

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE CIÊNCIAS E MATEMÁTICA

VALDEIR FRANCISCO OLIVEIRA FILHO

Explorando a Termodinâmica: desenvolvimento e programação de recursos
didáticos virtuais

Ituiutaba - MG
2024

VALDEIR FRANCISCO OLIVEIRA FILHO

**Explorando a Termodinâmica: desenvolvimento e programação de recursos
didáticos virtuais**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Ensino de Ciências e Matemática da Universidade
Federal de Uberlândia, como requisito parcial para a
obtenção do título de Mestre em Ensino de Ciências e
Matemática

Linha de pesquisa: Ensino e Aprendizagem em Ensino de
Ciências e Matemática

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Debora Coimbra

Ituiutaba - MG
2024

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

O48 2024	<p>Oliveira Filho, Valdeir Francisco, 1987- Explorando a Termodinâmica [recurso eletrônico] : Desenvolvimento e programação de recursos didáticos virtuais / Valdeir Francisco Oliveira Filho. - 2024.</p> <p>Orientador: Debora Coimbra. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Ensino de Ciências e Matemática. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.di.2024.357 Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Ciência - Estudo ensino. I. Coimbra, Debora ,1972-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós- graduação em Ensino de Ciências e Matemática. III. Título.</p> <p>CDU: 50:37</p>
-------------	---

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ensino de
Ciências e Matemática

Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1A, Sala 207 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-
MG, CEP 38400-902

Telefone: (34) 3230-9419 - www.ppgecm.ufu.br - secretaria@ppgecm.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Ensino de Ciências e Matemática (PPGECM)				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Profissional / Produto Educacional				
Data:	28/02/2024	Hora de início:	16:00	Hora de encerramento:	18:09
Matrícula do Discente:	12112ECM022				
Nome do Discente:	Valdeir Francisco Oliveira Filho				
Título do Trabalho:	Explorando a Termodinâmica: desenvolvimento e programação de recursos didáticos virtuais				
Área de concentração:	Ensino de Ciências e Matemática				
Linha de pesquisa:	Ensino e Aprendizagem em Ciências e Matemática				
Projeto de Pesquisa de vinculação:					

Reuniu-se, por vídeo conferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Ensino de Ciências e Matemática, assim composta: Profa. Dra. Débora Coimbra (ICENP/UFU); Prof. Dr. Paulo Vitor Teodoro de Souza, (ICENP/UFU) e, Prof. Dr. Paulo Eduardo Fornasari Farinas (UFSCar). Iniciando os trabalhos a presidente da mesa apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa. A seguir, a presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu os conceitos finais. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

Aprovado

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

O componente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

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



Documento assinado eletronicamente por **Debora Coimbra Martins, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/02/2024, às 18:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Vitor Teodoro de Souza, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/02/2024, às 18:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Eduardo Fornasari Farinas, Usuário Externo**, em 28/02/2024, às 19:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5162091** e o código CRC **9B4CB133**.

AGRADECIMENTOS

A Deus Pai Poderoso, Onipotente e Eterno pelo Dom da Vida, sem este nada do que acontece hoje aqui seria possível.

A Santa Maria e São José, pelas ajudas cotidianas e pelo Sim que mudou o percurso da história!

À minha família de berço, meus pais, Valdeir Francisco Oliveira e Lúcia Lopes Oliveira por construírem em mim uma base que me permitiu chegar até aqui, pelas orações e pela liberdade de crescer, à minha irmã Amanda Lopes de Oliveira pela companhia na infância.

À minha família que constituí junto à minha esposa Lígia, nossos amados filhos: Tarcísio, Mariana e Letícia, só Deus sabe o quanto amo vocês. E aos meus sogros Pio José e Nívea, pelo auxílio de sempre.

Aos meus amigos Leonardo e Fabrício, pela longa jornada de amizade, e pelas confidências durante este período.

À minha orientadora Prof.^a Dr.^a Debora Coimbra, minha sincera gratidão por sua dedicação e orientação valiosa ao longo do meu percurso acadêmico. Obrigado pela disposição em me orientar.

Ao professor Alexandre Cacheffo que, mesmo sem ser oficialmente designado como meu orientador, desempenhou um papel fundamental durante esta jornada de Mestrado.

Aos meus colegas de trabalho Paulo Felipe e Lillian Oliveira, que generosamente cooperaram comigo ao longo desta jornada de estudos, aliviando minha carga de trabalho.

Ao Jonata Teixeira Pastro pela revisão do Abstract.

A todos os professores e colegas do PPGECEM, pela companhia nessa caminhada.

A todos, sem exceção. Sincera gratidão!

RESUMO

A análise epistemológica é uma das abordagens de investigação da origem do conhecimento e exploração da sua aquisição. Neste trabalho, optamos pela Metodologia dos Programas de Pesquisa Científica de Imre Lakatos para estudar dois coletivos de pensamento: as leis da Termodinâmica - conservação da energia, considerando o calor como uma forma desta e aumento da entropia para processos irreversíveis; e o Problema do Caixeiro Viajante, avaliando as teorias concorrentes que utilizam métodos de otimização combinatória heurísticos ou exatos. Corroborar esse estudo, a perspectiva de que a modelagem matemática nos oferece ferramentas que facilitam a compreensão, análise e solução de problemas complexos, especialmente nas áreas de física e computação. No primeiro caso, a modelagem dos ciclos termodinâmicos foi realizada utilizando o comportamento funcional dos processos isotérmicos, adiabáticos, isobáricos e/ou isovolumétricos envolvidos, enquanto no problema do caixeiro a modelagem pode ser em termos de grafos. No contexto da modelagem do problema do caixeiro viajante por grafos, os vértices representam as cidades que o caixeiro precisa visitar, e as arestas indicam as conexões entre elas. Numa abordagem concorrente, a aproximação de primeiros vizinhos, a distância entre as cidades é calculada pela distância euclidiana entre os pontos distribuídos em uma rede. A determinação do valor de k , representando o número de vizinhos mais próximos, depende do tamanho do conjunto de dados, da complexidade do problema e da precisão desejada. A construção da rota para uma nova cidade envolve calcular as distâncias para todas as cidades no conjunto de treinamento e identificar os k vizinhos mais próximos, considerando regras previamente definidas, como não passar por cada ponto mais de uma vez e retornar ao ponto inicial. Destes estudos resultam o Produto Educacional, um site hospedado no *Github* homônimo ao livro "Do Micro ao Macro: uma introdução à Termoestatística". Trata-se de um ambiente colaborativo e gratuito em construção, de design visualmente agradável e amigável, disponibilizando conteúdos estáticos e dinâmicos. O ambiente permite anexar ferramentas virtuais de avaliação, as quais geram um banco de dados para a sua validação pelos usuários e, também, foi realizada pela banca de especialistas.

Palavras-chave: Imre Lakatos, Programas de Pesquisa, ciclos termodinâmicos, Caixeiro-Viajante, modelagem matemática, Tecnologias Digitais da Informação e Comunicação (TDIC).

ABSTRACT

Epistemological analysis is a research approach that investigates the origin and acquisition of knowledge. This study applies Imre Lakatos's Methodology of Scientific Research Programmes (MSRP) to analyze two bodies of thought: the laws of thermodynamics, i.e., conservation of energy, heat as a form of energy, and entropy increase for irreversible processes; and the classical Traveling Salesman Problem (TSP), evaluating competing theories that seek heuristic or exact combinatorial optimization methods. The analysis is supported by the perspective that mathematical modeling provides tools that facilitate the understanding, analysis, and solution of complex problems, especially in physics and computation. In the first case, thermodynamic cycles were modeled using the functional behavior of the isothermal, adiabatic, isobaric and/or isometric processes involved. In the context of the TSP, modeling can be done in terms of graphs, in which the vertices of the structure represent the cities that the salesman needs to visit and the edges indicate the connections between them. Applying the concurrent approach of the k-nearest neighbors algorithm, the distance between cities is calculated by the Euclidean distance between the points distributed in a network. Determining the value of k, representing the number of nearest neighbors, depends on the size of the data set, the complexity of the problem and the desired accuracy. Tracing the route to a new city involves calculating the distances to all the cities in the training set and identifying the k-nearest neighbors. The process must consider previously defined rules, such as not passing each point more than once and returning to the starting point. The primary output of these studies is a website hosted on Github of the homonymous book "From Micro to Macro: An Introduction to Thermostatistics". It is a free collaborative environment under construction, with user-friendly design providing static and dynamic content. The environment allows virtual evaluation tools to be embedded, which generate a database for validation by users and by a panel of experts.

Key-words: Imre Lakatos, Research Program, Thermodynamics Cycles, Traveling Salesman Problem, mathematical modelling, Digital Information and Communication Technologies (DICT).

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação de estrutura de um programa de pesquisa de Imre Lakatos.....	17
Figura 2 - Código fonte da animação do ciclo de Carnot.....	31
Figura 3 - Vendedor Caixeiro	33
Figura 4 - Jogo Icosiano, exemplar do dodecaedro de Hamilton.	34
Figura 5 - Representação de um grafo completo com quatro cidades.....	36
Figura 6 - Ramificação binária do método Branch and Bound.	38
Figura 7 - Método Branch and Cut.....	39
Figura 8 - Heurística KNN - Passo a passo ilustrativo de inserção de pontos.	41
Figura 9 - Algoritmo K-OPT.	42
Figura 10 - Representação gráfica de uma interface do JupyterLab.	47
Figura 11 - Recorte de código para plotagem de gráfico.....	48
Figura 12 - Screenshot da página inicial de um site produzido com mkdocs.	49
Figura 13 - Screenshot da página da Organização criada no GitHub para hospedagem dos arquivos do produto educacional.....	51
Figura 14 - Imagem da página inicial do produto educacional	52
Figura 15 - Entendimento da termodinâmica segundo a MPPC	54
Figura 16 - Entendimento do TSP segundo a MPPC	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACO	Ant Colony Optimization
BB	Branch & Bound
BC	Branch and Cut
GH	GitHub Pages
KNN	K-Nearest Neighbors
MM	Modelagem Matemática
MPPC	Metodologia dos Programas de Pesquisa Científica
NP-Completo	Non-Deterministic Polynomial
NumPy	Numerical Python
PPGECM	Programa de Pós-graduação em Ensino de Ciências e Matemática
PUC	Pontifícia Universidade Católica
SA	Simulated Annealing
TDIC	Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação
TSP	Travelling Salesman Problem

SUMARIO

1. MINHA TRAJETÓRIA ATÉ ESSA ETAPA	8
2. INTRODUÇÃO	10
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
3.1 Imre Lakatos, vida e epistemologia	13
3.1.2 A metodologia dos programas de pesquisa científica de Lakatos	14
3.2 A epistemologia de Ludwig Fleck	20
3.3 O Coletivo de Pensamento e os Programas de Pesquisa	22
4. MODELAGEM MATEMÁTICA, CHAVE PARA A COMPREENSÃO DE FENÔMENOS NATURAIS	26
4.1 Construção do Ciclo de Carnot, modelagem e programação	27
4.2 O Problema Do Caixeiro Viajante	33
5. METODOLOGIA	45
5.1 A importância da produção de conteúdo educacional	45
5.2 Desenvolvimento do produto educacional	46
5.2.1 Python, Jupyter Notebooks e outras bibliotecas	46
5.2.2 Mkdocs-material e GitHub e GitHub-Pages	49
6. RESULTADOS	52
6.1 O Site: domicroaomacro.github.io	52
6.2 Aplicação da Metodologia de Lakatos à Termodinâmica e ao TSP	53
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
REFERÊNCIAS	59
APENDICE A	63
APÊNDICE B	64

1. MINHA TRAJETÓRIA ATÉ ESSA ETAPA

Sou Técnico de Laboratório na Universidade Federal de Uberlândia (UFU) há quase uma década, com formação em Tecnologia da Informação. Iniciei minha jornada profissional no campus de Monte Carmelo - MG, no curso de Bacharelado de Sistemas de Informação, estive lotado lá por dois anos e seis meses. No ano de 2016, consegui a sonhada remoção e pude, finalmente, retornar para minha querida cidade de Ituiutaba. Até o momento presente, estou lotado no Curso de Física do Pontal, onde aprendi muito com todos os membros do curso.

Tive a oportunidade de vivenciar algumas outras experiências profissionais, atuando como professor em alguns cursos de formação continuada e educação tecnológica vinculada ao ensino médio. Não foi uma experiência longa, porém muito enriquecedora, a qual pretendo ampliar ao concluir mais esta etapa.

Durante minha formação acadêmica, cultivei um interesse pela programação e pela matemática, reconhecendo lacunas de conhecimento a serem preenchidas nessas áreas, decidi realizar uma especialização em Ciência de Dados e *Big Data*, ministrada na Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – (PUC Minas). Essa formação desempenhou um papel significativo no aprimoramento da minha compreensão em matemática estatística e uso da linguagem *Python*, direcionada ao universo dos dados.

Quando ingressei no Programa de Pós-graduação em Ensino de Ciências e Matemática (PPGECM), estávamos imersos na pandemia de Covid-19, e ficou evidente a inviabilidade no ensino presencial. Nesse contexto, os serviços online, que já estavam em ascensão, tornaram-se ainda mais relevantes. Percebi que diversos sites, desenvolvidos a partir de frameworks, poderiam representar uma oportunidade de colaboração e aprimoramento, especialmente na adaptação dessas plataformas para atender às demandas específicas daquele momento.

Disciplinas desse programa como Modelagem Matemática e Prática Docente Supervisionada foram fundamentais, ao proporcionar os conhecimentos e habilidades necessários para implementar com sucesso o meu projeto. A primeira contribuiu com fundamentos teóricos e análises críticas, enquanto a Prática Docente Supervisionada permitiu a primeira sondagem da aplicação desses conhecimentos em contextos práticos, consolidando a base teórico-prática essencial para colocar o produto em funcionamento.

Durante o curso dos créditos do programa, foram realizadas reuniões paralelas com o grupo de pesquisa formado pelos alunos sob a orientação da Prof.a Debora. Alguns desses encontros contaram com a participação do Prof. Silvio Salinas (USP), nos quais foram

discutidos temas pertinentes à pesquisa dos estudantes. Dentre esses temas, destaco aqueles que diretamente se relacionaram à minha pesquisa, como os avanços no desenvolvimento de veículos autônomos. Exploramos os fundamentos físicos e matemáticos que, aliados ao crescimento do poder computacional, possibilitaram avanços significativos nessa área. Além dessas discussões, muitos diálogos se concentraram nos desdobramentos propostos pelas leis da termodinâmica, incluindo a derivação das leis propostas por Boltzmann.

O Prof. Silvio Salinas elucidou diversos aspectos desse tema, como a noção de reversibilidade e irreversibilidade, destacando especialmente o experimento da Urna de Ehrenfest. Este experimento envolve a distribuição inicial arbitrária de bolas entre duas urnas, seguida pela remoção aleatória de uma bola de uma das urnas e sua transferência para a outra. Esse processo é repetido indefinidamente. Embora a descrição do experimento seja simples, seus resultados surpreendem ao demonstrar que, ao longo do tempo, as bolas se distribuem entre as urnas de tal forma que a probabilidade de encontrar um determinado número de bolas em cada urna converge para uma distribuição binomial, independentemente da distribuição inicial das bolas. Os estudos progrediram em direção a temas interdisciplinares que combinam física, computação e matemática, como processos markovianos, teoria das probabilidades, modelo de Ising e o Problema do Caixeiro Viajante.

2. INTRODUÇÃO

A epistemologia, como ramo da filosofia dedicado à investigação da natureza do conhecimento científico, é um campo de estudo multifacetado e em constante evolução. Ao longo da história, diversas perspectivas e contribuições enriqueceram essa área, expandindo nossa compreensão da complexa dinâmica por trás da produção e validação do conhecimento científico. Para Blanché “a epistemologia significa literalmente a teoria da ciência” (Blanché, 1975, p. 06), complementando que “é uma reflexão sobre a ciência” (Blanché, 1975, p.13).

No contexto do ensino, a epistemologia é um meio eficaz de exploração das bases teóricas e metodológicas do conhecimento científico. Cachapuz ressalta sua importância neste contexto ao afirmar que: “Considerar a Didáctica das Ciências uma simples aplicação prática das Ciências da Educação pode fazer com que ignoremos a importância da epistemologia da ciência para uma melhor aprendizagem das ciências” (Cachapuz, 2005, p. 197)

Entre os pensadores nesse processo de exploração da epistemologia, destacam-se Imre Lakatos e Ludwig Fleck. Imre Lakatos, filósofo húngaro do século XX, é notável por sua revolucionária "metodologia dos programas de pesquisa científica". A epistemologia de Lakatos propicia um entendimento da construção da ciência, que se constitui por Metodologias de Programas de Pesquisa (MPP) com enfoque em suas discussões.

Sua abordagem difere da visão linear e estática da ciência, de uma simples acumulação do conhecimento, propondo uma estrutura dinâmica para entender a progressão do conhecimento científico. Para Lakatos, a ciência se configura como um conjunto de programas de pesquisa em constante evolução, as teorias são continuamente aprimoradas e ajustadas à luz de novas descobertas, anomalias e desafios.

Ludwig Fleck, médico e filósofo polonês, ofereceu uma perspectiva singular sobre a epistemologia em sua obra "Gênese e Desenvolvimento de um Fato Científico". Para Fleck, em toda sua obra, a ciência não é um “construto formal, mas, essencialmente, uma atividade organizada pelas comunidades de pesquisadores” (Schäfer; Schnelle, 1986, p. 1). Através do conceito de "estilo de pensamento", Fleck argumenta que as concepções científicas individuais não são produtos de mentes isoladas, mas sim frutos de um contexto social e cultural específico. O estilo de pensamento de uma comunidade científica molda a maneira como seus membros interpretam o mundo e formulam suas teorias, evidenciando a natureza socialmente construída do conhecimento científico.

Ao analisar as perspectivas de Fleck e Lakatos, identificamos convergências, que evidenciam o "coletivo de pensamento" de Fleck nos "grupos de pesquisa" de Lakatos. Essa convergência se reflete na influência do contexto social na construção do conhecimento, na dinâmica interna das comunidades científicas e na compreensão de que o conhecimento científico é dinâmico e evolutivo. Essas reflexões são fundamentais para a compreensão da epistemologia, oferecendo uma abordagem crítica e contextualizada à produção do conhecimento científico.

Além de uma abordagem epistemológica da ciência, esta dissertação propõe estabelecer um diálogo educacional entre as ciências computacionais e a física termodinâmica por meio da modelagem matemática, mediado pela incorporação de Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação (TDIC) como recurso pedagógico. Essa integração possibilitou o desenvolvimento de um site, disponível no endereço <https://domicroaomacro.github.io/>, que possui conteúdo para o ensino e contextualização do ensino de termodinâmica, configurando-se como um produto educacional.

O objetivo principal do site é constituir uma extensão do livro "Do Micro ao Macro: uma introdução à Termoestatística". Nesse produto, são abordados temas relevantes à termodinâmica, estabelecendo uma conexão com o problema do caixeiro viajante, um desafio clássico da computação que utiliza métodos exatos e heurísticos para sua resolução. A interseção entre a termodinâmica e a programação computacional é explorada de maneira prática e educativa nesse ambiente interdisciplinar, procurando promover uma compreensão aplicada dos conceitos teóricos.

No Capítulo 3, Fundamentação Teórica, abordamos a reflexão epistemológica de Imre Lakatos e sua Metodologia dos Programas de Pesquisa Científica (MPPC), que trata do progresso científico, interpretando mudanças paradigmáticas como elementos essenciais desse avanço. Realizamos uma análise detalhada da MPPC, explorando seus pilares fundamentais, como o núcleo duro, cinturão protetor e heurísticas. Como complemento à visão de Lakatos, estudamos a "Gênese e Desenvolvimento de um Fato Científico" de Ludwik Fleck, que introduz o conceito de "coletivo de pensamento". Fleck destaca como a construção do conhecimento é influenciada por fatores sociais, históricos e culturais.

Já no Capítulo 4, enfatizamos a importância da modelagem matemática na compreensão dos fenômenos naturais. A viabilização das representações matemáticas, oferece uma visão abrangente, diversificada e sistemática para descrever os sistemas termodinâmicos. Diante

disso, a integração da modelagem matemática com TDIC como recurso pedagógico tem se mostrado eficaz, proporcionando uma abordagem mais ativa e envolvente no processo educacional.

Mencionamos também o Problema do Caixeiro Viajante, a partir de uma breve incursão pela sua história. Exploramos a sua definição como um problema NP-completo, cujo a solução não pode ser resolvida por algoritmo conhecido e capaz de solucionar todos os problemas do mesmo tipo, além de sua complexidade que o torna uma questão intrigante e desafiadora dentro da teoria da computação. Também é apresentado um breve resumo dos métodos exatos e heurísticos propostos ao longo do tempo para sua resolução.

No Capítulo 5 relacionamos a metodologia, contemplando a importância da produção de conteúdo educacional, bem como de um material online acessível e prático. São detalhadas as ferramentas fundamentais empregadas no desenvolvimento, como a escolha da linguagem de programação e a utilização de cadernos de código. Destaca-se, ainda, o papel essencial dos serviços gratuitos em nuvem e de hospedagem de código, que desempenham um papel central na viabilização e aprimoramento de materiais educacionais dessa natureza.

No Capítulo 6, intitulado “Resultados”, são apresentados os detalhes do produto educacional proposto, destacando sua finalidade de ampliar os conhecimentos apresentados no livro *Do micro ao macro: Uma introdução à Termoestatística*, escrito por Salinas e Coimbra, com publicação prevista para 2024. Oferecemos também, uma análise detalhada das seções que compõem o site, proporcionando uma visão abrangente do conteúdo disponibilizado.

No Capítulo 7, são examinados os resultados obtidos e a aplicação direta da epistemologia de Lakatos aos temas investigados nesta dissertação sobre a Termodinâmica e o Problema do Caixeiro Viajante. Por último, apresentamos as considerações finais obtidas ao longo da pesquisa, destacando também a possibilidade de trabalhos futuros nesta linha de desenvolvimento. Este capítulo não apenas sintetiza os principais insights da dissertação, mas também delineia caminhos promissores para pesquisas subsequentes, contribuindo para o enriquecimento contínuo do campo de estudo abordado.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Imre Lakatos, vida e epistemologia

Imre Lakatos nasceu em Debrecen, Hungria, em 9 de novembro de 1922. Ele era filho de uma família judia de classe média. Em 1938, com a ascensão do nazismo na Alemanha, Lakatos mudou seu nome para Imre Molnár para evitar perseguição. Conforme Worrall (1979), Lakatos estudou matemática e filosofia na Universidade de Debrecen, tendo se formado no ano de 1944. Após este período, mudou-se para a União Soviética para estudar na Universidade Estatal de Moscou, onde foi influenciado pelo positivismo lógico e pelo marxismo.

Após a Segunda Guerra Mundial, Lakatos retornou à Hungria, e se tornou professor de matemática na Universidade de Budapeste. Em sua autobiografia, Lakatos, cita que em 1947 ingressou na política e foi nomeado para um cargo no Ministério da Educação da Hungria, tornando-se membro do Partido Comunista Húngaro. Foi preso em 1950, sob acusação de revisionismo, por suas posições dissidentes dentro do marxismo. Libertado em 1953, continuou a ser perseguido pelo governo húngaro (Lakatos, 1978).

Em 1956, acabou por fugir da Hungria após a Revolução Húngara, e se estabeleceu no Reino Unido, onde se tornou professor de filosofia da ciência na Universidade de Cambridge. Nesta universidade, desenvolveu sua teoria do progresso científico, que é uma crítica à teoria de Karl Popper sobre a falsificação¹.

Lakatos é mais conhecido por suas contribuições para a filosofia da ciência, particularmente pelo desenvolvimento de sua Metodologia dos Programas de Pesquisa Científica (MPPC). Sua abordagem influente procurou reconciliar aspectos da visão de Karl Popper sobre falsificacionismo com a visão mais histórica e sociológica da ciência.

...a grande questão com respeito ao desenvolvimento de Lakatos é quanto do velho hegeliano-marxista permaneceu no filósofo pós-popperiano tardio, e quanto de sua filosofia foi uma reação contra seu eu anterior. (Oliveira, 2022. p. 107)

Embora Lakatos adotasse uma postura crítica em relação ao positivismo lógico e ao falsificacionismo ingênuo, ele também buscava preservar uma noção de progresso científico racional, algo que pode ser visto como alinhado com a ideia marxista de progresso histórico.

¹ O falsificacionismo, concebido por Karl Popper, sustenta que a diferenciação entre ciência e pseudociência reside na capacidade de falsificação. Segundo Popper, uma teoria científica, sendo uma hipótese sujeita a testes por observação e experimentação, deve ser descartada se falsificada, ou seja, se evidências contraditórias forem encontradas. Apesar de críticas, o falsificacionismo continua a ser uma teoria influente na filosofia da ciência, utilizada para distinguir ciência de pseudociência e avaliar a validade das teorias científicas.

Embora Lakatos não fosse um marxista ortodoxo, ele reconhecia que fatores sociais e econômicos influenciam o desenvolvimento científico.

O apelo mina a influente leitura “hegeliana” de Lakatos devida a Ian Hacking. Segundo Hacking (1983, p. 118), “Lakatos, educado na Hungria, numa tradição hegeliana e marxista, tomava como dada a demolição pós-kantiana das teorias da correspondência”. Tal asserção, para dizer o mínimo, é extravagante, pois Lakatos endossou explicitamente a teoria da correspondência em diversas ocasiões. (Oliveira, 2022. p. 147)

As contribuições de Lakatos para a filosofia da ciência são significativas e abrangentes. Fernando Lang afirma que, a epistemologia de Imre Lakatos se constitui como uma das mais importantes reflexões filosóficas da ciência no século XX (Da Silveira, 1996). Além disso, em um artigo intitulado *Notes on Lakatos*, Thomas Kuhn reconhece a importância da obra, apesar de ainda tecer críticas sobre sua metodologia. Lakatos morreu em Londres em 2 de fevereiro de 1974, aos 51 anos.

3.1.2 A metodologia dos programas de pesquisa científica de Lakatos

Uma das questões centrais da filosofia da ciência é o progresso científico. Como a ciência progride? Como as teorias científicas são desenvolvidas e substituídas? A MPPC de Lakatos é uma abordagem filosófica que responde a essas questões. Ela pretende desmistificar as mudanças paradigmáticas, interpretando-as como parte integrante do progresso científico.

Segundo a MPPC as transformações teóricas são resultado de um processo racional, no qual novos programas de pesquisa concorrem e, eventualmente, suplantam os anteriores. Para Lakatos, a MPPC é uma explicação lógica para o fazer científico, interpretando as revoluções científicas como casos de progresso racional e não de conversões religiosas:

A história da ciência é vista como a história dos programas de pesquisa em concorrência. As chamadas “revoluções científicas²” são interpretadas como um processo racional de superação de um programa por outro (Lakatos, 1970, p. 69)

Em seus escritos, Lakatos defende uma ideia contrária ao falsificacionismo de Karl Popper, afirmando que a ciência possui um processo crítico de desenvolvimento (Lakatos,

² As revoluções científicas de Thomas Kuhn são conceitos centrais na filosofia da ciência, desafiando a visão linear do progresso científico. Kuhn introduziu a ideia de paradigmas, conjuntos compartilhados de crenças e técnicas dentro de uma comunidade científica. Durante períodos de normalidade científica, os cientistas operam dentro desses paradigmas, contribuindo incrementalmente para o conhecimento. No entanto, crises ocorrem quando anomalias desafiam o paradigma existente, levando a uma revolução científica. Durante essas fases, os fundamentos do paradigma são questionados e substituídos, resultando em uma transformação abrupta na compreensão científica e influenciando a aceitação e substituição de teorias ao longo do tempo.

1978). Também argumentou que a ciência é uma atividade social e que as teorias científicas são influenciadas por fatores sociais e políticos.

A epistemologia Popper afirma ainda que: “A ciência não é um sistema que avance continuamente em direção a um estado de finalidade, ela jamais pode proclamar haver atingido a verdade” (Popper, 1972, p. 305). E adiante, acrescenta: o esforço por conhecer e a busca da verdade são os motivos mais fortes da investigação científica” (Popper, 1972, p. 305).

As pretensões de Karl Popper em sua célebre obra *A lógica da pesquisa científica*, escrita em 1934 consistia em traçar os limites do conhecimento empírico, definidos a partir de um critério negativo da falseabilidade (Dias, 2015, p. 164). De outro modo, se a observação mostrar que o efeito previsto foi refutado, a teoria deve ser refutada, justamente porque é incompatível com certos resultados observados, significando que as teorias científicas são passíveis de serem falseadas. Afirma Popper:

[...] não exigirei que um sistema científico seja susceptível de ser dado como válido, de uma vez por todas, em sentido positivo, exigirei, porém que sua forma lógica seja tal que torne possível validá-lo através de recurso a provas empíricas, em sentido negativo, deve ser possível refutar pela experiência, um sistema empírico. (Popper, 1972, p. 42).

Lakatos criticou essa teoria, argumentando que ela é inadequada para explicar o progresso científico, ainda que considerasse que “as ideias de Popper constituem o desenvolvimento filosófico mais importante do século XX” (Lakatos, 1989, p. 180).

A falsificação de uma teoria não prova que ela é falsa. Ela apenas prova que a teoria é incompatível com um determinado conjunto de dados. Uma teoria pode ser falsa, mas ainda ser consistente com todos os dados disponíveis" (Lakatos, 1979, p.112).

Soto, ressalta outra crítica de Lakatos a Popper a respeito da refutabilidade de Popper, que enfatizava a importância da crítica e do teste empírico na ciência, buscando teorias que possam resistir à falsificação.

Imre Lakatos ousa dizer o seguinte: toda teoria nasce refutada, nenhuma teoria dá conta perfeitamente de todo um campo empírico. Objeções empíricas fundamentais podem ser feitas a todas as teorias. Se fôssemos coerentes com Popper, se fôssemos efetivamente críticos, deveríamos abandonar permanentemente nossas teorias. (Soto, 1998, p. 120)

Soto afirma que Popper desafiou cada teoria a especificar sob quais condição empírica estaria disposta a ser refutada, visando promover o diálogo, a crítica e evitar o dogmatismo. Ele destacou que a força lógica das refutações deve ser conclusiva para que uma hipótese seja legitimamente rejeitada. Popper diferenciou entre verificação (confirmação em sentido positivo) e corroboração (resistência a instâncias refutadoras), argumentando que o avanço

científico envolve descartar hipóteses que não resistem a instâncias refutadoras, mantendo aquelas que são corroboradas.

Para Musgrave, a metodologia de Lakatos tem sido corretamente vista como uma tentativa de reconciliar o falseacionismo de Popper com as concepções de Thomas Kuhn. Popper via a ciência como consistindo em conjecturas explicativas ousadas e refutações dramáticas que levavam a novas conjecturas (Oliveira, 2022, p. 141).

Todavia, a crítica de Lakatos a Popper não se reveste de um caráter pessoal, mas sim de um profundo reconhecimento intelectual. Lakatos expressou sua gratidão ao reconhecer uma dívida pessoal para com Popper, cujas ideias provocaram uma mudança significativa em sua vida e em sua abordagem filosófica. Ele afirmou:

Minha dívida pessoal com ele é imensa: mudou minha vida mais que nenhuma outra pessoa (...). Sua filosofia me ajudou a romper, de forma definitiva, com a perspectiva hegeliana que eu havia retido durante quase vinte anos, e, o que é ainda mais importante, me forneceu um conjunto muito fértil de problemas, um autêntico programa de pesquisa" (Lakatos, 1989; p.180).

Neste cenário de contraste com a teoria de Popper, a MPPC enxerga as transformações teóricas como resultado de um processo racional, no qual novos programas de pesquisa concorrem e, eventualmente, suplantam os anteriores. Para Lakatos, a MPPC é uma explicação lógica para o fazer científico, interpretando as revoluções científicas como casos de progresso racional e não de conversões religiosas.

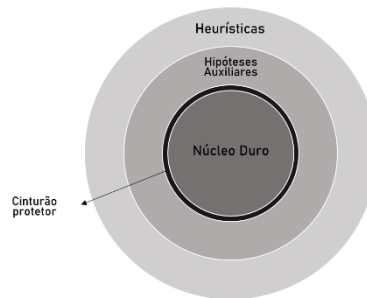
Para Miguel Flach, a metodologia de Lakatos é geralmente vista como uma tentativa de reconciliar o falseacionismo de Popper com as concepções de Thomas Kuhn. Para ele, Lakatos propôs uma síntese, substituindo o aparato sociopsicológico de Kuhn por um aparato lógico-metodológico. Para Lakatos, a unidade básica de avaliação científica não é uma teoria isolada, mas sim um “programa de pesquisa”.

Lakatos propôs um meio-termo, no qual o aparato sociopsicológico de Kuhn é substituído pelo aparato lógico metodológico. A unidade básica de avaliação não é a teoria testável isolada, mas, sim, o “programa de pesquisa” dentro do qual uma série de teorias testáveis é gerada. Cada teoria produzida dentro de um programa de pesquisa contém em comum os mesmos pressupostos ou “núcleo duro”, cercados por um “cinturão protetor” e de hipóteses auxiliares. (Oliveira, 2022, p. 141)

Um programa de pesquisa científica consiste em uma série de teorias que compartilham o mesmo núcleo firme, cinturão protetor e heurísticas. Os programas de pesquisa são avaliados com base em sua capacidade de gerar novos conhecimentos e de prever novos fenômenos. "Se um programa de pesquisa explica de forma progressiva mais fatos que um programa rival,

'supera' a este último, que pode ser eliminado ou se se prefere, arquivado" (Lakatos, 1983, p.117).

Figura 1 - Representação de estrutura de um programa de pesquisa de Imre Lakatos



Fonte: De autoria própria

A Figura 1 sintetiza a visão de Lakatos sobre como os cientistas trabalham dentro de programas de pesquisa para proteger e desenvolver teorias científicas. No centro do esquema está o "Núcleo Duro", composto pelos princípios fundamentais e inegociáveis do programa de pesquisa. Ao redor do núcleo duro, o "Cinturão Protetor", formado por hipóteses auxiliares que protegem o núcleo duro de falsificações. Mais externamente, encontram-se as "Heurísticas", que são metodologias ou estratégias que orientam a modificação do cinturão protetor e a extensão do programa de pesquisa.

Os programas progressivos são aqueles que geram novos conhecimentos e preveem novos fenômenos (Silveira, 1996, p.223). Esses programas são considerados mais promissores e têm maior probabilidade de substituir os programas regressivos. Já os chamados programas regressivos são aqueles que não geram novos conhecimentos e não preveem novos fenômenos. Esses programas são considerados menos promissores e têm maior probabilidade de serem substituídos por programas progressivos.

Na essência dos programas de pesquisa, residem três elementos fundamentais: núcleo firme, cinturão protetor e heurísticas. O núcleo firme de um programa de pesquisa consiste em um conjunto de hipóteses ou teorias consideradas irrefutáveis pelos cientistas. "O núcleo firme é 'convencionalmente' aceito (e, portanto, 'irrefutável' por decisão provisória)" (Lakatos, 1983, p.116). Mesmo quando ocorrem anomalias ou refutações, o núcleo firme não é descartado, mas sim protegido e modificado pelo "cinturão protetor" para superar tais desafios.

Quanto às heurísticas, são diretrizes que orientam a prática científica dentro de um programa de pesquisa específico. A heurística positiva refere-se à estratégia dos cientistas em um programa de pesquisa para buscar ativamente evidências que confirmem as previsões do núcleo duro da teoria. Em contraste, a heurística negativa aborda anomalias ou contradições entre as previsões teóricas e os resultados observados, propondo a revisão do cinturão protetor do programa, ao invés de rejeitar a teoria de imediato.

A heurística positiva consiste num conjunto parcialmente articulado de sugestões ou palpites sobre como mudar e desenvolver as variantes refutáveis do programa de pesquisa, e sobre como modificar e sofisticar o cinto de proteção 'refutável' (Lakatos, 1979, p.165).

Essa abordagem flexível destaca a importância de adaptar continuamente o programa de pesquisa, permitindo ajustes no cinturão protetor para resolver inconsistências, enquanto mantém o núcleo teórico fundamental. Essas heurísticas refletem a abordagem dinâmica de Lakatos, que reconhece a necessidade de um núcleo teórico sólido e flexibilidade no cinturão protetor para lidar com desafios e anomalias ao longo do desenvolvimento científico.

De acordo com a heurística positiva, é sempre esperado que exista um cinturão protetor, o qual consiste em conhecimento prévio e intencionalidade. O cinturão protetor é uma camada de hipóteses auxiliares que circunda o núcleo duro de uma teoria científica "sobre cuja base se estabelecem as condições iniciais" (Lakatos, 1989, p.230). Representa, deste modo, o conjunto de suposições periféricas que os cientistas podem ajustar para proteger o núcleo essencial da teoria de refutações imediatas, e garantir a sobrevivência do programa.

Ao contrário de abordagens mais inflexíveis, como o refutacionismo ingênuo³, que rejeitam teorias diante de conflitos imediatos com os fatos, a proposta do cinturão protetor de Lakatos é ajustar as hipóteses periféricas antes de considerar o abandono do programa. Isso promove uma perspectiva científica mais adaptável, reconhecendo a complexidade do desenvolvimento teórico e a necessidade de modificações ao lidar com questões práticas e empíricas, capaz de permitir a evolução contínua de um programa de pesquisa diante de desafios empíricos ou anomalias.

³ ...a concepção de que fatos em conflito com uma teoria são suficientes para que ela seja rechaçada (refutacionismo ingênuo) e substituída por outra: o embate se dá entre, no mínimo, dois programas de pesquisa e os fatos; a superação de um programa por outro não acontece instantaneamente, constituindo-se em um processo temporalmente extenso (Da Silveira, 1996, p. 5).

A MPPC oferece uma visão mais dinâmica e realista do desenvolvimento da ciência, especialmente ao reconhecer que as teorias científicas estão sempre evoluindo e que esse processo pode ser marcado por conflitos e disputas entre diferentes programas de pesquisa. Também tem sido uma ferramenta importante para a compreensão do desenvolvimento da ciência em diversos campos, o que especialmente inclui a história da ciência.

3.2 A epistemologia de Ludwig Fleck

Ludwig Fleck (1896-1961) foi um médico judeu-polonês dedicado à pesquisa sobre microbiologia. Durante a Segunda Guerra Mundial, passou parte de sua vida em campos de concentração nazistas, onde investigou a doença de tifo e trabalhou na produção de uma vacina, em Auschwitz e Buchenwald.

Sua obra de maior destaque, "Gênese e Desenvolvimento de um Fato Científico: Introdução à Doutrina do Estilo de Pensamento e do Coletivo de Pensamento", foi escrita em 1935. Apesar de ter passado despercebida inicialmente, a obra ganhou notoriedade trinta anos após sua publicação, quando o físico norte-americano Thomas Kuhn (1922-1996) mencionou o nome de Fleck no prefácio de "A Estrutura das Revoluções Científicas".

Kuhn reconheceu que os escritos de Fleck antecipavam algumas de suas próprias ideias e que estavam muito à frente de sua época. Essa menção gerou grande repercussão e contribuiu para a difusão das ideias de Fleck entre a comunidade de pesquisadores.

Embora a história de Fleck revele que a pressão nazista o forçou a trabalhar no desenvolvimento de uma vacina contra o tifo, sua obra se concentra principalmente na doença da sífilis. Fleck a utiliza como base para construir seu raciocínio sobre o caráter social da ciência, entrelaçando conceitos e discussões com fatos históricos. Tal fato o distancia substancialmente da realidade de sua experiência durante a Segunda Guerra Mundial.

Canguilhem (1990), comenta o pioneirismo de Ludwig Fleck na epistemologia manifesta em sua obra, que se volta para o campo da medicina, um âmbito com particularidades que o distinguem de outras áreas do conhecimento. Nas ciências médicas, o foco do conhecimento não reside na regularidade e na normalidade, mas sim nos estados patológicos. Há então dois estados opostos: saúde e doença. Essa dicotomia permite a existência da fisiologia, que se dedica aos fenômenos da saúde, e da patologia, que se concentra nos fenômenos da doença.

Schäfer & Schnele (1986), ao examinarem o trabalho de Fleck, assinalam que essa singularidade da medicina molda o modo de pensar médico. Essa característica, por sua vez, determinou a linha de trabalho de Fleck, que se baseia no caráter interdisciplinar e coletivo do conhecimento científico. Ilana Löwy resume este entendimento ao afirmar que:

Resumindo: para Fleck, a complexidade do objeto de estudo da medicina — a patologia humana — torna inevitável a coexistência de vários estilos de pensamento médicos distintos e incomensuráveis. Sua incomensurabilidade explica-se, ao nível cognitivo, pela impossibilidade de desenvolver uma teoria que englobe a riqueza dos fenômenos patológicos, e, ao nível sociológico, pelo processo de especialização na medicina (Löwy, 1994, p. 11)

Fleck propõe que o conhecimento científico não é um produto individual, mas sim o resultado da interação entre indivíduos que compartilham um mesmo estilo de pensamento. Esse estilo é caracterizado por um conjunto de crenças, valores e pressupostos básicos sobre o mundo e seu funcionamento, juntamente com um vocabulário específico e uma maneira particular de formular problemas e soluções (Fleck, 1986).

O autor argumenta que os cientistas adotam estilos de pensamento específicos que abrangem métodos e técnicas de investigação científica, e são moldados por fatores sociais, culturais e históricos (Fleck, 1986). O estilo de pensamento é, ainda, uma maneira de perceber e interpretar o mundo que é compartilhado e aprendido entre os pares de uma comunidade de cientistas ou em um campo de conhecimento. Esse modo de pensar molda como o grupo define problemas científicos, constrói conhecimento e interpreta a realidade.

Ao ingressar em um coletivo de pensamento, os cientistas passam por um processo de socialização. Nesse contexto, aprendem as normas, valores e habilidades específicas necessárias para atuar neste campo científico. Apesar das possíveis diferenças nos estilos de pensamento, há uma comunicação entre eles (Canguilhem, 1990). Esse intercâmbio possibilita a circulação de conhecimento entre diferentes grupos de cientistas, permitindo a incorporação de novas ideias em diferentes abordagens.

Fleck destaca que os fatos científicos não são simplesmente reflexos da realidade, mas construções moldadas pelo estilo de pensamento do grupo de cientistas (Fleck, 1986). Em outras palavras, a realidade é interpretada através das lentes específicas desse estilo. Conforme as ideias evoluem ao longo do tempo, a interação dentro das comunidades científicas desempenha um papel crucial nesse desenvolvimento, o que permite compreender como os cientistas, ou determinada comunidade, constroem o conhecimento, bem como os impactos do estilo de pensamento e suas respectivas influências.

O conceito de Coletivo de Pensamento (Denkstil) é um ponto central na teoria de Fleck. Ele se refere ao conjunto de ideias, crenças e pressupostos compartilhados por uma comunidade científica específica. Esse coletivo de pensamento influencia a maneira como os cientistas formulam perguntas, conduzem pesquisas e interpretam resultados.

Para Matos (2005), o estilo de pensamento pode ser compreendido como uma forma de perceber direcionada, envolvendo uma elaboração intelectual e objetiva daquilo que é percebido, além de manifestar-se como uma prática. Fleck (1986) submete a teoria da ciência ao postulado do máximo de experiência, considerando-o como a lei máxima do pensamento científico. O estilo de pensamento abrange as pressuposições fundamentais sobre as quais o coletivo constrói sua estrutura teórica.

Um estilo de pensamento não existe individualmente. Existe de forma interna em determinado coletivo de pensamento, ou seja, o coletivo de pensamento é portador de um estilo de pensamento. Segundo Fleck, o coletivo de pensamento refere-se à unidade social existente dentro da comunidade científica ou de um campo específico de conhecimento, como um grupo profissional (Fleck, 1986).

O pensamento coletivo, conforme compreendido por Fleck, desempenha um papel fundamental na produção de conhecimento dentro de uma comunidade científica específica. Essa abordagem facilita a troca de ideias e a colaboração entre os membros, proporcionando suporte e validação às pesquisas individuais. Além disso, contribui para a continuidade do conhecimento científico ao longo do tempo, servindo como um filtro social que seleciona as ideias consideradas válidas pela comunidade científica.

Ao pertencer a uma comunidade, o estilo de pensamento coletivo experimenta o fortalecimento social que corresponde a todas as estruturas sociais e está sujeito a um desenvolvimento independente através das generalizações. Coerciona os indivíduos e determina ‘o que não pode pensar-se de outra forma’. Épocas completas são regidas por esta coerção de pensamento (Fleck, 1986, p. 145).

O Coletivo de Pensamento opera a partir de uma base comum, delineada pelos conhecimentos e práticas compartilhadas. Cabe a cada indivíduo vivenciar modificações individuais, acrescentando algo ao Estilo de Pensamento que pode ser aceito e incorporado pelo próprio Coletivo de Pensamento.

Em suma, a relação entre Estilo de Pensamento e Coletivo de Pensamento consiste em que os Estilos de Pensamento não existem de forma independente, mas sim dentro de um Coletivo de Pensamento, e este, por consequência, é o portador do primeiro, pois é o grupo que o define, o transmite e o modifica ao longo do tempo.

3.3 O Coletivo de Pensamento e os Programas de Pesquisa

Os MPPC de Lakatos descrevem um programa de pesquisa científica como um conjunto hierárquico de teorias, oferecendo aos cientistas a capacidade de organizar conhecimentos,

formular novas hipóteses e testar teorias. Simultaneamente, o Coletivo de Pensamento de Fleck proporciona o contexto social em que os programas de pesquisa de Lakatos estão inseridos, exercendo influência nas escolhas e direções desses programas. Isso destaca a interconexão categórica entre a estrutura interna dos programas e o ambiente social que os circunda.

Lakatos apresenta uma perspectiva alternativa à concepção tradicional do desenvolvimento científico como um processo linear e acumulativo. Em sua visão, a ciência é uma atividade complexa e dinâmica, marcada pela competição entre distintos programas de pesquisa. Ele destaca essa dinâmica ao enfatizar que o conhecimento científico é sempre provisório, passível de revisão constante. Segundo Lakatos: “A ciência não é um processo cumulativo de conhecimento objetivo, mas sim uma atividade competitiva e crítica entre diferentes programas de pesquisa” (Lakatos, 1978, p. 11).

Por outro lado, Fleck, observa a influência do ambiente social, ao apresentar o Coletivo de Pensamento como uma unidade social dentro de uma comunidade científica ou em um campo específico. Ele destaca como os cientistas compartilham um estilo de pensamento comum, moldado por fatores sociais, culturais e históricos. Kuhn (1987) corrobora a visão de Fleck quando afirma o conceito de paradigma como um conjunto de crenças, valores e técnicas que definem como uma comunidade científica pensa sobre um determinado problema. É notório que tanto Lakatos quanto Fleck reconhecem o papel fundamental da comunidade científica na produção do conhecimento, compartilham a ideia de que o conhecimento científico não é uma atividade individual isolada, ao contrário, uma construção social e coletiva. Popper (1972) também afirmava uma ideia análoga ao dizer que a ciência não é um processo objetivo e imparcial, mas sim um processo influenciado por fatores sociais e culturais.

Embora inicialmente esses conceitos apresentem abordagens diferentes, ambos observam a importância da interação social e coletiva na produção e evolução do conhecimento científico. A interconexão entre o ambiente social delineado por Fleck e a estrutura interna dos programas de pesquisa propostos por Lakatos destaca a complexidade e a interdependência dos fatores que moldam o progresso científico.

No âmbito dos MPPC de Lakatos, diferentes grupos de pesquisa podem ser vistos como programas de pesquisa distintos, cada um com sua hierarquia de teorias e métodos. Cada grupo trabalha para organizar o conhecimento sobre o TSP, formulando novas hipóteses, revisando métodos e testando teorias específicas relacionadas ao problema. Assim como Lakatos destaca a competição entre programas de pesquisa, diferentes abordagens para resolver o TSP podem

ser consideradas como programas concorrentes, cada um buscando avançar e contribuir para uma solução de resolução do problema.

O conhecimento científico não é um produto de indivíduos isolados, mas sim o resultado da atividade de uma comunidade científica, que se caracteriza por um estilo de pensamento próprio e por um conjunto de normas e valores que regulam a produção do conhecimento (Lakatos & Musgrave, 1970, p. 50).

O Coletivo de Pensamento de Fleck também desempenha um papel importante nesse contexto. O ambiente social no qual os grupos de pesquisa do TSP estão inseridos influencia as escolhas e direções desses programas. O estilo de pensamento compartilhado pelos pesquisadores, moldado por fatores sociais, culturais e históricos, reflete a unidade social destacada por Fleck. A influência do contexto social na definição de prioridades de pesquisa, na adoção de certas abordagens e na aceitação de determinadas teorias é um reflexo da interação entre o Coletivo de Pensamento e os programas de pesquisa.

Um coletivo de pensamento é uma comunidade de pessoas que trocam pensamentos ou se encontram numa situação de influência recíproca de pensamentos (Fleck, 1986, p. 149).

O conhecimento científico não é um produto de indivíduos isolados, mas sim o resultado da atividade de um coletivo de pensamento (Fleck, 1986, p. 150).

Assim como Lakatos e Fleck reconhecem a importância da comunidade científica na produção do conhecimento, os grupos de pesquisa do TSP também operam como comunidades que compartilham objetivos comuns e enfrentam desafios específicos do campo. A competição entre diferentes abordagens para resolver o TSP reflete a dinâmica destacada por Lakatos, enquanto a influência do ambiente social nos grupos de pesquisa ecoa as ideias de Fleck sobre o Coletivo de Pensamento.

Atualmente, diferentes grupos de pesquisa trabalham em modelos para resolver o TSP, cada um com sua própria abordagem e hierarquia de teorias. Alguns grupos se concentram em algoritmos heurísticos, enquanto outros exploram técnicas de inteligência artificial e otimização. O Coletivo de Pensamento no campo da otimização influencia as escolhas dos grupos de pesquisa. A busca por soluções cada vez mais eficientes para o TSP, impulsionada por aplicações em logística e outras áreas, molda o estilo de pensamento dos pesquisadores.

Na trajetória da história da termodinâmica, presenciamos uma série de competições entre distintos programas de pesquisa. No final do século XVIII e início do século XIX, o programa de pesquisa calórico era a teoria dominante para explicar os fenômenos

termodinâmicos. Para Thomson: “A teoria do calórico foi a primeira teoria científica do calor, e reinou suprema por mais de um século” (Thomson, 1882, p. 102).

Essa teoria sustentava a concepção de que o calor consistia em um fluido imponderável denominado calórico, e era responsável por suas propriedades termodinâmicas. A competição entre distintos programas de pesquisa na história da termodinâmica, todos empenhados em desvendar os fenômenos termodinâmicos, marcou o avanço da disciplina na construção do conhecimento científico que perdura atualmente. Esta competição, intrinsecamente vinculada à natureza da ciência conforme delineada por Lakatos, emergiu como um influente propulsor para o progresso contínuo dessa área, deixando uma marca duradoura na construção do conhecimento científico.

No final do século XIX e início do século XX, o modelo do calórico foi gradualmente substituído pela teoria cinética dos gases. Sobre isso, Conde de Rumford afirmava que: “Parece-me extremamente difícil, se não impossível, conceber que qualquer corpo possa ser aquecido sem que haja movimento em suas partículas minúsculas” (Rumford, 1797, p. 100).

Essa mudança paradigmática foi impulsionada pela incapacidade do modelo do calórico em explicar satisfatoriamente novos fenômenos, como a relação entre temperatura e pressão em gases ideais. “A energia térmica é a energia cinética das moléculas.” (Boltzmann, 1898, p. 12).

4. MODELAGEM MATEMÁTICA, CHAVE PARA A COMPREENSÃO DE FENÔMENOS NATURAIS

Modelos experimentais em pesquisa consistem em representações simplificadas de eventos reais. O desenvolvimento de modelos é de suma importância na medida em que estes auxiliam na compreensão dos fenômenos naturais. Sua construção exige rigor e precisão, validada por meio de comprovações prévias e reconhecimento das limitações inerentes à representação da realidade (Ferreira *et al*, 2003, p. 2).

Os modelos matemáticos podem ser definidos como representações matemáticas ou descrições aproximadas de fenômenos ou sistemas do mundo real. Segundo Bertone *et al.* (2014, p. 7-8) modelagem matemática é "um processo de construção de um modelo matemático para representar um fenômeno real. Esse modelo é uma abstração do fenômeno, que captura as suas características essenciais".

O apontamento de Cifuentes e Negrelli (2007) é similar, afirmando que um modelo é uma representação de um recorte da realidade, formulado a partir de hipóteses e aproximações simplificadoras. De acordo com os autores, um modelo matemático é uma representação ou interpretação simplificada de uma situação problemática, ou uma interpretação de um fragmento de um sistema, segundo uma estrutura de conceitos mentais ou experimentais, expressas em linguagem matemática.

Para Biembengut e Hein (2011), o modelo é um meio utilizado para representar o conhecimento que será construído partindo de uma situação do mundo real. Esse processo envolve conceitos matemáticos e requer uma formulação do fenômeno. Esses modelos podem assumir várias formas, como equações, sistemas de equações ou algoritmos, e capturam as relações entre diferentes variáveis ou parâmetros em um determinado sistema.

No contexto educacional, a Modelagem Matemática (MM) oportuniza o envolvimento dos alunos em atividades de resolução de problemas e o desenvolvimento de suas habilidades de pensamento matemático. Ela representa uma ferramenta robusta e aplicável em várias áreas, incluindo física, biologia, economia e engenharias.

A incorporação das Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação (TDIC) como recurso pedagógico pode aprimorar a exploração e experimentação por parte dos alunos, abre um leque de possibilidades através destes recursos. Ao unir MM à programação de computadores, especialmente utilizando recursos visuais, os modelos desenvolvidos pelos

alunos podem adquirir uma dimensão mais vívida, acessível através de elementos como a visualização gráfica, por exemplo.

A ideia de que o conhecimento científico é construído, provisório e sujeito à revisão alinha-se com a visão lakatosiana da dinâmica da ciência, a qual afirma que a ciência não é um método único e universal para chegar à verdade, mas sim um sistema aberto de ideias em constante revisão (Lakatos, 1978). Assim, as teorias e modelos científicos são vistos como parte de um programa de pesquisa em evolução, sujeitos a refinamentos e revisões à medida que novas evidências e insights emergem.

O conhecimento científico, de maneira geral, busca explicar eventos e objetos físicos, químicos, biológicos etc., seguindo critérios específicos de aceitação. Esse processo envolve observações, experimentos, conceitos, modelos e teorias. Mesmo em disciplinas rotuladas como "exatas", os modelos são aproximativos e sujeitos a aprimoramentos.

A Física, como ciência da natureza, busca compreender e explicar os diversos fenômenos que nos cercam. Desde o movimento dos planetas até o comportamento da luz, a MM se apresenta como uma ferramenta fundamental para essa investigação. Através da construção de modelos matemáticos, podemos descrever e prever o comportamento de sistemas físicos com grande precisão.

Tal fato era perceptível desde séculos passados. Galileu Galilei afirmava que: "O livro da natureza está escrito em linguagem matemática." (Galilei, 1623, p. 23). Além disso, corrobora a visão de Planck, quase três séculos à frente, sobre a relação da física e os modelos matemáticos: "A física moderna é uma ciência hipotético-dedutiva, que constrói modelos matemáticos para explicar os fenômenos da natureza." (Planck, 1936, p. 12)

É possível exemplificar esta questão ao se olhar os processos termodinâmicos sob uma óptica matemática. A aplicação da MM à termodinâmica facilita o processo de aprendizagem, ao sistematizar os conceitos fundamentais por trás da transformação e propagação da energia. Através do desenvolvimento desses modelos matemáticos rigorosos, leis físicas e princípios termodinâmicos puderam ser traduzidos em equações.

4.1 Construção do Ciclo de Carnot, modelagem e programação

As máquinas térmicas, como motores a combustão e turbinas a vapor, há muito tempo fascinam a humanidade. Em 2024, comemora-se o bicentenário da publicação da obra célebre

"Reflexões sobre a Potência Motriz do Fogo", de Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832), um trabalho seminal que lançou as bases da termodinâmica moderna, responsável por impulsionar o desenvolvimento tecnológico que revolucionou o mundo, permitindo o funcionamento de inúmeros sistemas que utilizamos cotidianamente.

A Obra de Carnot abordou questões fundamentais sobre a conversão de calor em trabalho e estabeleceu um marco fundamental na história da termodinâmica. Sua relevância reside na definição do limite superior para a eficiência de máquinas térmicas, servindo como parâmetro para o desenvolvimento de diversos sistemas de conservação de energia.

Composto por quatro processos distintos, o ciclo de Carnot opera sob premissas idealizadas, fornecendo um modelo teórico para avaliar a performance de máquinas térmicas reais. Através da análise dos princípios termodinâmicos que regem cada etapa do ciclo, podemos compreender os fatores que influenciam sua eficiência e identificar as estratégias para otimizar o desempenho de tais sistemas.

Embora o ciclo de Carnot não seja viável na prática, devido à dificuldade de alcançar processos reversíveis, ele se configura como modelo para o estudo e o aprimoramento de tecnologias que dependem da conversão de calor em trabalho. Carnot (1824) concluiu que a forma descrita, era a maneira de se obter o máximo de rendimento, ainda que não seja integral, pois:

$$\eta = 1 - \frac{T_F}{T_Q},$$

η representando o rendimento, T_F a temperatura da fonte fria, T_Q da fonte quente, com um gás ideal realizando o ciclo. Ao estabelecer um limite teórico para a eficiência, esse modelo direciona as pesquisas e inovações no campo da termodinâmica, impulsionando o desenvolvimento de soluções mais eficientes e sustentáveis para a geração de energia.

Na primeira etapa do processo acontece a Expansão Isotérmica. O gás no sistema é expandido forma isotérmica, ou seja, a temperatura do gás permanece constante. Durante essa expansão, o gás realiza trabalho e absorve calor da fonte quente. Essa troca de calor ocorre em temperatura constante, seguindo a Lei de Boyle:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

sendo P_1 e P_2 as pressões inicial e final, e V_1 e V_2 os volumes inicial e final, respectivamente.

Na segunda etapa do processo acontece a Expansão Adiabática. O sistema é isolado termicamente, interrompendo a troca de calor com o ambiente. Sem a absorção de calor externo, a energia necessária para a expansão do gás vem da energia interna do sistema. Essa conversão de energia interna em trabalho resulta na diminuição da temperatura do gás. A expansão adiabática de um gás ideal segue a seguinte relação entre pressão e volume:

$$P_2 V_2^\gamma = P_3 V_3^\gamma$$

para a qual γ é o índice adiabático do gás.

Na terceira etapa, de Compressão Isotérmica, o sistema entra em contato com uma fonte de baixa temperatura (T_2) e libera calor Q_2 , a temperatura constante. A energia térmica transferida para a fonte de baixa temperatura é proveniente do trabalho realizado sobre o sistema durante a compressão. Similar à expansão isotérmica, a compressão isotérmica de um gás ideal segue a Lei de Boyle:

$$P_3 V_3 = P_4 V_4$$

Na última fase, acontece a Compressão Adiabática, com o sistema isolado termicamente, sem troca de calor com o ambiente. Este processo segue a mesma relação entre pressão e volume, dada por:

$$P_4 V_4^\gamma = P_1 V_1^\gamma$$

A eficiência de um ciclo de Carnot pode ser calculada utilizando a relação entre o trabalho realizado no ciclo e o calor fornecido pela fonte quente. A eficiência de um ciclo de Carnot é dada por:

$$Eficiência = \frac{Trabalho\ Líquido}{Calor\ Fornecido}$$

Nesse contexto, que é um ciclo teórico idealizado de uma máquina térmica, a eficiência pode ser expressa em termos das temperaturas dos reservatórios de calor com os quais a máquina interage. Embora o ciclo de Carnot forneça uma referência teórica importante para a eficiência de máquinas térmicas, as limitações práticas significam que as eficiências reais serão sempre inferiores àquelas previstas pelo ciclo de Carnot.

A eficiência do ciclo de Carnot estabelece um limite teórico máximo para qualquer máquina térmica operando entre duas temperaturas específicas. No entanto, essa eficiência ideal

não é alcançável na prática devido a várias irreversibilidades e perdas presentes em sistemas reais, como atrito, perdas de calor e não-idealidades nos materiais.

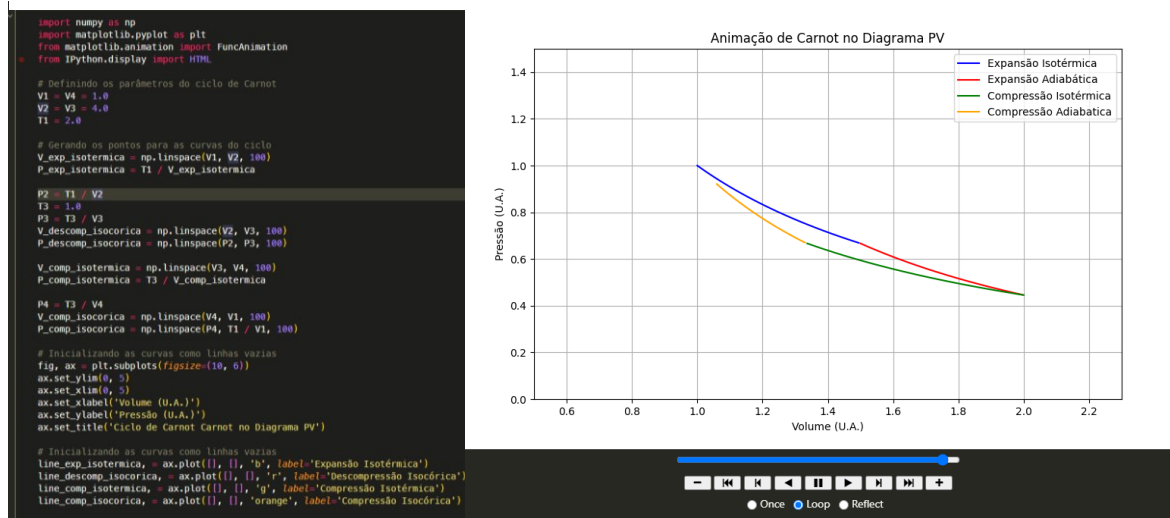
Neste cenário, acontece a modelagem matemática dos ciclos termodinâmicos, evidenciando a importância da representação matemática. A utilização de um método sistemático e quantitativo para investigar o comportamento térmico de sistemas complexos permite quantificar a transferência de calor e trabalho, bem como determinar a eficiência do ciclo e identificar os parâmetros que influenciam o desempenho do sistema.

A utilização de uma linguagem de programação ou de um software capaz de simplificar esse processo não apenas amplia consideravelmente as opções, mas também enriquece as possibilidades de recursos para conectar a aprendizagem por meio da modelagem matemática.

No decorrer da construção dos ciclos termodinâmicos, evidencia-se a mobilização de uma tríade educacional: a compreensão dos princípios físicos atua como alicerce para o desenvolvimento e aprimoramento dos modelos; a modelagem matemática como interface entre a teoria e a prática computacional, estabelecendo uma ponte para a implementação eficaz dos ciclos; e a programação de computadores desempenha o papel de ferramenta para traduzir os modelos matemáticos em simulações visuais e interativas.

Exemplifico este processo na Figura 1, na qual é apresentada a tríade educacional aplicada neste trabalho. Através da utilização da linguagem de programação Python e algumas bibliotecas, que serão detalhadas posteriormente, tornou-se possível criar uma animação representando o Ciclo de Carnot. Cada uma das curvas é apresentada de forma dinâmica, programada para ser incorporada ao site do produto educacional, enriquecendo a experiência de aprendizado com recursos visuais interativos.

Figura 2 - Código fonte da animação do ciclo de Carnot



Fonte: De autoria própria

Neste exemplo, a modelagem do ciclo de Carnot desempenha um papel construtivo essencial na compreensão dos ciclos termodinâmicos. Ao ser um ciclo ideal, simplifica o sistema e desconsidera fatores como atrito, oferecendo uma visão mais clara e conceitual.

O processo de modelagem dos demais ciclos termodinâmicos, como os ciclos Joule, Otto e Diesel, oferece uma perspectiva única para aprofundar nossa compreensão sobre as máquinas térmicas. Ao aplicar essa abordagem interdisciplinar, torna-se possível criar ferramentas avançadas para a simulação e otimização desses ciclos termodinâmicos, impulsionando não apenas a pesquisa científica, mas também abrindo caminho para inovações educacionais significativas.

Para a análise, um quadro comparativo entre os ciclos Joule, Otto e Diesel permite comparar as semelhanças e diferenças entre eles. Isto está realizado no Quadro I.

Quadro I - Comparativo dos Ciclos de Gases

Ciclo	Processo 1-2	Processo 2-3	Processo 3-4	Processo 4-1	Rendimento
Joule	Compressão Adiabática (aquecimento)	Expansão Isobárica (aquecimento)	Expansão Adiabática (resfriamento)	Compressão Isobárica (resfriamento)	$\eta = 1 - \left(\frac{T_1}{T_2}\right)$
Otto	Compressão Adiabática (aquecimento)	Aquecimento Isocórico	Expansão Adiabática (resfriamento)	Resfriamento Isocórico	$\eta = 1 - \frac{\Delta T_{1-4}}{\Delta T_{2-3}}$
Diesel	Compressão Adiabática (aquecimento)	Expansão Isobárica (aquecimento)	Expansão Adiabática (resfriamento)	Resfriamento Isocórico	$\eta = 1 - \frac{1}{\gamma} * \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}$
Carnot	Compressão Adiabática (aquecimento)	Expansão Isotérmica	Expansão Adiabática (resfriamento)	Compressão Isotérmica	$\eta = 1 - \left(\frac{T_2}{T_1}\right)$

Fonte: De autoria própria

O processo de modelagem dos demais ciclos termodinâmicos apresentados no Quadro I, considerados ideais, evidenciou padrões entre eles, simplificando a descrição funcional e a codificação de programas. Utilizamos a linguagem Python e o princípio de reuso⁴ de código, que facilita a geração de curvas e gráficos. Por exemplo, todos os ciclos do Quadro I iniciam-se com processos adiabáticos, deste modo, não foi necessário escrever uma função para cada um, mas uma única vez, e só ajustar os parâmetros.

No cerne deste trabalho, buscamos priorizar a integração cuidadosa dos pilares de programação e modelagem matemática ao incorporá-los aos ciclos termodinâmicos. O objetivo principal foi facilitar a compreensão desses ciclos, visualizando-os de maneira a construir uma base semiótica para a termodinâmica.

A aplicação de modelos matemáticos nos estudos de ciclos termodinâmicos, está intrinsecamente ligada à otimização matemática. Devemos reconhecer que modelos podem não capturar toda a complexidade da realidade com perfeição. Notadamente, em problemas como o Caixeiro Viajante, a busca por otimização se repete, pois possuem similaridades matemáticas que podem ser exploradas para otimizar soluções em ambos os campos.

⁴ Segundo Pressman (2016), o reuso de software é a incorporação de componentes de softwares preexistentes em um novo sistema.

4. 2 O Problema Do Caixeiro Viajante

Caixeiros-viajantes são profissionais que viajavam para vender produtos e serviços a clientes em todo o território nacional. Comercializavam uma vasta categoria de produtos, visitavam residências, empresas e lojas em cidades, vilarejos e fazendas. Alves (1979) apontam que os caixeiros viajantes viajavam longas distâncias e tinham habilidades de comunicação e persuasão para negociar seus produtos. A profissão diminuiu com o advento do comércio eletrônico e das lojas de departamento, embora persista em algumas regiões.

Figura 3 - Vendedor Caixeiro



Fonte: Berenice Abbott. disponível em: <https://www.artnet.com/artists/berenice-abbott/traveling-tin-shop-brooklyn-DcTZiPsa2OVXkeci9734A2>.

De acordo com Viera Filho (2022), há uma imagem um pouco folclórica em nosso imaginário quando pensamos em caixeiros-viajantes, descrita como homens de meia idade, andando de cidade em cidade, de lugarejo em lugarejo, montados a cavalo ou a pé, carregando suas bolsas e malas. Hilda Flores detalha, a seguir, a figura dos caixeiros:

O caixeiro viajante vestia bota de cano alto, conhecida por Musterreiter Stüfel, provida de grandes esporas, bombacha, mais apropriada para semanas de cavalgadas, camisa xadrez, lenço ao pescoço e chapéu de aba larga para proteção contra a canícula, além do poncho ou capa de chuva - que A. J. Renner logrou impermeabilizar na década de 1880, especialmente para o caixeiro viajante, que também ele foi. Completava a indumentária o relho de cabo curto na mão direita e guaiaca na cintura, onde guardava o dinheiro e a pistola (Flores, 2000 *apud* Mühlen, 2018, p. 125).

A breve menção histórica deste problema clássico neste trabalho, revela uma intersecção intrigante entre a experiência humana e a resolução de desafios complexos, presentes tanto na

história quanto na matemática. Ao considerar não apenas os aspectos matemáticos inerentes, mas também os elementos culturais, históricos e da profissão, alcançamos uma compreensão mais abrangente e integrada do tema. Este famoso ambulante, há muito tempo, capturou nossa imaginação, sendo uma figura proeminente em histórias, livros, peças e canções (Applegate, 2007), ofereceu também sua contribuição cultural.

A analogia entre os desafios de locomoção do vendedor e a otimização matemática cresceu, devido à sua similaridade estrutural, versatilidade e acessibilidade. Sua aplicabilidade em áreas como logística, transporte e biologia reforçaram sua relevância como modelo de otimização, enquanto a familiaridade com a ideia do viajante em busca da rota mais eficiente facilita sua compreensão e a motivação da busca por técnicas cada vez rápidas de solução.

Pairam algumas incertezas sobre a origem formal do problema do TSP (Applegate, 2007). É possível encontrar alguns trabalhos semelhantes, como o do matemático irlandês William Rowan Hamilton, formalizado pela primeira vez no século XIX. Na Figura 3, é possível ver um exemplar do jogo Dodecaedro de Hamilton, equivalente ao TSP com 12 cidades, cujo objetivo era percorrer cada face do objeto e retornar ao ponto de partida.

Figura 4 - Jogo Icosiano, exemplar do dodecaedro de Hamilton.



Fonte: Universidade de Waterloo CA Disponível em: <https://www.math.uwaterloo.ca/tsp/history/>

Outro pesquisador influente que tem seus trabalhos citados como pioneiros no assunto é o matemático norte americano Merrill Meeks Flood (1956), cujo trabalho teceu uma análise sobre a complexidade de uma solução exata do TSP, demonstrando que problema do vendedor ambulante pertence à classe de problemas do tipo NP (Nondeterministic Polynomial). A primeira solução foi proposta por Dantzig, Fulkerson e Johnson (1954), sendo a partir daí, tema de inúmeras teses e artigos pelo mundo.

A complexidade de uma solução para o TSP, classifica-o como um problema NP-Completo. Esse é um tipo de problema de decisão, em que a verificação de uma solução candidata pode ser realizada em tempo polinomial, mas não há algoritmo conhecido que possa encontrar uma solução ótima nesse mesmo tipo de tempo, para todas as suas instâncias (Applegate, 2007).

Em 1972, o cientista da computação Richard Karp demonstrou que o TSP pertence à classe dos problemas NP-Completo. Isso implica que, se houver um algoritmo polinomial para resolver o TSP, então, existe um algoritmo polinomial para resolver qualquer problema do tipo NP (Karp, 1972). Até o momento, nenhum algoritmo polinomial conhecido foi desenvolvido para resolver qualquer problema NP-completo.

Para ilustrar a complexidade do TSP, considere um cenário hipotético no qual um candidato político deseja percorrer as 26 capitais brasileiras para promover sua campanha. Nessa situação, emergiriam notáveis $1,5511 \times 10^{25}$ possíveis itinerários distintos. A essência da complexidade reside em sua natureza exponencial, com o número de soluções possíveis aumentando de forma fatorial à medida que o número de cidades cresce.

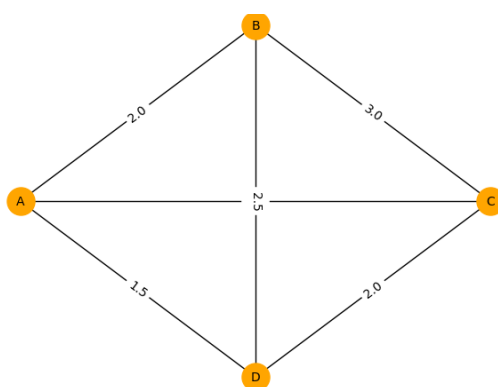
Deste modo, para cada conjunto de N cidades, existem N! possibilidades de um roteiro. Isso ocorre porque, para cada cidade, podemos escolher qualquer uma das cidades restantes como a próxima parada. Se fixarmos a cidade inicial, então existem N-1 cidades restantes, e cada uma delas pode ser a próxima parada. Isso significa que há N-1 possibilidades para a segunda parada, N-2 possibilidades para a terceira parada, e assim sucessivamente. No total, existem N! possibilidades de planejar um roteiro.

Apesar de sua formulação aparentemente simples, TSP é um desafio sobre o qual não há uma solução abordagem analítica direta de solução. A explosão de combinações possíveis torna-o um problema difícil solução, mesmo para conjuntos de cidades relativamente pequenos. O número de possíveis combinações cresce de forma fatorial, acrescentando ainda mais complexidade ao desafio.

O desafio do Caixeiro Viajante é expresso matematicamente usando a teoria de grafos⁵, buscando encontrar a rota mínima que passa por cada nó uma vez. Neste cenário, um vendedor procura otimizar a rota que percorre todos os pontos de um grafo (cidades), começando e terminando em um nó específico.

Na Figura 5, é possível observar um grafo completo; cada vértice está conectado a todos l/os outros e as arestas representam as distâncias entre as cidades. Tratamos aqui de um TSP chamado simétrico, com as distâncias entre quaisquer dois pontos sendo as mesmas, e o custo de ir de A para B o mesmo que de B para A.

Figura 5 - Representação de um grafo completo com quatro cidades



Fonte: De autoria própria

O Problema do Caixeiro Viajante é amplamente utilizado e se destaca entre os problemas mais reconhecidos na área de otimização combinatória, especialmente nos campos de logística, transporte, roteamento e manufatura. Por esse motivo, continua a desafiar a pesquisadores em busca de soluções eficazes em uma variedade de cenários. Os métodos de resolução do TSP podem ser divididos em duas categorias: métodos exatos e heurísticos.

Os métodos exatos são técnicas e algoritmos que têm a premissa de encontrar a melhor rota possível para o problema em questão. Conforme Dumitrescu e Stützle (2003) afirmam, um algoritmo é considerado exato quando consegue encontrar a solução ótima do problema em um tempo de execução finito. Esses métodos têm como objetivo a busca pela solução ótima do TSP, que consiste em determinar o caminho mais curto que visita todas as cidades exatamente uma vez e retorna ao ponto de partida.

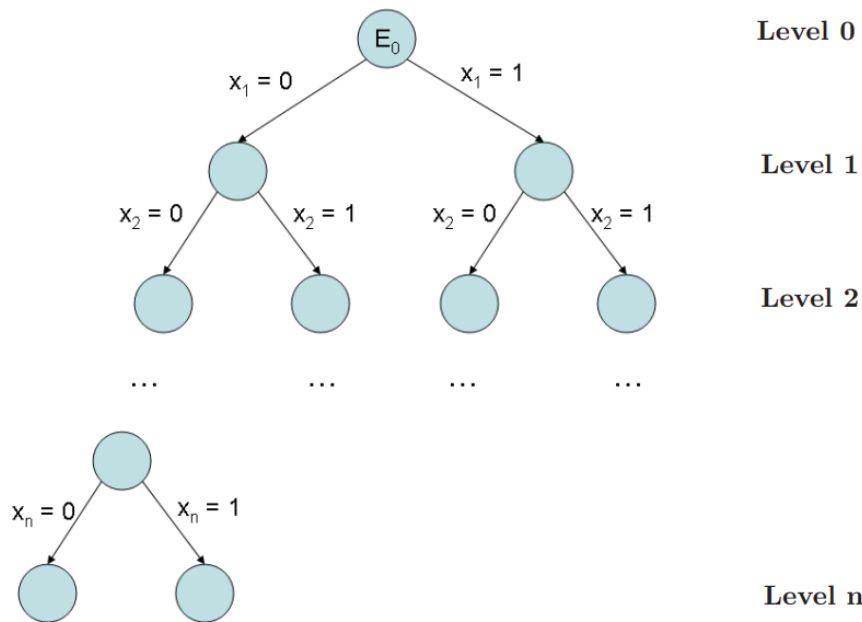
⁵ A teoria dos grafos é um campo da matemática que estuda as relações entre objetos distintos através de estruturas chamadas de grafos. Um grafo consiste em um conjunto de vértices (também chamados de nós) conectados por arestas (também chamadas de arcos ou linhas). Esses grafos são usados para modelar uma variedade de situações do mundo real, como redes de comunicação, sistemas de transporte, redes sociais, circuitos elétricos, entre outros.

Um dos métodos exatos mais comuns e até intuitivos para resolver o TSP é conhecido como Busca Exaustiva. Esse método envolve uma abordagem que consiste na minuciosa avaliação de todas as possíveis soluções até encontrar uma ótima. Em sua aplicação, todas as combinações são consideradas de forma exaustiva a fim de compará-las e, finalmente, determinar a solução mais adequada.

Outro método, denominado Branch & Bound (BB), atua dividindo o espaço de busca em subconjuntos menores, e resolve cada um deles de forma recursiva. Bispo (apud Land; Doig, 1960) aponta que, ao longo do processo, o método utiliza esse limite para eliminar ramos da árvore de busca que já excedem o valor encontrado até o momento, economizando tempo computacional. Novamente, ele divide os subconjuntos, obtendo outros menores que os primeiros, cada um representando uma escolha de rota. A partir deste ponto, ele compara aqueles que têm um melhor resultado e define o melhor como um novo limite, e descartando os demais.

Esse processo se repete até que não seja mais possível obter um novo limite, ou seja, um parâmetro melhor. Ao integrar essas técnicas, o BB não apenas evita a avaliação exaustiva de todas as soluções possíveis, mas também trabalha de maneira inteligente para focar em áreas mais promissoras, contribuindo para uma abordagem eficiente e eficaz na resolução de problemas desta natureza.

Figura 6 - Ramificação binária do método Branch and Bound.

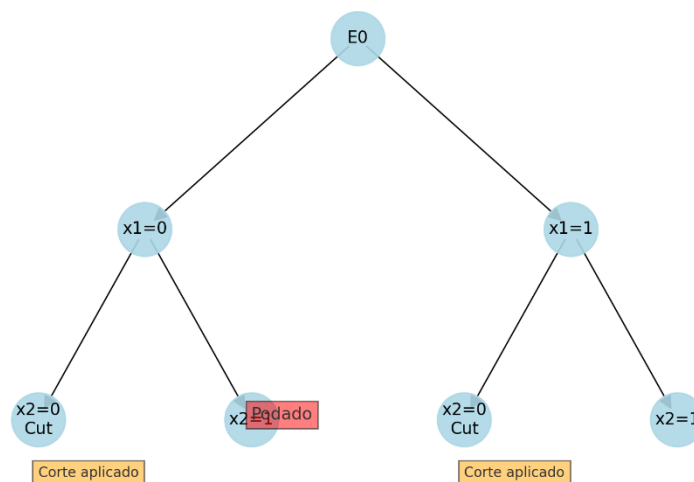


Fonte: Methods and Models for Combinatorial Optimization. Disponível em
<https://www.math.unipd.it/~luigi/courses/metmodoc/m06.pli.en.pdf>

Na figura 6, há uma representação de todas as possíveis soluções para um problema de otimização. Cada nó da árvore representa um estado parcial ou completo do problema. A raiz da árvore (nó no nível 0) representa o estado inicial E_0 . A partir deste nó, o problema é dividido em subproblemas menores por meio de decisões binárias formando novos nós nos níveis subsequentes.

O método Branch and Cut (BC) é uma estratégia eficaz na resolução de problemas de otimização combinatória, conforme exposto por Gouvêa *et al.* (2006). Essa abordagem combina heurísticas como a aplicação de planos de corte, com o enfoque preciso do Branch and Bound. O BC tem início ao criar uma árvore de busca, cada nó representando uma solução parcial do TSP e realizando ramificação para dividir os nós em subproblemas menores. Durante esse processo, o algoritmo utiliza cortes, obtidos por meio de desigualdades válidas ou relaxações lineares, para eliminar soluções inviáveis ou sub-ótimas, como demonstrado por Rendl *et al.* (2010).

Figura 7 - Método Branch and Cut



Fonte: De própria autoria

A figura 7 demonstra o BC aplicado a um problema de otimização realizado através do processo de poda (cut), onde nós que não podem levar a uma solução melhor são descartados, como indicado pelo nó "Podado". Os cortes ajudam a excluir subproblemas inviáveis, enquanto a poda reduz o número de subproblemas a serem explorados, tornando o método mais eficiente.

No nível 0, temos o nó raiz E_0 , representando o problema original. A partir deste nó, o problema é dividido em subproblemas menores através de decisões binárias, formando uma árvore de decisão. No nível 1, as decisões $x_1 = 0$ e $x_1 = 1$ geram dois subproblemas. No nível 2, novas decisões $x_2 = 0$ e $x_2 = 1$ criam mais subproblemas. Os nós apresentam cortes (indicados por "Cut"), que são restrições adicionais aplicadas para eliminar soluções fracionárias e fortalecer as restrições do problema.

A abordagem do BC trata o problema de forma iterativa, refinando continuamente a estratégia para buscar a otimização. Em cada iteração, o algoritmo concentra-se nas regras não satisfeitas, formulando-as como planos de corte incorporados ao modelo e restringindo o espaço de busca. Os planos de corte desempenham papel fundamental, eliminando soluções inviáveis e contribuindo para aprimorar a qualidade das soluções aproximadas. Esses cortes atuam como filtros, permitindo que o algoritmo se concentre em trajetórias mais promissoras, otimizando a eficiência do processo de resolução.

É relevante destacar que, apesar da garantia de soluções ótimas conferida por abordagens exatas, como o BC, essa certeza frequentemente está associada a uma alta carga computacional. A convergência entre abordagens exatas e heurísticas surge como estratégia

eficaz para reduzir a complexidade computacional, assegurando a obtenção de melhores resultados.

A fim de encontrar soluções viáveis para instâncias grandes do problema, uma variedade de abordagens algorítmicas e heurísticas foram desenvolvidas ao longo do tempo. Conforme observado por Trinidad (apud Hillier e Lieberman, 2010), heurísticas são técnicas desenvolvidas com o intuito de descobrir soluções para problemas, empregando abordagens intuitivas que geram soluções que podem não ser ideais, mas são viáveis, especialmente diante de restrições de tempo e processamento. O que se espera é que, dadas as restrições do problema, a solução encontrada seja viável e satisfaça as necessidades do usuário. Rayward-Smith et al (1996, p. 5) define que:

Uma heurística é uma técnica que busca boas soluções, isto é, soluções próximas do ótimo, com um custo computacional razoável sem garantir a otimalidade, e possivelmente a viabilidade. Inoportunamente pode não ser possível determinar quão próximo uma solução heurística em particular está da solução ótima.

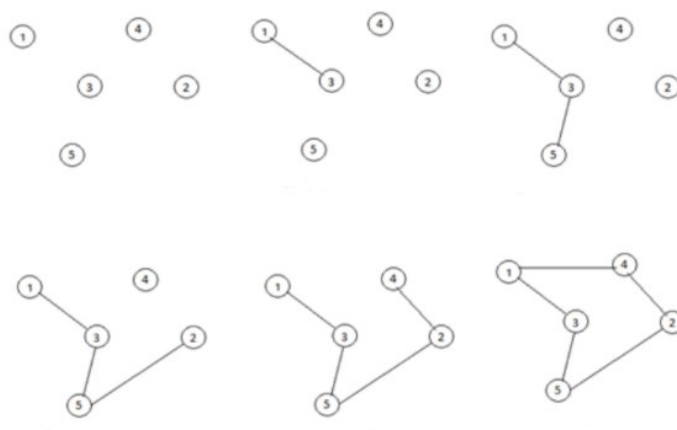
Segundo Trinidad (2022), a origem deste conceito tem sua raiz na expressão grega "heuriskein," que significa localizar e é aplicada na área de otimização para descrever uma categoria de algoritmos utilizados na resolução de desafios (Medoza, 2017). Existem algumas diferenças entre esses dois meios de resolução não exatos do TSP. Métodos heurísticos são suficientes para problemas relativamente simples, e se baseiam em regras práticas ou intuições para encontrar soluções aproximadas, sem garantir a solução ótima, porém com boas soluções de forma rápida. As meta-heurísticas são abordagens mais abstratas e genéricas. Elas não dependem de regras práticas específicas, mas sim de estruturas de busca mais amplas e adaptáveis. Essas abordagens, em regra, oferecem maior flexibilidade e potencial para encontrar soluções de alta qualidade, mesmo em instâncias complexas do TSP.

São amplamente usadas em otimização combinatória, programação linear, roteamento, design de redes e outros domínios. A flexibilidade e adaptabilidade das meta-heurísticas tornam-nas uma escolha valiosa para resolver problemas complexos, muitas vezes em situações em que métodos determinísticos tradicionais podem ser ineficazes. Elas são especialmente úteis quando a busca por soluções exatas é inviável devido ao tamanho ou à complexidade do problema, pois são capazes de desempenhar um papel essencial na otimização.

A heurística do K-Nearest Neighbors (KNN) Evelyn Fix e Joseph Hodges (1951), conhecida como "Vizinho Mais Próximo", tem por princípio estabelecer um ponto de partida no grafo que representa as cidades a serem visitadas. A partir desse ponto de partida, o algoritmo

seleciona o próximo vértice (ou cidade) que tem o menor peso, ou seja, a menor distância para o vértice atual. A Figura 8 ilustra a introdução dos pontos nessa heurística.

Figura 8 - Heurística KNN - Passo a passo ilustrativo de inserção de pontos.



Fonte: De autoria própria

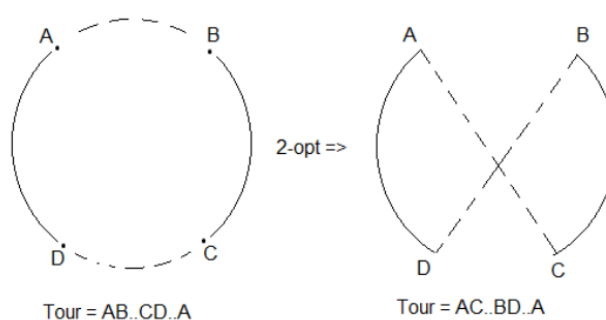
Na Figura 7, podemos observar que o processo de seleção do próximo vértice é repetido iterativamente até que todos os vértices mais próximos tenham sido adicionados à solução. Esse procedimento segue a lógica de minimização das distâncias, evitando repetições. Ao final do processo, o ponto inicial (cidade de partida) é reintroduzido ao roteiro para completar o circuito, assegurando que a solução final seja um circuito Hamiltoniano. Vale ressaltar que o vértice escolhido não deve ter sido visitado anteriormente, visando evitar redundâncias e garantir a integridade do roteiro.

É importante observar que, o KNN é um método de aprendizado que não define um modelo ou uma fórmula, em vez disso, ele simplesmente encontra os k registros mais parecidos com o ponto que queremos categorizar a partir do conjunto de dados disponíveis (Geron, 2019). É uma abordagem simples e intuitiva para resolver o TSP, e sua eficácia pode variar dependendo da natureza do conjunto de cidades e das distâncias entre elas.

Embora o KNN possa produzir soluções razoáveis em muitos casos, ele não garante a obtenção da solução ótima, uma vez que é uma heurística e não um algoritmo exato. Para problemas com grande número de cidades, podem ser necessárias técnicas mais avançadas para encontrar soluções próximas do caminho ótimo.

Outro método, o k -opt é uma técnica de otimização, frequentemente aplicada ao TSP, usada para aprimorar soluções iniciais aproximadas. A lógica do método é realizar modificações em uma solução existente, alterando as conexões entre as cidades visitadas. O valor de k se refere ao número de conexões que são modificadas em cada iteração, diferentes valores de k podem obter diferentes níveis de otimização. Seu processo de aplicação, em regra, envolve uma solução inicial para o TSP, que pode ser obtida por meio outras heurísticas, como por exemplo o KNN, ou ainda outras abordagens aproximadas. O valor de " k " é determinado, especificando quantas conexões devem ser modificadas em cada iteração. Valores comuns para k incluem 2-opt, modificando duas arestas de cada vez, ou 3-opt, modificando três arestas de cada vez, e assim por diante.

Figura 9 - Algoritmo K-OPT.



Fonte: Bispo 2018 apud ĐORĐEVIĆ 2008

As conexões a serem modificadas são escolhidas, e novas soluções são geradas, reorganizando os trajetos das cidades de acordo com as mudanças. A qualidade das novas soluções é avaliada, com base em critérios como a distância total percorrida no trajeto. Se uma das novas soluções for melhor, ou seja, reduzir a distância do trajeto, ela é aceita como a nova solução. Caso contrário, a solução anterior é mantida. O processo é repetido por um número determinado de iterações ou até que não seja possível encontrar uma solução melhor. À medida que o valor de k aumenta, a complexidade do método também aumenta, e o tornar menos eficiente para problemas de larga escala, e como nos demais métodos, não há garantia de se encontrar a rota mais otimizada. Na Figura 9 é possível visualizar os “cortes” realizados pelo algoritmo.

O algoritmo Ant Colony Optimization - ACO, em tradução livre, Otimização por Colônia de Formigas, originou-se pela observação de colônias de formigas reais, que

posteriormente foram incorporadas as técnicas de busca local (Dorigo *et al*, 1997). Esta implementação originou-se nas décadas de 1990 e 2000 e tem como referência os trabalhos de: Marco Dorigo e seu trabalho pioneiro na área das formigas, e António Colorni, Vittorio Maniezzo, e outros autores, que desenvolveram o algoritmo Ant System (Dorigo *et al*, 1996), uma das primeiras implementações de ACO.

O ACO utiliza uma metodologia que imita o comportamento de formigas reais para resolver problemas de otimização. Usando uma população de formigas virtuais, o ACO constrói soluções passo a passo, escolhendo os próximos passos com base em feromônios deixados nas rotas (Dorigo *et al*, 1996). O feromônio é uma substância que as formigas reais deixam para marcar o caminho de volta ao ninho.

No contexto do ACO, o feromônio representa a probabilidade de uma formiga visitar um nó. Conforme as formigas exploram, feromônios guiam o algoritmo para encontrar soluções de alta qualidade ao longo do tempo. A evaporação de feromônios e parâmetros de influência controlam a exploração do espaço de busca, tornando-o eficaz na resolução de problemas de otimização.

No contexto do TSP, à medida em que as formigas exploram diferentes caminhos, elas depositam feromônios nas arestas percorridas, fortalecendo as rotas mais curtas. Cada formiga constrói uma solução candidata passo a passo, escolhendo a próxima cidade com base na probabilidade influenciada pelos feromônios depositados nas arestas do grafo (Dorigo; Birattari; Stutzle; 1996). O controle da exploração do espaço de busca é regido pela taxa de evaporação dos feromônios e pelos parâmetros de influência.

Em síntese, o ACO, inspirado pelo eficiente comportamento das formigas reais, é uma notável metaheurística para resolver desafios de otimização, incluindo o Problema do Caixeiro Viajante. Sua aplicação tem proporcionado uma abordagem inovadora e adaptável na busca por soluções de alta qualidade, ao mesmo tempo que otimiza o desempenho computacional e mantém o equilíbrio entre a exploração do espaço de busca.

O método Recozimento Simulado (SA) - Simulated Annealing –, é uma metaheurística de otimização global, implementada de forma simples, através de busca local proposta por Metropolis *et al*. (1953). Eles observaram que a natureza minimiza a energia das estruturas cristalinas durante o recozimento para eliminar defeitos na estrutura atômica. Kirkpatrick *et al*. (1983) estenderam esse método de otimização termodinâmica para resolver problemas de otimização combinatória. O algoritmo é fundamentado na ideia de resfriamento simulado, um

processo físico em que um metal é aquecido e, em seguida, resfriado gradualmente, de modo que alcance um estado de equilíbrio. Na literatura é possível encontrar o nome de recristalização para este processo (Secchi, 2002).

Na implementação do SA, o algoritmo começa com uma solução inicial aleatória para o problema. Em seguida, itera, gerando novas soluções a partir da solução atual. As novas soluções são criadas por meio de perturbações, que por sua vez, podem ser definidas como pequenas alterações promovidas por meio de operações de swap, invertendo ou trocando as posições das cidades. O algoritmo aceita ou rejeita uma nova solução tendo como referência a função de temperatura, que controla a probabilidade de aceitar uma solução pior do que a solução atual.

A temperatura inicial controla a probabilidade de aceitar soluções piores e diminui ao longo do tempo, de acordo com um regime predefinido, simulando o resfriamento do material. A qualidade de uma solução é medida por uma função de custo, que é uma medida da distância total percorrida pelo vendedor viajante. Aceitar soluções piores a uma determinada temperatura permite a exploração de diferentes regiões do espaço de busca, enquanto a diminuição gradual da temperatura direciona o algoritmo para a convergência.

A eficácia do SA no TSP está densamente ligada à configuração de seus parâmetros, como a temperatura inicial, a taxa de resfriamento e a estratégia de perturbação. Ajustar esses parâmetros de maneira adequada é um desafio, mas estudos empíricos e otimização desses valores podem resultar em soluções de alta qualidade para o TSP.

5. METODOLOGIA

5.1 A importância da produção de conteúdo educacional

O produto educacional deste programa de mestrado é o desenvolvimento de um site hospedado no endereço: domicroaomacro.github.io. Entendemos que no cenário educacional contemporâneo, a criação de um site assume uma relevância como meio de ensino, especialmente no contexto predominante das redes sociais. A interconexão digital oferecida por plataformas online proporciona um ambiente propício para a disseminação de conhecimento, alcançando um público vasto e diversificado.

A produção de um livro acadêmico impresso é um empreendimento intelectual valioso, cujo alcance pode ser significativamente ampliado com a criação de um site dedicado a ele. Isso possibilita uma comunicação mais eficaz com o leitor. Além do mais, a ideia deste produto de mestrado não apenas enriquece a experiência do estudante, como também, estende o alcance do livro e permite uma interação mais profunda com o público.

Um site tem a capacidade de oferecer o aprimoramento da experiência do leitor ao disponibilizar materiais complementares, além de recursos como *blog*, para assuntos abordados de forma indireta, promovendo uma abordagem mais dinâmica e interativa. Ao ampliar o alcance do livro, ele agiliza o acesso, o que contribui para a democratização do conhecimento.

Em meio à vastidão de informações disponíveis na internet, a orientação correta dos estudos pode ser uma tarefa complexa. A abundância de informações online, embora valiosa, muitas vezes carece da estrutura e credibilidade necessárias para direcionar efetivamente o aprendizado. Nesse contexto, a relevância de materiais provenientes do meio acadêmico proporciona uma forma segura e confiável para construção de um conhecimento sólido.

As páginas de busca usuais enfrentam desafios ao tentar retornar os resultados relevantes de uma busca. Isso ocorre por uma série de razões, incluindo a complexidade dos algoritmos de classificação, limitações de indexação e a dinamicidade da internet. O grande volume de informações disponíveis online torna difícil para os mecanismos de busca rastrear e indexar todas as páginas da web de forma rápida, hierárquica e eficaz (Isotani, 2015).

Essa limitação pode ser atribuída a múltiplos fatores, como a relevância percebida do conteúdo, a qualidade do website e a precisão dos algoritmos (Colpo, 2014). Páginas que não

são facilmente acessíveis ou que possuem baixa autoridade, podem ser menos propensas a serem indexadas pelos motores de busca, levando a sua omissão nas páginas de resultados.

Percebemos, então, a importância do desenvolvimento de estratégias de otimização dos mecanismos citados, denominados Search Engine Optimization - SEO, por parte dos proprietários de websites, bem como a necessidade de os usuários explorarem diferentes fontes e métodos para encontrar informações específicas. Brian Dean, define SEO como um processo de otimizar seu site para que ele seja facilmente encontrado e indexado pelos mecanismos de busca (Brian Dean, 2015).

Motores de busca alternativos ou especializados podem ser úteis em certos casos, especialmente ao rastrear informações mais específicas ou nichos. Outra opção viável é criar redes sociais para o produto, para alcançar um público específico interessado e, aumentar sua indexação em sites de busca.

5.2 Desenvolvimento do produto educacional

5.2.1 Python, Jupyter Notebooks e outras bibliotecas

Para desenvolver o produto educacional empregamos algumas ferramentas e técnicas que me permitiram adotar uma metodologia capaz de integrar tanto os aspectos técnicos quanto pedagógicos. Inicialmente procurei definir alguns conceitos chave da termodinâmica a serem abordados e que seriam relevantes para o aprendizado dos usuários.

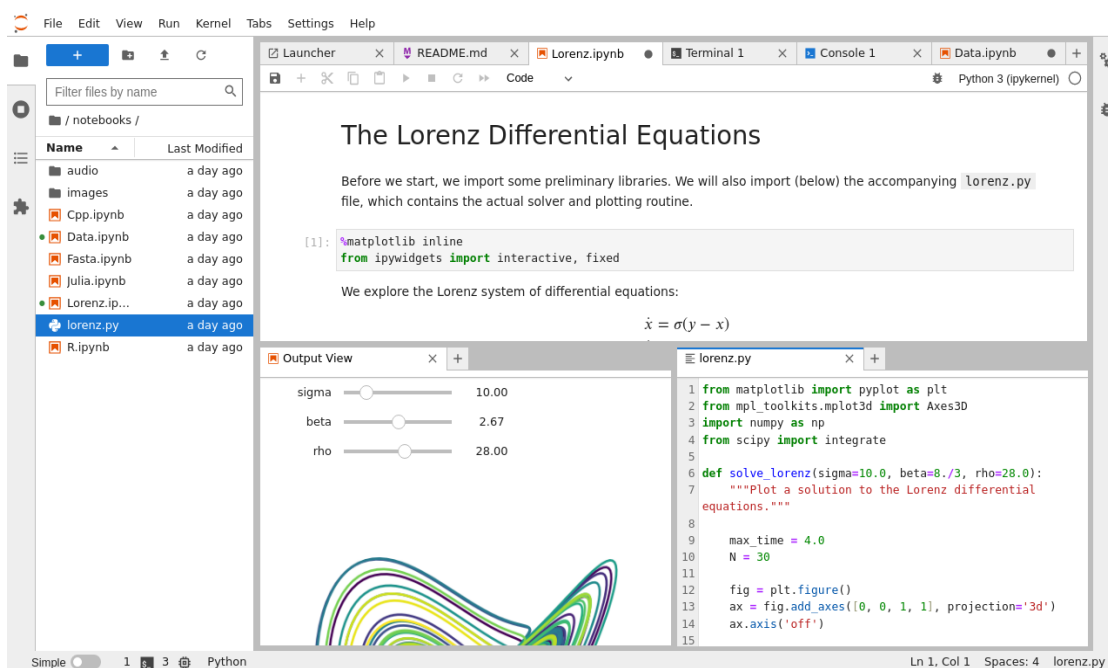
Os ciclos termodinâmicos representam o comportamento de sistemas em diferentes condições de temperatura, pressão e volume. Através do seu estudo, é possível entender como a energia é transferida entre os sistemas e o ambiente, e como essa transferência afeta as propriedades físicas através da realização de trabalho. É importante salientar que este site não é um produto acabado. Intentamos que seu conteúdo seja atualizado e adaptado para o contexto do ensino em questão. A intenção é que seu conteúdo seja continuamente atualizado e adaptado para melhor atender ao contexto específico do ensino, mantendo-se relevante e alinhado às demandas educacionais em constante evolução.

Utilizamos a linguagem de programação Python⁶ para desenvolver scripts e elementos interativos, bem como para a construção do site. A primeira consistiu em um conjunto de

⁶ Python, é uma linguagem de programação reconhecida por sua sintaxe clara, destaca-se no ambiente acadêmico devido à facilidade de implementação de algoritmos e à disponibilidade de recursos especializados. Sua vasta

*Jupyter Notebooks*⁷ contendo gráficos com animações de alguns ciclos. *Jupyter Notebooks* são cadernos interativos para programação e análise de dados. Imagine-os como cadernos digitais onde se pode combinar textos explicativos, códigos de programação, gráficos e resultados, tudo em um só lugar. A Figura 10 ilustra um modelo destes cadernos.

Figura 10 - Representação gráfica de uma interface do JupyterLab.



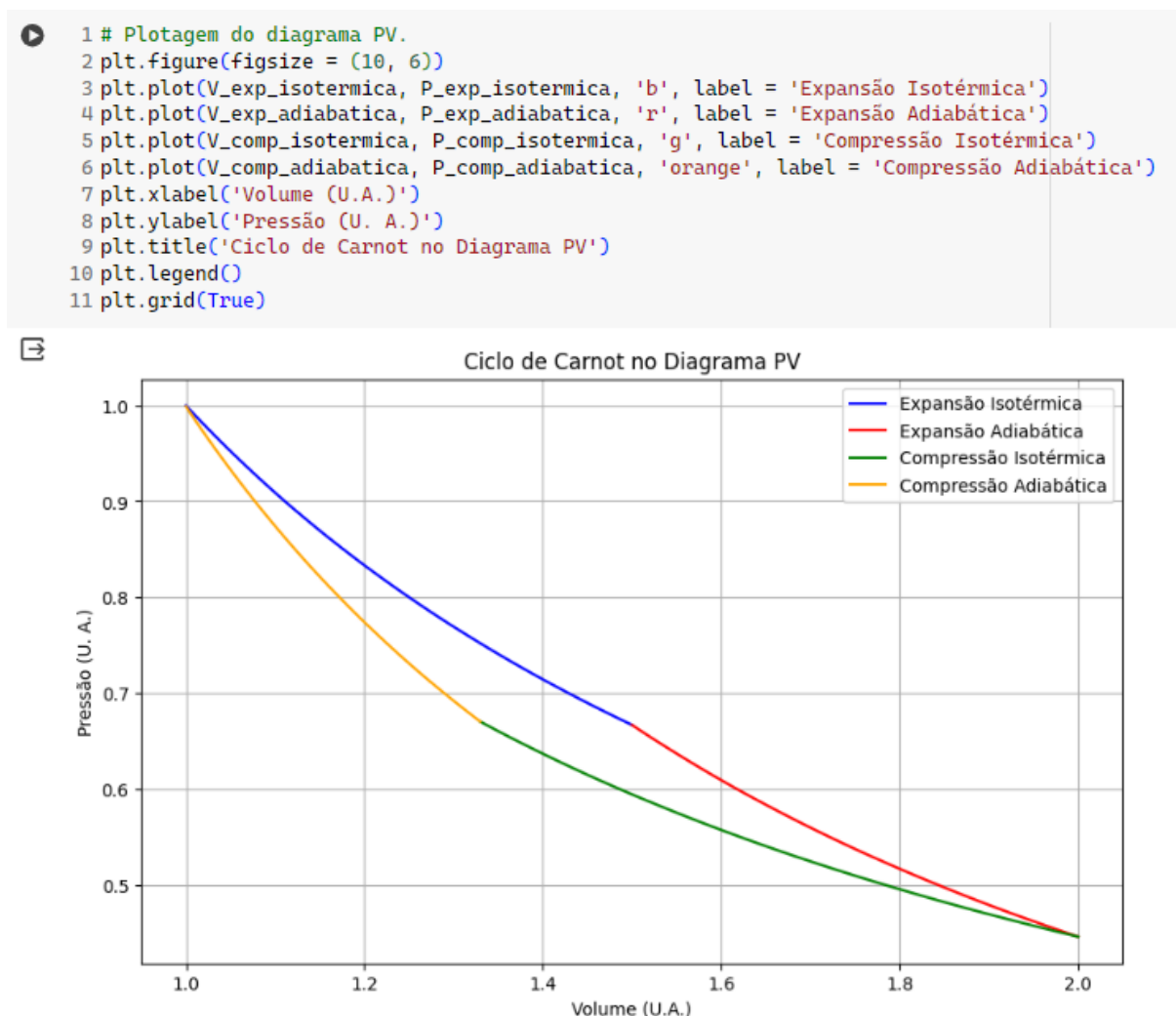
Fonte: Disponível em <https://docs.jupyter.org/>

A singularidade dos Jupyter Notebooks reside na possibilidade de executar cada célula de forma independente, abrindo caminho para uma abordagem passo a passo para programação e análise de dados. Essa característica é particularmente valiosa ao lidar com conjuntos de dados, pois os usuários podem explicar seu raciocínio, incorporar gráficos visuais e compartilhar códigos funcionais, tudo dentro do mesmo documento.

⁷ O Jupyter Notebook é o aplicativo web original para criação e compartilhamento de documentos computacionais. Ele oferece uma experiência simples, simplificada e centrada em documentos. Fonte: Jupyter.org

Essa flexibilidade pode ser ainda otimizada por meio dos serviços em nuvem, como o *Google Colab* (vide Figura 11). Essa plataforma possibilita a utilização dos Jupyter Notebooks sem a necessidade de instalação direta, removendo assim barreiras de entrada e viabilizando a colaboração e execução de projetos em ambientes de computação em nuvem.

Figura 11 - Recorte de código para plotagem de gráfico



Fonte: De autoria própria

Com a utilização de notebooks e da linguagem Python, foi possível criar gráficos dos ciclos e suas animações, sendo essencial o emprego de bibliotecas dedicadas a cálculos matemáticos, como o *NumPy* e o *Matplotlib*. Essas ferramentas facilitaram a construção de soluções eficientes e flexíveis para manipulação de dados em geral. Todos os códigos deste trabalho podem ser acessados neste link: <https://github.com/doMicroAoMacro>.

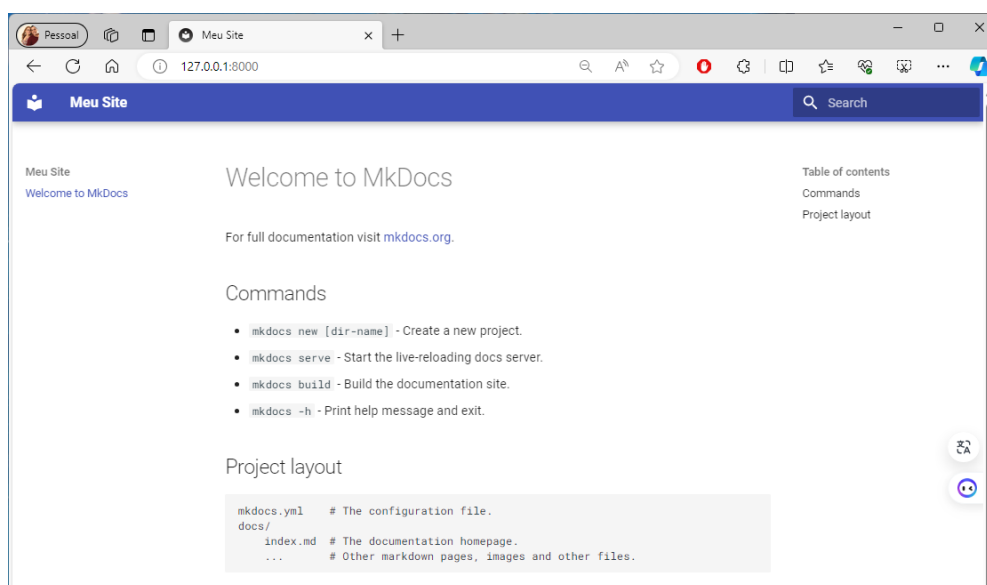
O *NumPy*, é uma biblioteca de computação numérica em Python, capaz de proporcionar suporte a *arrays* multidimensionais (matrizes) e funções matemáticas avançadas para operações nesses *arrays*. Otimizado para operações numéricas, o *NumPy* utiliza implementações eficientes em C e Fortran, resultando em desempenho superior. A biblioteca também realiza operações vetorizadas, executadas de forma paralela e mais eficiente do que loops tradicionais.

Por sua vez, o *Matplotlib*⁸, lida diretamente com visualização de dados, é amplamente empregado na criação de diversos tipos de gráficos, desde estáticos até interativos, como histogramas, gráficos de barras e de dispersão. Destacado por sua flexibilidade, proporciona amplas opções de personalização, permitindo ajustes em cores, estilos e tamanhos. Ambas as bibliotecas, NumPy e Matplotlib, contribuem significativamente para a eficácia e qualidade na manipulação e representação visual de dados no ambiente Python.

5.2.2 Mkdocs-material e GitHub e GitHub-Pages

Após a conclusão da etapa de construção dos gráficos, deu-se início à segunda fase do desenvolvimento do produto, centrada na criação efetiva do site. O emprego do Mkdocs-material⁹ desempenhou um papel crucial nesse processo, simplificando o desenvolvimento do site e oferecendo uma apresentação visual coerente e de fácil implementação.

Figura 12 - Screenshot da página inicial de um site produzido com mkdocs.



Fonte: De autoria própria.

⁸ <https://matplotlib.org/>

⁹ O MkDocs-material é um gerador de documentação estática, comumente utilizado para a criação de sites de documentação limpos e fáceis de navegar a partir de arquivos escritos em Markdown, facilitando a organização e publicação de informações importantes sobre um projeto.

Após o processo de instalação e configuração, a produção de conteúdo para o site tornou-se um processo facilitado e dinâmico. A simplicidade da sintaxe Markdown oferecida pelo MkDocs-material facilitou a elaboração do material, sem a necessidade de lidar com um número maior detalhes técnicos. A estrutura intuitiva do MkDocs contribuiu para a organização eficiente do conteúdo. Em suma, a combinação do MkDocs-material com a facilidade de utilização do Python proporcionou uma experiência fluida para o desenvolvimento do produto, tornando-o não apenas visualmente atraente em um curto espaço de tempo. Além disso, a flexibilidade oferecida pela biblioteca possibilitou a incorporação de recursos pedagógicos interativos, como questionários e exercícios, enriquecendo ainda mais a experiência de aprendizado para os usuários.

Após concluir a fase inicial do desenvolvimento do site e garantir que uma versão preliminar estivesse operacional em ambiente local, o próximo passo foi a integração com o GitHub. Além de fornecer uma cópia de segurança para o projeto, essa plataforma tornou-se instrumental para a exposição global do site. O GitHub é uma ferramenta para o armazenamento e compartilhamento de códigos de programação em todo o mundo. Trata-se de uma plataforma central de desenvolvimento de software, capaz de oferecer um ambiente colaborativo e ferramentas essenciais para o controle de versão e colaboração descentralizada. Fundado em 2008 por Chris Wanstrath, PJ Hyett e Tom Preston-Werner, o GitHub surgiu como uma solução baseada em Git¹⁰ para tornar o desenvolvimento de software mais acessível e social.

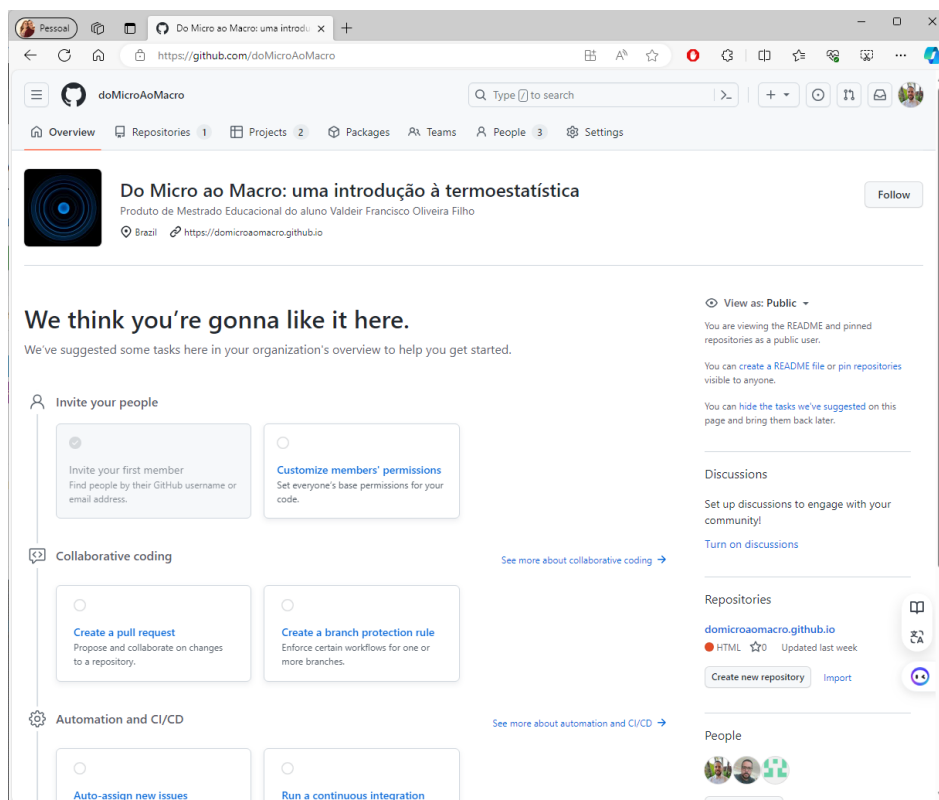
Neste projeto, adotamos como padrão criar uma organização como forma de gerenciar o trabalho a ser desenvolvido no produto. Uma organização no GitHub desempenha um papel básico na orquestração eficaz de um trabalho a ser desenvolvido, especialmente em projetos mais complexos e colaborativos.

A Figura 13 exibe a página do overview e os repositórios pertinentes ao projeto Do micro ao macro. Nesta página, é possível realizar a gestão de equipes, projetos e permissões, o que promove uma colaboração mais eficiente e transparente. A estrutura organizacional flexível

¹⁰ Git é um sistema de controle de versão distribuído, usado para gerenciar o histórico de alterações de arquivos. Disponível em <https://git-scm.com/>

facilita a colaboração, gerenciando permissões e assegurando a rastreabilidade em projetos colaborativos e complexos.

Figura 13 - Screenshot da página da Organização criada no GitHub para hospedagem dos arquivos do produto educacional.



Fonte: De autoria própria.

Outra possibilidade que é oferecida pelo GitHub é um serviço chamado de GitHub Pages, ferramenta que oferece a capacidade de orquestrar trabalhos em uma organização GitHub. Enquanto a plataforma fornece uma estrutura para gerenciar equipes e repositórios, o GitHub Pages permite a divulgação dos resultados desses esforços para o público externo. A integração do GitHub Pages permite que repositórios se transformem facilmente em sites estáticos acessíveis publicamente. A simplicidade do GitHub Pages simplifica consideravelmente o processo de hospedagem de sites, eliminando a necessidade de infraestrutura adicional.

Essa característica se alinha perfeitamente à filosofia colaborativa do GitHub, permitindo que os colaboradores visualizem instantaneamente as mudanças no site antes mesmo de sua integração ao repositório principal. A integração destes serviços cria uma vitrine acessível para compartilhar os resultados com a comunidade global, o que amplia o impacto e a utilidade do trabalho desenvolvido.

6. RESULTADOS

6.1 O Site: domicroaomacro.github.io

O ápice de um mestrado profissional se manifesta na conclusão do projeto, e por meio do produto, em sua versão final. Neste caso, a apresentação se dá através do site domicroaomacro.github.io hospedado no GitHub Pages. Inicialmente, o site aborda alguns ciclos termodinâmicos, proporcionando aos interessados uma compreensão clara da dinâmica de cada ciclo, ao mesmo tempo que explora sua evolução histórica e relevância no contexto científico.

A Figura 14 exibe a página inicial atual do produto educacional, exibindo a linha do tempo dos principais acontecimentos da história da termodinâmica. Com as próximas manutenções do projeto, novos conteúdos poderão ser incorporados à página, ampliando e aprofundando o material disponível para os estudantes e permitindo um aprendizado contínuo e atualizado

Figura 14 - Imagem da página inicial do produto educacional



Fonte: De autoria própria

O site <https://domicroaomacro.github.io/>, conta também com seções complementares, uma delas intitulada "Os Autores", dedicada aos criadores do livro "Do micro ao macro: uma introdução à Termoestatística", elaborado por Sílvia Salinas e Debora Coimbra. Nesta seção,

os visitantes podem encontrar informações relevantes, incluindo links para currículos e outros detalhes pertinentes.

A seção "Blog" do site tem como objetivo explorar assuntos do cotidiano que possam estar relacionados à termodinâmica, proporcionando uma abordagem prática e contextualizada. Além disso, durante a manutenção do produto essa seção irá oferecer uma forma didática de ensinar termos específicos da física, tornando o conteúdo mais acessível e compreensível para um público amplo.

6.2 Aplicação da Metodologia de Lakatos à Termodinâmica e ao TSP

A MPPC de Imre Lakatos oferece uma perspectiva para analisar o desenvolvimento da termodinâmica, através dos conceitos de núcleo firme, cinturão protetor, heurística positiva definidos no Capítulo 2, é possível identificá-la como um programa progressivo de pesquisa científica. A irrefutabilidade das leis termodinâmicas, mesmo diante de novas descobertas e teorias, destaca a resiliência e a consistência dessa abordagem.

Einstein corrobora esta visão ao afirmar que: “A termodinâmica é a única teoria da física da qual estou absolutamente convencido.” (Einstein, 1935, p. 12). Ao longo do tempo, a teoria termodinâmica resistiu a testes rigorosos e desafios científicos, permanecendo intacta e robusta. Este fato consolida-a na compreensão dos princípios fundamentais que regem outros fenômenos físicos. Max Planck é categórico ao dizer que: “A termodinâmica é a base da física, e a física é a base de toda a ciência.” (Planck, 1906, p. 23).

A partir dessas premissas é possível verificar que o núcleo duro da termodinâmica consiste, em termos práticos, nas suas primeira e a segunda leis. Elas compõem a base inabalável do núcleo duro do programa de pesquisa, pois aplicam-se a inúmeros sistemas físicos, e servem como pilares sobre os quais se erguem às diversas modelagens necessárias, resistindo ao teste do tempo e às tentativas de refutação, permanecendo intactas mesmo diante de novas descobertas. A Primeira Lei da Termodinâmica postula a conservação da energia, indicando que a energia total em um sistema isolado permanece constante em qualquer processo, proporcionando uma base essencial para compreender as transformações energéticas em diversos sistemas. Max Planck confirma ao afirmar que: “A energia não pode ser criada ou destruída, apenas convertida de uma forma para outra.” (Planck, 1901).

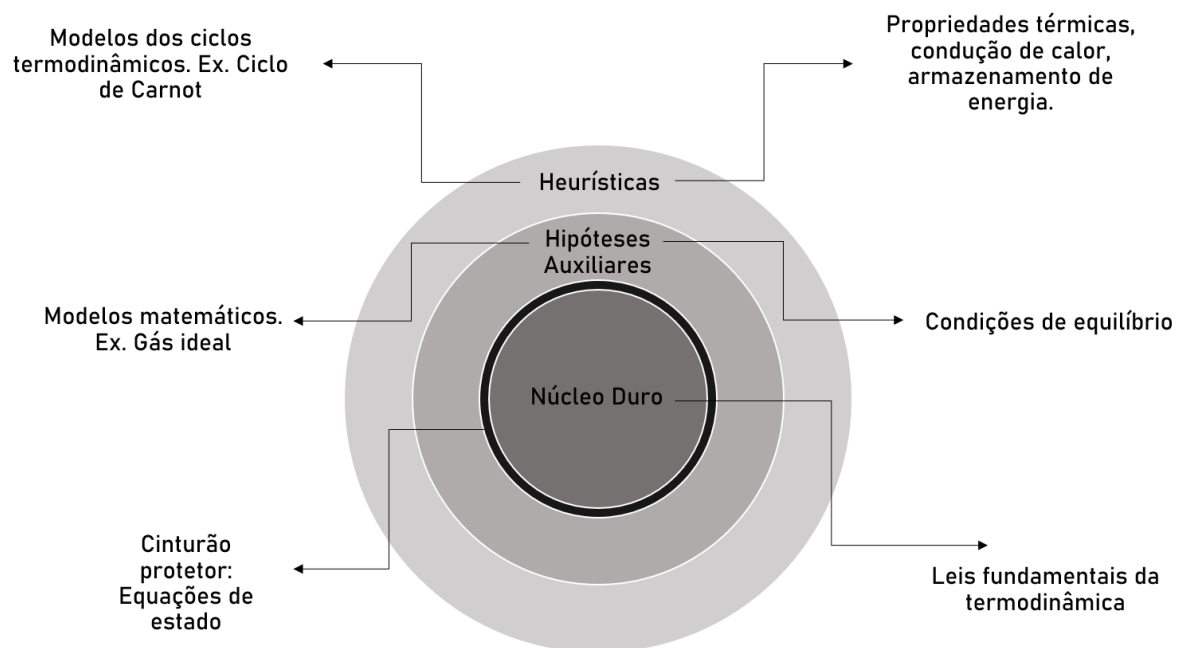
Já a Segunda Lei introduz o conceito de entropia, medindo a dispersão da energia em um sistema, e estabelece a irreversibilidade de processos como a dissipação de calor. Além

disso, impõe limites à capacidade de realizar trabalho, destacando a direção preferencial dos fenômenos termodinâmicos e a qualidade da energia envolvida nos processos. "A energia do universo é constante. A entropia de um sistema isolado tende a um máximo durante qualquer processo natural." (Clausius, 1854)

Em concordância com o afirmado no Capítulo 2, o cinturão protetor em um programa de pesquisa, como proposto por Lakatos, é composto por hipóteses auxiliares destinadas a resguardar o núcleo duro da teoria contra refutações diretas.

A ilustração da Figura 15 observa-se a aplicação da teoria dos programas de pesquisa de Imre Lakatos à termodinâmica, destacando três componentes principais: núcleo duro, hipóteses auxiliares e heurísticas, circundados pelo cinturão protetor.

Figura 15 - Entendimento da termodinâmica segundo a MPPC



Fonte: De autoria própria

No centro, o núcleo duro representa os princípios fundamentais da termodinâmica, como as três leis principais. Circundando este núcleo, as hipóteses auxiliares, como os modelos de gás ideal e condições de equilíbrio, aplicam esses princípios a situações específicas. Mais externamente, as heurísticas, como os modelos de ciclos termodinâmicos e propriedades térmicas, guiam o desenvolvimento contínuo e a inovação no campo.

O cinturão protetor, localizado fora das heurísticas, inclui suposições ajustáveis, como as equações de estado, que protegem o núcleo duro de refutações diretas, permitindo que a teoria se adapte a novas descobertas sem comprometer seus princípios essenciais.

O cinturão protetor também possibilita o cálculo de propriedades do sistema; modelos matemáticos que representam processos termodinâmicos; e representações geométricas, como diagramas P-V e T-S, que facilitam a compreensão e modelagem de fenômenos complexos.

A heurística positiva orienta a seleção, a implementação, a validação e o ajuste e das hipóteses auxiliares. Ela não apenas indica quais hipóteses são mais eficazes para proteger o núcleo duro, mas também guia ajustes conforme novas evidências surgem, além de contribuir para a avaliação da plausibilidade dessas hipóteses em relação ao núcleo central da teoria.

No cerne do programa de pesquisa do TSP, deparamo-nos com afirmações metaheurística que constituem sua base essencial. Uma dessas afirmações fundamentais é a crença na existência da solução ótima: a rota que minimiza a distância total percorrida. Essa convicção orienta os esforços dos pesquisadores, fornecendo uma direção clara para seus estudos e inovações.

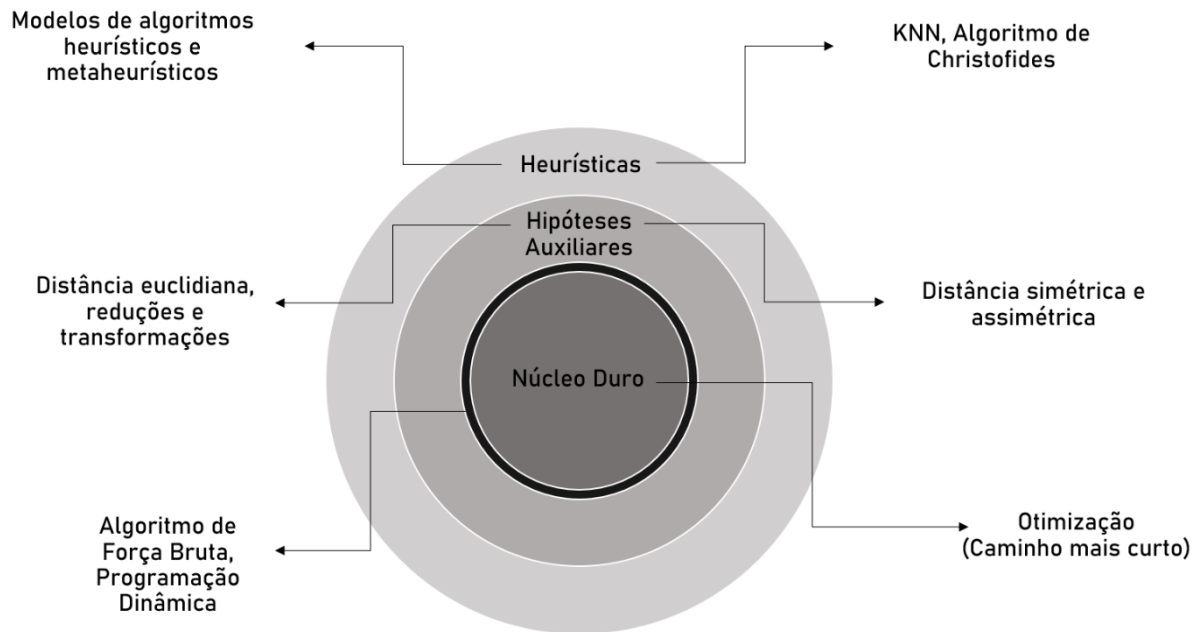
O Programa de Pesquisa de Lakatos aplicado ao Problema do Caixeiro Viajante (TSP) apresenta um núcleo duro consolidado na otimização combinatória, de acordo com o qual as decisões são delimitadas com base em restrições específicas. O TSP emerge como um desafio complexo, envolvendo a busca pela rota mais eficiente ao passar por um conjunto de cidades e retornar ao ponto de partida, minimizando a distância total percorrida.

Lakatos enfatiza a competição entre programas de pesquisa como impulsionadora do progresso científico. No contexto do TSP, essa competição se manifesta na busca constante por algoritmos e abordagens que levem a resultados superiores. Os pesquisadores procuram incessantemente melhorar as soluções, gerando avanços contínuos na resolução do TSP. Uma hipótese auxiliar fundamental é a crença na existência da solução ótima, que serve como guia para os esforços dos pesquisadores. Essa crença molda as decisões e direciona os estudos e as inovações.

O conceito de cinturão protetor na abordagem de Lakatos refere-se às estratégias ou ajustes adicionais que os programas de pesquisa científica podem incorporar para proteger o núcleo duro diante de desafios ou anomalias. As estratégias específicas variam de acordo com o método. Ao aplicar essa ideia a métodos como KNN (K-Nearest Neighbors) e BC no contexto

do TSP, podemos explorar as adaptações específicas que esses métodos incorporam para melhor lidar com as complexidades do problema.

Figura 16 - Entendimento do TSP segundo a MPPC



Fonte: De autoria própria.

A análise do TSP segundo a Teoria dos Programas de Pesquisa Científica de Lakatos pode ser visualizada e compreendida através da Figura 16. O núcleo duro consiste na definição fundamental do TSP como a busca pelo menor caminho que visita todas as cidades uma vez e retorna à origem, além do reconhecimento do problema como NP-difícil. Este núcleo é protegido por um cinturão de hipóteses auxiliares e heurísticas.

As hipóteses auxiliares incluem suposições como o uso de distâncias euclidianas, reduções e transformações do problema, além de distinções entre distâncias simétricas e assimétricas. No cinturão de heurísticas, encontram-se métodos como o algoritmo do vizinho mais próximo (KNN) e o algoritmo de Christofides, além de algoritmos exatos como o de força bruta e programação dinâmica. Por fim, o cinturão protetor é reforçado por modelos de algoritmos heurísticos e metaheurísticos, que oferecem soluções práticas e eficientes para o TSP, mesmo que não garantam sempre a solução ótima. Essa abordagem reflete a natureza dinâmica e adaptativa da pesquisa em otimização e algoritmos, onde novas técnicas são continuamente desenvolvidas e integradas.

O cinturão protetor no KNN, por exemplo, pode envolver estratégias para lidar eficientemente com grandes conjuntos de dados. Métodos de otimização, indexação espacial, podem ser implementados para acelerar a busca pelos vizinhos mais próximos, melhorando a eficiência computacional. A normalização de atributos é uma parte integrante desse cinturão protetor, visando assegurar que a escala variada dos diferentes atributos não comprometa a contribuição individual de cada um deles durante o cálculo de distâncias.

Em outros métodos, como BC, por exemplo, o cinturão protetor é muitas vezes evidenciado por estratégias de poda eficientes. Isso inclui os métodos adotados para cortar partes do espaço de busca que não levariam a soluções ótimas, reduzindo a complexidade do problema, bem como examinar as adaptações específicas, como heurísticas de seleção de variáveis ou cortes, que são aplicadas para melhorar a eficiência do método em diferentes cenários.

Especialmente no contexto do TSP a escolha do número de vizinhos K é importante devido ao crescimento exponencial do problema. A aplicação de métodos como validação cruzada podem ser parte do cinturão protetor para encontrar o valor ótimo de K .

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo desta jornada intelectual, exploramos as interconexões entre diferentes áreas do conhecimento, desde considerações no âmbito da epistemologia da ciência com Lakatos e Fleck, passando pela física com a termodinâmica até a otimização combinatória com o problema do caixeiro viajante (TSP) e a modelagem matemática.

Frente à perspectiva de Ludwik Fleck, ao introduzir o conceito de "coletivo de pensamento", tentamos articular como os diferentes grupos de pesquisas atuam ao examinar os métodos de cada programa de pesquisa em conformidade com os conceitos de núcleo firme, cinturão protetor e heurísticas, remontando às ideias lakatosianas de evolução dos programas concorrentes.

A relevância da linguagem matemática como uma ferramenta poderosa para construir representações abrangentes de sistemas do mundo real é enfatizada. A integração da modelagem matemática com Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação (TDIC) como recurso pedagógico destaca-se como uma abordagem dinâmica e envolvente no processo educacional. A produção de materiais online acessíveis e práticos destaca-se como um componente essencial para facilitar o aprendizado e promover a disseminação do conhecimento e é ponto culminante, o produto desse trabalho de mestrado. No capítulo destinado à metodologia, foram detalhadamente abordadas ferramentas as fundamentais reconhecendo os elementos-chave na construção de uma base sólida para compreensão da utilização da linguagem de programação e de cadernos de código, igualmente destacados como eficazes para proporcionar uma experiência de aprendizado mais interativa.

Nesta linha, também o papel dos serviços em nuvem e de hospedagem de código foi sublinhado como uma prática fundamental na promoção da colaboração e compartilhamento de conhecimento. A capacidade de acessar recursos online e hospedar código de forma eficiente contribui para a criação de uma comunidade de aprendizado dinâmica e global. A abordagem metodológica discutida não só enriquece o conteúdo educacional, mas também ressalta a importância de empregar ferramentas modernas e acessíveis para otimizar a aprendizagem. A integração desses elementos torna a proposta robusta, permitindo transpor as fronteiras artificiais entre as áreas do conhecimento, construindo uma compreensão mais profunda do mundo que nos cerca e desenvolvendo soluções mais eficazes para os desafios que enfrentamos.

REFERÊNCIAS

- ALVES, Leopoldo. **História e estórias do caixeiro viajante**. Salvador: Edições Contemp. 1979.
- APPLEGATE, David L.. **The Traveling Salesman Problem: A Computational Study**. Feira: Princeton University Press, 2007.
- BASSANEZI, Rodney Carlos. Modelagem Matemática: um método científico de pesquisa ou uma estratégia de ensino e aprendizagem. In: BASSANEZI, Rodney Carlos. **Ensino-aprendizagem com Modelagem matemática**. 3. ed. Campinas: Editora Contexto, 2002. Cap. 1. p. 15-41.
- BASSANEZI, Rodney Carlos. **Ensino-aprendizagem com modelagem matemática: uma nova estratégia**. Editora Contexto, 2002.
- BERTONE, Ana Maria Amarilo; BASSANEZI, Rodney Carlos; JAFELICE, Rosana Sueli da Motta. **Modelagem Matemática**. 187: Cead/Ufu, 2014. 187 p.
- BIEMBENGUT, Maria Salett; HEIN, Nelson. **Modelagem matemática no ensino**. Editora Contexto, 2000.
- BLANCHÉ, Robert. A Epistemologia. Trad. Natália Couto. Editora Martins Fontes, 1975.
- BOLTZMANN, Ludwig. **Vorlesungen über gastheorie**. JA Barth (A. Meiner), 1898.
- CAIXEIRO Viajante**. São Paulo, SP: [s.n.], [s.d.]. Disponível em: <http://bndigital.bn.gov.br/acervo-digital/caixeiro-viajante/814954>. Acesso em: 5 out. 2023. Disponível em: <http://memoria.bn.br/DOCREADER/DocReader.aspx?bib=814954>. Acesso em: 5 out. 2023.
- CANGUILHEM, Gregório. **O normal e o patológico**. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 1990. Artigo.
- CARNOT, S. Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à developper cette puissance. in R. Fox, **Reprodução do trabalho original de Sadi Carnot de 1824**. Librairie Philosophique Vrin, 1978, pp. 55-179.
- CIFUENTES, José Carlos; NEGRELLI, Leônia Gabardo. Modelagem matemática e método axiomático. **Modelagem matemática na educação matemática brasileira: pesquisas e práticas educacionais**. Recife: SBEM, p. 63-77, 2007.
- CLAUSIUS, Rudolf. Über eine veränderte Form des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie. **Annalen der Physik**, v. 169, n. 12, p. 481-506, 1854. <https://doi.org/10.1002/andp.18541691202>
- COLPO, Miriam Pizzatto. OPIS: um método para identificação e busca de páginas-objeto. 2014.
- CROES, Georges A. A method for solving traveling-salesman problems. **Operations research**, v. 6, n. 6, p. 791-812, 1958. <https://doi.org/10.1287/opre.6.6.791>
- DA SILVEIRA, Fernando L. A metodologia dos programas de pesquisa: a epistemologia de Imre Lakatos. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 13, n. 3, p. 219-230, 1996.

DEAN, Brian. On-Page SEO: Anatomy of a Perfectly Optimized Page. **Saatavilla: <http://backlinko.com/on-page-seo>**. Luettu, v. 2, 2015.

DORĐEVIĆ, Milan. Influence of grafting a hybrid searcher into the Evolutionary Algorithm. 2008.

DORIGO, Marco; BIRATTARI, Mauro; STUTZLE, Thomas. Ant colony optimization. **IEEE computational intelligence magazine**, v. 1, n. 4, p. 28-39, 2006. <https://doi.org/10.1109/CI-M.2006.248054>

DORIGO, Marco; GAMBARDELLA, Luca Maria. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. **IEEE Transactions on evolutionary computation**, v. 1, n. 1, p. 53-66, 1997. <https://doi.org/10.1109/4235.585892>

DORIGO, Marco; MANIEZZO, Vittorio; COLORNI, Alberto. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. **IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, part b (cybernetics)**, v. 26, n. 1, p. 29-41, 1996. <https://doi.org/10.1109/3477.484436>

DUMITRESCU, Irina; STÜTZLE, Thomas. Combinations of local search and exact algorithms. In: **Workshops on Applications of Evolutionary Computation**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003. p. 211-223. https://doi.org/10.1007/3-540-36605-9_20

EINSTEIN, Albert. **The meaning of relativity**. Routledge, 2003. <https://doi.org/10.4324/9780203449530>

FERREIRA, Lydia Masako; FERREIRA, Luiz Roberto Kobuti. Experimental model: historic and conceptual revision. *Acta Cirurgica Brasileira*, [s.l.], v. 18, n. , p.01-03, 2003. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0102-86502003001100001>.

FLOOD, Merrill M. The traveling-salesman problem. **Operations research**, v. 4, n. 1, p. 61-75, 1956. <https://doi.org/10.1287/opre.4.1.61>

GALILEI, Galileu. **O Ensaiador**. São Paulo: Nova Cultural, 1978.

GÉRON, Aurélien. **Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow**. " O'Reilly Media, Inc.", 2019.

GOLDBARG, Marco Cesar; LUNA, Henrique Pacca L. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. Elsevier, 2005.

GOUVÊA, Elizabeth Ferreira et al. **Uma análise experimental de abordagens heurísticas aplicadas ao problema do caixeiro viajante**. 2006. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Guilherme, Willian Douglas. **História: Tempo & Argumento**. 1º ed, Atena Editora, 2022. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.22533/at.ed.602222505>. Acesso em: 28 dez. 2023.

HEIN, Maria Sallet Biembengut; Nelson. **Modelagem matemática no ensino**. 5. ed. São Paulo: Contexto, 2020.

ISOTANI, Seiji; BITTENCOURT, Ig Ibert. **Dados abertos conectados: em busca da web do conhecimento**. Novatec Editora, 2015.

Karp, Richard M. “**Reducibility among Combinatorial Problems**”. *Complexity of Computer Computations*, organizado por Raymond E. Miller et al., Springer US, 1972, p. 85-103. DOI.org (Crossref), https://doi.org/10.1007/978-1-4684-2001-2_9.

KUHN, Thomas S. Notes on lakatos. In: **PSA: Proceedings of the biennial meeting of the philosophy of science association**. Cambridge University Press, 1970. p. 137-146. <https://doi.org/10.1086/psaprocbienmeetp.1970.495758>

KUHN, Thomas Samuel. **A Estrutura das Revoluções Científicas**. 5. ed. São Paulo: Perspectiva, 1962.

LAKATOS, Imre. History of science and its rational reconstructions. In: **PSA: Proceedings of the biennial meeting of the philosophy of science association**. Cambridge University Press, 1970. p. 91-136. <https://doi.org/10.1086/psaprocbienmeetp.1970.495757>

_____, Imre. O Falseamento e a Metodologia dos Programas de Pesquisa Científica. In: LAKATOS, Imre; MUSGRAVE, Alan (org.). **A Crítica e o Desenvolvimento do Conhecimento**. São Paulo: Cultrix, 1979. p. 109-243.

_____, Imre. **The methodology of scientific research programmes**. New York: Cambridge University Press, 1978.

LAND, A. H.; DOIG, A. G.. An Automatic Method of Solving Discrete Programming Problems: **Econometrica**, [s.l.], v. 28, n. 3, p.497-520, jul. 1960. JSTOR. <http://dx.doi.org/10.2307/1910129>.

LOWY, Ilana. Ludwik Fleck e a presente história das ciências. 1994. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0104-59701994000100003>>. Acesso em: 02 jan. 2024

LÖWY, Ilana. Ludwik Fleck e a presente história das ciências. **História, Ciências, Saúde-Manguinhos**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 7-18, out. 1994. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-59701994000100003>.

MATOS, Eliane; GONÇALVES, Jadete R; RAMOS, Flávia Regina Souza. A epistemologia de Ludwick Fleck: subsídios para a prática interdisciplinar em saúde. **Texto Contexto Enfermagem**, Florianópolis, v. 14, n. 3, p.383-390, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0104-07072005000300009>

MEDOZA, J. J. Diseño de Algoritmos Heurísticos y Metaheurísticos eficientes para resolver el Problema del Agente Viajero. 2017. Tese (Doutorado em Matemática Aplicada) — Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua, 2017.

METROPOLIS, Nicholas et al. Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. **The Journal Of Chemical Physics**, [s.l.], v. 21, n. 6, p.1087-1092, jun. 1953. <https://doi.org/10.1063/1.1699114>

METROPOLIS, Nicholas et al. Simulated annealing. *Journal of Chemical Physics*, v. 21, n. 161-162, p. 1087-1092, 1953. <https://doi.org/10.1063/1.1699114>

OLIVEIRA, Deivide Garcia da Silva. **Textos selecionados de filosofia da ciência III**. 2022.

PLANCK, Max Karl Ernst Ludwig. On the Law of the Energy Distribution in the Normal Spectrum. **Annalen Der Physik**, Berlin, v. 4, n. 1, p.553-564, jan. 1901.

Planck, Max. (1906). *Vorlesungen über Thermodynamik*. Veit & Company.

POPPER, Karl. **A lógica da descoberta científica**. Tradução de Octanny S. da Mota. 2. ed. Rio de Janeiro: Tempo Brasileiro, 1972.

PRESSMAN, Roger S.; MAXIM, Bruce R. **Engenharia de software**. McGraw Hill Brasil, 2021.

RAYWARD-SMITH, Vic; OSMAN, Ibrahim; REEVES, Colin; SIMTH, G.. **Modern Heuristic Search Methods**. 1996.

RENDL, Franz; RINALDI, Giovanni; WIEGELE, Angelika. Solving max-cut to optimality by intersecting semidefinite and polyhedral relaxations. **Mathematical Programming**, v. 121, p. 307-335, 2010. <https://doi.org/10.1007/s10107-008-0235-8>

SANTOS, Rafael Lorenzo; LEAL, J. E. Uma aplicação de algoritmos de colônias de formigas em problemas de roteirização de veículos com janelas de tempo. 2006.

SCHÄFER, Lothar; SCHNELLE, Thomas. Los fundamentos de la visión sociológica de Ludwik Fleck de la teoría de la ciencia. **FLECK, L. La gênesis y el desarrollo de um hecho científico**. Madrid: Alianza Editorial, 1986.

SECCHI, Argimiro Resende, **Método de Recozimento Simulado (Simulated Annealing)**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Programa de Engenharia Química - COPPE/UFRJ, 2023. Disponível em http://www2.peq.coppe.ufrj.br/Pessoal/Professores/Arge/COQ897/Naturais/aulas_piloto/aula2.pdf Acesso em 01 de jan. 2024

SILVEIRA, Fernando Lang da. A FILOSOFIA DA CIÊNCIA DE KARL POPPER: O RACIONALISMO. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Poto Alegre, v. 3, n. 13, p.197-218, dez. 1996.

SOTO, Carlos Pérez. **Sobre un concepto histórico de ciencia: de la epistemología actual a la dialéctica**. Lom Ediciones, 1998.

SOUZA, Ednilson Sergio Ramalho de; SANTO, Adilson Oliveira do Espírito. Modelagem matemática e letramento científico no ensino de física. **Revista Exitus**, [s.l.], v. 9, n. 4, p. 635, 1 out. 2019. Universidade Federal do Oeste do Para. <http://dx.doi.org/10.24065/2237-9460.2019v9n4id1028>.

THOMSON, W. **On the dynamical theory of heat**. Nature. 1882

WORRALL, John. A Reply to David Bloor. **The British Journal for the History of Science**, v. 12, n. 1, p. 71-81, 1979. <https://doi.org/10.1017/S0007087400016836>

APENDICE A

Descrição Técnica do Produto Educacional

Nível de ensino: Superior

Área de conhecimento: Ensino de Ciências e Matemática

Público-alvo: Estudantes de graduação

Categoria deste produto: Digital

Finalidade: Ensino e Aprendizagem

Organização do Produto: Navegação por abas (site)

Registro de propriedade intelectual: Licenciado sob GPL 3.0

Disponibilidade: Online

URL: <https://domicroaomacro.github.io/>

Processo de validação: Validado pela banca avaliadora em 28/02/2024

Processo de aplicação: Aplicado à professores da educação básica e superior ©Forms

Origem do produto: Vinculado a essa dissertação de mestrado

APÊNDICE B

Ferramentas de Controle de Versão e Hub de Alterações

Git

No âmbito do desenvolvimento de software, o controle de versão é uma peça fundamental para gerenciar eficientemente o código-fonte de um projeto, rastreando as alterações realizadas ao longo do tempo e facilitando a colaboração entre membros de uma equipe de desenvolvimento de software. Neste contexto, Git e GitHub emergem como ferramentas indispensáveis, capazes de proporcionar um ambiente robusto para o controle de versão de arquivo de maneira distribuída, como também uma colaboração de desenvolvimento descentralizada.

O Git, desenvolvido por Linus Torvalds em 2005, revolucionou a forma como equipes de desenvolvimento lidam com o controle de versão. É um sistema distribuído, o que significa que cada colaborador tem uma cópia completa do repositório (pasta ou um conjunto delas) em seu sistema local. Isso não apenas torna as operações mais rápidas, mas também permite um histórico de versões completo, mesmo em ambientes offline.

Uma forma didática de entender o Git é compará-lo a um assistente pessoal eficiente. Imagine um projeto longo, como a escrita de um livro que será realizado em colaboração com outras pessoas. O seu assistente eficiente, admite controlar cada modificação, permitindo voltar a versões anteriores sem perder alterações feitas posteriormente.

O Git ainda oferece uma variedade de recursos que o tornam uma ferramenta poderosa para o controle de versão. Esses recursos incluem:

Branches: O Git permite criar branches, que são cópias separadas do projeto. Isso permite trabalhar em diferentes versões do projeto ao mesmo tempo.

Merges: O Git permite mesclar alterações de um branch em outro. Isso é útil para combinar o trabalho de diferentes pessoas ou para integrar alterações de um repositório externo.

Tags: O Git permite marcar pontos específicos no histórico do projeto. Isso pode ser útil para identificar versões específicas do projeto ou para marcar pontos de referência importantes.

Deste modo usando um backup inteligente, o Git torna-se útil em qualquer tarefa que envolva trabalho contínuo, mudanças e colaboração, sendo como um assistente organizado para manter o controle de todas as alterações em projetos.

GitHub

O GitHub é uma plataforma central no mundo do desenvolvimento de software, oferecendo um ambiente colaborativo e ferramentas essenciais para o controle de versão e colaboração descentralizada. Fundado em 2008 por Chris Wanstrath, PJ Hyett e Tom Preston-Werner, o GitHub surgiu como uma solução baseada em Git para tornar o desenvolvimento de software mais acessível e social.

Seu crescimento rápido e popularidade se devem à sua abordagem inovadora e recursos sociais. A plataforma permite que desenvolvedores armazenem, compartilhem e controlem versões de seus projetos em repositórios na nuvem. Além disso, oferece ferramentas como issues, pull requests e wikis para facilitar a colaboração e o gerenciamento de projetos.

Em 2018, a Microsoft adquiriu o GitHub por US\$ 7,5 bilhões, marcando uma mudança significativa na indústria de tecnologia. No entanto, a Microsoft manteve a abordagem de código aberto do GitHub, permitindo que desenvolvedores continuem a utilizar a plataforma de forma livre e flexível.

Dentre as ferramentas importantes do GitHub, destacam-se os "pull requests", que simplificam o processo de contribuição e revisão de código, e as "actions", que automatizam tarefas de integração contínua e implantação contínua (CI/CD). Essas características transformaram o GitHub em um hub para colaboração aberta, promovendo a transparência e a participação ativa na comunidade de desenvolvimento de software.

Github Pages

O GitHub Pages é um serviço disponibilizado pelo GitHub que possibilita aos usuários hospedar sites diretamente a partir de seus repositórios no GitHub. Essa funcionalidade facilita o trabalho dos desenvolvedores, proporcionando um meio rápido e simples de entrega de conteúdo, sem a necessidade de configurar servidores web tradicionais.

A principal característica do GitHub Pages é sua integração direta com repositórios do GitHub. Os usuários podem criar um branch especial chamado "gh-pages" ou usar a pasta "docs" para armazenar o conteúdo do site. Todo o código e arquivos relacionados a um site,

como HTML, CSS, JavaScript, bibliotecas e frameworks, podem ser gerenciados diretamente no repositório GitHub.

O GitHub Pages suporta sites estáticos, o que significa que não há necessidade de um servidor web dinâmico. Isso é ideal para projetos simples, blogs pessoais, documentação técnica e até mesmo sites de portfólio. Além disso, suporta domínios personalizados, permitindo que os usuários utilizem seus próprios nomes de domínio para os sites hospedados no GitHub Pages.