



Trabalho de Conclusão de Curso

Otimização de mix energético via Enxame de Partículas e funções custo com restrições nas áreas econômica, ambiental e de disponibilidade.

Pedro Henrique Farias Cechinel

22 de fevereiro de 2024

Pedro Henrique Farias Cechinel

**Otimização de mix energético via Enxame de Partículas e
funções custo com restrições nas áreas econômica,
ambiental e de disponibilidade.**

Trabalho de Conclusão apresentado à comissão de Graduação do Departamento de Estatística da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Estatística.

Orientador: Prof. Dr. Cleiton Guollo
Taufemback

Porto Alegre
22 de fevereiro de 2024

Pedro Henrique Farias Cechinel

**Otimização de mix energético via Enxame de Partículas e
funções custo com restrições nas áreas econômica,
ambiental e de disponibilidade.**

Este Trabalho foi julgado adequado para obtenção dos créditos da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso em Estatística e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____
Prof. Dr. Cleiton Guollo Taufemback, UC3M
Doutor pela Universidad Carlos III de Madrid,
Espanha

Banca Examinadora:

Prof. Dra. Marcia Elisa Echeveste, UFRGS
Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, RS

Dra. Ruane Fernandes de Magalhães, UFRGS
Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, RS

Porto Alegre
22 de fevereiro de 2024

*“Here comes the sun
And I say
It’s all right”*

George Harrison

Agradecimentos

Aos meus pais, avós e tia, meus maiores exemplos na vida, motivos de orgulho e inspiração. À minha esposa, que admiro muito, ela que sempre acreditou em mim e me incentivou. E aos meus filhos, que me fazem sorrir todos os dias. Amo vocês.

À Professora Marcia Echeveste, que me encorajou a realizar este TCC e por ter aceitado ser minha banca. À Dra. Ruane de Magalhães por ter realizado estudos que foram inspiração para este trabalho e também ter aceitado ser minha banca.

Ao meu Orientador, Professor Cleiton Taufemback, que esteve sempre disposto a ajudar, contribuindo com muito conhecimento e humildade no meu TCC. Fosse jogador de futebol seria daqueles que fazem as jogadas difíceis parecerem fáceis.

Resumo

Para auxiliar um gestor na tomada de decisão em relação ao melhor mix energético para compra no Mercado Livre Energético, este trabalho desenvolveu uma metodologia fundamentada no Algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas. Nosso algoritmo avalia combinações ou soluções energéticas para alcançar um mix energético ótimo, levando em consideração três critérios no processo de otimização: custo, emissões de CO₂ e confiabilidade. Uma vez estabelecidas as metas para cada índice, o gestor tem a capacidade de definir se a função de custo penalizará desvios em relação a uma meta estabelecida previamente, além de estabelecer limites para a utilização de uma fonte energética específica. Foi desenvolvido um painel de controle (dashboard) com o intuito de proporcionar ao gestor uma assistência visual na análise das informações. Por fim, a metodologia foi aplicada de acordo com as necessidades do Campus do Vale da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Palavras-Chave: Algoritmo Enxame de Partículas, Otimização, Função Custo, Insituição Pública de Ensino, Mix Energético.

Abstract

To assist a manager in making a decision regarding the best energy mix for purchase on the Free Energy Market, this work developed a methodology based on the Particle Swarm Optimization Algorithm. Our algorithm evaluates energy combinations or solutions to achieve an optimal energy mix, taking into account three criteria in the optimization process: cost, CO₂ emissions and reliability. Once the goals for each index have been established, the manager has the ability to define whether the cost function will penalize deviations in relation to a previously established goal, in addition to establishing limits for the use of a specific energy source. A dashboard was developed with the aim of providing the manager with visual assistance in analyzing information. Finally, the methodology was applied according to the needs of the Vale Campus of the Federal University of Rio Grande do Sul.

Keywords: Particle Swarm Optimization Algorithm, Public Education Institution, Optimization, Cost Function, Energy Mix.

Sumário

1	Introdução	12
2	Revisão Bibliográfica	14
3	Metodologia	16
4	Sobre os dados	20
5	Simulações	23
6	Dashboard	35
7	Conclusão	40
	Referências	40

Lista de Figuras

Figura 4.1: Geração Média Horária (Energia Solar Geração Média Horária (Todos os Dias de setembro de 2022 - Brasil))	21
Figura 4.2: Energia Eólica: Geração Média Horária (Todos os Dias de setembro de 2022 - Brasil)	22
Figura 6.1: Tela Dashboard interativo para configuração de Mix Energético pelo Algoritmo do Enxame de Partículas	36
Figura 6.2: Configuração de parâmetros do Algoritmo	37
Figura 6.3: Configuração das Metas para os Critérios Ambiental, Econômico e Disponibilidade	37
Figura 6.4: Configuração da Participação de cada Fonte Energética	38
Figura 6.5: Botão para Executar Algoritmo	38
Figura 6.6: Tabela de Resultados do Mix Energético	39
Figura 6.7: Gráfico do Percentual do Melhor Mix Energético	39

Lista de Tabelas

Tabela 4.1: Matriz de Custos Ambientais e Econômicos e taxa de Disponibilidade das Fontes Energéticas. Fonte: de Magalhães et al. (2021) .	20
Tabela 5.1: Mix Energético (expresso na razão de cada fonte energética) utilizando Função Custo Quadrática com Fontes Renováveis e Não Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.	24
Tabela 5.2: Custo Energético utilizando Função Custo Quadrática com Fontes Renováveis e Não Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.	24
Tabela 5.3: Mix Energético (expresso na razão de cada fonte energética) utilizando Função Custo Linear com Fontes Renováveis e Não Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.	25
Tabela 5.4: Custo Energético utilizando Função Custo Linear com Fontes Renováveis e Não Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.	25
Tabela 5.5: Mix Energético (expresso na razão de cada fonte energética) utilizando Função Custo Linear com penalização do critério Ambiental com Fontes Renováveis e Não Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.	26
Tabela 5.6: Custo Energético utilizando Função Custo Linear com penalização do critério Ambiental com Fontes Renováveis e Não Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.	26
Tabela 5.7: Mix Energético (expresso na razão de cada fonte energética) utilizando Função Custo Linear com penalização do critério Econômico com Fontes Renováveis e Não Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.	27
Tabela 5.8: Custo Energético utilizando Função Custo Linear com penalização do critério Econômico com Fontes Renováveis e Não Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.	27
Tabela 5.9: Mix Energético (expresso na razão de cada fonte energética) utilizando Função Custo Linear com penalização do critério Disponibilidade e Fontes Renováveis e Não Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.	28

Tabela 5.10: Custo Energético utilizando Função Custo Linear com penalização do critério Disponibilidade e Fontes Renováveis e Não Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.	28
Tabela 5.11: Mix Energético (expresso na razão de cada fonte energética) utilizando Função Custo Quadrática e apenas Fontes Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.	29
Tabela 5.12: Custo Energético utilizando Função Custo Quadrática e apenas Fontes Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.	29
Tabela 5.13: Mix Energético (expresso na razão de cada fonte energética) utilizando Função Custo Linear e apenas Fontes Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.	30
Tabela 5.14: Custo Energético utilizando Função Custo Linear e apenas Fontes Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.	30
Tabela 5.15: Mix Energético (expresso na razão de cada fonte energética) utilizando Função Custo Linear com penalização do critério Ambiental e apenas Fontes Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.	31
Tabela 5.16: Custo Energético utilizando Função Custo Linear com penalização do critério Ambiental e apenas Fontes Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.	31
Tabela 5.17: Mix Energético (expresso na razão de cada fonte energética) utilizando Função Custo Linear com penalização do critério Econômico e apenas Fontes Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.	32
Tabela 5.18: Custo Energético utilizando Função Custo Linear com penalização do critério Econômico e apenas Fontes Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.	32
Tabela 5.19: Mix Energético (expresso na razão de cada fonte energética) utilizando Função Custo Linear com penalização do critério Disponibilidade e apenas Fontes Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.	33
Tabela 5.20: Custo Energético utilizando Função Custo Linear com penalização do critério Disponibilidade e apenas Fontes Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.	33
Tabela 5.21: Comparativo dos melhores resultados de Funções Custo. Obs: custo é adimensional.	34

1 Introdução

O Mercado Livre energético, conforme [Oliveira \(2017\)](#), é um mercado para grandes consumidores de energia elétrica, no qual esses têm a possibilidade de optar pelo seu fornecedor de eletricidade, negociando-a de forma direta com empresas do setor, sendo esse modelo uma alternativa ao Mercado Cativo tradicional, no qual a energia elétrica é comprada de uma distribuidora local. Algumas vantagens desse mercado apontadas pelo [SEBRAE \(2022\)](#) são:

- I. Redução de custos (a competitividade pode reduzir a conta de energia elétrica em 15% em média, liberdade de escolha do fornecedor de energia elétrica (o que também promove redução de preços e maior eficiência);
- II. Vantagem competitiva (diminuição de custos e de risco);
- III. Maior previsibilidade de custos (possibilidade de firmar contratos de longo prazo e previsão de gastos em projetos futuros);
- IV. Possibilidade de aquisição de energia elétrica de geradores de fontes renováveis (o que é incentivado em estratégias governamentais).

Existe, portanto, uma negociação mais flexível – consumidor e fornecedor negociam alternativas de preço, prazo, volume, forma de pagamento, fonte de geração, entre outros, de forma livre.

O mercado livre energético já é uma realidade em países da Europa. Para [Joskow \(2008\)](#) os benefícios desse modelo são o incentivo à inovação e a tecnologia no fornecimento de energia elétrica, a promoção de um adequado nível de disponibilização do serviço, além da melhora da qualidade e eficiência. Conforme [Raineri \(2006\)](#), na América do Sul, o Chile foi o pioneiro a adotar reformas em seu modelo energético, citando-se como alguns fatores que proporcionaram melhor eficiência a privatização, a regulamentação, as obrigações contratuais impostas às empresas de distribuição e à livre entrada no mercado.

No Brasil, o mercado livre de energia elétrica teve início com a Lei 9.074/95 [BRASIL \(1995\)](#), a qual estabeleceu o regramento da utilização de energia elétrica, abrindo essa nova opção de mercado para aqueles cujo consumo de energia elétrica superasse 3MW de potência e 69kV de tensão. Dessa forma, esse consumidor poderia escolher a sua contratação, dentre empresas do mercado, em relação à distribuição e à transmissão. Segundo [Silva \(2011\)](#), o setor energético institucionalizou dois ambientes de contratação de energia elétrica: o Ambiente de Contratação Regulada (ACR), no qual o montante de energia necessário a atender a concessão é adquirido pela distribuidora na forma de leilões do Ministério de Minas e Energia (MME), e o Ambiente de Contratação Livre (ACL), em que a compra e a venda de energia elétrica é livremente e autonomamente negociada no mercado.

Diante desta realidade, os gestores têm dificuldade em avaliar cenários que proporcionem menor custo e maior sustentabilidade por meio de fontes renováveis, respeitando a disponibilidade das fontes, de Magalhães (2022). Por essa razão ao comparar possíveis mix energéticos, não se pode considerar somente o aspecto econômico, mas selecionar maior percentual de energias renováveis. Ressalta-se ainda que, para atingir tal objetivo, a configuração depende de cada região, país. Isso porque a disponibilidade das fontes pode ser sazonal e dependente dos recursos disponíveis para manter o sistema confiável.

Neste trabalho, serão avaliados diversos cenários com combinações levando-se em consideração três aspectos: o econômico, a emissão equivalente de CO₂ e a disponibilidade do sistema energético. Para atender a essas metas, diferentes cenários de mix energéticos são delineados e para cada mix, estas medidas são calculadas, oferecendo uma base de decisão aos gestores. Desta maneira, pretende-se estabelecer uma função custo a qual, dentro de um algoritmo de otimização, terá como objetivo minimizar o custo e a emissão de CO₂, ao passo que buscará a maior disponibilidade possível. Um exemplo de algoritmo de otimização é o Enxame de Partículas, descrito por Procópio (2018) como um algoritmo no qual uma população de indivíduos é representada por partículas em um espaço de busca, as quais realizam movimentos com a finalidade de convergência para uma posição de uma partícula ótima. Por conseguinte, a fim de se encontrar uma ou mais soluções ótimas para o melhor mix, emprega-se uma função custo que penalizará possíveis desvios da meta imposta pelo gestor, ver Seção 3.

Baseado na pesquisa de de Magalhães et al. (2023), este trabalho utiliza os dados relativos ao Campus do Vale da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Segundo noticiado por UFRGS (2023), nessa unidade, com área de 650 ha, são ministrados cursos de graduação e pós-graduação, das áreas de exatas e humanas, além de cursos de extensão e atividades de pesquisa como laboratórios. Consequentemente, há uma grande demanda de energia elétrica para manter o pleno funcionamento de suas atividades, requerendo altos níveis de disponibilidade de seu mix energético. O câmpus conta, conforme UFRGS (2019), com mais uma subestação, inaugurada em 2019, e atualmente a Universidade passa por uma transformação energética, a qual envolve a seleção de uma matriz energética para suas unidades de ensino.

Em resumo, o objetivo do trabalho é avaliar cenários de mix energéticos, utilizando de uma função custo ponderando o desvio de possíveis níveis ótimos de custo financeiro, emissão de CO₂ e disponibilidade, demonstrando-os aos gestores públicos, através de um Dashboard interativo, os trade-offs, i.e., perdas e ganhos, com a seleção de diferentes mix energéticos.

2 Revisão Bibliográfica

Segundo [EPE \(2023\)](#), em seu Relatório Síntese do Boletim Energético Nacional (BEN), a matriz elétrica brasileira, em 2022, teve 61,9 % de participação de energia hidráulica, 11,8% de eólica, 8,0% de biomassa, 6,1% de gás natural, 4,4% de solar, 2,1% de carvão e derivados, 2,1% de nuclear, 1,9% de eletricidade importada e 1,8% de derivados de petróleo. No que tange o sistema energético como um todo (renováveis: biomassa da cama, energia hidráulica, lenha e carvão vegetal, eólica, solar e outras renováveis; não renováveis: petróleo e derivados, gás natural, carvão mineral, urânio e outras não renováveis), 44,7% utiliza energia renovável; 55,3% é não renovável. Em comparação com o ano de 2021, houve aumento de 5,2% em energia renovável; ao passo que a energia não renovável teve diminuição de 4,3%. Destaca-se, entre as renováveis, o aumento de 51,5% a energia solar (fotovoltaica e térmica); já as não renováveis, a maior queda foi do gás natural, com -21,2%. Os mesmos dados, apesar da alta participação do petróleo e derivados, também apontam avanços do Brasil na redução de emissão de CO₂ na geração elétrica. O fator de CO₂, como descrito por [Scheer \(2002\)](#), corresponde à quantidade de CO₂ produzida na geração de um quilowatt-hora. Calculado em 61,7 Kg CO₂-eq/MWh no Brasil em 2022, o valor é de aproximadamente seis e onze vezes menor que os patamares de Estados Unidos e China, respectivamente [EPE \(2023\)](#). Nesse contexto, existem políticas públicas com vistas ao uso mais eficiente da energia elétrica, como é o caso de uma das propostas do Plano Nacional de Eficiência Energética [MME \(2011\)](#), na qual é estabelecida a criação de mecanismos de premiação e incentivos fiscais para as empresas por ações de eficiência energética; penalizando aquelas com baixo rendimento ou que se utilizem de fontes não renováveis.

Segundo Relatório Final do Plano Nacional de Energia 2030 [EPE \(2007\)](#), um dos grandes desafios com a expansão da oferta de energia é pesar os ganhos do desenvolvimento econômico com os custos ambientais. Ademais, como aponta [Ribas \(2022\)](#), apesar de fontes de energia solar e eólica não possuírem custos de operação, quando comparadas às fontes de energia não renováveis (como carvão e gás), a sua intermitência pode aumentar o risco na comercialização de energia, sendo necessário precificar o risco da sua disponibilidade. Assim, considerando a matriz elétrica e sua disponibilidade apresenta-se ao gestor público e privado o desafio de escolher a melhor configuração dado os requisitos de economia, sustentabilidade e disponibilidade.

Neste trabalho, serão avaliados diversos cenários levando-se em consideração três aspectos: o econômico, a emissão de CO₂ e a disponibilidade do sistema energético.

I. Econômico: devido a sua natureza, para [Lee \(2004\)](#) a eletricidade é um bem

fundamental na manutenção de atividades diárias da população, sendo uma commodity. Segundo [Mayo \(2012\)](#), trata-se de um bem de baixo preço com alto valor para o consumidor. Nesse sentido, com o advento do mercado livre de energia, conforme [Brasil e ABRACEEL \(2022\)](#), o consumidor teria cerca de 18% de redução em sua conta de energia elétrica.

II. Emissão de CO₂: dado o atual contexto econômico-social de redução de utilização de fontes energéticas não renováveis e do crescimento das energias mais limpas, como apontou o Relatório Síntese do Boletim Energético Nacional (BEN), as empresas (Pessoas Jurídicas), estão indo ao encontro de boas práticas de ESG (Governança Ambiental, Social e Corporativa), com a predileção pela oferta de energia renovável e de baixo carbono, [Irigaray e Stocker \(2022\)](#). Segundo [Losekann e Tavares \(2019\)](#), existe atualmente uma transição energética liderada por países desenvolvidos, a qual produz políticas energéticas com foco, especialmente, em fontes renováveis na geração de energia elétrica. Fato esse que é percebido em Estados da região Sul do Brasil, como notícia [GaúchaZH \(2023\)](#), a exemplo do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda (SC), a Termelétrica de Candiota (RS) solicita a sua inclusão na Política de Transição Justa do Governo Federal, após ter sua venda anunciada pela Eletrobras, a qual tem como meta estratégica emissão zero de carbono até o ano de 2030.

III. Disponibilidade: possui relação com a manutenção e a logística de fornecimento de matéria-prima e a acessibilidade das fontes renováveis (como o sol e o vento), isto é, com a inconstância na geração de energia. A redução da disponibilidade do mix energético contratado é o terceiro aspecto a ser considerado. Além de preço e emissão de poluentes, é fundamental contar com um sistema que minimize interrupções, as quais influenciam negativamente no processo produtivo, na qualidade de produtos e serviços. Minimizar o risco de interrupção do fornecimento de energia é um objetivo a ser constantemente buscado, o que é corroborado por [Rodríguez \(2017\)](#), um grande desafio de empresas de distribuição de energia é fornecer energia elétrica ao consumidor continuamente.

3 Metodologia

A fim de se atingir o objetivo do trabalho, o qual é avaliar cenários de mix energéticos, implementa-se um algoritmo de otimização visando à ponderação do desvio dos possíveis níveis ótimos de custo financeiro, emissão de CO₂-eq e disponibilidade. Nesse sentido, o procedimento metodológico consiste na avaliação de cenários de diversos mix energéticos, com a perspectiva econômica, ambiental e da disponibilidade, utilizando-se do método de otimização do Enxame de Partículas, por meio do qual é possível encontrar não apenas a melhor, mas melhores soluções possíveis de mix energético (quando essas existirem), sendo aplicada a função de custo que delimitará, considerando as restrições das perspectivas supracitadas e as diretrizes do gestor público, as decisões acerca do mix energético.

Função Custo

A função de custo ou de perda, [Wald \(1949\)](#), é aquela que mapeia um evento ou valores de uma ou mais variáveis em um número real. Em um problema de otimização, busca-se a sua minimização. Essa função, representa um custo relacionado a um evento e geralmente é representada pela letra L (de “Loss” em inglês). Existem algumas funções de custo para algoritmos de otimização, como por exemplo a quadrática, a linear, a assimétrica e a limitada.

Quadrática: utilizada na minimização do erro quadrático médio na regressão linear, a função custo é descrita matematicamente como:

$$L = a(x - m)^2$$

onde a é uma constante maior que zero e m é a meta a ser atingida.

Linear: utilizada na minimização do erro absoluto médio, a função de custo é descrita matematicamente como:

$$L = a|x - m|$$

onde a é uma constante maior que zero e m é a meta a ser atingida.

Assimétrica: utilizada na minimização em uma função custo que trabalha com uma variação da função do erro absoluto médio, descrita matematicamente como:

$$L = a|x - m| \cdot \mathbb{I}(|x - m| < 0) + b|x - m| \cdot \mathbb{I}(|x - m| \geq 0) \quad (3.1)$$

onde a e b são constantes diferentes e maiores que zero e m é a meta a ser atingida.

Limitada: utilizada no problema de minimização da função quadrática limitada a duas constantes, descrita matematicamente como:

$$L = \begin{cases} a(x - m)^2, & \text{se } c_1 < (x - m)^2 < c_2, \text{ com } c_1, c_2 > 0, \\ \infty, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

onde a , c_1 e c_2 são constantes maiores que zero e m é a meta a ser atingida.

Nesse contexto, objetiva-se minimizar no mix energético:

$$\min[L_{\text{econômico}} + L_{\text{ambiental}} + L_{\text{confiabilidade}}]$$

onde o custo total é uma medida sem unidade (adimensional), logo é possível somar os desvios das metas das diferentes restrições.

Seja o custo econômico, ambiental e valor de disponibilidade definidos por CE , CA e CD , respectivamente, e a meta econômica, ambiental e de disponibilidade definida por CE_m , CA_m e CD_m , a função objetivo a ser minimizada é dada por:

$$\begin{aligned} \min f(\cdot) &= \min \left[L \left(\frac{CE - CE_m}{CE_m} \right) + L \left(\frac{CA - CA_m}{CA_m} \right) + L \left(\frac{CD - CD_m}{CD_m} \right) \right] \\ \text{sujeito a} & \quad \sum_{i=1}^n p_i = 1. \end{aligned} \tag{3.2}$$

onde $f(\cdot)$ é uma função dependente do conjunto de metas, fontes e função custo escolhida, p_i é a proporção da fonte energética i , $i = 1, \dots, n$. O valor de n está sujeito a quantidade de fontes energéticas disponíveis na localidade.

Otimização por Enxame de Partículas

Segundo [Waintraub \(2009\)](#), o método computacional denominado Enxame de Partículas foi proposto no ano de 1995 por James Kennedy e Russel Eberhart. “*A new Optimizer Using Particle Swarm Theory*” denota um algoritmo estocástico o qual utiliza o comportamento psicossocial dos exames e revoadas, cujo método tem como princípio a colaboração dos agentes para atingir a evolução, considerando-se que cada partícula toma sua decisão pela própria experiência e pelo enxame. Para [Kennedy e Eberhart \(1995\)](#), os algoritmos relativos à técnica do Enxame são classificados em cinco princípios básicos, quais sejam:

1) **Proximidade:** partículas devem ter a capacidade de superar computações de espaço e tempo simples (possibilidade de execução do algoritmo em um plano n-dimensional);

2) **Qualidade:** população deve responder aos fatores qualitativos inerentes ao ambiente (o enxame atende aos fatores de qualidade pelo “melhor global” e o “melhor local”);

3) **Resposta Diversa:** população não deve concentrar atividades por “caminhos muito estreitos” no universo de busca (quantidade de respostas possíveis entre os aspectos “melhor global” e “melhor local” garantem ampla gama de caminhos);

4) **Estabilidade:** toda vez que o ambiente se alterar, não deve haver mudança de comportamento do enxame (população apenas altera comportamento quando da mudança dos valores de “melhor global” e “melhor local”);

5) **Adaptabilidade:** os indivíduos devem alterar comportamento caso seja válido o esforço computacional (considerando-se os valores de “melhor global” e de “melhor local”, trabalha de modo que a influência do ambiente seja mínima).

Conforme [Procópio \(2018\)](#), todos esses princípios são atendidos, e de forma rápida, na execução do algoritmo do Enxame de Partículas, sendo elementos básicos dessa otimização:

- **Partícula:** elemento do enxame existente em um vetor m-dimensional, no qual M é o número de parâmetros a serem otimizados;
- **População:** conjunto de n partículas no enxame, onde se recomenda $20 \leq n \leq 30$;
- **Enxame:** população inicialmente desorganizada de partículas que se movem com determinada velocidade, e com a tendência de se agrupar, enquanto se movimentam aleatoriamente;
- **Velocidade da partícula:** velocidade com que as partículas se movimentam no universo m-dimensional;
- **Inércia:** forma de controle utilizada no cálculo do impacto que as velocidades anteriores tiveram na atual velocidade, influenciando na troca de habilidades de busca das partículas pelo melhor local individual e pelo melhor local global;
- **Melhor individual:** conforme uma partícula se movimenta no universo de procura, ela compara o valor da atual posição com o melhor valor conquistado por ela desde sua criação até o atual momento;
- **Melhor global:** melhor posição dentre todas as “melhores individuais” conquistadas até o atual momento;
- **Critério de parada:** condição para encerrar a procura de posições com um limite máximo de iterações.

Nesse sentido, [Kennedy e Eberhart \(1995\)](#) fazem uma analogia entre o algoritmo e o comportamento de aves (partículas), as quais, de forma geral, voam em grupo (enxame) em busca de fontes de alimento, possuindo ainda como característica a interação social, a qual viabiliza voos sem riscos de colisões, mesmo em mudanças repentinas na direção, além de espalhamento e reagrupamento rápidos em face das ameaças externas, evitando predadores. O movimento compartilhado pelo bando é refletido nas interações entre as aves, sendo a posição e a velocidade realizadas através do princípio da proximidade. Durante um determinado número de interações, a partícula/ave “sobrevoa” o espaço de busca na procura de uma solução ótima.

Segundo [Rizzi et al. \(2016\)](#), cada partícula é composta por três vetores:

- a posição de busca denotada em $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$;
- a melhor posição encontrada até o momento é dada por $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$;
- e a velocidade para uma trajetória é dada por $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$.

Onde cada partícula tem sua posição e velocidade inicializadas; o valor de *fitness* de cada uma delas é avaliado por uma função objetivo para definir os dois “melhores” valores, que são denominados $pBest$ e $gBest$. O movimento da partícula em direção à melhor posição é influenciado pelo $gBest$, ao passo que $pBest$ move a partícula para a melhor posição encontrada por ela mesma; cada partícula se trai para o local onde se encontra o $pBest$. A velocidade da partícula i da dimensão d é atualizada pela equação:

$$v_{id} = w \cdot v_{id} + c_1 \cdot r_1(p_{id} - x_{id}) + c_2 \cdot r_2(p_{gd} - x_{id})$$

onde w é um fator de inércia, a qual representa a velocidade inercial da partícula,

enquanto que $x_{id} = x_{id} + v_{id}$ é a posição da partícula em iterações anteriores; p_{id} a posição na qual se encontrou, nas iterações anteriores, o melhor valor de textitfitness da partícula i ; sendo p_{gd} a posição na qual foi encontrado o melhor valor fitness dentre todas as partículas do enxame até aquele instante. Além disso, c_1 e c_2 são coeficientes que contribuem respectivamente para a autoexploração da partícula e com o movimento da partícula em direção ao deslocamento global do enxame no espaço de busca; r_1 e r_2 são valores aleatórios ditribuídos uniformemente no intervalo $[0, 1]$, os quais são gerados a cada iteração através de uma função de densidade de probabilidade. Adaptado de [Procópio \(2018\)](#), abaixo o Algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas Original denotado por:

```

01: para cada partícula i em S faça
02:   inicializa aleatoriamente velocidade e posição
03: fim para
04: enquanto critério de parada não satisfeito faça
05:   para cada partícula i em S faça
06:     calcula o valor fitness
07:     se fit (x_id) < fit (pBesti) então
08:       pBesti <- x_id
09:     fim se
10:   se fit (pBesti) < fit (x_id) então
11:     gBest <- pBesti
12:   fim se
13:   fim para
14:   para cada partícula i em S faça
15:     calcula velocidade com  $v_{id}=w*v_{id}+c_1*r_1 (p_{id}-x_{id})+c_2*r_2 (p_{gd}-x_{id})$ 
16:     atualiza posição com  $x_{id}= x_{id}+ v_{id}$ 
17:     fim para
18: fim enquanto

```

Frisa-se que, dada a natureza da otimização do Enxame de Partículas, o algoritmo é capaz de detectar, caso houver, mais de um ponto com custo mínimo, i.e., mais de uma solução para o problema.

4 Sobre os dados

Para este trabalho, foram utilizados na execução do algoritmo do Enxame de Partículas aplicado ao mix energético presente ao Campus do Vale da UFRGS, dados de custos ambientais, econômicos e a taxa de disponibilidade de cada uma das fontes energéticas (hidroelétrica, eólica, solar, gás natural, biomassa e carvão), os quais foram retirados do estudo de [de Magalhães et al. \(2021\)](#), que se baseou em um Método de Avaliação do Ciclo de Vida para cada um dos custos supracitados. Na construção dos dados ambientais, aplicou-se a modelagem de avaliação do ciclo de vida, sendo atribuído, portanto, para cada fonte energética, um número de 0 a 1, onde quanto mais próximo de zero, menor o custo ambiental; nos econômicos, foi realizado um levantamento histórico de contratos do mercado livre de energia elétrica, sendo atribuído, portanto, para cada fonte energética, um número de 0 a 1, onde quanto mais próximo de zero, menor o custo econômico; e os relativos a disponibilidade, por meio do cruzamento de dados de potência instalada de cada usina energética com a respectiva produção dessas fontes de energia elétrica em um ano, também entre 0 e 1, porém quando maior melhor a disponibilidade. A Tabela 4.1 mostra, portanto, para cada critério (onde Amb corresponde ao Ambiental; Eco ao Econômico; e Disp à Disponibilidade) o custo ou taxa relacionada a cada uma das fontes energéticas disponíveis para este trabalho, quais sejam: Hidrelétrica, Eólica, Solar e Biomassa (Renováveis); Gás Natural e Carvão (Não Renováveis).

Tabela 4.1: Matriz de Custos Ambientais e Econômicos e taxa de Disponibilidade das Fontes Energéticas. Fonte: [de Magalhães et al. \(2021\)](#)

Critério	Hidro	Eólica	Solar	Bio	Gás N	Carvão
Amb	0,0733	0,0144	0,0778	0,0452	0,4499	1,223
Eco	0,0430	0,0341	0,0457	0,0398	0,0501	0,0541
Disp	0,4764	0,3628	0,1737	0,4936	0,5377	0,2446

A título de exemplo, para construção dos dados de disponibilidade para cada uma das fontes energéticas, foram utilizados dados como os da Figura 4.1, que ilustra a geração de energia, retirada de [ONS \(2023b\)](#), durante o dia inteiro no período de 30 dias do mês de setembro de 2022. No caso da energia solar, verifica-se que há geração entre as 5:00 horas e aproximadamente 20:00 horas e que os valores de pico médio atingem patamares de 4.000 MW, entre as 10:00 horas e as 13:00 horas. A Figura 4.2 mostra o gráfico semelhante ao anterior para a energia eólica, [ONS \(2023a\)](#). Diferentemente da energia solar, há geração de energia em todos momentos do dia, alcançando os valores de pico médios entre as 20:00 horas e as 0:00 horas, com valores

em torno de 14.000 MW, patamares superiores aos da energia solar, não obstante, a geração de energia eólica mostrada na Figura 4.2 considera dados do Brasil como todo, alerta-se, portanto, para o fato de que ter geração contínua de eólica no Brasil não significa que não possa faltar em algum lugar específico, já que a malha não é totalmente conectada, podendo assim haver pontos com falta de energia eólica em alguns territórios brasileiros, enquanto há sobras em outros. Em ambos os casos (energia solar e eólica), o período de geração de energia possui relação direta com a disponibilidade da fonte energética. No caso da disponibilidade, novamente tem-se um valor de 0 a 1 sendo atribuído a cada fonte energética, entretanto, o desejável dessa vez é que esse valor esteja o mais próximo possível de um, propiciando a maior manutenção da energia elétrica possível para o Campus do Vale da UFRGS, exemplo em questão. Obs: os dados da Matriz de Custos e os gráficos estão em escala diferentes (sazonal e diária).

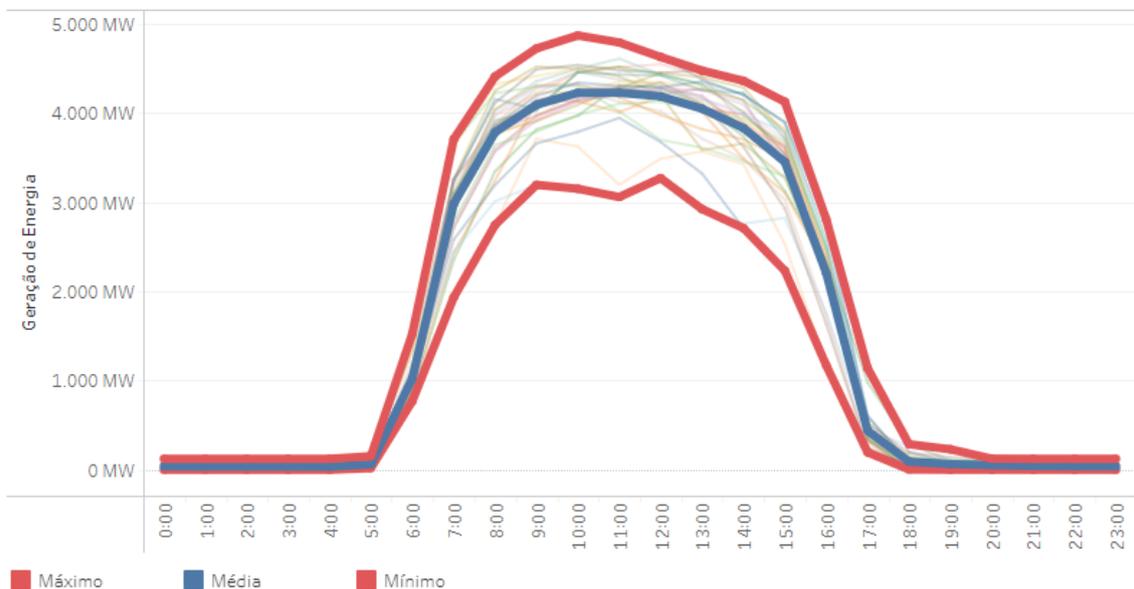


Figura 4.1: Geração Média Horária (Energia Solar Geração Média Horária (Todos os Dias de setembro de 2022 - Brasil))

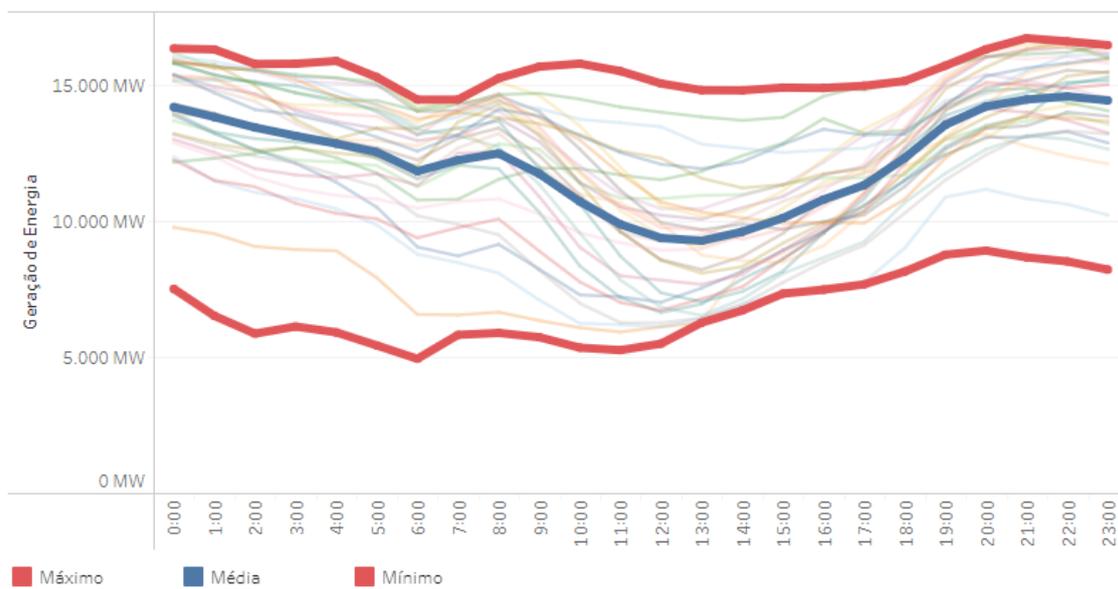


Figura 4.2: Energia Eólica: Geração Média Horária (Todos os Dias de setembro de 2022 - Brasil)

5 Simulações

Foram implementados códigos e realizadas simulações no software R Studio, versão 4.3.2 (2023-10-31), com os seguintes parâmetros: número de partículas = 100; número máximo de iterações = 15.000; $w = 0$; $c_1 = 0,9$; $c_2 = 1,9$, conforme descrito na Seção 3, e percentual mínimo de 20% para a fonte energética Hidrelétrica. Os parâmetros inerentes ao Enxame de Partículas w , c_1 e c_2 foram definidos por meio de testes empíricos, cujos resultados foram os melhores em termos de convergência do algoritmo; e em relação ao percentual mínimo da fonte Hidrelétrica, esse valor foi definido, de forma *Ad hoc*, levando-se em consideração a composição da Matriz Elétrica do Brasil, em que a fonte hidrelétrica possui a maior participação dentre as fontes. Cada tabela apresentada abaixo mostra as 10 primeiras partículas geradas entre as 100 partículas de cada simulação. Ademais, em todas as simulações foram adotados consumo unitário de energia elétrica (kWh), uma vez que o funcionamento do algoritmo independe desse valor para gerar o mix energético.

Dado o processo de minimização de custo, descrito pela Equação (3.2), $f(x) = f(\text{Metas}; \text{Fontes}; \text{Função custo})$, foi utilizado para a simulação o seguinte conjunto de metas M : $\{CA_m = 0,08; CE_m = 0,038; CD_m = 0,50\}$.

Analisamos as fontes em dois grupos, $\{\text{RNR}; \text{R}\} = \{\text{Renováveis e não Renováveis}; \text{Apenas Renováveis}\}$. Também foi avaliado as funções de custo $\{\text{Q}; \text{L}; \text{LA}; \text{LE}, \text{LD}\} = \{\text{Quadrática}; \text{Linear Absoluta}; \text{Linear com penalização Ambiental}; \text{Linear com penalização Econômica}; \text{Linear com penalização de Disponibilidade}\}$.

Para os casos de simulação que fazem uso da função assimétrica, ver equação (3.1), com as penalizações supracitadas, tem-se o seguinte equacionamento:

$$LA = \begin{cases} 0,5 \cdot \left| \frac{CE - CE_m}{CE_m} \right| + 0,5 \cdot \left| \frac{CD - CD_m}{CD_m} \right| + 25 \cdot \left| \frac{CA - CA_m}{CA_m} \right|, & \text{se } (CA - CA_m) > 0 \\ 0,5 \cdot \left| \frac{CE - CE_m}{CE_m} \right| + 0,5 \cdot \left| \frac{CD - CD_m}{CD_m} \right| + \left| \frac{CA - CA_m}{CA_m} \right|, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$LE = \begin{cases} 0,5 \cdot \left| \frac{CA - CA_m}{CA_m} \right| + 0,5 \cdot \left| \frac{CD - CD_m}{CD_m} \right| + 25 \cdot \left| \frac{CE - CE_m}{CE_m} \right|, & \text{se } (CE - CE_m) > 0 \\ 0,5 \cdot \left| \frac{CA - CA_m}{CA_m} \right| + 0,5 \cdot \left| \frac{CD - CD_m}{CD_m} \right| + \left| \frac{CE - CE_m}{CE_m} \right|, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$LD = \begin{cases} 0,5 \cdot \left| \frac{CA - CA_m}{CA_m} \right| + 0,5 \cdot \left| \frac{CE - CE_m}{CE_m} \right| + 25 \cdot \left| \frac{CD - CD_m}{CD_m} \right|, & \text{se } (CD - CD_m) < 0 \\ 0,5 \cdot \left| \frac{CA - CA_m}{CA_m} \right| + 0,5 \cdot \left| \frac{CE - CE_m}{CE_m} \right| + \left| \frac{CD - CD_m}{CD_m} \right|, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Cabe salientar ainda que as simulações fizeram uso do número 1221 como semente aleatória do R. Os resultados apresentados nas tabelas abaixo são dependentes dos parâmetros do algoritmo do Enxame de Partículas, como o número de partículas,

número máximo de iterações e as constantes inseridas na equação do cálculo da velocidade e da atualização da posição das partículas. Através desse método, é possível encontrar múltiplas respostas, sendo ainda um diferencial em relação a métodos que apresentam solução única.

Tabela 5.1: Mix Energético (expresso na razão de cada fonte energética) utilizando Função Custo Quadrática com Fontes Renováveis e Não Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.

Partícula	Hidro	Eólica	Solar	Bio	Gás N	Carvão	Custo Total
1	0,2000	0,0000	0,0000	0,7755	0,0000	0,0245	0,0063
2	0,2000	0,0000	0,0000	0,7756	0,0000	0,0244	0,0063
3	0,2000	0,0000	0,0000	0,7752	0,0000	0,0248	0,0063
4	0,2000	0,0000	0,0000	0,7752	0,0000	0,0248	0,0063
5	0,2000	0,0000	0,0000	0,7760	0,0000	0,0240	0,0064
6	0,2000	0,0000	0,0000	0,7748	0,0000	0,0252	0,0064
7	0,2000	0,0000	0,0000	0,7748	0,0000	0,0252	0,0064
8	0,2000	0,0903	0,0000	0,6314	0,0783	0,0000	0,0064
9	0,2000	0,0884	0,0000	0,6333	0,0783	0,0000	0,0064
10	0,2000	0,0880	0,0000	0,6364	0,0746	0,0011	0,0064

Tabela 5.2: Custo Energético utilizando Função Custo Quadrática com Fontes Renováveis e Não Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.

Partícula	Ambiental	Econômico	Disponibilidade
1	0,0797	0,0408	0,4841
2	0,0796	0,0408	0,4841
3	0,0801	0,0408	0,4840
4	0,0801	0,0408	0,4840
5	0,0792	0,0408	0,4842
6	0,0805	0,0408	0,4839
7	0,0805	0,0408	0,4839
8	0,0797	0,0407	0,4818
9	0,0798	0,0407	0,4821
10	0,0796	0,0407	0,4817

O mix energético apresentado na Tabela 5.1, obtido com $f(M; RNR; Q)$, atingiu nos seus dez primeiros resultados (partículas do algoritmo) valores muito próximos de solução, os quais se diferenciaram apenas a partir da quarta casa decimal. Houve, nesses resultados, praticamente duas opções de mix: uma com participação percentual de 20% para Hidrelétrica, 78% Biomassa e 2% Carvão; outra com 20% para Hidrelétrica, 9% Eólica e 63% Biomassa e 8% de Gás Natural. Ademais, pode-se observar na Tabela 5.2 que os custos e a taxa de disponibilidade observados nas dez primeiras soluções ficaram muito próximos das metas estipuladas, com custos ambientais diferenciando-se apenas na terceira casa decimal; custo econômico e taxa de disponibilidade apenas a partir da quarta casa decimal. Obtém-se dessa simulação,

portanto, pelo menos duas opções de mix que geram custos energéticos similares. Diferencial esse que já era esperado, uma vez que o método de partículas poderia achar essas múltiplas respostas.

Tabela 5.3: Mix Energético (expresso na razão de cada fonte energética) utilizando Função Custo Linear com Fontes Renováveis e Não Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.

Partícula	Hidro	Eólica	Solar	Bio	Gás N	Carvão	Custo Total
1	0,2000	0,0000	0,0000	0,7279	0,0721	0,0000	0,0963
2	0,2000	0,0000	0,0000	0,7279	0,0721	0,0000	0,0964
3	0,2000	0,0000	0,0000	0,7280	0,0720	0,0000	0,0965
4	0,2000	0,0000	0,0000	0,7279	0,0721	0,0000	0,0965
5	0,2000	0,0000	0,0000	0,7280	0,0720	0,0000	0,0967
6	0,2000	0,0000	0,0000	0,7280	0,0720	0,0000	0,0968
7	0,2000	0,0000	0,0000	0,7278	0,0722	0,0000	0,0969
8	0,2000	0,0000	0,0000	0,7281	0,0719	0,0000	0,097
9	0,2000	0,0000	0,0000	0,7278	0,0722	0,0000	0,097
10	0,2000	0,0000	0,0000	0,7281	0,0719	0,0000	0,097

Tabela 5.4: Custo Energético utilizando Função Custo Linear com Fontes Renováveis e Não Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.

Partícula	Ambiental	Econômico	Disponibilidade
1	0,0800	0,0412	0,4934
2	0,0800	0,0412	0,4934
3	0,0800	0,0412	0,4934
4	0,0800	0,0412	0,4934
5	0,0800	0,0412	0,4934
6	0,0800	0,0412	0,4934
7	0,0801	0,0412	0,4934
8	0,0799	0,0412	0,4934
9	0,0801	0,0412	0,4934
10	0,0799	0,0412	0,4934

Apresenta-se na Tabela 5.3 o mix energético gerado com $f(M; RNR; L)$, em que sua função custo alcançou em seus primeiros resultados valores muito próximos de solução, diferenciando-se apenas a partir da terceira casa decimal. Percebe-se ainda, que as participações percentuais do mix foram homogêneas, fornecendo praticamente uma configuração de mix, com 20% de participação de Hidrelétrica, 73% de Biomassa e 7% de Gás Natural. Os custos energéticos e a taxa de disponibilidade também tiveram valores muito semelhantes e pouco distantes das metas, como pode ser observado na Tabela 5.4.

Verifica-se que a função custo do mix energético referente a $f(M; RNR; LA)$, mostrado na Tabela 5.5, atingiu nas suas dez primeiras partículas valores muito próximos de solução entre si, apresentando resultados da função custo que se dife-

Tabela 5.5: Mix Energético (expresso na razão de cada fonte energética) utilizando Função Custo Linear com penalização do critério Ambiental com Fontes Renováveis e Não Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.

Partícula	Hidro	Eólica	Solar	Bio	Gás N	Carvão	Custo Total
1	0,2000	0,0000	0,0000	0,7280	0,072	0,0000	0,0483
2	0,2000	0,0000	0,0000	0,7280	0,072	0,0000	0,0483
3	0,2000	0,0000	0,0000	0,7280	0,072	0,0000	0,0484
4	0,2000	0,0000	0,0000	0,7279	0,0721	0,0000	0,0484
5	0,2000	~ 0	0,0000	0,7248	0,0722	0,0000	0,0486
6	0,2000	0,0000	0,0000	0,7281	0,0719	0,0000	0,0488
7	0,2040	0,0000	0,0000	0,7243	0,0717	0,0000	0,0488
8	0,2000	~ 0	0,0000	0,7221	0,0724	0,0000	0,0489
9	0,2000	0,0000	0,0000	0,7279	0,0721	0,0000	0,0490
10	0,2000	0,0000	0,0000	0,7281	0,0719	0,0000	0,0490

Tabela 5.6: Custo Energético utilizando Função Custo Linear com penalização do critério Ambiental com Fontes Renováveis e Não Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.

Partícula	Ambiental	Econômico	Disponibilidade
1	0,0800	0,0412	0,4934
2	0,0800	0,0412	0,4934
3	0,0800	0,0412	0,4934
4	0,0800	0,0412	0,4934
5	0,0800	0,0411	0,4930
6	0,0799	0,0412	0,4934
7	0,0800	0,0412	0,4933
8	0,0800	0,0411	0,4927
9	0,0800	0,0412	0,4934
10	0,0799	0,0412	0,4934

reñciaram apenas a partir da terceira casa decimal. O resultado praticamente convergiu para uma solução de mix, com 20% para Hidrelétrica, 73% Biomassa e 7% de Gás Natural. Quanto aos custos e à taxa de disponibilidade energética, observou-se novamente que esses valores ficaram muito próximos das suas respectivas metas, em especial os custos ambientais, como demonstrado na Tabela 5.6. Ademais, com a utilização da função objetivo Assimétrica, há uma limitação em um dos lados de seu domínio (positivo ou negativo), que no caso da penalização ambiental, para os desvios que excederam à meta ambiental, aplicou-se a penalização de os multiplicar pelo número vinte e cinco.

Tabela 5.7: Mix Energético (expresso na razão de cada fonte energética) utilizando Função Custo Linear com penalização do critério Econômico com Fontes Renováveis e Não Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.

Partícula	Hidro	Eólica	Solar	Bio	Gás N	Carvão	Custo Total
1	0,2000	0,6254	0,0000	0,0674	0,1006	~ 0	0,0889
2	0,2000	0,6480	0,0000	0,0309	0,1211	0,0000	0,0903
3	0,2000	0,6512	0,0000	0,0269	0,1219	0,0000	0,0910
4	0,2000	0,6523	0,0000	0,0254	0,1223	0,0000	0,0918
5	0,2000	0,6513	0,0000	0,0276	0,1211	0,0000	0,0919
6	0,2000	0,6507	0,0000	0,0283	0,1210	0,0000	0,0919
7	0,2000	0,6413	~ 0	0,0415	0,1089	~ 0	0,0926
8	0,2000	0,6414	~ 0	0,0414	0,1089	~ 0	0,0927
9	0,2000	0,6403	~ 0	0,0446	0,1069	~ 0	0,0928
10	0,2000	0,6396	~ 0	0,0463	0,1036	~ 0	0,0931

Tabela 5.8: Custo Energético utilizando Função Custo Linear com penalização do critério Econômico com Fontes Renováveis e Não Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.

Partícula	Ambiental	Econômico	Disponibilidade
1	0,0800	0,038	0,4112
2	0,0799	0,038	0,4107
3	0,0801	0,038	0,4104
4	0,0802	0,038	0,4102
5	0,0798	0,038	0,4103
6	0,0797	0,038	0,4104
7	0,0801	0,038	0,4087
8	0,0802	0,038	0,4087
9	0,0802	0,038	0,4088
10	0,0800	0,038	0,4081

No mix energético obtido com $f(M; RNR; LE)$, a função custo atingiu nos seus primeiros resultados valores próximos de solução, todavia apresentando diferenças a partir da terceira casa. As participações percentuais do mix variaram de forma considerável de uma solução para outra, quando comparado à simulação anterior.

Cita-se como exemplo a partícula 1, com 7% de participação de Biomassa; e a partícula 3 com 3% de participação para essa mesma fonte, ambas gerando opções de soluções possíveis em termos de função custo e muito semelhantes, com diferença na terceira casa decimal. Esses resultados são expostos na Tabela 5.7. Em relação aos custos e à taxa de disponibilidade, houve mais variação, no entanto, esses valores não se distanciaram das suas respectivas metas, destacando-se a meta econômica, a que apresentou melhor resultado, como pode ser observado na Tabela 5.8. Fazendo-se uso da função objetivo Assimétrica, há uma limitação em um dos lados de seu domínio (positivo ou negativo), que no caso da penalização econômica, para os desvios que excederam à meta econômica, aplicou-se a penalização de os multiplicar pelo número vinte e cinco.

Tabela 5.9: Mix Energético (expresso na razão de cada fonte energética) utilizando Função Custo Linear com penalização do critério Disponibilidade e Fontes Renováveis e Não Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.

Partícula	Hidro	Eólica	Solar	Bio	Gás N	Carvão	Custo Total
1	0,2000	0,0000	0,0000	0,7279	0,0721	0,0000	0,3728
2	0,2000	0,0000	0,0000	0,7279	0,0721	0,0000	0,3728
3	0,2000	0,0000	0,0000	0,7278	0,0722	0,0000	0,3729
4	0,2000	0,0000	0,0000	0,7278	0,0722	0,0000	0,3729
5	0,2000	0,0000	0,0000	0,7278	0,0722	0,0000	0,3729
6	0,2000	0,0000	0,0000	0,7278	0,0722	0,0000	0,3729
7	0,2000	0,0000	0,0000	0,7277	0,0723	0,0000	0,3729
8	0,2000	0,0000	0,0000	0,7277	0,0723	0,0000	0,3729
9	0,2000	0,0000	0,0000	0,7277	0,0723	0,0000	0,3729
10	0,2000	0,0000	0,0000	0,7277	0,0723	0,0000	0,3729

Tabela 5.10: Custo Energético utilizando Função Custo Linear com penalização do critério Disponibilidade e Fontes Renováveis e Não Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.

Partícula	Ambiental	Econômico	Disponibilidade
1	0,0800	0,0412	0,4934
2	0,0800	0,0412	0,4934
3	0,0800	0,0412	0,4934
4	0,0801	0,0412	0,4934
5	0,0801	0,0412	0,4934
6	0,0801	0,0412	0,4934
7	0,0801	0,0412	0,4934
8	0,0801	0,0412	0,4934
9	0,0801	0,0412	0,4934
10	0,0801	0,0412	0,4934

Verifica-se na Tabela 5.9, que a função custo do mix energético, gerado com $f(M; RNR; LD)$, atingiu nas primeiras dez partículas do algoritmo, valores de possíveis

soluções praticamente idênticas. Há maior quantidade de valores zerados no conjunto de soluções de mix, esses aparecendo nas fontes Eólica, Solar e Carvão. Existe praticamente uma convergência para 20% de Hidrelétrica, 73% de Biomassa e 7% de Gás Natural. Novamente, com a função objetivo Assimétrica, existe uma limitação em um dos lados de seu domínio (positivo ou negativo), que no caso da penalização pelo critério de disponibilidade, para os desvios que ficaram aquém dessa meta, aplicou-se a penalização de os multiplicar por vinte e cinco. Verifica-se ainda, na Tabela 5.10 que as metas Ambiental e de Disponibilidade apresentaram os melhores resultados em termos da função custo.

Tabela 5.11: Mix Energético (expresso na razão de cada fonte energética) utilizando Função Custo Quadrática e apenas Fontes Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.

Partícula	Hidro	Eólica	Solar	Bio	Gás N	Carvão	Custo Total
1	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0266
2	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0266
3	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0266
4	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0266
5	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0266
6	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0266
7	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0266
8	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0266
9	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0266
10	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0266

Tabela 5.12: Custo Energético utilizando Função Custo Quadrática e apenas Fontes Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.

Partícula	Ambiental	Econômico	Disponibilidade
1	0,0732	0,043	0,4764
2	0,0732	0,043	0,4764
3	0,0732	0,043	0,4764
4	0,0732	0,043	0,4764
5	0,0732	0,043	0,4764
6	0,0732	0,043	0,4764
7	0,0732	0,043	0,4764
8	0,0732	0,043	0,4764
9	0,0732	0,043	0,4764
10	0,0732	0,043	0,4764

O mix energético gerado com $f(M; R; Q)$, apresentado pela Tabela 5.11, fez com que sua função custo atingisse nos seus dez primeiros resultados valores idênticos, aplicando 100% da participação de cada solução na fonte Hidrelétrica. É importante ressaltar ainda que as fontes solar, eólica e biomassa, apesar de serem renováveis, ficaram zeradas. Quanto aos custos e à taxa de disponibilidade, a Tabela 5.12 mostra

valores ligeiramente mais distantes em relação às suas respectivas metas, o que não impediu, entretanto, de sua função custo alcançar um bom resultado.

Tabela 5.13: Mix Energético (expresso na razão de cada fonte energética) utilizando Função Custo Linear e apenas Fontes Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.

Partícula	Hidro	Eólica	Solar	Bio	Gás N	Carvão	Custo Total
1	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,2628
2	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,2628
3	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,2628
4	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,2628
5	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,2628
6	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,2628
7	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,2628
8	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,2628
9	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,2628
10	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,2628

Tabela 5.14: Custo Energético utilizando Função Custo Linear e apenas Fontes Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.

Partícula	Ambiental	Econômico	Disponibilidade
1	0,0732	0,043	0,4764
2	0,0732	0,043	0,4764
3	0,0732	0,043	0,4764
4	0,0732	0,043	0,4764
5	0,0732	0,043	0,4764
6	0,0732	0,043	0,4764
7	0,0732	0,043	0,4764
8	0,0732	0,043	0,4764
9	0,0732	0,043	0,4764
10	0,0732	0,043	0,4764

Na Tabela 5.13 é possível observar que o mix energético gerado com $f(M; R; L)$ atingiu nos seus primeiros resultados valores praticamente iguais de função custo, sendo esses inferiores, em termos de performance, aos da função quadrática. Novamente, em todas as soluções apresentadas, foram aplicadas de forma integral a Hidrelétrica. Cabe ressaltar ainda que a fonte solar, a eólica, a fonte biomassa ficaram zeradas, apesar de serem fontes renováveis. As metas não foram atingidas com tanta precisão, como demonstrado na Tabela 5.14 refletindo-se esse resultado na função custo.

O mix energético gerado com $f(M; R; LA)$, cuja função custo é mostrada na Tabela 5.15, alcançou nos seus primeiros resultados valores praticamente idênticos, concentrando seu mix na fonte Hidrelétrica, permanecendo as fontes Solar, Eólica e Biomassa zeradas, apesar de serem fontes renováveis. Com a utilização da função

Tabela 5.15: Mix Energético (expresso na razão de cada fonte energética) utilizando Função Custo Linear com penalização do critério Ambiental e apenas Fontes Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.

Partícula	Hidro	Eólica	Solar	Bio	Gás N	Carvão	Custo Total
1	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1736
2	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1736
3	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1736
4	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1736
5	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1736
6	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1736
7	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1736
8	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1736
9	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1736
10	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1736

Tabela 5.16: Custo Energético utilizando Função Custo Linear com penalização do critério Ambiental e apenas Fontes Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.

Partícula	Ambiental	Econômico	Disponibilidade
1	0,0732	0,043	0,4764
2	0,0732	0,043	0,4764
3	0,0732	0,043	0,4764
4	0,0732	0,043	0,4764
5	0,0732	0,043	0,4764
6	0,0732	0,043	0,4764
7	0,0732	0,043	0,4764
8	0,0732	0,043	0,4764
9	0,0732	0,043	0,4764
10	0,0732	0,043	0,4764

objetivo Assimétrica, há uma limitação no lado positivo de seu domínio, assim, para os desvios que excederam à meta ambiental, aplicou-se a penalização de multiplicação por vinte e cinco. Conforme mostrado na Tabela 5.16, a meta Ambiental ficou mais próxima de ser atingida que as demais.

Tabela 5.17: Mix Energético (expresso na razão de cada fonte energética) utilizando Função Custo Linear com penalização do critério Econômico e apenas Fontes Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.

Partícula	Hidro	Eólica	Solar	Bio	Gás N	Carvão	Custo Total
1	0,2000	0,4253	0,0000	0,3747	0,0000	0,0000	0,3296
2	0,2000	0,4253	0,0000	0,3747	0,0000	0,0000	0,3296
3	0,2000	0,4253	0,0000	0,3747	0,0000	0,0000	0,3296
4	0,2000	0,4253	0,0000	0,3747	0,0000	0,0000	0,3296
5	0,2000	0,4252	0,0000	0,3748	0,0000	0,0000	0,3296
6	0,2000	0,4253	0,0000	0,3747	0,0000	0,0000	0,3296
7	0,2000	0,4253	0,0000	0,3747	0,0000	0,0000	0,3296
8	0,2000	0,4253	0,0000	0,3747	0,0000	0,0000	0,3296
9	0,2000	0,4254	0,0000	0,3746	0,0000	0,0000	0,3296
10	0,2000	0,4252	0,0000	0,3748	0,0000	0,0000	0,3296

Tabela 5.18: Custo Energético utilizando Função Custo Linear com penalização do critério Econômico e apenas Fontes Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.

Partícula	Ambiental	Econômico	Disponibilidade
1	0,0377	0,038	0,4346
2	0,0377	0,038	0,4346
3	0,0377	0,038	0,4346
4	0,0377	0,038	0,4346
5	0,0377	0,038	0,4346
6	0,0377	0,038	0,4346
7	0,0377	0,038	0,4346
8	0,0377	0,038	0,4346
9	0,0377	0,038	0,4345
10	0,0377	0,038	0,4346

A simulação de mix energético gerado com $f(M; R; LE)$, exposto na Tabela 5.17, cuja função custo atingiu valores praticamente iguais em suas primeiras dez partículas, gerando participações percentuais de cada solução com maior diversificação em relação às fontes, aplicando-se, dessa vez, 20% de Hidrelétrica, 43% de Eólica e 37% de Biomassa. Somente a energia Solar, dentre as apenas renováveis, ficou zerada em termos de participação. Utilizando-se a função objetivo Assimétrica, há uma limitação no lado positivo de seu domínio, assim, para os desvios que excederam à meta econômica, aplicou-se a penalização de os multiplicar pelo número vinte e cinco. Destaca-se a meta econômica como a que melhor foi atingida, como mostra a Tabela 5.18.

Tabela 5.19: Mix Energético (expresso na razão de cada fonte energética) utilizando Função Custo Linear com penalização do critério Disponibilidade e apenas Fontes Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.

Partícula	Hidro	Eólica	Solar	Bio	Gás N	Carvão	Custo Total
1	0,2000	0,0000	0,0000	0,8000	0,0000	0,0000	0,7039
2	0,2000	0,0000	0,0000	0,8000	0,0000	0,0000	0,7039
3	0,2000	0,0000	0,0000	0,8000	0,0000	0,0000	0,7039
4	0,2000	0,0000	0,0000	0,8000	0,0000	0,0000	0,7039
5	0,2000	0,0000	0,0000	0,8000	0,0000	0,0000	0,7039
6	0,2000	0,0000	0,0000	0,8000	0,0000	0,0000	0,7039
7	0,2000	0,0000	0,0000	0,8000	0,0000	0,0000	0,7039
8	0,2000	0,0000	0,0000	0,8000	0,0000	0,0000	0,7039
9	0,2000	0,0000	0,0000	0,8000	0,0000	0,0000	0,7039
10	0,2000	0,0000	0,0000	0,8000	0,0000	0,0000	0,7039

Tabela 5.20: Custo Energético utilizando Função Custo Linear com penalização do critério Disponibilidade e apenas Fontes Renováveis, em ordem crescente de Custo Total. Obs: custo é adimensional.

Partícula	Ambiental	Econômico	Disponibilidade
1	0,0508	0,0404	0,4902
2	0,0508	0,0404	0,4902
3	0,0508	0,0404	0,4902
4	0,0508	0,0404	0,4902
5	0,0508	0,0404	0,4902
6	0,0508	0,0404	0,4902
7	0,0508	0,0404	0,4902
8	0,0508	0,0404	0,4902
9	0,0508	0,0404	0,4902
10	0,0508	0,0404	0,4902

Por fim, apresenta-se na Tabela 5.19, o mix energético gerado com $f(M; R; LD)$, no qual a função custo atingiu valores de função custo idênticos nos seus dez primeiros resultados. Observam-se novamente valores zerados nas fontes Solar, Eólica e Biomassa, não obstante serem fontes renováveis. Com o uso da função objetivo Assimétrica, há uma limitação no lado negativo de seu domínio, dessa forma, para os desvios que ficaram abaixo da meta de disponibilidade, aplicou-se a penalização da multiplicação por vinte e cinco. Na Tabela 5.20, observa-se que a meta de disponibilidade é a que ficou mais próxima de ser atingida.

Tabela 5.21: Comparativo dos melhores resultados de Funções Custo. Obs: custo é adimensional.

Fonte	Função	Hidro	Eólica	Solar	Bio	Gás N	Carvão	Custo
RNR	Q	0,2000	0,0000	0,0000	0,7755	0,0000	0,0245	0,0063
RNR	L	0,2000	0,0000	0,0000	0,7279	0,0721	0,0000	0,0963
RNR	LA	0,2000	0,0000	0,0000	0,728	0,072	0,0000	0,0483
RNR	LE	0,2000	0,5234	0,0000	0,2379	0,0004	0,0383	0,0881
RNR	LD	0,2000	0,0000	0,0000	0,7279	0,0721	0,0000	0,3728
R	Q	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0266
R	L	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,2628
R	LA	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1736
R	LE	0,2000	0,4253	0,0000	0,3747	0,0000	0,0000	0,3296
R	LD	0,2000	0,0000	0,0000	0,8000	0,0000	0,0000	0,7039

Na Tabela 5.21 são apresentados dados comparativos do melhor resultado da função custo de cada uma das simulações realizadas. Assim, observou-se que os melhores resultados na tarefa de minimizar os custos ambientais e econômicos e maximizar a disponibilidade da energia elétrica foram obtidos com a função quadrática, chegando a patamares de 0,0063 de erro nas simulações realizadas com as fontes renováveis e não renováveis e de 0,02 quando o algoritmo é executado com apenas fontes renováveis. A opção de função linear com penalização ambiental, segunda melhor, alcançou resultados na casa dos 0,04883 de desvio em relação às metas conjuntas dos critérios sem restrição de fontes; ao passo que se utilizando apenas de fontes renováveis, esse valor sobe para a casa de 0,17. Ressalta-se ainda que as configurações com penalização obtiveram resultados de custos e de disponibilidade energética mais próximos de suas respectivas metas, quando comparados com as demais simulações.

6 Dashboard

Desenvolveu-se um Dashboard interativo para configuração de Mix Energético pelo Algoritmo do Enxame de Partículas. O aplicativo foi construído em Shiny, pacote da linguagem R lançado no ano de 2012 pela equipe do RStudio, o qual permite o desenvolvimento de aplicativos interativos web utilizando elementos como HTML e CSS, [RStudio, PBC \(2023\)](#). O Algoritmo teve seu número máximo de iterações fixado em 15.000; e quando não acontece a convergência, uma mensagem de erro de convergência é mostrada no Dashboard ao usuário. A Figura 6.1 mostra a tela do Dashboard interativo para este trabalho, a qual contém os seguintes campos: Título, Painel de Configurações Lateral (Configurações do ALgoritmo - Particle Swarm Optimization (PSO), Metas para cada Critério, Participação de cada Fonte Energética (Mínimo e Máximo) e Executar Algoritmo) e Corpo do Dashboard (Tabela de Mix de Fontes Energéticas e Gráfico de Barras do Melhor Mix Energético). Cada um dos campos é explicado de forma detalhada a seguir.

A Figura 6.2 mostra dois campos configuráveis do Algoritmo do Enxame de Partículas no Painel de Configurações Lateral: o slider com o número de partículas, que vai de 1 a 100, correspondendo à escolha do usuário do número total de partículas que geram um total de combinações de soluções do algoritmo para o portfólio; e um select input, no qual o usuário define qual será a função custo a ser utilizada no algoritmo para minimização do erro em relação à meta, considerando os três critérios: ambiental, econômico e disponibilidade. A Função Custo possui as seguintes opções: Quadrática, Linear Absoluto, Linear Absoluto com penalização ambiental, Linear Absoluto com penalização econômica e Linear Absoluto com penalização de disponibilidade. Na Figura 6.3, pode-se observar 3 sliders os quais têm como objetivo possibilitar ao usuário configurar as metas para cada critério, onde: Meta Ambiental corresponde à meta de custo ambiental do mix; Meta Econômica à meta de custo financeiro do mix; e Meta de Disponibilidade à oferta do recurso da fonte energética no momento do fornecimento de energia elétrica do mix. A Figura 6.4 mostra 6 sliders, um para cada fonte energética do mix. Cada um deles configura percentuais mínimos e máximos de participação da fonte energética no Mix Energético. Por fim, o último campo do Painel de Configurações Lateral é o Botão que executa o Algoritmo, ilustrado na Figura 6.5.

No corpo do Dashboard são mostrados os resultados do Algoritmo do Enxame de Partículas. A Figura 6.6 mostra a tabela com as opções de mix energético geradas a partir das configurações selecionadas pelo usuário no Painel de Configurações Lateral. Cada linha da tabela é uma possível solução para a minimização do erro em relação às metas, contendo os percentuais de participação de cada fonte energética

e o resultado da função custo. As soluções estão ordenadas de forma crescente, pois quanto menor é o resultado da função custo, melhor é o resultado do mix em relação às metas dos critérios: ambiental, econômico e de disponibilidade. O último item do corpo do Dashboard é o gráfico de barras mostrado na Figura 6.7 com os percentuais de cada fonte do melhor mix energético gerado pelo Algoritmo, o qual corresponde à primeira linha da tabela da Figura 6.6.

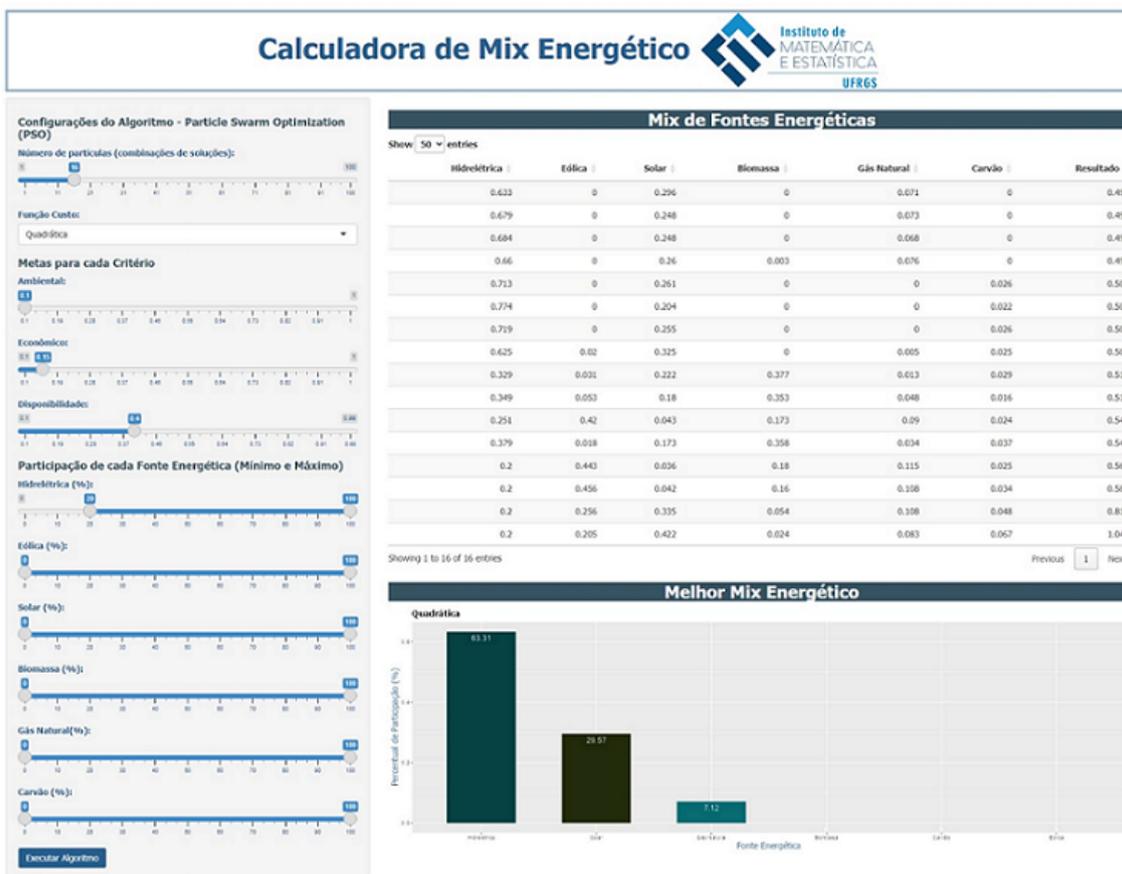


Figura 6.1: Tela Dashboard interativo para configuração de Mix Energético pelo Algoritmo do Enxame de Partículas



Figura 6.2: Configuração de parâmetros do Algoritmo

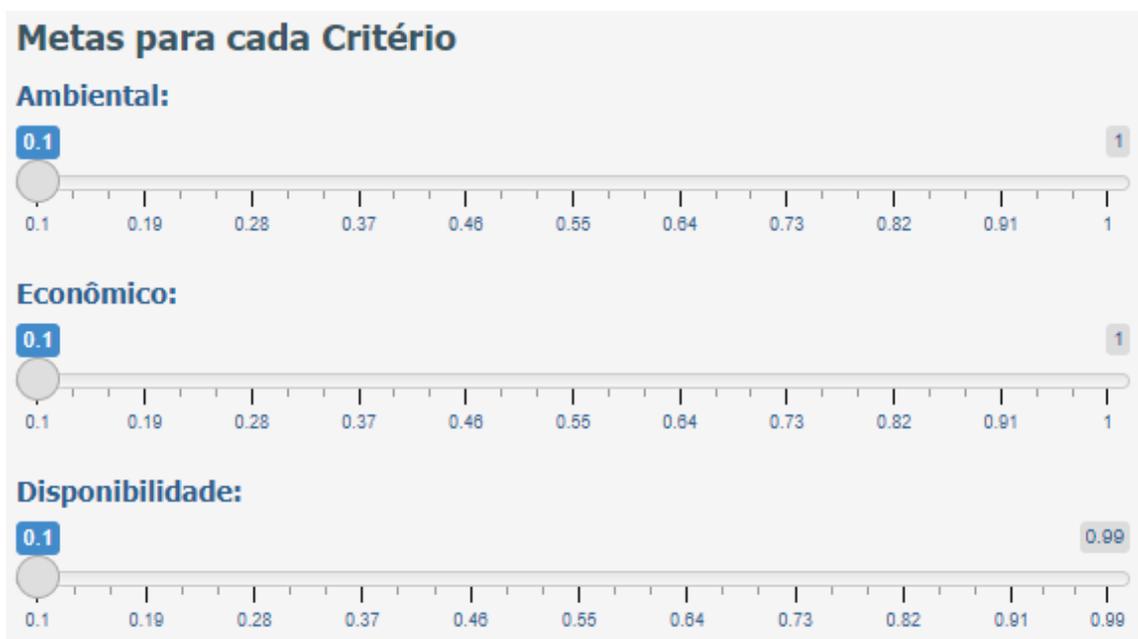


Figura 6.3: Configuração das Metas para os Critérios Ambiental, Econômico e Disponibilidade

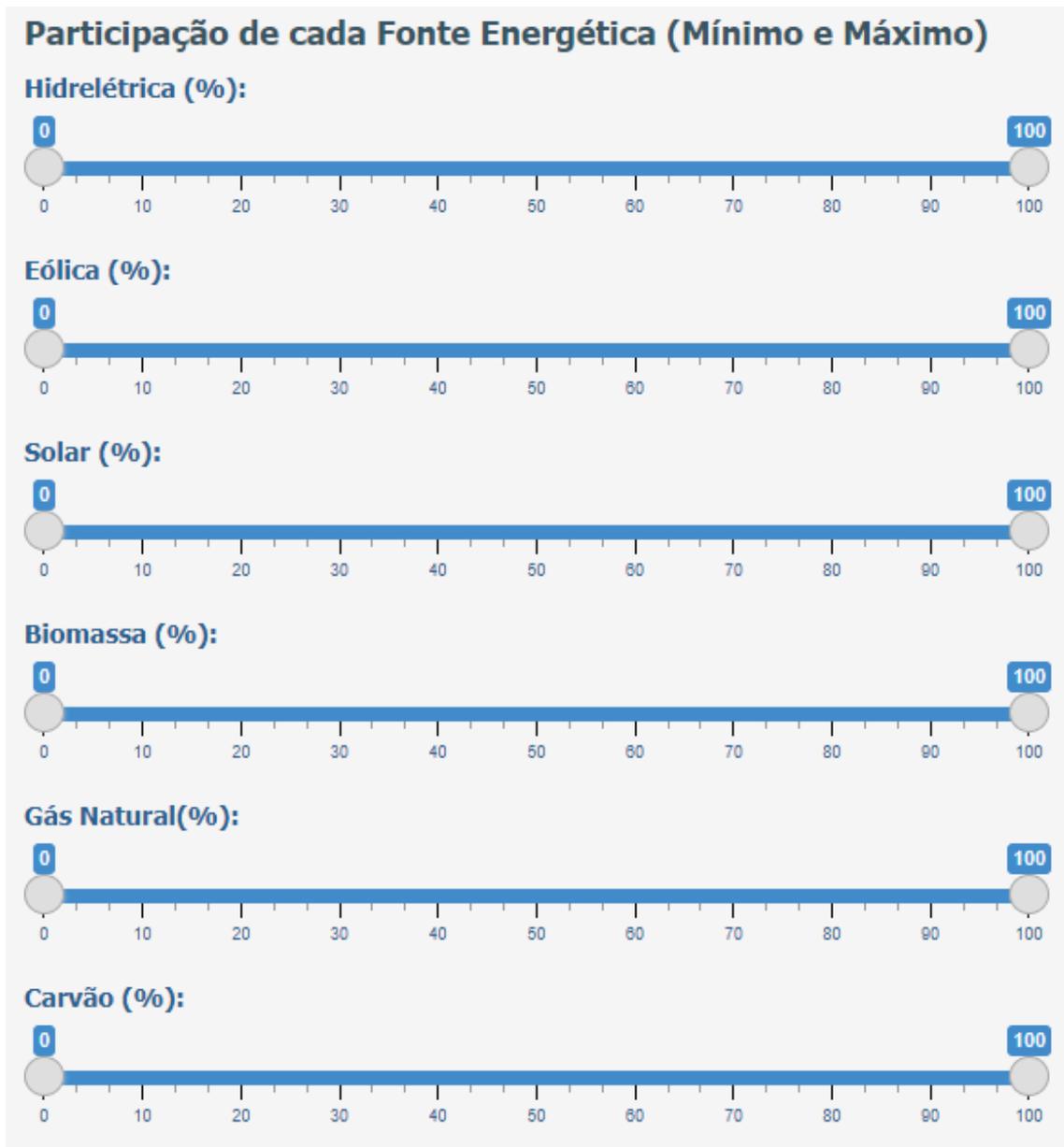


Figura 6.4: Configuração da Participação de cada Fonte Energética



Figura 6.5: Botão para Executar Algoritmo

Mix de Fontes Energéticas							
Show	5 entries						
	Hidrelétrica	Eólica	Solar	Biomassa	Gás Natural	Carvão	Resultado
	0.326	0	0.268	0.376	0	0.03	0.511
	0.422	0.002	0.208	0.338	0	0.03	0.512
	0.483	0.019	0.187	0.268	0.017	0.025	0.512
	0.34	0.139	0.158	0.264	0.099	0	0.523
	0.225	0.263	0.106	0.274	0.131	0	0.533

Showing 1 to 5 of 20 entries

Previous 2 3 4 Next

Figura 6.6: Tabela de Resultados do Mix Energético

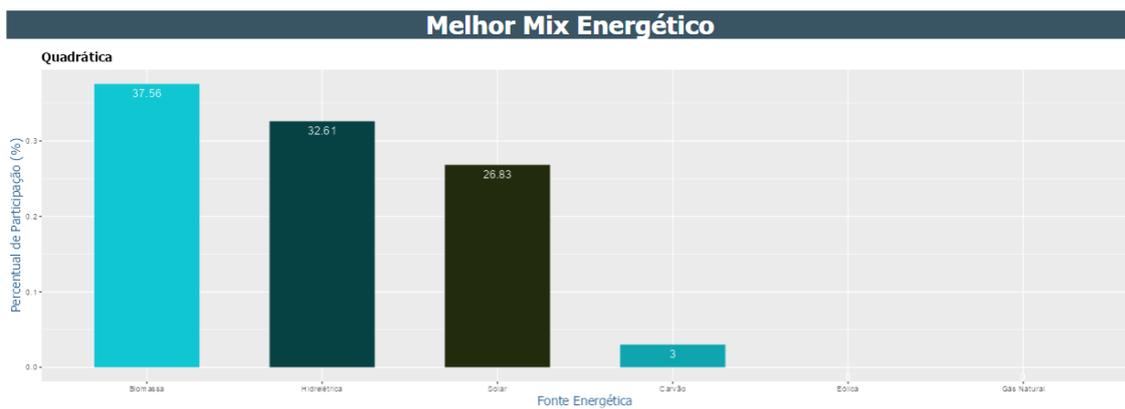


Figura 6.7: Gráfico do Percentual do Melhor Mix Energético

7 Conclusão

O algoritmo do Enxame de Partículas para geração de um Mix Energético para a tomada de decisão do gestor mostrou eficiência no objetivo de minimizar a diferença em relação as metas ambientais, econômicas e de disponibilidade. É uma metodologia capaz de gerar diversas soluções de mix energéticos as quais buscam uma melhor otimização dos resultados da função custo. Isso é ainda potencializado pela disponibilização dessa ferramenta na forma de um Dashboard que executa o algoritmo com as simulações que o gestor desejar testar.

Além disso, a técnica do Algoritmo supracitado oportuniza o fornecimento de um extenso leque de possibilidades de configurações/combinções de mix energético para compra no Mercado Livre de Energia, o que pode ser apontado como uma vantagem quando comparado a técnicas de otimização de funções que geram apenas um resultado.

As simulações realizadas demonstraram que o Algoritmo, a depender de seus parâmetros setados, é capaz de fornecer mais de uma solução de mix com o mesmo valor da função de custo, quando essas existem, sendo, portanto, possível escolher dentre diferentes portfólios, aquele mais adequado à realidade e às condições da Instituição. Existe ainda a possibilidade de privilegiar uma determinada meta, como demonstrado nas simulações realizadas: aplicando-se a penalização pelos critérios Ambiental, Econômico e de Disponibilidade, o Algoritmo afasta aqueles portfólios (mix energéticos) gerados com diferença em relação à meta de penalização escolhida, fazendo com que os valores dessa meta em questão sejam atingidos com maior probabilidade.

Em relação ao Dashboard, esse tem como output uma tabela ordenada de forma crescente na função custo (iniciando pelo melhor resultado) com as partículas/soluções do Algoritmo - número que o usuário escolher- e o gráfico de barras que apresenta de forma visual a melhor dentre todas as soluções apresentadas. Esse recurso fornece uma eficiente interface entre o usuário e o Algoritmo.

Referências Bibliográficas

- BRASIL (1995). Lei nº 9.074, de 7 de julho de 1995. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*.
- Brasil, E. e ABRACEEL (2022). Avaliação dos cenários possíveis para abertura organizada do setor elétrico brasileiro. https://www.ey.com/pt_br/energy-resources/cenarios-possiveis-para-abertura-do-setor-eletrico-brasileiro. Acesso em 19/07/2023.
- de Magalhães, R. F. (2022). O gerenciamento de trade-offs para integração de sustentabilidade e de resiliência na transição para economias urbanas de baixo carbono. *Journal of Cleaner Production*.
- de Magalhães, R. F., Danilevicz, Â. d. M. F., Passuello, A., e Echeveste, M. E. (2023). Exploring life cycle trade-offs of the electricity solutions on brazilian urban environments: Ways towards a low-carbon economy. *Sustainable Production and Consumption*.
- de Magalhães, R. F., Echeveste, M. E., e Taufemback, C. G. (2021). The assessment of the sustainability, environmental and economic impact in selecting mix-energy resources. Tech. report, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS.
- EPE (2007). Relatório final do plano nacional de energia 2030. Technical report, Empresa de Pesquisa Energética. <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/Relat%C3%B3rio%20final%20PNE%202030.pdf>. Acesso em 10/07/2023.
- EPE (2023). Empresa de Pesquisa Energética. relatório síntese 2022. <https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/balanco-energetico-nacional-ressalta-crescimento-da-renovabilidade-da-matriz-brasileira>. Acesso em 21/07/2023.
- GaúchaZH (2023). Candiota busca alternativas após anúncio da venda de usina termelétrica. <https://gauchazh.clicrbs.com.br/economia/noticia/2023/07/candiota-busca-alternativas-apos-anuncio-da-venda-de-usina-termeletrica-clkcx464l008y015lz87stqoq.html>. Acessado em 10/01/2024.
- Irigaray, H. A. R. e Stocker, F. (2022). ESG: novo conceito para velhos problemas. *Cadernos EBAPE.BR*, 20(4):1–4.
- Joskow, P. L. (2008). Lessons learned from electricity market liberalization. *The Energy Journal*, 29(2):9–42.

- Kennedy, J. e Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. In *Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks*, volume 4, pages 1942–1948. IEEE.
- Lee, W.-W. (2004). Us lessons for energy industry restructuring: based on natural gas and california electricity incidences. *Energy Policy*, 32(2):237–259.
- Losekann, L. e Tavares, F. B. (2019). Política energética no brics: desafios da transição energética. Technical report, Texto para Discussão.
- Mayo, R. (2012). *Mercado de Eletricidade*. Synergia Editora, Rio de Janeiro.
- MME (2011). Plano nacional de eficiência energética - relatório de 2011. Technical report, Ministério de Minas e Energia. <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/plano-nacional-de-eficiencia-energetica/documentos/plano-nacional-eficiencia-energetica-pdf.pdf/view>. Acesso em 10/07/2023.
- Oliveira, Y. M. d. (2017). *O Mercado Livre de Energia no Brasil: apromiramentos para sua expansão*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Economia), Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.
- ONS (2023a). Operador Nacional do Sistema Elétrico. Resultados da Operação - Boletim Geração Eólica. <https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/boletim-geracao-eolica.aspx>. Acesso em 20/12/2023.
- ONS (2023b). Operador Nacional do Sistema Elétrico. Resultados da Operação - Boletim Geração Solar. <https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/boletim-geracao-solar.aspx>. Acesso em 20/12/2023.
- Procópio, F. (2018). *Otimização por enxames de partículas: usando uma adaptação de serendipidade*. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal.
- Raineri, R. (2006). Chile: Where it all started. In Pfaffenberger, W. e Sioshansi, F. P., editors, *Electricity market reform*, pages 77–108. Elsevier Science & Technology.
- Ribas, F. W. d. M. (2022). *Análise do Impacto do Aumento de Geração de Energia Elétrica por Fontes Solar e Eólica no Setor Elétrico Brasileiro*. Dissertação (Mestrado em Administração), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Rizzi, M., Furtado, J. C., Costa, A. B. d., Gerbase, A. E., e Ferrão, M. F. (2016). Método do enxame de partículas para otimização de modelos de regressão multivariada empregados na determinação de biodiesel em blendas biodiesel/óleo vegetal/diesel. *Revista Virtual de Química. Niterói, RJ. Vol. 8, n. 6 (2016), p. 1877-1892*.
- Rodríguez, A. M. (2017). *Planejamento de Tarefas de Manutenções Centradas em Confiabilidade para Redes de Distribuição de Energia Elétrica*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

- RStudio, PBC (2023). *Shiny: Web Application Framework for R*. RStudio, PBC, Boston, MA. <https://www.rstudio.com/products/shiny/>. Acessado em 13/12/2023.
- Scheer, H. (2002). *Economia Solar Global*. CRESESB – CEPEL, Rio de Janeiro.
- SEBRAE (2022). Como funciona o mercado livre de energia. <https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/como-funciona-o-mercado-livre-de-energia,b4e21fed76ee4810VgnVCM100000d701210aRCRD>. Acesso em 29/07/2023.
- Silva, B. G. d. (2011). *Evolução do Setor Elétrico Brasileiro no Contexto Econômico Nacional: Uma Análise Histórica e Econométrica de Longo Prazo*. Dissertação (Mestrado em Energia), Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- UFGRS (2019). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Inaugurada subestação de energia no campus do vale. <http://www.ufgrs.br/ufgrs/noticias/inaugurada-subestacao-de-energia-no-campus-do-vale>. Acesso em 11/07/2023.
- UFRGS (2023). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Estrutura administrativa. <http://penta.ufgrs.br/gm/ufgrsorg.html>. Acesso em 16/07/2023.
- Waintraub, M. (2009). *Algoritmos paralelos de otimização por Enxame de Partículas em problemas nucleares*. Tese (Doutorado em Energia Nuclear), Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Wald, A. (1949). Statistical decision functions. *The Annals of Mathematical Statistics*, pages 165–205.