

14º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2023

APLICAÇÃO DO ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO BAYESIANA E ALGORITMO EVOLUTIVO PARA A RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DE EXPANSÃO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

WILLIAN BUENO SANTOS¹, MURIELL R. FREIRE²

¹ Graduando em Engenharia de Controle e Automação, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Câmpus SJBV, w.bueno@aluno.ifsp.edu.br.

² Professor orientador, IFSP, Câmpus São João da Boa Vista, muriell@ifsp.edu.br.

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.04.04.02-9 Engenharia Elétrica.

RESUMO: O objetivo principal do projeto é aplicar a ferramenta Weka (Waikato Environment for Knowledge Analysis) e o BOA (Bayesian Optimization Algorithm) para solucionar o problema de PET (Planejamento da Expansão da Transmissão). Isso visa aprimorar a eficiência e robustez do processo de busca da melhor solução do problema de planejamento da expansão do sistema de transmissão de energia elétrica. O projeto busca identificar o melhor conjunto de soluções subótimas e mapeá-las em uma única RB (Rede Bayesiana), criando um modelo probabilístico que auxilie na tomada de decisão. O teste se concentra no modelo de sistema Garver para curto prazo, o qual deverá atender à futura demanda prevista para o sistema elétrico. Atualmente, a resolução de problemas PET para sistemas de transmissão reais é uma tarefa de otimização combinatória estocástica altamente complexa. Para resolver os desafios complexos do PET em sistemas de transmissão reais, técnicas de otimização combinatória estocástica, como algoritmos evolutivos, têm sido bem-sucedidas. Essas abordagens permitem a resolução de problemas complexos com uma descrição matemática simples do objetivo da solução.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Elétrica. Algoritmo Evolutivo. Redes Bayesianas. Planejamento da Expansão de Transmissão.

APPLICATION OF THE BAYESIAN OPTIMIZATION ALGORITHM AND EVOLUTIONARY ALGORITHMS TO RESOLVE THE PROBLEM OF EXPANSION PLANNING OF THE ELECTRIC POWER TRANSMISSION SYSTEM

ABSTRACT: The main objective of the project is to apply the Weka tool and the BOA (Bayesian Optimization Algorithm) to solve the Transmission Expansion Planning (PET) problem. This aims to improve the efficiency and robustness of the search process for the best solution to this problem. The project seeks to identify the best set of suboptimal solutions and map them into a single Bayesian Network (RB), creating a probabilistic model that helps in decision making. The test focuses on the short-term model of the Garver system, which is expected to meet the anticipated future demand for the system. Currently, solving PET problems for real transmission systems is a highly complex stochastic combinatorial optimization task. To solve the complex challenges of PET in real transmission systems, stochastic combinatorial optimization techniques, such as evolutionary algorithms, have been successful. These approaches allow the resolution of complex problems with a simple mathematical description of the objective of the solution.

KEYWORDS: Electricity Energy. Evolutionary Algorithm. Bayesian Networks. Transmission Expansion Planning.

INTRODUÇÃO

A energia elétrica é fundamental nos dias de hoje por uma série de razões cruciais que impactam quase todos os aspectos de nossas vidas e da sociedade como um todo. Tornou-se uma necessidade básica por diversos motivos como saúde, medicina, tecnologia, comunicação, conservação de alimentos, indústria, manufatura e transporte. O estudo propõe a aplicação de métodos para aprimorar o Planejamento da Expansão do Sistema de Transmissão de Energia Elétrica (PET), buscando eficiência e minimização de custos. Conforme (Rodrigues, 2012, p. 2), esse planejamento "consiste em determinar onde, quando e quantos novos equipamentos de transmissão deverão ser instalados no sistema elétrico". O objetivo é tomar decisões informadas para aprimorar a infraestrutura de transmissão, considerando a demanda atual e futura. A motivação para esse trabalho reside na complexidade do PET e na busca por alternativas eficientes em vez de uma única solução ótima que pode ser difícil ou inacessível por meios de métodos exatos. Dado um cenário futuro de demanda geração de energia, o PET busca encontrar uma solução ótima, com menor custo de investimento que atenda as especificações de qualidade, segurança para transmissão de energia elétrica. (Leite Da Silva; Freire; Honório, 2016).

Em resumo, o estudo visa melhorar o PET por meio da mineração de dados, algoritmos evolutivos e modelos matemáticos, lidando com a complexidade e a incerteza inerentes aos sistemas de energia elétrica. Essa abordagem permite encontrar soluções mais eficientes para o planejamento da expansão da transmissão de energia elétrica com um menor custo de investimento, visando determinar os reforços à rede que devem ser realizados para se atender o crescimento do consumo de energia elétrica. No entanto, é importante notar que um plano com menor custo inicial nem sempre é a melhor escolha, uma vez que pode não atender a critérios de confiabilidade, segurança ou políticas públicas. Além disso, optar por um plano de menor custo inicial pode acabar se tornando economicamente inviável no futuro devido a despesas adicionais, como a necessidade de suporte de potência reativa e regulação de tensão, que podem elevar os custos do investimento. (Freire, 2016).

MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa descrita neste artigo é uma continuação da pesquisa desenvolvida por Lopes (2018). Desta forma, foram realizadas revisões bibliográficas e uma otimização dos métodos e ferramentas utilizadas. As ferramentas utilizadas no estudo envolvem o software WEKA para mineração de dados em aplicações PET. Visando aumentar a eficiência e a robustez do processo de busca pela RB que melhor representa o conjunto das soluções ótimas. O pacote matemático MATPOWER (*MATLAB Power System Simulation Package*), que através das suas diversas rotinas implementadas em MATLAB, auxilia tanto na modelagem matemática dos sistemas elétricos como na simulação de casos de estudo. Para auxiliar esse desafio, são aplicados algoritmos evolutivos (AE), que são flexíveis e podem ser adaptados a diferentes problemas.

O PET é crucial para garantir o fornecimento confiável de energia elétrica. No entanto, sua resolução envolve a otimização de muitos parâmetros, o modelo matemático de um sistema de transmissão é definido como um conjunto de equações que representa a dinâmica do sistema com precisão ou, pelo menos, razoavelmente bem. Um modelo matemático não é único para determinado sistema, um sistema pode ser representado de muitas maneiras diferentes e, portanto, pode ter vários modelos matemáticos, dependendo da perspectiva a ser considerada. Para o planejamento da expansão geralmente são usados modelos matemáticos simplificados para representar a rede elétrica. Estes modelos são mais fáceis de solucionar e conseguem modelar a rede elétrica de maneira satisfatória. Sendo assim, a formulação para o problema PET na sua forma mais geral é extremamente complexo, envolvendo múltiplos objetivos, variáveis inteiras e discretas, modelado cronológico multi-estágio, etc. As funções consideradas são não lineares, o espaço de solução é não convexo e provavelmente apresenta mais de um mínimo. (Rodriguez; Falcão; Taranto, 2009).

O problema do PET pode ser formulado como um problema de otimização, como mostrado pelas equações. Além disso, as topologias originais e os dados elétricos dos sistemas testados podem ser consultados em Silva Junior (2005) e Souza Lopes (2018).

$$\text{Min } v = \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} n_{ij} + \sum_{(i,j) \in \Omega} c_i q_{ci}$$

$$\text{s. a.} \quad P(V, \theta, n) - P_G - P_D = 0$$

$$Q(V, \theta, n, q_c) - Q_G - Q_D = 0$$

$$S^{DE}(V, \theta, n, q_c) \leq S^{max}$$

$$S^{PARA}(V, \theta, n, q_c) \leq S^{max}$$

$$V^{min} \leq V \leq V^{max}$$

$$P_G^{min} \leq P_G \leq P_G^{max}$$

$$Q_G^{min} \leq Q_G \leq Q_G^{max}$$

$$0 \leq n \leq n^{max}$$

$$0 \leq q_c \leq q_c^{max}$$

Em que:

c_{ij}	custo da adição de um circuito no ramo ij
n_{ij}	número de circuitos adicionados no ramo ij
c_i	custo da adição de 1MVar no ramo i
q_{ci}	quantidade de potência reativa adicionada no ramo i
Ω	conjunto de ramos que podem ser adicionados
P	vetor da potência ativa injetada nos nós
Q	vetor da potência reativa injetada nos nós
V	vetor das magnitudes das tensões nos nós
θ	vetor dos ângulos das tensões nos nós
n	vetor do número de adições das linhas de transmissão
n^{max}	vetor do número máximo de adições
q_c	vetor do número de adições de MVar
P_G	vetor da potência ativa dos geradores
P_D	vetor da potência ativa das cargas
Q_G	vetor da potência reativa dos geradores
Q_D	vetor da potência reativa das cargas
S	vetor da potência aparente nos ramos

Por se tratar de um planejamento automático da expansão da transmissão via algoritmo, a metodologia a ser implementada terá como sustentação uma formulação matemática, baseada no modelo AC e no planejamento da expansão da transmissão de curto prazo (PETCP) com o intuito de representar a rede, neste projeto, aplicou-se o script desenvolvido por Lopes (2018), tal qual, foi realizado algumas mudança e melhorias para o estudo em questão.

O início dos métodos realizados começa com a escolha do sistema para aplicação do PET, o escolhido foi o sistema Garver de 6 barramentos apresentado na figura 1, utilizou-se a biblioteca MATPOWER para modelagem da rede AC para resolução, juntamente com a implementação de algoritmo evolutivo adaptativo via multioperadores, como forma de melhorar o desempenho da meta-heurística no processo de busca pelos melhores plano de expansão para o PET. Os parâmetros genéticos do problema, como, por exemplo, tamanho da população, número máximo de gerações, número de genes, probabilidade de mutação, número máximo de linhas a serem adicionadas e valor máximo de compensação foram definidos adequadamente de forma empírica uma vez que, esses interferem diretamente no desempenho do algoritmo.

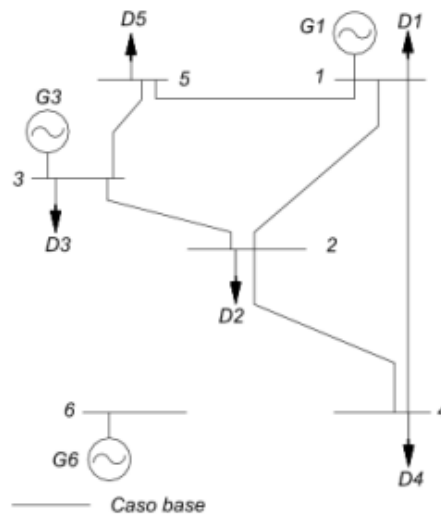


FIGURA 1. Diagrama unifilar para o sistema GARVER – topologia original. FONTE: (Villajuan Montes, 2016).

A partir dos resultados obtidos no processo anterior, o objetivo centraliza-se na utilização do BOA (modelo probabilístico de otimização estocástico). Este modelo, fundamentado nos princípios de algoritmos evolutivos, emprega operadores genéticos de cruzamento para originar novos "indivíduos" ou planos no contexto do PET. Estes operadores se baseiam em inferências de uma RB, que é construída através da estimação de distribuição de probabilidades dos melhores indivíduos da população atual. Em termos práticos, o resultado é um planejamento do sistema representado em um gráfico probabilístico. Este gráfico atua como um guia para a criação de eficientes planos de expansão, possibilitando um planejamento interativo. Para gerar a RB, utilizamos a ferramenta Weka, enquanto o BayesFusion é empregado para criar um gráfico probabilístico. Esta abordagem, tem o potencial de produzir impactos significativos no setor de planejamento elétrico.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos durante a realização deste estudo oferecem um plano de estratégias para execução de reforços para suprir demandas futuras de energia elétrica. Os resultados preliminares provenientes da ferramenta Matpower entregam os melhores planos possíveis do problema, adotando um futuro aumento no consumo de energia elétrica. De forma resumida, essas futuras cargas se encontram nos barramentos 1, 2, 3, 4, 5 e apresentam uma demanda de 40MW, 240MW, 40MW, 160MW, 240MW respectivamente. Também é assumido que as fontes geradoras do sistema suportam esse aumento de consumo. A tabela 1 apresenta os melhores resultados obtidos, após uma série de testes e modificações realizadas nos parâmetros do algoritmo evolutivo. Estes parâmetros foram cuidadosamente ajustados através de experimentação empírica.

TABELA 1. Melhores planos encontrados, com reforços necessários, sistema Garver.

Planos	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15
1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0
6	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	2	0	0	3	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0
8	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0
9	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	3	0	0	2	0
10	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0
11	0	0	0	2	0	0	0	1	1	0	1	0	0	2	0

Fonte: Elaboração própria.

Na tabela 1, a primeira coluna apresenta os planos ótimos de solução diante da crescente demanda energética, organizados em ordem crescente de custos. O plano 1 é o melhor plano com menor custo, o valor indicado como "1" na coluna A9 sinaliza o reforço previsto do ramo 2 ao ramo 6 no sistema Garver. Simultaneamente, os valores "1" e "2" nas colunas A11 e A14, respectivamente, denotam um reforço projetado do ramo 3 ao ramo 5, bem como dois reforços do ramo 4 ao ramo 6 no mencionado sistema Garver. Nesse contexto, a partir dos resultados adquiridos com as ferramentas Matpower e AE via Matlab, realizou-se a filtragem e mineração de dados, pois como mostra a tabela 1 alguns planos de reforços, como A1, A2 e A3, não são adotados, visto que apresentam exclusivamente valores nulos.

Para a construção da RB utilizando o Weka, dentre todos os algoritmos testados os que apresentaram maior estabilidade foram os algoritmos Hill Climber, LAGHillClimber, RepeatedGillClimber e TAN, em conjunto com o MDL (Minimum Description Length). O que foi observando com os resultados é que, independente da escolha dos parâmetros apresentou uma resposta (topologia da RB) fixa para qualquer configuração escolhida a partir dos dados de entrada, servindo de parâmetro, o que pode garantir estabilidade na busca. Nas Figuras 2 e 3, a rede bayesiana foi constituída com o software Weka e a rede foi montada no software BayesFudion, tal qual, apresenta a capacidade de inserir inferências na rede.

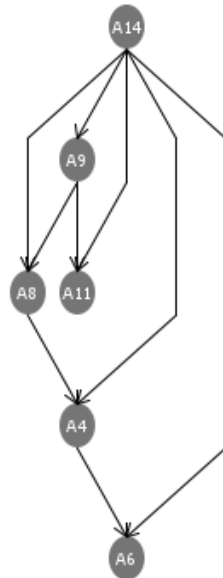


Figura 2: Rede Bayesiana - Weka

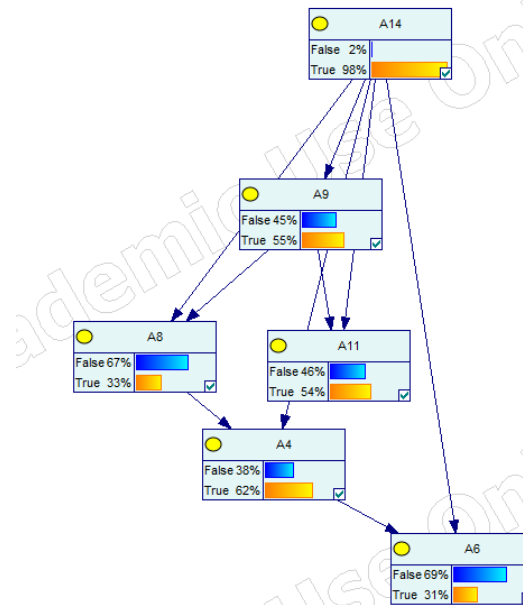


Figura 3: Rede Bayesiana - BayesFudion

FONTE. Elaboração própria.

A configuração para gerar os resultados das Redes Bayesianas, tais como a estrutura da rede, algoritmos, mineração de dados e as fontes de evidência, foram refinados por meio de experimentação empírica, uma vez que esses parâmetros desempenham um papel fundamental na precisão e eficácia da inferência realizada pela rede. Pode-se verificar após alguns testes que a solução obtida via RB é promissora, permitindo ao planejador interagir com o modelo e realizar inferências visando obter a solução que melhor se adequa ao seu caso.

CONCLUSÕES

Os resultados alcançados são tanto satisfatórios quanto esperados. A utilização do AE, em particular, desempenhou um papel fundamental na busca pelo melhor plano de expansão com o menor custo possível. Isso contribuiu significativamente para a melhoria da eficiência do processo de planejamento de expansão de redes de energia. É importante destacar que, embora o AE tenha se mostrado eficaz na busca por soluções ótimas do ponto de vista técnico e econômico, o desafio reside na consideração de fatores não puramente técnicos. O melhor plano de expansão gerado pelo algoritmo pode não ser necessariamente o mais adequado em termos de geolocalização, considerações políticas ou restrições legais no local de implementação. Por exemplo, pode ocorrer que a solução mais eficiente em termos de custos envolva passar por uma área de reserva ambiental, o que tornaria o plano inviável devido a preocupações ambientais e legais.

Nesse contexto, a utilização de RB surge como uma abordagem valiosa. As RBs permitem uma análise abrangente e detalhada dos fatores que afetam o planejamento de expansão, incorporando não

apenas aspectos técnicos, mas também variáveis complexas, como considerações ambientais e regulatórias. Essa capacidade de modelar e analisar incertezas e interações complexas oferece uma vantagem significativa na tomada de decisões em planejamento de expansão de redes de energia. Uma das principais vantagens da aplicação de AE nesse contexto é a capacidade de explorar soluções em um espaço de busca vasto e complexo. Isso resulta na identificação de soluções eficientes e ótimas, o que pode levar a economias substanciais de custos operacionais e de infraestrutura. Por outro lado, a utilização de RBs permite uma compreensão mais profunda das implicações das decisões de planejamento em um contexto mais amplo, ajudando a evitar soluções tecnicamente eficientes, mas ambientalmente problemáticas ou em desacordo com regulamentações.

Portanto, a combinação de Algoritmos Evolutivos e Redes Bayesianas representa uma abordagem poderosa e equilibrada para o planejamento de expansão de redes de energia PET. Isso permite os planejadores considerarem não apenas a eficiência técnica, mas também os fatores sociais, ambientais e regulatórios, garantindo que o planejamento de expansão seja não apenas eficaz, mas também sustentável e em conformidade com as normas e regulamentos aplicáveis.

Em última análise, essa abordagem integrada é fundamental para enfrentar os desafios crescentes e complexos que envolvem o planejamento de expansão de redes de energia, proporcionando resultados melhores e mais robustos em benefício de toda a sociedade de forma eficaz com eficiência em termos como custos de investimentos, computacionais, tempo e de planejamento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor orientador pela oportunidade e por me orientar. Agradeço ao IFSP/PIBIFSP pelo apoio financeiro destinado ao trabalho.

REFERÊNCIAS

FREIRE, Muriell De Rodrigues E. **Algoritmo evolutivo adaptativo via multioperadores aplicado ao planejamento da expansão de sistemas de transmissão**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016.

LEITE DA SILVA, A. M. et al. **Transmission expansion planning optimization by adaptive multioperator evolutionary algorithms**. Electric Power Systems Research, v. 133, p. 173-181, 2016.

LOPES, Thaís De Souza. **Planejamento automático da expansão da transmissão de curto prazo via algoritmo evolutivo especialista**. São João da Boa Vista: IFSP, 2018.

RODRIGUEZ, J. I. R.; FALCÃO, D. M.; TARANTO, G. N. **Planejamento da expansão da transmissão de curto prazo utilizando modelo CA com restrições dinâmicas de segurança**. XI **Simpósio de especialistas em planejamento da operação e expansão elétrica**, Belém, março 2009.

VILLAJUAN MONTES, Cristiam Victor. **Modelos de programação linear inteira mista para resolver problemas de planejamento da expansão e da operação de sistemas de transmissão de energia elétrica**. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira 2016.