

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

WILSON ENRIQUE CHUMBI QUITO

**IMPLEMENTAÇÃO DE UMA METODOLOGIA SIG PARA O PLANEJAMENTO DE
ALIMENTADORES PRIMÁRIOS**

Ilha Solteira
2020



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

WILSON ENRIQUE CHUMBI QUITO

IMPLEMENTAÇÃO DE UMA METODOLOGIA SIG PARA O PLANEJAMENTO DE ALIMENTADORES PRIMÁRIOS

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação na Faculdade de Engenharia Elétrica de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre. Especialidade: Automação

Prof. Dr. Antônio Padilha Feltrin
Orientador

Ilha Solteira
2020




FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

C559i Chumbi Quito, Wilson Enrique.
Implementação de uma metodologia SIG para o planejamento de alimentadores primários / Wilson Enrique Chumbi Quito. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2020
76 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2020

Orientador: Antônio Padilha Feltrin
Inclui bibliografia

1. Análise de decisão multicritério. 2. Análise hierárquica. 3. Planejamento da distribuição. 4. Redes complexas. 5. Roteamento de linhas elétricas. 6. Sistemas de informação geográfica.


Raiane da Silva Santos



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Implementação de uma metodologia SIG para o planejamento de alimentadores primários

AUTOR: WILSON ENRIQUE CHUMBI QUITO

ORIENTADOR: ANTONIO PADILHA FELTRIN

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: Automação pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ANTONIO PADILHA FELTRIN
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. JONATAS BOAS LEITE
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. JOEL DAVID MELO TRUJILLO
Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas / Universidade Federal do ABC - UFABC

Ilha Solteira, 31 de agosto de 2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelas forças e suporte ao longo da minha vida.

Agradeço em especial a minha família pelo apoio nas minhas decisões e preocupação comigo.

Ao meu orientador António Padilha pelo acolhimento e aprendizado durante a orientação.

A meus amigos, companheiros e professores que fizeram parte no processo do meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Aos funcionários da FEIS-UNESP, por todos os serviços prestados.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

RESUMO

Neste trabalho, apresenta-se uma metodologia para o roteamento de linhas de distribuição de 69 kV, avaliando as restrições geográficas por meio de modelos de análise espacial e critério de especialistas. A metodologia pode ser considerado como uma ferramenta de ajuda no planejamento de longo prazo, e esta composta por duas etapas principais. A primeira está relacionada com a seleção e ajuste dos fatores geográficos que interferem na construção das linhas. Para isto é utilizada a combinação de um método de análise hierárquica e um método de análise de decisão multicritério baseado no sistema de informação geográfica (SIG). Na segunda etapa, os dados do ambiente geográfico são integrados a um grafo com estrutura de rede. Assim, as potencialidades das ferramentas de análise de redes complexas possam ser aproveitadas. A metodologia é implementada através da sistematização de modelos de análise espacial envolvendo ferramentas SIG e algoritmos eficientes de análise de grafos. O desempenho foi testado com um problema de planejamento da expansão de um sistema de distribuição real de uma concessionária de energia equatoriana. Os resultados são pontos geográficos que permitem uma representação cartográfica de alta resolução espacial e definem a localização das rotas de mínimo custo considerando critérios técnicos, econômicos e ambientais. Os resultados são avaliados utilizando uma ferramenta comercial de análise espacial ArcGIS.

Palavras-chave: Análise de decisão multicritério. Análise hierárquica. Planejamento da distribuição. Redes complexas. Roteamento de linhas elétricas. Sistemas de informação geográfica.

ABSTRACT

This research project presents a methodology for 69 kV distribution line routing by evaluating geographical restrictions through spatial models and expert criteria. This approach can be considered as a useful tool to aid in the long-term distribution systems planning. The methodology involves two main stages. The first is related to the selection and feature calibration of geographical factors that influences the construction of electric lines. Thus, the merge of an analytic hierarchy process method and a multicriteria decision analysis, integrating geographic information system (GIS) are used. In the second stage, data from the geographic environment are integrated into a spatial network with a grid structure, so that, the power of complex network analysis can be employed. The methodology is implemented through the systematization of spatial analysis models involving GIS tools and efficient graph analytical algorithms. The performance of the proposed method was tested on a real case distribution systems expansion planning of an Ecuadorian distribution energy utility. The results are geographic points that allow a cartographic representation of high spatial resolution and define the location of the least cost routes considering technical, economic and environmental criteria. The results are evaluated using a commercial software ArcGIS.

Keywords: Analytic hierarchy process. Complex networks. Distribution planning. Electric line routing. Geographic information systems. Multicriteria decision analysis.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Estrutura de um sistema de informação geográfica | 14 |
| Figura 2 - Estrutura para o modelo de rota ótima..... | 22 |
| Figura 3 - Roteamento dos alimentadores | 37 |
| Figura 4 - Roteamento de corredores | 38 |
| Figura 5 - Estrutura típica de um grafo G | 39 |
| Figura 6 - Rede clássica com estrutura de malha..... | 42 |
| Figura 7 - Estrutura de dados para resolver o problema do caminho mais curto | 43 |
| Figura 8 - Estudo de caso: CENTROSUR, Cuenca, Equador | 45 |
| Figura 9 - Localização de centros de carga e SE de distribuição existentes..... | 46 |
| Figura 10 - Estrutura SIG-ADMC para alocar uma SE e rotear uma linha em AT..... | 49 |
| Figura 11 - Avaliação de critérios..... | 50 |
| Figura 12 - Fator vegetação definido como variável espacial com estrutura raster ... | 53 |
| Figura 13 - Mapa de custos | 55 |
| Figura 14 - Mapa de preferências para alocação de uma nova SE | 57 |
| Figura 15 - Alternativa 1 proposta..... | 58 |
| Figura 16 - Roteamento baseado na alternativa 1 | 59 |
| Figura 17 - Alternativa 2 proposta..... | 60 |
| Figura 18 - Roteamento baseado na alternativa 2 | 61 |
| Figura 19 - Alternativa 3 proposta..... | 62 |
| Figura 20 - Roteamento baseado na alternativa 3..... | 63 |
| Figura 21 - Resultados baseados na estrutura raster e estrutura de grafos | 64 |
| Figura 22 - Teste 1, comparação de resultados entre os algoritmos baseados em uma estrutura de dados raster e de grafos | 74 |
| Figura 23 - Teste 2, comparação de resultados entre os algoritmos baseados em uma estrutura de dados raster e de grafos | 74 |
| Figura 24 - Teste 3, comparação de resultados entre os algoritmos baseados em uma estrutura de dados raster e de grafos | 75 |
| Figura 25 - Teste 4, comparação de resultados entre os algoritmos baseados em uma estrutura de dados raster e de grafos | 75 |
| Figura 26 - Teste 4, comparação de resultados entre os algoritmos baseados em uma estrutura de dados raster e de grafos | 76 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Índice de inconsistência randômico médio do AHP | 29 |
| Tabela 2 - Escala de Saaty | 29 |
| Tabela 3 - Algoritmo de rota de custo mínimo | 36 |
| Tabela 4 - Algoritmo de Dijkstra | 44 |
| Tabela 5 - Demanda de potência das cargas predominantes..... | 47 |
| Tabela 6 - Número de clientes projetados para o ano 2034 por estrato de clientes .. | 48 |
| Tabela 7 - Demanda projetada de potência até 2034 por estrato do cliente | 48 |
| Tabela 8 - Descrição dos fatores espaciais..... | 51 |
| Tabela 9 - Matriz de combinação por pares (AHP) | 52 |
| Tabela 10 - Restrições espaciais para passagem de uma linha elétrica | 52 |
| Tabela 11 - Ponderação e calibração dos parâmetros do modelo SIG-ADMC..... | 54 |
| Tabela 12 - Fatores espaciais para a localização de uma nova subestação | 56 |
| Tabela 13 - Restrições espaciais para a localização de uma nova SE | 56 |
| Tabela 14 - Testes de processamento dos algoritmos de roteamento..... | 65 |
| Tabela 15 - Ponderação e calibração dos fatores espaciais para alocar uma SE | 72 |

SUMÁRIO

| | | |
|-----|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1 | Objetivos..... | 13 |
| 1.2 | Justificativa | 14 |
| 1.3 | Revisão bibliográfica | 16 |
| 1.4 | Contribuições | 18 |
| 2 | MÉTODOLOGIA DE ROTEAMENTO | 20 |
| 2.1 | Método de análise de decisão multicritério | 24 |
| 2.2 | Processo de hierarquia analítica..... | 27 |
| 2.3 | Funções de normalização | 30 |
| 2.4 | Rotas baseadas na programação dinâmica..... | 31 |
| 2.5 | Modelo de rota de custo mínimo | 34 |
| 2.6 | Modelo de corredores | 37 |
| 3 | TEORIA DE GRAFOS E ROTEAMENTO ESPACIAL | 39 |
| 3.1 | Noção de grafos | 40 |
| 3.2 | Grafos e redes | 41 |
| 3.3 | Rotas ótimas baseadas em grafos..... | 42 |
| 4 | ESTUDO DE CASO | 45 |
| 4.1 | SIG-ADMC..... | 48 |
| 4.2 | Superfície de custo para roteamento de linhas elétricas | 49 |
| 4.3 | Alocação de uma nova subestação..... | 55 |
| 4.4 | Cenários de estudo | 57 |
| 4.5 | Avaliação de resultados | 63 |
| 4.6 | Discussão | 65 |
| 5 | CONCLUSÕES..... | 66 |
| 5.1 | Trabalhos futuros | 67 |
| | REFERÊNCIAS | 68 |
| | ANEXOS..... | 72 |
| | Anexo A - Fatores espaciais para alocar uma SE..... | 72 |
| | Anexo B - Comparação de resultados | 74 |

1 INTRODUÇÃO

De maneira geral, o sistema elétrico de potência (SEP) está dividido em subsistemas por nível de tensão. São eles: fontes de geração, sistema de transmissão, subtransmissão ou sistema de distribuição em alta tensão (SDAT), sistema de distribuição em média tensão (SDMT) e sistema de distribuição em baixa tensão (SDBT) onde estão a maioria dos consumidores, os grandes consumidores são supridos pela rede de MT. O objetivo do SEP é fornecer suprimento de energia elétrica nas melhores condições de qualidade e segurança, com o menor custo para os consumidores atuais e futuros, e que é abordado pelo planejamento (RAMIREZ CASTAÑO, 2004).

Os intervalos de planejamento no horizonte de tempo são (1 a 5 anos) para o curto prazo, (5 a 10 anos) para o médio prazo e (10 a 15 anos) para o longo prazo. No planejamento de curto prazo, são estabelecidas as diretrizes para o financiamento e construção de obras. No médio prazo, é definido o plano de obras referente à incorporação de novas instalações no sistema elétrico. No longo prazo, o planejamento da expansão do SEP é feito com base em cenários de crescimento de carga e com incorporação de novas instalações (FLETCHER; STRUNZ, 2007).

A expansão do sistema de distribuição surge da necessidade de atender os requerimentos exigidos pelo crescimento horizontal e vertical da demanda de energia elétrica suprimindo as exigências de qualidade e confiabilidade. A expansão está composta de vários subproblemas, como: reforço, dimensionamento e construção de subestações, linhas elétricas, entre outras (WILLIS, 2004). Por tanto, são necessárias desenvolver propostas de planejamento a través de métodos e técnicas tão eficientes quanto possível de acordo com a exigência (GÖNEN, 2014). Um modelo que responda às restrições operacionais e de segurança, minimizando os custos de investimento, fornece informações importantes no momento da tomada de decisão no problema da expansão (LIN; TSAY; WU, 1996).

O planejamento do sistema de distribuição é um problema complexo no qual três subproblemas são consolidados: planejamento de subestações, planejamento de linhas de alta e média tensão, e planejamento da rede de baixa tensão (FLETCHER et al., 2018). De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) o sistema de distribuição que opera entre 69 kV e 230 kV está em alta tensão, entre 1 kV e 69 kV em média tensão, igual ou inferior a 1 kV em baixa tensão. Assim, entrando

no planejamento de linhas de distribuição em alta e média tensão, determinar a configuração, o equipamento e a topologia é o ponto de partida e devem ser tratados de maneira articulada para um planejamento eficaz (WILLIS, 2004).

Um sistema de distribuição visa transferir energia elétrica desde as subestações até os transformadores de distribuição espalhados estrategicamente em uma região geográfica, para atender à demanda exigida por todos os consumidores. No caso de linhas de alta tensão, a conexão é entre subestações ou da subestação aos transformadores das cargas especiais de alto consumo. Como o planejamento do sistema de distribuição se centra em três aspectos fundamentais: eficiência, confiabilidade e custo. Estabelecer os critérios que intervêm no traçado das linhas elétricas contribui na maximização da eficiência e minimização dos custos de todo o sistema de distribuição (RAMIREZ CASTAÑO, 2004).

A topologia da rede define a configuração com a qual uma rede elétrica é projetada. Existem vários tipos de configuração: radial, anel e malhas, cada um com suas próprias características, vantagens e desvantagens em relação a questões de custo, operação e confiabilidade. A configuração radial é a mais simples, mais econômica e é a configuração com a qual os sistemas operam em condições normais. O sistema radial não requer controle complexo do fluxo de energia nem sofisticados equipamentos de proteção. A principal desvantagem da configuração radial é seu baixo nível de confiabilidade, no entanto, é a topologia mais usada em sistemas de distribuição quando maiores níveis de confiabilidade de serviço não é requerido. (WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION, 1964).

Um sistema de distribuição é um circuito que liga os pontos de origem (subestações) com pontos de destino (sejam subestações ou transformadores). No entanto, a rota ótima na maioria dos casos reais não é uma conexão direta entre estes dois pontos, depende de vários fatores espaciais. Sendo: (i) fatores técnicos, como o declive, falhas geográficas, entroncamento com rodovias e direito de passagem das redes existentes; (ii) fatores ambientais, como florestas, parques nacionais, áreas arqueológicas, recursos hídricos, travessias de rios, reservas para vida silvestre; (iii) fatores socioeconômicos, como áreas agrícolas, áreas residenciais, zonas declaradas como patrimônio cultural, zonas de recreação, áreas turísticas e planejamento zonal. Portanto, a modelagem da rota deve considerar as restrições do espaço geográfico (MONTEIRO et al., 2005b).

A concessionária de distribuição de energia CENTROSUR do Equador apresenta um estudo de caso para a expansão de longo prazo do Sistema de Distribuição de Alta Tensão (SDAT), com a alocação de uma nova subestação e uma avaliação de alternativas de serviço para cobrir o rápido crescimento da indústria apresentado nos últimos anos. A CENTROSUR usou um Análise de Decisão Multicritério baseado nos Sistemas de Informação Geográfica (SIG-ADMC) para encontrar locais ideais e alocar uma nova subestação. Porém, neste trabalho se propõe uma análise SIG-ADMC para roteamento de linhas de distribuição em alta e média tensão considerando fatores geográficos e critério especializado como modelo que faz parte da solução ao problema apresentado. A disponibilidade de informações e a acessibilidade aos recursos de computação tornam a escolha viável.

Portanto, este trabalho se concentrará no traçado ótimo de rotas radiais de linhas de distribuição, considerando critérios espaciais. Explorar a estrutura e natureza espacial através da avaliação dos fatores espaciais que intervêm no traçado de rotas em combinação com a montagem de uma rotina que pegue essa informação e aproveite a fortaleza de análise da teoria dos grafos para alcançar a máxima eficiência é o objetivo deste trabalho.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho está focalizado no planejamento de longo prazo de linhas elétricas do sistema de distribuição em alta e média tensão, com uma metodologia estruturada para fornecer ajuda no processo de tomada de decisão na escolha de rotas, minimizando os custos de construção, e reduzindo os impactos sociais e ambientais.

Os objetivos específicos procurados com o desenvolvimento deste trabalho são os seguintes:

- A integração de um modelo de decisão multicritério com o SIG, avaliando critérios técnicos e fatores geográficos envolvidos no roteamento de linhas elétricas para obter uma matriz de custo.
- Desenvolver uma metodologia de localização SIG baseado no modelo consistente entre critério de especialistas e automatização para seleção de rotas.

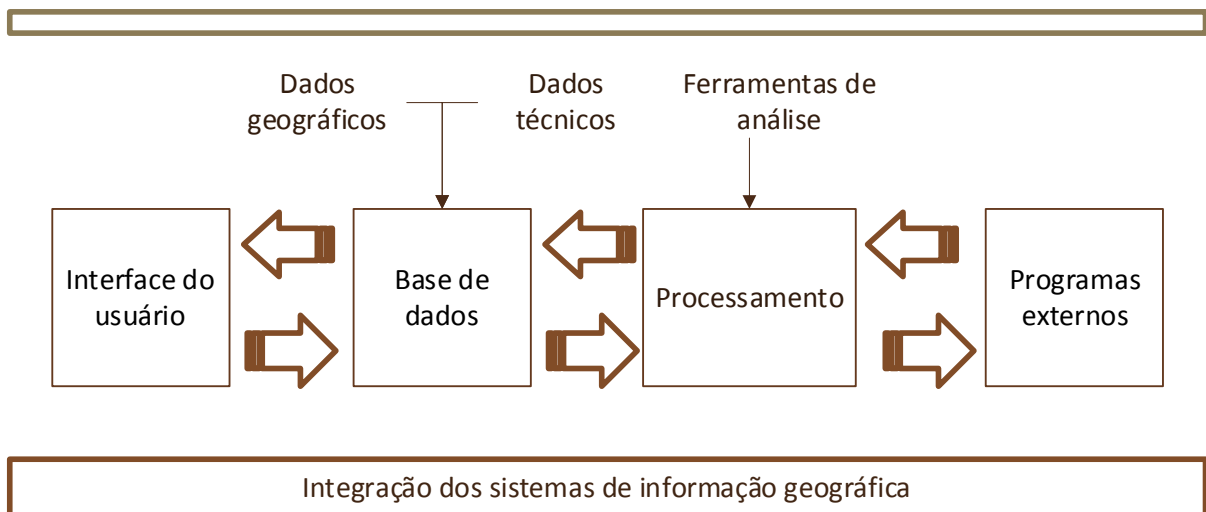
- Sistematizar um modelo espacial de rota ótima envolvendo ferramentas SIG e algoritmos eficientes de análise de grafos.
- Avaliar os resultados obtidos e estabelecer procedimentos formais para a aplicação do modelo.

1.2 Justificativa

Com o desenvolvimento de sistemas de gerenciamento e automação, a tecnologia de sistemas de informação geográfica (SIG) está sendo amplamente implementada em vários setores permitindo adicionar mais recursos de informação aos modelos: como no setor de energia, ambiental e risco entre outras (VEGA; SARMIENTO, 1996), (RAMÍREZ-ROSADO et al., 2005), (CHURCH; MURRAY, 2009).

O SIG fornece uma plataforma adequada que integra várias ferramentas para organização, análise, apresentação, manipulação, armazenamento e representação de bancos de dados vinculados a componentes espaciais, possibilitando extrair mais informações dos dados e realizar análises mais completas. Portanto a realização de uma análise espacial do sistema elétrico com a ajuda do SIG permite criar modelos eficientes para uma análise maior, adaptar os modelos no ambiente SIG resulta em um procedimento modular (LIN; TSAY; WU, 1997), conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Estrutura de um sistema de informação geográfica



Fonte: Elaboração do autor.

A utilização dos SIG nos estudos de planejamento dos sistemas elétricos de potência (SEP) contribui para uma melhor compreensão das condições técnicas e características topológicas nas quais se encontra a rede. O banco de dados SIG fornece informações importantes sobre as condições dos componentes das redes elétricas e dos clientes espalhados em grandes áreas geográficas.

Com a inserção de geração distribuída (GD) e recursos energéticos distribuídos se abrem novas aplicações para uso de SIG. Um projeto de integração de geração distribuída mostra como a incorporação de dados SIG na análise de redes de distribuição aportam um recurso essencial na adoção de uma tecnologia emergente (QUIRÓS-TORTÓS et al., 2017). Assim, o surgimento desse tipo de ferramenta ajuda a incentivar mudanças na estrutura regulatória abrindo espaço para novos atores elétricos, avaliando o impacto que eles produzem no sistema (MEEHAN, 2013).

Devido às características da análise espacial em toda uma área geográfica, o SIG permite identificar as relações, características e propriedades espaciais entre os diversos bancos de dados georreferenciados. Além disso, o SIG como ferramenta de análise vai se acoplando de melhor maneira aos *softwares* de análise e simulação fornecendo uma interfase de programação funcional com uma sintaxe simples, compacta e ordenada, para que seja possível automatizar rotinas e aproveitar a capacidade de interagir com outros pacotes, reduzindo o esforço computacional e abordando modelos complexos. Portanto, desta perspectiva o SIG é bem sucedido para vincular métodos e algoritmos às tecnologias modernas para auxiliar no problema de planejamento da tomada de decisão (KIM et al., 2014) (DE LIMA et al., 2016).

O roteamento é parte do problema de planejamento que envolve a otimização dos custos de instalação e manutenção de equipamentos sujeitos a restrições geográficas, ambientais, sociais e técnicas. Portanto, o roteamento pode ser definido em dois estágios.

O primeiro é o estágio anterior ao desenho técnico de uma nova linha de energia elétrica, onde o planejador decide a rota possível e as áreas geográficas através das quais a linha deve atravessar, levando em consideração as condições e restrições físicas. O segundo estágio considera todos os aspectos relacionados ao dimensionamento e seleção de equipamentos para manter as variáveis elétricas dentro dos limites de segurança (CHENG; CHANG, 2001) (KUMAR; SAMANTARAY; KAMWA, 2014).

Em relação ao primeiro estágio, definir os critérios espaciais é o principal aspecto envolvido no roteamento de linhas elétricas. Situações comuns relacionadas a evitar terrenos caros, obstáculos ou outros critérios de barreiras físicas levam a um desvio de uma rota direta. Portanto, o processo de roteamento deve ser realizado através de um modelo que inclua variáveis geográficas locais, de proximidade e de vizinhança que devem ser avaliadas com conhecimento especializado para obter soluções razoáveis.

Embora o conjunto de fatores a considerar no traçado das rotas possa variar para cada situação prática, podem ser identificados certos fatores determinantes que são comuns em vários casos, por exemplo: fatores ambientais como parques e rios, fatores sociais como locais históricos e fatores técnicos como declive e acesso.

Os SIG são projetados especificamente para gerenciar e analisar bancos de dados com atributos espaciais, e é por isso que foram testados em alguns projetos de linhas de transmissão como uma ferramenta de planejamento (EPRI-GTC, 2006) (MONTEIRO et al., 2005b).

Além disso, alguns trabalhos aplicaram um modelo SIG-ADMC para combinar critérios espaciais com a participação de diferentes entidades no processo de roteamento. Permitindo que os planejadores participem de maneira coordenada nos complexos problemas de tomada de decisão (MONTEIRO et al., 2005a).

1.3 Revisão bibliográfica

O planejamento de longo prazo da expansão do sistema de distribuição está relacionado à minimização de custos de capital e operacionais, estes são custos relacionados a investimentos, perdas de energia, confiabilidade etc. Os problemas do planejamento do sistema de distribuição geralmente são divididos em três categorias. Subestações em alta tensão (AT) ou média tensão (MT), roteamento de linhas em AT ou MT, e roteamento da rede em baixa tensão (BT) (FLETCHER et al., 2018).

Um problema enfrentado no roteamento de linhas elétricas é conectar com eficiência pontos de carga espalhados sobre uma ampla área geográfica. A modelagem que combina restrições geográficas com técnicas de otimização apropriadas contribuem para reduzir custos. A seguinte revisão de literatura mostra uma variedade de trabalhos relacionados ao problema apresentado.

Electric Power Research Institute (EPRI) e a *Georgia Transmission Corporation (GTC)* desenvolveram um projeto com o propósito de padronizar um processo na alocação das linhas de transmissão, combinando o juízo dos tomadores de decisão com tecnologia SIG e métodos de avaliação estatística, a metodologia integra uma superfície acumulada para definir as rotas (EPRI-GTC, 2006).

Um modelamento geoespacial para roteamento de linhas de transmissão de energia com um caso de estudo na Turquia é desenvolvido através da ponderação de mapas topográficos usando o software comercial ArcGIS, para mostrar o ganho os resultados são comparados com a rota de uma linha desenhada sem considerar restrições geográficas (YILDIRIM; NISANCI, 2010).

Um tópico importante no roteamento de linhas elétricas está relacionado com a intervenção em diferente medida dos diversos interesses socioeconômicos de grupos envolvidos no processo de planejamento (empresas de serviços públicos, agentes ambientais ou autoridades locais e regionais). Um sistema multicritério de ajuda à decisão (*Decision System Aid - DAS*) utiliza uma técnica de ponderação multicritério baseado no uso de recursos geográficos como o principal componente para refletir os distintos interesses dos agentes de decisão (MONTEIRO et al., 2005a). Além disto, em um trabalho decorrente usa um modelo de programação dinâmico para otimização de rotas, juntamente com uma modelagem das restrições geográficas através de funções de custos plasmadas em superfícies topográficas, o modelagem inclui custos dependentes da geografia e de equipamento não-geográfico. Um abordagem de corredores econômicos também é considerado (MONTEIRO et al., 2005b).

Até agora a maior parte de trabalhos apresentados estão relacionados ao planejamento do sistema de transmissão (KIM et al., 2014) (DE LIMA et al., 2016) (VISWARANI et al., 2014) (EKEL et al., 2019) (GILL et al., 2006). No planejamento do sistema de distribuição os trabalhos centram-se nas técnicas de solução, algoritmos heurísticos e de otimização são levados em consideração.

Uma técnica de programação dinâmica é usada para planejar redes de distribuição radial em MT; uma malha geográfica ponderada, equipamentos e cargas georreferenciadas são considerados para a seleção ótima do bitola do condutor e suas rotas (BOULAXIS; PAPADOPOULOS, 2002).

Uma abordagem como planejamento do sistema elétrico, integrando no roteamento de linhas as características geográficas, é realizado através de um modelo

de programação inteira que atua sobre uma superfície topográfica ponderada, minimizando o custo acumulado e mantendo o balanço de fluxos de potência. A formulação é simplificada com técnicas de álgebra inteira, reduzindo assim um problema de programação não linear inteira mista (MINLP) a um problema de programação linear inteira mista (MILP) (SHU et al., 2012).

Um método de otimização para determinar as rotas de um sistema de distribuição radial em MT é desenvolvido pela implementação de algoritmos genéticos (AG) no problema de caminho mais curto. O AG utiliza uma codificação de comprimento variável e considera as linhas candidatas não fixas por meio da adição de pontos no espaço conhecidos como “Pontos de Steiner” e uma técnica de reconfiguração, como os principais mecanismos para encontrar uma topologia da rede eficiente. Os custos de confiabilidade e queda de tensão são incorporados com a ajuda da ferramenta de análise MATPOWER. O impacto ambiental e os custos de investimento relacionados a fatores geográficos são levados em consideração por meio de uma estrutura de dados SIG. O método é testado em um sistema real no sudoeste da Austrália (FLETCHER et al., 2018).

1.4 Contribuições

Até hoje as metodologias de planejamento de linhas de distribuição propostas em (FLETCHER et al., 2018) (SHU et al., 2012) são as mais destacadas, porém, somente zonas restritas e declives tem sido consideradas. Desta forma neste trabalho, através de um método SIG-ADMC que integra um modelo de combinação linear ponderada e um processo de análise hierárquica, e a partir de um banco de dados, são definidos e calibrados os fatores espaciais que têm maior impacto no roteamento de linhas de distribuição satisfazendo critérios técnicos, econômicos e ambientais.

No trabalho mais atual (FLETCHER et al., 2018) na linha de pesquisa, o sistema de distribuição é levado para um grafo mas não os dados geográficos, dificultando o planejamento da expansão visando na avaliação integral das características operacionais do sistema considerando restrições geográficas. Assim, para obter um melhor desempenho, por meio do SIG propõe-se a integração de dados referentes às condições geográficas que influenciam no roteamento de linhas elétricas para um grafo com estrutura de rede. Este é o primeiro passo no processo de

integração do SIG na análise e planejamento de longo prazo do sistema de distribuição.

A metodologia utiliza uma alta resolução espacial 20x20 metros, é sistematizada montando uma rotina em uma linguagem de programação Python de código aberto, e é avaliada com um caso real de planejamento da expansão do SDAT na área de serviço de uma concessionária de energia equatoriana.

2 MÉTODOLOGIA DE ROTEAMENTO

Se propõe uma metodologia que é desenvolvida de forma modular, em três partes, para que cada uma seja modelada de forma independente, mas com uma estrutura articulada. A estrutura permite que cada um dos módulos se concentre em uma função específica e, assim, obtenha unidades simplificadas, especializadas de acordo com as capacidades e os dados que estão em gestão. O objetivo é maximizar o potencial de cada módulo.

Cada módulo possui um modelo espacial associado: avaliação de critérios de especialistas, modelagem do problema de roteamento e captura do ambiente espacial em uma estrutura de rede (grafos). Os modelos, juntamente com as ferramentas computacionais, fornecem uma análise sequencial, mas ao mesmo tempo permitem uma avaliação independente dos resultados de cada um deles.

Começa identificando as relações espaciais entre os requisitos exigidos no roteamento das linhas elétricas e as características geográficas dos locais através da avaliação de critérios espaciais. Posteriormente, as trajetórias são modeladas em um contexto de otimização com base em parâmetros de custo e restrições físicas de roteamento. Finalmente, todas as informações geográficas disponíveis são levadas a uma estrutura de grafos para estabelecê-las como atributos que possibilitam estender a análise adicionando mais critérios de simulação.

O processo da estrutura proposta que foi descrito acima é detalhado a continuação:

- 1 Mapas de cobertura geográfica são criadas para cada fator de avaliação, em que cada atributo tem um valor com base na função de um critério espacial.
- 2 Cada uma das coberturas geográficas é ajustada e combinada para criar uma matriz de custos¹, em que o valor de cada elemento da matriz representa o custo total de atravessar uma linha elétrica através dessa localidade.
- 3 Um modelo de otimização trabalha na matriz de custos, definindo traçados de rotas entre os pontos a serem conectados.

¹ Uma matriz de custos representa um arranjo do plano cartesiano em que cada um de seus elementos é referenciado a uma posição em um sistema de coordenadas geográficas.

- 4 Uma análise de corredores é usada para determinar possíveis rotas alternativas, além de reduzir o espaço de busca no momento de definir um grafo com estrutura de rede de malha.
- 5 Uma rotina é desenvolvida para integrar cada um dos processos dentro de uma plataforma de código livre Python e combinar o análise espacial com o análise de grafos. Se utiliza um algoritmo de rota mínima Dijkstra que faz parte de um pacote de análise de grafos Networkx para avaliar o desempenho da metodologia.

O roteamento das linhas elétricas está condicionado por aspectos geográficos, dentre os principais estão os relacionados aos setores ambiental, econômico e de engenharia, os quais encontram-se digitalizados em diferentes formatos. Assim, as condições existentes (infraestrutura e cartografia do espaço físico), como rede viária, ferrovias, uso da terra, grandes parques industriais etc. devem ser representadas como coberturas.

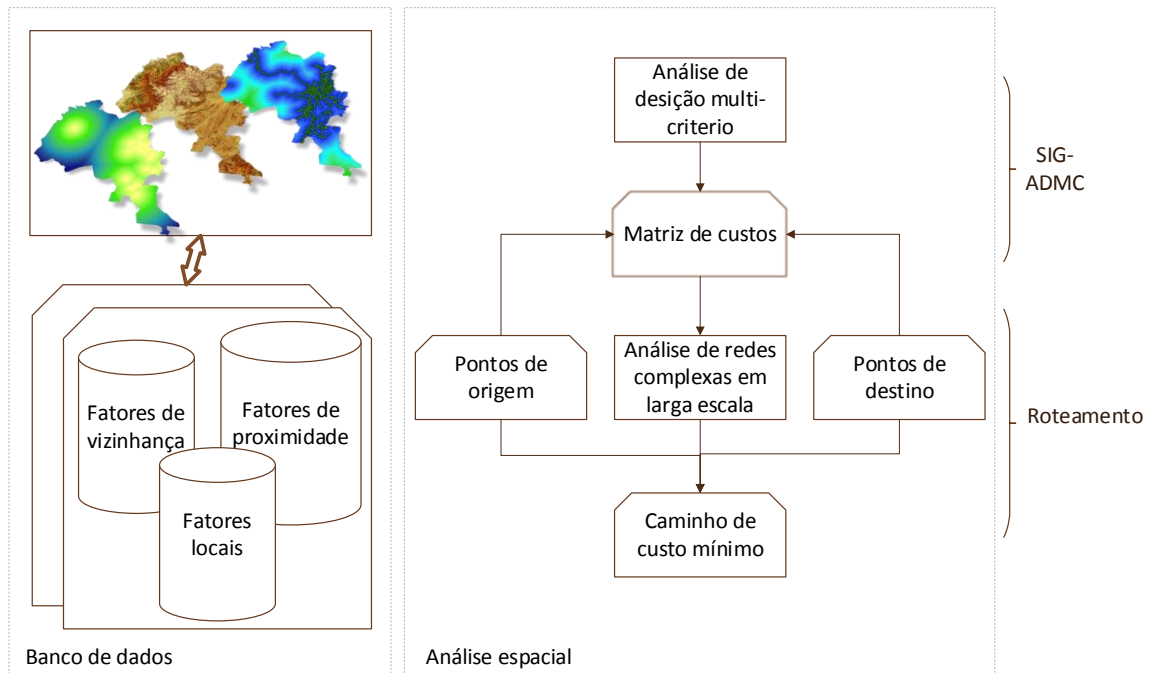
Nesse contexto, haverá um banco de dados com diagramas, figuras, arquivos e outras informações referentes as condições existentes envolvidas no desenho das rotas, difíceis de gerenciar e processar em conjunto. Portanto, é necessário mudar para uma estrutura de dados raster² devido a sua facilidade de análise, captura do entorno geográfico em um ambiente discreto e agilidade de processamento baseada no SIG.

Modelos e algoritmos são importantes, mas definir um procedimento estruturado para formalizar uma metodologia que se alinhe ao problema de planejar a expansão do sistema de distribuição também é um aspecto importante e ponto de partida de qualquer plano. Assim, o esquema integra algoritmos e ferramentas que facilitam a sistematização do desenho de planejamento de rotas.

A sistematização do processo é uma integração do SIG com sistemas de gerenciamento de banco de dados e modelos computacionais. O diagrama da Figura 2 mostra a estrutura completa do processo para obter o roteamento do SDAT e SDMT.

² Um raster é uma matriz simples formada por um arranjo em linhas e colunas de quadriculas geográficas (pixels), em que cada quadricula tem associado um valor que representa um fenômeno específico, como: temperatura, elevação, etc. (¿QUÉ SON LOS DATOS RÁSTER?—AYUDA | ARCGIS FOR DESKTOP, [s.d.]).

Figura 2 - Estrutura para o modelo de rota ótima



Fonte: Elaboração do autor.

A estrutura da metodologia é um processo linear, não iterativo que depende de duas ferramentas principais, elas são: uma ferramenta de análise de decisão multicritério e uma ferramenta de roteamento baseada em análise de redes. Se sistematiza os módulos e modelos utilizados, onde a interação deles são controlados pelos tomadores de decisões. A interface apresentada na Figura 1 e a estrutura da Figura 2 estabelecem a participação de algoritmos, pacotes e ferramentas padrão integradas em uma plataforma SIG.

Dados. - Conforme descrito, o primeiro passo é a criação do banco de dados com a coleta e o gerenciamento de informações. Esses conjuntos de dados correspondem ao uso da terra, declives, estradas, rede elétrica existente, infraestrutura linear, flora, fauna, áreas protegidas, lagos, rios e todas as informações relacionadas ao modelo, seja em formato vetorial ou raster. Assim, cada conjunto de dados passa por um estágio de processamento até alcançar os mapas de cobertura com um formato de estrutura raster, os quais são os dados de entrada ao modelo.

Ajuste. - A seleção dos fatores espaciais e o ajuste das capas raster em função com as condições e a influência do espaço físico fazem parte do processo de categorização dos fatores. O processo consiste em definir os fatores que têm maior influência e, posteriormente, calcular o nível de importância normalizada com relação a todos os fatores em consideração. Além disso, a área de trabalho é definida, bem

como a resolução ou o tamanho de quadricula do espaço discreto estabelecido. A escolha da resolução é um aspecto que envolve um consenso entre a precisão do resultado requerido, detalhe da informação disponível e o esforço computacional tolerado, particularmente neste caso, uma resolução (tamanho da quadricula) de 20x20 metros foi selecionada baseada na informação de entrada.

Análise. - Um método de análise de decisão multicritério (ADMC) integrando sistemas de informações geográficas conhecido como (SIG-ADMC) (MALCZEWSKI; RINNER, 2015) e uma estrutura de análise hierárquica (*Analytic Hierarchy Process - AHP*) (TOBISZEWSKI et al., 1999) são empregados para obter uma superfície (mapas de cobertura) de custo, conseguindo desta maneira ajustar os fatores e capturar as preferências estabelecidas pelos agentes de decisão. A maneira como são utilizados os níveis hierárquicos para obter pesos dos fatores é apresentado mais para frente. Os cálculos são feitos com base na ponderação das superfícies, respectivamente calibradas em relação a uma função de influência relativa. O resultado do SIG-ADMC representa o custo de atravessar uma determinada quadricula com uma linha elétrica.

Áreas restritas. - Entre os critérios a serem considerados no modelo estão as áreas que, devido às suas características, são absolutamente impossíveis de atravessar, portanto devem ser estabelecidas como barreiras ou restrições físicas. Entre eles estão as áreas ativas de deslizamento de terra, áreas de flora e fauna, áreas protegidas, corpos de água, etc. Uma maneira de impedir ou penalizar que a rota passe pelas zonas que têm essa característica atribuída é atribuir um valor muito alto, de modo que o custo da passagem seja atribuído como um valor máximo, o que significa que a travessia é bastante difícil, por exemplo, áreas densamente povoadas, áreas com altas inclinações.

Características especiais. - O traçado é baseado em três parâmetros: matriz de custo, pontos de origem e pontos de destino. Os pontos de origem são designados como locais de referência onde estão localizadas as entidades de serviço, que neste caso é uma subestação em AT. Enquanto os pontos de destino são os locais com os quais a subestação deve ser conectada, ao considerar o SDAT (69 kV), os transformadores das cargas que fazem parte desse nível de tensão serão os pontos de destino do modelo.

Roteamento. - Um algoritmo de programação dinâmica que calcula os custos de transição entre quadriculas define uma superfície de custo cumulativa onde várias alternativas de rotas ótimas podem ser avaliados. Este procedimento obtém zonas de

cobertura simulando o roteamento de linhas de energia da subestação para todas as direções da superfície de custo discreta.

2.1 Método de análise de decisão multicritério

Os modelos SIG-ADMC que combinam uma análise de decisão multicritério usando Sistemas de Informações Geográficas são os mais utilizados para solucionar problemas relacionados a tomadas de decisões e critérios. O modelo consiste em uma combinação aditiva de variáveis lineares (*Weighted Linear Combination - WLC*), isso significa que cada uma das variáveis é independente e a pontuação dos atributos de uma variável não interfere com as de outra. Seu recurso intuitivo para analisar situações de decisão e gerenciamento permite que os tomadores de decisão se envolvam no processo, o que o levou a ser o mais usado em várias áreas de pesquisa (GÓMEZ DELGADO; BARREDO CANO, 2006). O modelo matemático é apresentado em (1).

$$C(A_i) = \sum_{k=1}^n \omega_k T(a_{ik}) \quad (1)$$

O modelo apresentado em (1) é um procedimento de combinação de critérios e atributos, no qual dois componentes são distinguidos. O primeiro representa os pesos ω dos critérios $k = 1, 2, \dots, n$ e o segundo corresponde a uma função de pontuação $T(a_{ik})$ que qualifica os atributos $a_{ik} = a_{1k}, a_{2k}, \dots, a_{mk}$ de cada critério para valorar a preferência espacial de seus elementos. $C(A_i)$ é o valor total caracterizado como um nível de preferência ou custo de atravessar uma linha elétrica pelo atributo A_i na localização geográfica (x_i, y_i) , onde o número de atributos não depende dos critérios.

Para implementar esse procedimento, a etapa inicial é definir claramente como cada um dos critérios está envolvido no problema. A seleção dos critérios e sua avaliação por pares são essenciais para a construção da matriz de avaliação. Uma má exploração no processo da elaboração causará inconsistência nos resultados e, com isso, a confiabilidade dos resultados estará em debate, produzindo uma oposição entre os atores.

Dependendo da experiência do planejador, das restrições regulatórias e da complexidade do problema, a determinação da rota ideal pode variar de um projeto

para outro. No entanto, a maioria dos projetos de rotas é baseada na experiência e no senso comum do planejador, obtido de outros projetos. Algumas práticas gerais, como envolver o critério do especialista para realizar o planejamento, são fatores que não podem ser descartados. Portanto, os critérios baseados em técnicas e regulamentos formais para o planejamento de rotas (como direito de passagem, serviços públicos planejados para o futuro, encaminhamento por terras privadas, condições geotécnicas subterrâneas instáveis, áreas de restrição municipal, etc.) são combinadas com conhecimento e experiência para determinar possíveis rotas.

Como foi mencionado acima, a seleção de critérios é um dos pontos em que maior ênfase deve ser dada. Neste estudo, para definir o conjunto de critérios envolvidos no problema, foram utilizados três recursos:

- Consulta com especialistas.
- Pesquisa relacionada.
- Práticas padronizadas

Definição dos critérios

Linhas elétricas com caminhos retos quase nunca ocorrem em um sistema real, os fatores geográficos são os principais aspectos que intervêm no desenho das rotas, pois eles influenciam diretamente nos custos de construção (CHENG; CHANG, 2001). Uma compilação de literatura relacionada à avaliação de custos de rotas permite definir os fatores envolvidos no layout das linhas de distribuição em AT e MT (GILL et al., 2006) (SHU et al., 2012) , os detalhes de cada um deles são descritos abaixo.

Ambiental. - As áreas cobertas por vegetação produzem um aumento nos custos de instalação e manutenção causados pelo corte e poda da vegetação. Áreas com alto valor ambiental devem ser evitadas, pois as atividades relacionadas à construção afetam a vegetação; portanto, políticas ambientais devem ser consideradas nesses casos. Usar equipamento adequado para reduzir o impacto representa um custo adicional, por exemplo, fazer uma transição de uma linha aérea para uma linha subterrânea para se harmonizar com o meio ambiente e diminuir o impacto, no entanto, é uma alternativa que pode não ser economicamente viável.

Solo. - O custo relacionado ao tipo de solo é afetado pelo tipo de escavação e pelo reforço das fundações necessárias no momento de erigir os postes. Além disso,

o uso da terra causará uma estimativa do preço e da disposição da terra, afetando, assim, o direito de passagem, por exemplo, áreas próximas a indústrias com ambiente corrosivo.

Orografia. - Os custos relativos à complexidade do terreno são avaliados de acordo com o gradiente do terreno. Terrenos complexos envolvem diferentes níveis de altitude e declives, o que se traduz em torres mais altas, mais unidades e equipamentos de ancoragem adicionais para suportar o maior estresse mecânico em relação a terrenos planos. Zonas elevadas são propensas a uma maior probabilidade de descargas atmosféricas, aumentando o custo para as estruturas de proteção necessárias, portanto, essas zonas devem ser evitadas.

Hidrologia. - Rios, córregos, lagoas podem ser obstáculos que interferem no traçado. Atravessar essas barreiras por razões de segurança envolve um reforço de estruturas e fundações de ambos os lados para suportar as forças mecânicas presentes.

Acessibilidade. - O financiamento para a construção de uma linha de energia inclui custos relacionados ao transporte, instalação e manutenção de equipamentos de curto, médio e longo prazo. É um fator que depende de uma localização geográfica em relação a uma determinada infraestrutura e é calculado com uma função espacial de custo-distância. A acessibilidade e o direito de passagem das linhas são garantidos nas proximidades de estradas, avenidas e ruas.

Infraestrutura. - Políticas para a recuperação e preservação dos espaços públicos estabelecidos pelos municípios, bem como planos de ordenamento territorial que regulam a ocupação e transformação do espaço físico urbano e rural não podem ser ignorados. Portanto, durante o estágio inicial do planejamento de rotas, existem projetos lineares e outros projetos propostos que devem ser levados em consideração. Por exemplo, atividades de construção, como a preparação do direito de passagem para a construção de uma linha elétrica, depende de outros projetos lineares, como vias férreas, viadutos, pontes, etc.

Segurança. - Circunstâncias como falhas elétricas nas linhas põem em risco a segurança da vizinhança, essas situações criam arcos que podem acionar incêndios se forem expostos perto de material inflamável, como a vegetação, por exemplo. Os campos magnéticos e elétricos também podem induzir correntes nos objetos se eles forem expostos a distâncias de segurança inadequada.

Rede existente. - A expansão do sistema de distribuição envolve a criação de nova rede elétrica, bem como a reutilização da infraestrutura existente através do reforço do circuito. Então, considerando a rede elétrica existente, uma trajetória geográfica pode ser determinada.

2.2 Processo de hierarquia analítica

No procedimento de combinação pareada, uma das técnicas mais usadas focadas na determinação de pesos em problemas de decisão com vários critérios, é o processo de hierarquia analítica (*Analytic Hierarchy Process* - AHP). O método requer um processo de decomposição, julgamento comparativo e síntese de prioridades.

O processo de decomposição revela hierarquicamente os critérios envolvidos no problema. Enquanto, por julgamento comparativo, os critérios são avaliados de maneira simplificada e ordenada. Uma estrutura com vários níveis hierárquicos é construída através de uma escala de prioridade.

O processo de hierarquia analítica é resumido na seguinte lista:

- 1 Estabeleça uma estrutura hierárquica.
- 2 Classifique cada critério com base no ponto 1 com o método de comparação entre pares.
- 3 Defina uma classificação prioritária através do cálculo dos pesos.

A abordagem SIG-AHP visa avaliar cada alternativa de forma integral, usando uma combinação de regras com capas de atributos. É uma abordagem amplamente usada para problemas com um grande número de alternativas respaldadas pelo princípio do julgamento comparativo.

Então, para classificar os n critérios em relação a uma estrutura hierárquica, a comparação pareada é desenvolvida em uma matriz recíproca ζ (2) entre o critério p e o critério q . O método de comparação é referido a uma escala subjacente denominada escala fundamental de Saaty e de acordo com o princípio da transitividade.

A matriz estabelecida em (2) é expressada como uma estrutura tabular para facilitar a comparação de fatores e calcular os pesos de cada um dos critérios (3), onde ζ é uma matriz recíproca com $c_{pq} = c_{qp}^{-1}$ e todos os seus elementos diagonais

iguais a 1. O vetor de pesos ω pode ser calculado resolvendo (3), considerando que λ_{max} é o maior autovalor de ζ (DE LIMA et al., 2016).

$$\zeta = [c_{pq}]_{n \times n} = \begin{bmatrix} 1 & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ 1/c_{12} & 1 & \dots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/c_{1n} & 1/c_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\zeta \omega = \lambda_{max} \omega \quad (3)$$

O procedimento para resolver (3) é apresentado em (MALCZEWSKI; RINNER, 2015), que calcula os pesos (5) através de um processo de normalização (4).

$$c_{qp}^* = \frac{c_{qp}}{\sum_{q=1}^n c_{qp}} \quad (4)$$

$$\omega_q = \frac{\sum_{p=1}^n c_{qp}^*}{n} \quad (5)$$

O método para estimar os pesos dos critérios está sujeito a um grau de inconsistência causado pelo princípio de transitividade em que se baseia; pois a qualidade da decisão depende da consistência dos julgamentos feitos na comparação pareada. Portanto (6) apresenta uma maneira de avaliar a razão de consistência.

$$CR = \frac{\lambda_{max} - n}{RI(n - 1)} \quad (6)$$

Onde RI é um índice que depende do número de critérios e é gerado comparando aleatoriamente N matrizes ζ de tamanho n (RAO TUMMALA; WAN, 1994). O método AHP foi testado em várias situações, portanto, recomenda-se uma razão de consistência $CR < 0,1$, assim, conforme o número de critérios n exibido na Tabela 1 será avaliado a razão de consistência. Se for $CR \geq 0,1$ é necessário revisar e reconsiderar as comparações (MALCZEWSKI; RINNER, 2015) (TOBISZEWSKI et al., 1999).

Tabela 1 - Índice de inconsistência randômico médio do AHP

| n | RI |
|----------|-----------|
| 1 | 0 |
| 2 | 0 |
| 3 | 0,58 |
| 4 | 0,9 |
| 5 | 1,12 |
| 6 | 1,24 |
| 7 | 1,32 |
| 8 | 1,41 |
| 9 | 1,45 |
| 10 | 1,49 |
| 11 | 1,51 |
| 12 | 1,54 |

Fonte: (TOBISZEWSKI et al., 1999).

A comparação é feita com base no grau de importância entre os critérios; o grau de importância pode ser quantificado com base em uma escala de preferências que reflete a percepção de importância do tomador de decisão em relação a um critério. A escala Saaty é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Escala de Saaty

| Valor | Categoria | Definição |
|--------------|--|--|
| 1 | Igual importância | Dois atividades contribuem igualmente para o objetivo |
| 2 | * | * |
| 3 | Importância moderada | A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em detrimento de outra |
| 4 | * | * |
| 5 | Forte importância | Experiência e julgamento favorecem fortemente uma atividade em detrimento de outra |
| 6 | * | * |
| 7 | Importância muito forte ou demonstrada | Uma atividade é favorecida fortemente contra outra; seu domínio demonstrado na prática |
| 8 | * | * |
| 9 | Extrema importância | A evidência que favorece uma atividade em detrimento de outra é de maior ordem possível de afirmação |

Valores com “*” correspondem a valores intermediários entre duas categorias.

Fonte:(TOBISZEWSKI et al., 1999).

2.3 Funções de normalização

A pontuação do atributo depende da relação espacial entre cada elemento e uma locação de referência. A relação espacial pode ser modelada através de funções matemáticas que permitem quantificar essas relações com níveis de aproximação (TOBISZEWSKI et al., 1999), no entanto, uma pontuação linear provou ser eficaz (DEDEMEN, 2013). Além de qualificar os critérios, as funções também têm o objetivo de transformar as unidades dos critérios em unidades padronizadas, para que possam ser comparadas e combinadas com uma escala comum.

As preferências do tomador de decisão podem ser expressas através de (7) ou (8) para que o critério k-th seja crescente ou decrescente, respectivamente.

$$T(a_{ik}) = \left(\frac{\max_i\{a_{ik}\} - a_{ik}}{r_k} \right)^\rho \quad (7)$$

$$T(a_{ik}) = \left(\frac{a_{ik} - \min_i\{a_{ik}\}}{r_k} \right)^\rho \quad (8)$$

$$r_k = \max_i\{a_{ik}\} - \min_i\{a_{ik}\} \quad (9)$$

Onde, a_{ik} é o valor do i-ésimo atributo para o k-ésimo critério, ρ pode ser interpretado como um parâmetro de risco associado com uma decisão que define a linearidade da função e é definida pelo tomador de decisão. Um conjunto simétrico de

funções $\begin{cases} 0 < \rho < 1 \\ \rho > 1 \\ \rho = 1 \end{cases}$ fornece valores padronizados e, para isso, é necessário subtrair

$T(a_{ik})$ de 1. $T(a_{ik})$ é o valor de preferência desse atributo em relação a nesse critério, o menor valor 0 representa um nível de preferência mínimo e o maior valor 1 representa um nível de preferência máximo.

Dependendo da escolha do tomador de decisão, as funções de padronização também podem ser modeladas como funções de custo (MONTEIRO et al., 2005b) e, com isso, cada critério corresponde a uma cobertura geográfica, onde as informações associadas de cada atributo representam um custo relativo. Essa consideração simplifica o modelo que será apresentado mais adiante na equação (11) com a eliminação do termo $\omega_k(i)$.

2.4 Rotas baseadas na programação dinâmica

O modelo estabelecido para o traçado ótimo de custo mínimo usando um algoritmo de programação dinâmica é desenvolvido através de um processo que calcula os custos cumulativos de transição entre os pontos de origem e destino. Esses algoritmos baseados na programação dinâmica são adequados para trabalhar em problemas discretizados e sequenciais, tais características apresentam os sistemas de informações geográficas com estruturas de dados raster (GARRIDO, 2015). Portanto, é necessário abordar algumas definições dessa abordagem.

No entanto fazer um esclarecimento deve ser feito, então, uma cobertura geográfica com uma estrutura raster é formada por micro áreas cujo centro define um nó que reúne todas suas características em um ponto.

Propriedade Markoviana.- O princípio da otimalidade estabelece que, dado um estado S_k , o estágio atual k é independente do estágio $k - 1$; isto é, se as agregações sequenciais são ótimas, a agregação total é ótima. A solução de um problema de rota com topologia radial é resolvida sistematicamente, onde cada nó de destino deve ser conectado ao nó de origem de forma iterativa em cada elemento da matriz de custos. Como cada sequência é ótima, o traçado será ótimo para que a propriedade Markoviana seja válida.

Estágio. - Um estágio é definido como um subconjunto de nós de uma rede, da mesma forma esses nós são classificados em estágios. Os nós de cada estágio são distribuídos espacialmente em torno de um ponto de origem; o espalhamento atende às seguintes características.

- 1 Um estágio contém um nó.
- 2 Os estágios seguem uma ordem do nó de origem para os nós de destino, ou seja, da subestação aos transformadores das cargas.
- 3 Um nó do estágio k está mais próximo do nó de origem do que um nó do estágio $k + 1$.
- 4 O primeiro estágio contém apenas o nó de origem, enquanto o último estágio contém todos os nós anteriores até o nó de destino mais distante.

Estado. - Um estado t_k é definido como um subconjunto de nós conectados aos nós dos estágios $k, k + 1, \dots, N$. Cada configuração de conexão dentro de um estado t_k executa uma otimização local entre os nós de destino e o nó do estado t_k .

Portanto, uma cadeia de interconexão ótima entre cada um dos estágios se desenvolve progressivamente.

O custo cumulativo de transição é definido como um custo total que gera a movimentação sobre um espaço discreto da posição k até um ponto de origem. Os custos de transição cumulativos são baseados em um parâmetro chamado distância de custo por unidade.

A distância de custo por unidade quantifica o custo de conexão de dois nós e é definida como a média dos custos derivados dos nós conectados (10).

$$C_{k,k-1} = \frac{C_k + C_{k-1}}{2} \quad (10)$$

O custo de transição está associado a uma impedância multiplicando a distância de custo por unidade $C_{k,k-1}$ e o tamanho da quadricula r . O valor da impedância representa um custo de deslocamento causado pela movimentação entre dois nós pertencentes aos estágios $k, k - 1$ dos estados t_k, t_{k-1} , respectivamente.

O valor da impedância depende do custo de cada quadricula, sua orientação espacial e a forma da trajetória de deslocamento. O custo de cada quadricula C_k é obtido pelo método SIG-ADMC, com base na análise de critérios espaciais e restrições geográficas apresentados na seção 2.1, assim, o modelo usado se apresenta em (11).

$$C_k = \sum_{i=1}^n \omega_k(i) \cdot T_k(i) \times \prod_{j=1}^m \psi_k(j) \quad (11)$$

Onde, ω_k é o peso relativo a um critério i , k corresponde a uma posição do espaço discreto bidimensional. T_k é um valor de pontuação em relação a uma função de influencia. ψ_k é uma variável binária para representar a restrição do uso da terra em relação à restrição; j ; $\begin{cases} \psi = 0 \text{ restrito} \\ \psi = 1 \text{ em outro caso} \end{cases}$, n é o número de critérios espaciais, m é o número de restrições.

A partir do custo da quadricula e dependendo da direção da viagem, o custo de transição $F(l_k)$ é definido em (12) se a direção for transversal e (13) se a direção for diagonal.

$$F(l_k) = r \times C_{k,k-1} \quad (12)$$

$$F(l_k) = \sqrt{2} \times r \times C_{k,k-1} \quad (13)$$

Onde r representa o tamanho da célula (resolução), k corresponde a uma posição do espaço discreto bidimensional.

O desvio de caminhos retos causa custos adicionais associados a mudanças de direção; esses custos adicionais são considerados na modelagem da função de custos. Assim, de acordo com a formulação que se apresenta em (12) e (13), o modelo permite traçar rotas de custo mínimo penalizando distância e mudança de direção (CÓMO FUNCIONAN LAS HERRAMIENTAS DE COSTE DE DISTANCIA—AYUDA | ARCGIS FOR DESKTOP, [s.d.]).

Um estágio k e um estado estão associados a um nó k ; isto é, um estágio está associado a uma característica de localização geográfica, enquanto um estado está relacionado a transições sucessivas nesses locais. A minimização do custo cumulativo de transição é o objetivo do problema.

O algoritmo de programação dinâmica trabalha na matriz de custos seguindo uma sequência de estados com base na impedância calculada em cada estágio. O algoritmo itera sobre os estados e define um caminho selecionando os nós que levam ao custo cumulativo mínimo de transição $G_t(p_k)$, o modelagem é definido em (14). No ponto de origem p_0 (nó zero), o custo da função é zero $G_0(p_0) = 0$ se nenhum custo fixo inicial for especificado.

$$G_t(p_k) = \min[G_{t,t-1}(p_{k-1}) + F(l_k)] \quad (14)$$

Onde, t representa um estado correspondente a uma sequência iterativa, $p_{k-1} \in \Omega_{p_k}^{1...8}$ descreve um locação adjacente à posição k da vizinhança Ω .

O cálculo dos custos mínimos acumulados é realizado em todo o espaço discreto (cobertura geográfica) e, com ele, os resultados computacionais podem definir áreas de cobertura baseada em um análise de rotas ótimas. O modelo foi testado em várias situações (GARRIDO, 2015) (EPRI-GTC, 2006) e provou ser bastante eficaz. Portanto, nesta situação, será considerado para definir rotas ótimas e explorar alternativas que ficam dentro de uma concepção provável.

Existem várias opções de traçado viáveis que dependem da folga dos critérios espaciais, portanto, pode-se controlar cada uma delas de forma integral em torno do traçado ótimo, isto é, desenhar traçados mantendo um custo dentro de um limite predefinido próximo ao ótimo. Para isso, o princípio dos corretores será abordado.

Um corredor geográfico é entendido como uma faixa que abraça uma determinada rota cumprindo certas características qualitativas ou quantitativas, neste caso a área ao redor da rota é mantida dentro de um limiar h_{max} . Visto da abordagem do modelo espacial apresentado, implica determinar um traçado com um pequeno desvio da trajetória ótima. Ou seja, dados dois pontos A, B, uma rota alternativa pode ser calculada $\{p_A, \dots, p_k, \dots, p_B\}$ com um custo $h_{p_A, p_B}(p_k)$ mantendo um fator de desvio respeito do custo mínimo h_{min} do traçado ótimo (15) (GARRIDO, 2015).

$$h_{min} \leq h_{p_A, p_B}(p_k) \leq h_{max} \quad (15)$$

Do traçado ótimo o custo para o percurso alternativo através do nó p_k pode ser obtido a partir de (16).

$$h_{p_A, p_B}(p_k) = G_{p_A}(p_k) + G_{p_B}(p_k) \quad (16)$$

Para alcançar um processo sistemático o fator de desvio não deve ser expressado em termos de custo. Assim, estabelecer alternativas de traçados adequados pode ser realizado através de um índice de impedância R usando (17) que é obtido totalizando o custo da rota, e cada uma delas pode ser referida de acordo a escolha de α que é uma porcentagem de desvio da rota ótima R_{opt} . Uma boa escolha fica entre ($0\% < \alpha < 15\%$). Com base nesse parâmetro, é possível estabelecer uma faixa R^* de rotas alternativas para selecionar uma entre um conjunto de opções aceitáveis (18).

$$R = \sum_{k=1}^S h_{p_A, p_B}(p_k) \quad (17)$$

$$R^* = (1 + \alpha) \cdot R_{opt} \quad (18)$$

Onde, $S = \{k/ k \in R\}$ é o conjunto de todos os nós pertencentes a uma rota R .

2.5 Modelo de rota de custo mínimo

O algoritmo de rota de custo mínimo atua em três variáveis: matriz de custo, pontos de origem e pontos de destino. Nesta seção a subestação será referenciada como ponto de origem e os transformadores de distribuição como pontos de destino. Os pontos de destino, bem como o ponto de origem e a cobertura geográfica são

assumidos como dados de entrada (ENTENDER EL ANÁLISIS DE COSTE-DISTANCIA—AYUDA | ARCGIS FOR DESKTOP, [s.d.]).

Para conectar a subestação aos transformadores de distribuição, o modelo procura a rota da impedância mínima com o custo mínimo de transição acumulado através da matriz de custos (12) e (13), quer dizer encontrar uma trajetória que totalize um custo menor de transição do que qualquer outro (14).

O processo de traçado busca a trajetória mais direto possível, controlado por uma função de custo que depende da distância e do valor de cada quadricula, evitando áreas com altas pontuações e barreiras geográficas. As rotas com os menores custos são as melhores alternativas.

O modelo consiste em um processo iterativo t sobre uma estrutura espacial com uma matriz de nós definidos por uma posição geográfica p e categorizados nos estágios k . O processo começa nas quadriculas de origem atribuindo um valor de custo acumulado igual a zero e atribuindo-os a uma variável de saída de custo-distância G . Posteriormente, os nós vizinhos aos nós de origem são ativados, os mesmos são avaliados de acordo com a matriz de custos e os custos acumulados calculados na etapa anterior $t - 1$. O traçado da rota de menor custo desde a origem até a posição p_k é definido pelo valor mínimo do elemento da lista de nós ativos H . O processo termina quando toda a cobertura geográfica (X, Y) é atingida, onde o número de iterações é limitado por uma variável de controle de loop infinito T .

Para validar os modelos apresentados e testar a flexibilidade da metodologia modular proposta neste trabalho, foi desenvolvido o Algoritmo de Rota de Custo Mínimo. Os resultados foram comparados com uma ferramenta de análise espacial chamada distância de custo disponível no software comercial ArcGIS de maior eficiência em relação ao tempo de processamento (CÓMO FUNCIONAN LAS HERRAMIENTAS DE COSTE DE DISTANCIA—AYUDA | ARCGIS FOR DESKTOP, [s.d.]), a mesma precisão foi obtida. O algoritmo descrito foi implementado como uma função e é apresentado a continuação na Tabela 3.

Tabela 3 - Algoritmo de rota de custo mínimo

Algoritmo de Rota de Custo Mínimo: seleção e expansão de nós com o menor custo acumulado

```

1:  Inicia com o estado:  $t_0 \leftarrow 0$ 
2:  Ativa os nós de origem:  $k_0 \leftarrow 0$ 
3:  Cria uma matriz de custos de transição cumulativas:  $G_t(p_k) \leftarrow 0$ 
4:  Cria uma lista temporária de nós ativos:  $H_t(p_k)$ 
5:  Enquanto  $t < T$ 
6:      Para cada  $k \in X, Y$  fazer
7:          Atualiza o status:  $t \leftarrow t + 1$ 
8:          Expande a vizinhança:  $k \leftarrow k + 1$ 
9:          Calcula os custos de transição:  $H_t(p_k) = G_{t-1}(p_{k-1}) + F(l_k)$ 
10:         Se encontrar uma nova rota  $h_t(p_k) < h_{t-1}(p_{k-1})$  então
11:             Atualiza a lista ativa com os novos custos de transição:
                 $h_{t-1}(p_{k-1}) = \min h_t(p_k)$ 
12:         Fim se
13:         Atualiza os nós ativos com o menor custo:  $G_t(p_k) = \min H_t(p_k)$ 
14:     Fim para
15: Fim enquanto

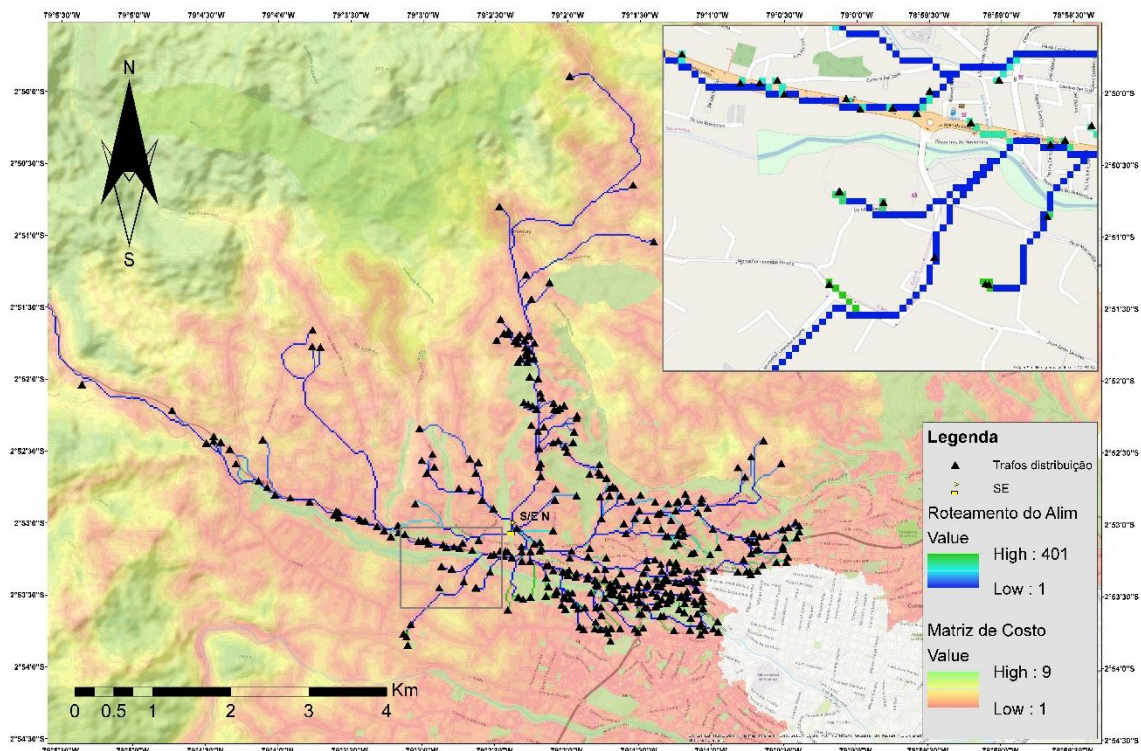
```

Fonte: Elaboração do autor.

A otimização é realizada através de uma variável temporária H , que evita redundância nos cálculos, ampliando o espaço de busca e avaliando apenas os nós inexplorados. A estrutura recursiva permite encontrar o ótimo para cada estágio k avaliando todas as possibilidades, garantindo que apenas os nós com o menor custo cumulativo da lista ativa sejam adicionados à variável de saída e uma função condicional controla que a lista seja mantida atualizada, evitando cálculos desnecessários.

Uma representação do resultado teste é apresentada na Figura 3, em que cada ponto de destino ou transformador de distribuição corresponde a uma rota de custo mínimo ótimo para o ponto de origem ou subestação. Cada gráfico é identificado com um valor numérico que inicia em três a frente, dependendo do número de transformadores de distribuição. O valor dois é reservado para identificar caminhos convergentes que atendem a mais de um transformador, ou seja, para definir rotas compartilhadas. No entanto, essa característica é usada apenas para fins representativos, a fim de identificar a maneira como as rotas entre os transformadores são atribuídas, pois os custos totalizados em cada rota também podem ser usados.

Figura 3 - Roteamento dos alimentadores



Fonte: Elaboração do autor.

2.6 Modelo de corredores

Uma vez construídas as principais rotas de menor custo, é necessário explorar novas rotas viáveis através de uma análise mais detalhada que inclua uma modelagem SIG com estruturas de traçados que permitam identificar padrões geográficos, onde o custo do desvio está dentro de uma faixa de tolerância, assim cada transformador tem mais de um caminho de conexão (CREAR UN CORREDOR DE MENOR COSTE—AYUDA | ARCGIS FOR DESKTOP, [s.d.]).

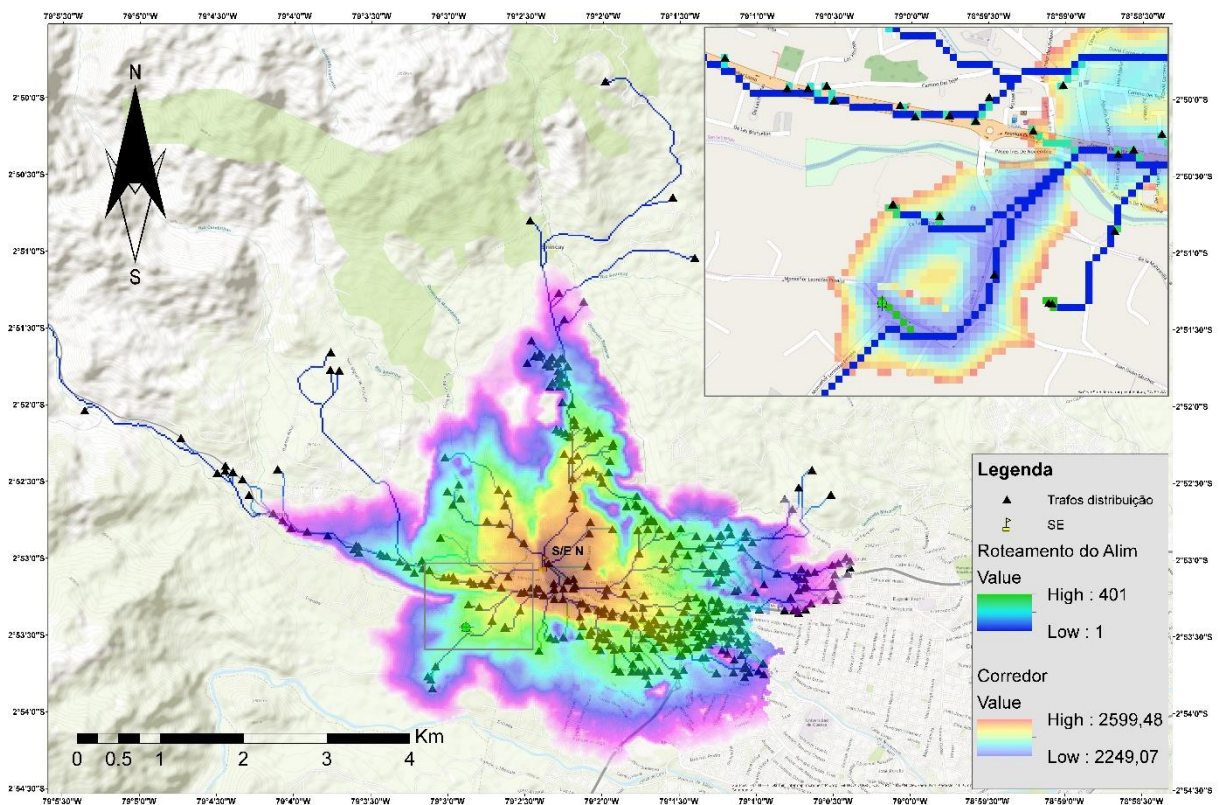
Visto em termos de custo, dois pontos podem ser conectados a través de várias rotas economicamente viáveis. Embora exista apenas uma trajetória ótima, também existem caminhos adequados que contribuem para uma melhor tomada de decisão satisfazendo certas características de desenho, como por exemplo o tipo de interconexão.

O modelo de corredores econômicos satisfaz a característica de procurar rotas viáveis dentro de uma margem de desvio do valor de custo da rota ótima (MONTEIRO

et al., 2005b). A análise pode ser facilmente realizada a partir da matriz de custos de transição cumulativos e de uma sobreposição algébrica (aditiva) de acordo com a equação (16).

Em primeiro lugar, uma matriz de custos acumulados é obtida de acordo com o algoritmo apresentado acima, tomando como referência os pontos de origem e destino em dois processos separados para combiná-los posteriormente e filtrar uma faixa geográfica dentro de uma margem de tolerância estabelecida. Uma série de alternativas aceitáveis pode ser gerada com um aumento de 5% em relação ao valor mínimo de custo. A cor violeta destaca a conectividade obtida com um aumento de 5% em relação ao valor mínimo de custo, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Roteamento de corredores



Fonte: Elaboração do autor.

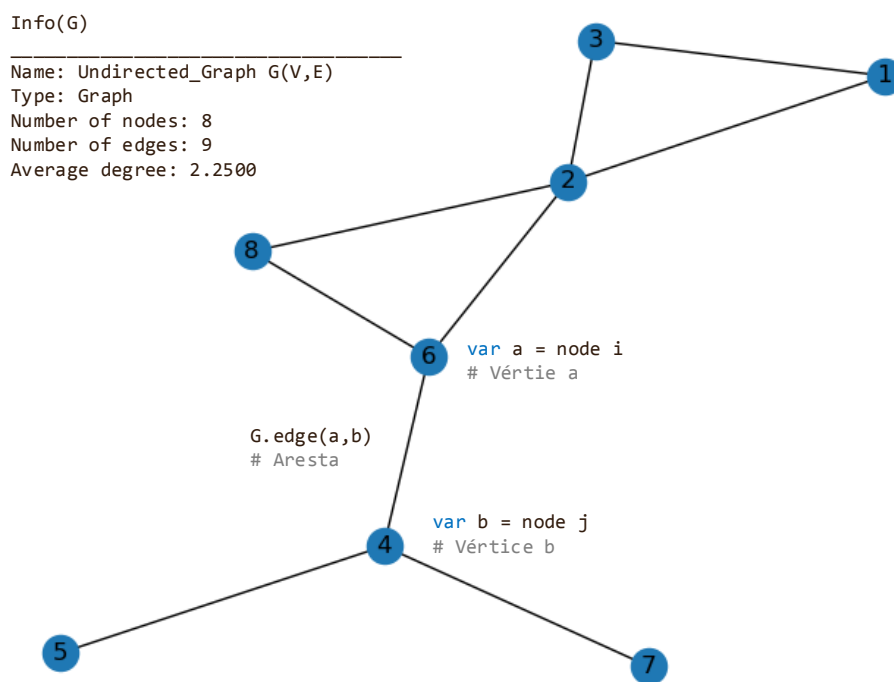
Com a determinação dos corredores, é fornecida uma margem de tolerância com relação ao custo mínimo e fornece trajetórias alternativas que contribuem para o conjunto de soluções e redução de espaço de busca.

3 TEORIA DE GRAFOS E ROTEAMENTO ESPACIAL

Os grafos são representados e estudados como um sistema de rede e suas análises se concentram na exploração de conectividade, topologia, centralidade, entre outros. Eles também são amplamente utilizados em várias áreas do conhecimento e modernas tecnologias de computação (SAVIĆ; IVANOVIĆ; JAIN, 2019).

Um grafo descreve um conjunto de elementos e os relacionamentos entre eles. Assim, esses elementos e relações são representados respectivamente como vértices V e arestas E de um grafo G . A Figura 5 mostra a estrutura típica de um grafo simples com 8 vértices e 9 arestas.

Figura 5 - Estrutura típica de um grafo G



Fonte: Elaboração do autor.

De um modo geral, existem dois tipos de grafos: os grafos direcionados são aqueles que têm suas arestas com uma direção específica e gráficos não direcionados têm suas arestas bidirecionais. Um grafo simples é aquele que não contém mais de um link entre dois vértices (arestas paralelas) e não possui links que conectam o próprio vértice (loops) (SAVIĆ; IVANOVIĆ; JAIN, 2019).

3.1 Noção de grafos

Sejam dois vértices a e b , com $e = \{a, b\}$ a aresta conectando esses vértices. Um grafo não direcionado pode ser expresso como um par $G = (V, E)$, onde $E = \{\{a, b\} \mid a, b \in V\}$ é um conjunto de dois elementos do subconjunto de V . O link entre a e b pode ser escrito como a, b ou também como b, a (SAVIĆ; IVANOVIĆ; JAIN, 2019).

Vértices

Se $V' \subseteq V$ e $E' \subseteq E$, o grafo $G' = (V', E')$ é um subgrafo do grafo $G = (V, E)$ denotado por $G' \subseteq G$. Além disso, se E' contém todas as arestas de G que têm os pontos finais em V' , então G' é um subgrafo de G induzido por V' .

Um caminho de a para b , em um grafo não direcionado, é um subgrafo G' de G , de modo que:

$$V' = \{a, v_1, v_2, \dots, v_n, b\} \quad (19)$$

$$E' = \{\{a, v_1\}, \{v_1, v_2\}, \dots, \{v_{n-1}, v_n\}, \{v_n, b\}\} \quad (20)$$

A soma dos vértices entre a e b em G' determina o comprimento do caminho; portanto, a noção de distância entre a e b é o comprimento do caminho mais curto entre eles (SAVIĆ; IVANOVIĆ; JAIN, 2019).

Caminho mais curto

Um grafo $G = (V, E)$ é um gráfico ponderado se suas arestas estiverem associadas a uma função do peso $w: E \rightarrow \mathbb{R}$, onde o peso de uma aresta $e \in E$ é denotado por $w(e)$. Seu significado está associado ao domínio da rede. Por exemplo, eles podem representar a proximidade entre os links ou a intensidade colaborativa da pesquisa em redes de coautoria. Cada interpretação dependerá do caso e da área de aplicação (SAVIĆ; IVANOVIĆ; JAIN, 2019) (DIJKSTRA, 1959).

Assim, o comprimento de um caminho entre dois vértices a e b de um gráfico ponderado é definido como a soma dos pesos das arestas ao longo do caminho e a distância do nó é generalizada.

A determinação das rotas mais curtas nos grafos ponderados, cujos pesos $w(e) \in \mathbb{R}^+/\{0\}$, podem ser alcançados com eficiência por meio do algoritmo Dijkstra (SAVIĆ; IVANOVIĆ; JAIN, 2019) (DIJKSTRA, 1959). Assim, a determinação da rota envolve encontrar um subgrafo G' otimizando uma certa função w .

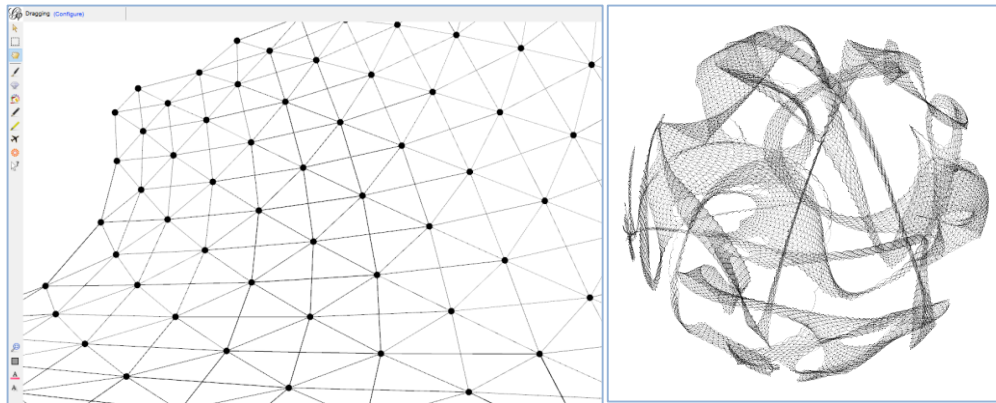
3.2 Grafos e redes

Em termos gerais uma rede é uma representação relacional de dados discretos ou entidades, assim, um grafo pode ser uma maneira de descrever uma rede. Vértices e arestas de rede são abstrações de alto nível, assim sua verdadeira natureza não é essencial pois ela toma relevância quando nelas (vértices e arestas) adicionamos certas propriedades conhecidas como atributos para estabelecer relacionamentos entre distintas entidades (ZINOVIEV, 2018).

Um sistema de rede visto como grafo com vértices e arestas permite representar vários aspectos físicos, sociais e informacionais, sejam materiais ou abstratos. Definindo assim dois tipos de redes. Redes clássicas ou redes simples são aquelas com uma estrutura regular que permitem a representação de relacionamentos lineares, cíclicos ou hierárquicos. Redes complexas têm uma estrutura irregular, mas não inteiramente aleatória, pois são resultados de processos descentralizados sem controle global decorrente da natureza e da percepção humana (ZINOVIEV, 2018).

As redes clássicas são amplamente usadas para representar relações espaciais, de fato "estar ao lado de" é um dos critérios fundamentais para capturar a interação de entidades geograficamente distribuídas. A Figura 6 mostra uma rede de malha em que cada vértice é uma entidade.

Figura 6 - Rede clássica com estrutura de malha



Fonte: Elaboração do autor.

Em uma rede em malha, os vértices carregam as coordenadas geográficas que definem as localizações espaciais como um atributo, além de outros atributos, como o tipo de entidade, seja um dispositivo elétrico ou propriedades das próprias entidades, enquanto as arestas carregam atributos relacionados à resistência, capacidade, nível de entrelaçamento, entre outros.

3.3 Rotas ótimas baseadas em grafos

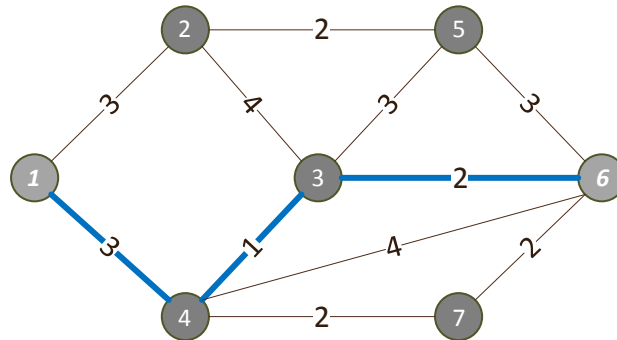
O Networkx é desenvolvido na linguagem de programação Python como um pacote de código aberto que trabalha com estruturas de dados para grafos, digrafos e multigrafos. É capaz de criar, calcular medições e explorar estruturas complexas de rede, facilitando sua análise através do gerenciamento e manipulação de vários algoritmos padronizados. Ele é projetado com a flexibilidade de trocar informações de redes com outros softwares para análise e visualização complementar (ZINOVIEV, 2018), (NETWORKX — NETWORKX DOCUMENTATION, [s.d.]).

Algoritmo de caminho mais curto Dijkstra

Dado um vértice inicial a (origem) e um vértice de destino b (destino) em um gráfico ponderado G , o algoritmo de Dijkstra determina o caminho mais curto entre o vértice inicial e cada um de seus vértices vizinhos até o vértice de destino ter sido alcançado. Truncar o algoritmo depois que o caminho de menor custo $w(e)$ for encontrado de um vértice inicial para um vértice final ou todo o espaço de busca for

explorado é o critério de parada (DIJKSTRA, 1959) (MODIFIED PYTHON IMPLEMENTATION OF DIJKSTRA'S ALGORITHM GITHUB, [s.d.]).

Figura 7 - Estrutura de dados para resolver o problema do caminho mais curto



Fonte: Elaboração do autor.

A maioria das metodologias amplamente usadas para calcular o caminho de mínimo custo entre dois vértices de um grafo G usam o algoritmo Dijkstra internamente, e é o algoritmo usado por padrão no Networkx (HAGBERG; SCHULT; SWART, 2011). O procedimento descrito na Tabela 4 é uma implementação em Python do algoritmo Dijkstra, e é parte de um conjunto de funções de acesso livre, disponíveis para trabalhar no NetworX:

- O algoritmo começa definindo uma variável com todos os vértices não visitados do grafo e outra com o vértice de origem com um custo zero como valor inicial dos vértices visitados. A variável que contém todos os vértices visitados começa com o vértice de origem como o primeiro item da lista.
- O vértice é selecionado na lista de vértices não visitados, o vértice com o menor custo é definido como o vértice atual $node_{min}$. O custo atual w_{actual} é o custo calculado até o vértice atual.
- Uma vez selecionado o vértice atual com o custo mínimo, ele é removido da lista de elementos da variável de vértices não visitados.
- Para o vértice atual, são consideradas todas as arestas incidentes e o custo acumulado é calculado para cada um dos vértices adjacentes. O novo custo provisório calculado é comparado com o custo anterior e o menor custo é selecionado.
- Uma vez selecionado o vértice candidato com o custo mínimo calculado, é adicionado à variável de vértice visitado, e, se torna parte dos elementos do

caminho de custo mínimo. O procedimento é repetido até que um dos critérios de parada seja satisfeito.

Tabela 4 - Algoritmo de Dijkstra

| Algoritmo de Dijkstra: mínima rota para grafos ponderados ($G, source$) | |
|--|--|
| 1: | Define o conjunto de vértices: $nodes \leftarrow G.nodes$ |
| 2: | Define o vértice inicial: $visited \leftarrow \{source: 0\}$ |
| 3: | $path \leftarrow \{\emptyset\}$ |
| 4: | Enquanto $nodes \neq \{\emptyset\}$ |
| 5: | $node_{min} \leftarrow None$ |
| 6: | Para cada $node$ no conjunto $nodes$ fazer |
| 7: | Se $node_{min}$ é $None$ então |
| 8: | $node_{min} \leftarrow node$ |
| 9: | Se $visited[node] < visited[node_{min}]$ então |
| 10: | $node_{min} \leftarrow node$ |
| 11: | Fim para |
| 12: | Remove o vértice visitado: $nodes.remove[node_{min}]$ |
| 13: | $w_{actual} \leftarrow visited[node_{min}]$ |
| 14: | Para cada $edge$ na lista de edges do G . $edges[node_{min}]$ fazer |
| 15: | Calcula o custo acumulado dos vértices candidatos: $w \leftarrow w_{actual} + G.weight(node_{min}, edge)$ |
| 16: | Se $edge$ não foi visitado OR $w < visited[edge]$ então |
| 17: | Adiciona o peso acumulado: $visited[edge] \leftarrow w$ |
| 18: | Adiciona o vértice para rota: $path[edge] \leftarrow node_{min}$ |
| 19: | Fim para |
| 20: | Fim enquanto |

Fonte: (MODIFIED PYTHON IMPLEMENTATION OF DIJKSTRA'S ALGORITHM GITHUB, [s.d.]).

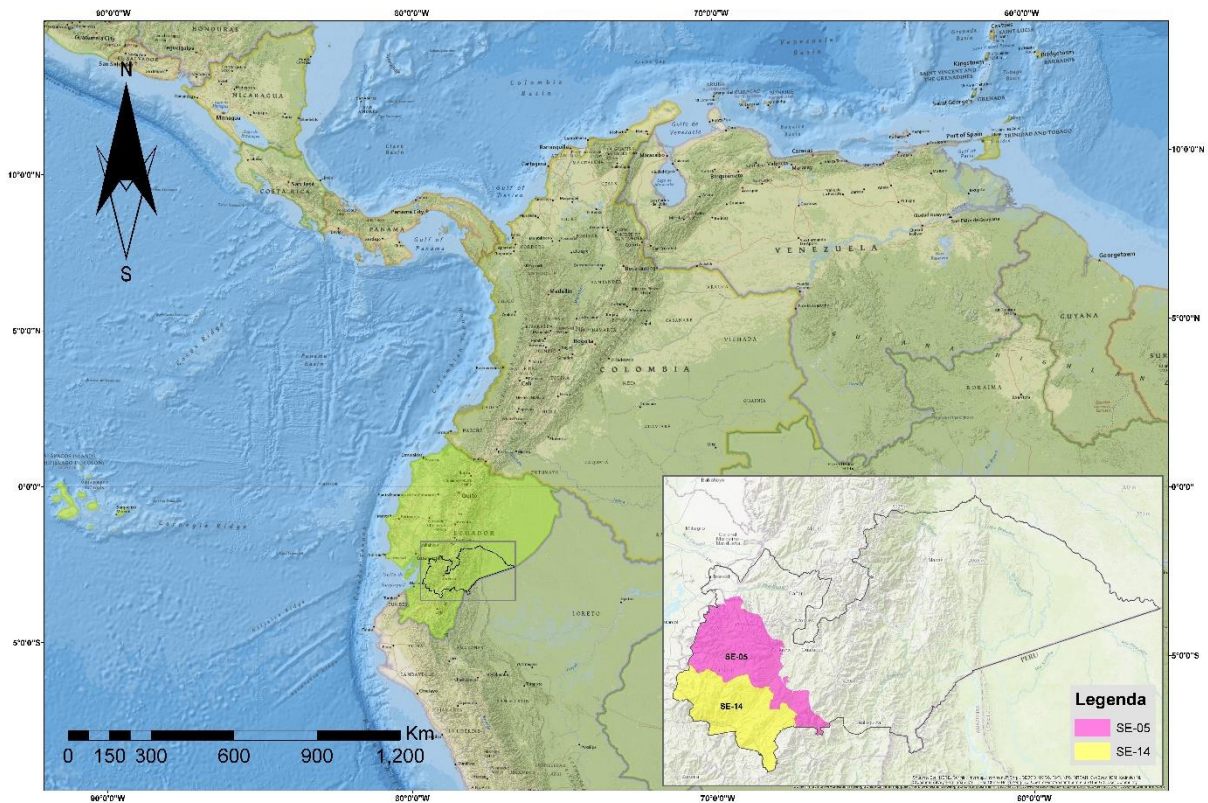
Capturar o ambiente geográfico usando uma função de custo e cobrá-los como atributos de um gráfico é um aspecto importante e abrange a primeira parte do modelo. A segunda parte corresponde à análise do gráfico por meio de modelos e algoritmos especializados com estruturas de dados eficientes, como a aplicação do modelo de rota mínima através do algoritmo de Dijkstra no atributo de peso de um gráfico ponderado.

Considerando um conjunto de n elementos associados ao par de origem e destino (o_i, d_i) para $n = 1, 2, 3, \dots$. O algoritmo de Dijkstra ao trabalhar com dados georreferenciados permite encontrar a direção e o grau de dificuldade na conexão de pares de vértices.

4 ESTUDO DE CASO

O método é aplicado utilizando dados de uma região que corresponde às áreas de serviço das subestações SE-05 e SE-14 da concessionária “Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A.” (CENTROSUR CA), coloridas em rosa e amarelo no mapa topográfico da Figura 8. A área de estudo é de aproximadamente 3.216,3 km² da SE-05 e 2.899,3 km² da SE-14.

Figura 8 - Estudo de caso: CENTROSUR, Cuenca, Equador



Fonte: Elaboração do autor.

O crescimento da demanda horizontal e vertical traz como consequência requisitos de expansão em todo o sistema elétrico, assim, os resultados de um estudo de previsão de demanda desenvolvido pelo departamento de planejamento do CENTROSUR e os requisitos de conexão coletados mostram a necessidade de expandir o sistema de distribuição através da construção de uma nova subestação e novas linhas de 69KV para atender o aumento esperado da demanda.

Três grandes centros de carga de alto consumo estão geograficamente distribuídos dentro da área de serviço das subestações de distribuição SE-05 e SE-14, que correspondem às empresas de mineração localizadas na zona de San Gerardo, a empresa de mineração localizada na área denominada como Rio Blanco e a empresa de mineração localizada em Loma Larga, cada uma deles é ilustrada na Figura 9.

A construção de uma nova subestação SE-N resulta em uma redistribuição da conexão da carga que faz parte do planejamento da expansão de médio e longo prazo do sistema de distribuição. Com a entrada de uma nova subestação, serão definidas novas áreas de serviço, a maneira como a carga será distribuída entre as subestações está além do escopo deste estudo.

Figura 9 - Localização de centros de carga e SE de distribuição existentes



Fonte: CENTROSUR.

O projeto de expansão torna-se complexo, pois está localizado em uma região montanhosa que faz parte da cordilheira ocidental dos Andes, com espécies de flora e fauna endêmicas da região. Portanto, para alcançar os pontos de demanda, áreas naturais sensíveis devem ser atravessadas, tal que seja minimizado o impacto

ambiental e evitando o aumento dos custos técnicos relacionados à construção da linha elétrica em AT.

Estes tipos de projetos, para que possam ser aprovados, além de atender aos requisitos técnicos, também devem considerar os impactos sociais e ambientais. Todos esses aspectos juntos fazem parte do planejamento responsável. Assim, O Ministério da Energia e Recursos Naturais Não Renováveis do Equador (MERNN) no cumprimento de suas funções tem como objetivo promover o planejamento e a exploração responsável dos recursos naturais. Portanto, é uma necessidade obrigatória que os projetos considerem estes aspectos.

A região possui uma riqueza de minerais e metais cuja exploração permite contribuir para o desenvolvimento da economia local e nacional que motivaram a construção de vários projetos de mineração na área, entre eles, existem três principais destacados por seu alto nível de demanda. As características de cada uma das cargas mais importantes em termos de potência requerida são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Demanda de potência das cargas predominantes

| Mineração | Carga inicial | Expansão 2034 |
|-------------------|----------------------|----------------------|
| San | 10.34 | 7.40 |
| Gerardo | MVA | MVA |
| Loma | 3 MVA | 15 MVA |
| Larga | | |
| Rio Blanco | 4.5 MVA | 9 MVA |

Fonte: CENTROSUR.

A partir do estudo de crescimento de carga, são projetados o número de clientes e a potência exigida pelo estrato do cliente. O estudo inclui uma previsão espaço-temporal da demanda que localiza geograficamente a demanda por novos clientes, bem como o crescimento vegetativo para um período de planejamento de médio e longo prazo (ZAMBRANO et al., 2017). As tabelas Tabela 6 e Tabela 7 apresentam um resumo da projeção da SE-14.

Tabela 6 - Número de clientes projetados para o ano 2034 por estrato de clientes

| Clientes [u] | Dez/19 | Dez/22 | Dez/27 | Dez/34 |
|---------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Comercial | 1116 | 1242 | 1470 | 1786 |
| Industrial | 262 | 278 | 316 | 369 |
| Outros | 807 | 897 | 1064 | 1297 |
| Residencial | 28253 | 30422 | 34339 | 39827 |
| Total | 30438 | 32839 | 37189 | 43279 |

Fonte: CENTROSUR.

Tabela 7 - Demanda projetada de potência até 2034 por estrato do cliente

| Demanda (MW) | 2019 | 2022 | 2027 | 2034 |
|---------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| Comercial | 0,92 | 1,12 | 1,46 | 1,89 |
| Industrial | 3,96 | 4,74 | 5,69 | 6,95 |
| Outros | 0,53 | 0,64 | 0,82 | 1,07 |
| Residencial | 6,39 | 7,54 | 9,25 | 11,39 |
| Total | 11,79 | 14,03 | 17,23 | 21,3 |

Fonte: CENTROSUR.

Com base nos resultados do estudo da demanda no espaço-tempo e na avaliação técnica do sistema de distribuição de longo prazo, uma alternativa para garantir o suprimento de eletricidade mantendo qualidade, considera necessário construir uma nova subestação e estender o SDAT (de 69kV) como dois primeiros pontos.

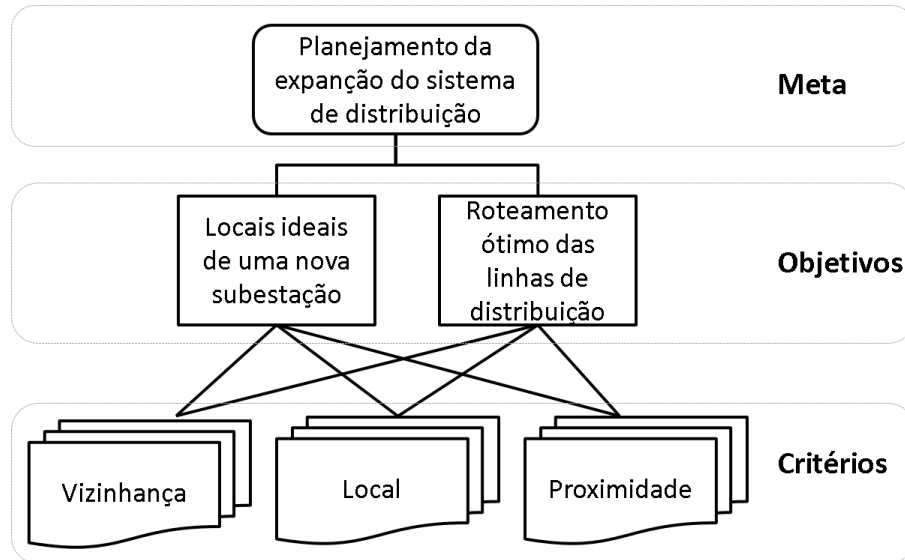
4.1 SIG-ADMC

Os problemas de decisão que envolvem informações georreferenciadas são chamados de Problemas de Decisão Espacial (PDS) (TOBISZEWSKI et al., 1999). Quando os dados são organizados, eles permitem uma melhor análise e interpretação das informações. Processá-los para obter informações úteis em um problema de tomada de decisão PDS aumenta o valor para os tomadores de decisão e é o primeiro passo depois de definir o problema (TOBISZEWSKI et al., 1999).

Um SIG-ADMC envolve um conjunto de critérios de avaliação e cada um deles é calibrado de acordo com o objetivo que perseguem. Uma estrutura de critérios para

alocar uma subestação e criar um mapa de cobertura de custos para roteamento das linhas é apresentada na Figura 10.

Figura 10 - Estrutura SIG-ADMC para alocar uma SE e rotear uma linha em AT



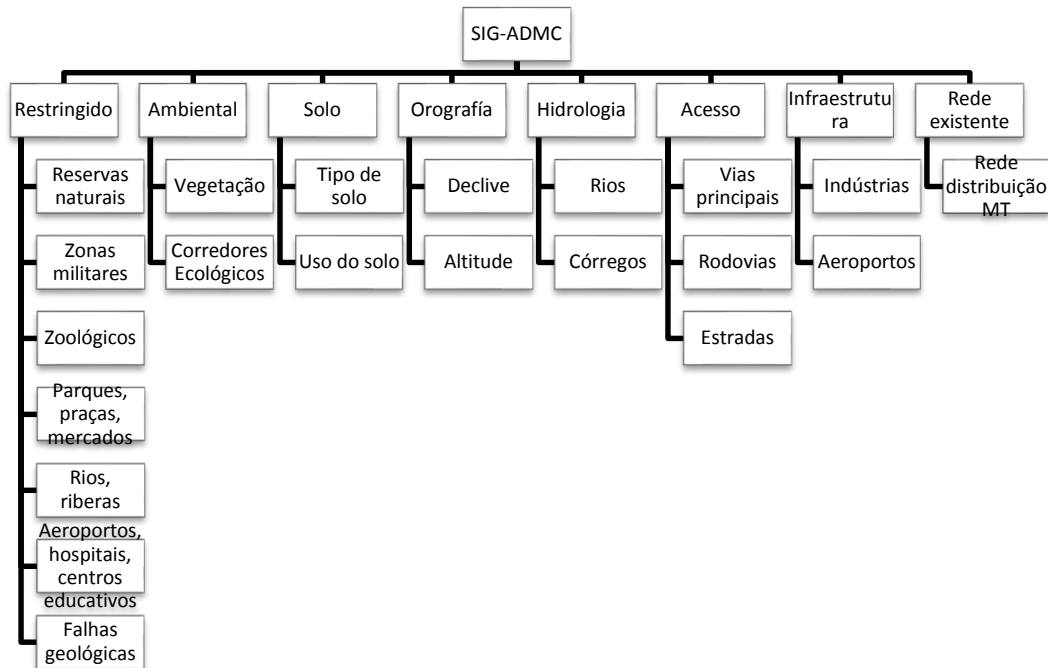
Fonte: Elaboração do autor.

A relação entre os elementos SIG-ADMC define uma estrutura hierárquica. Começa do nível de avaliação de fatores para um nível mais geral, onde o objetivo é planejar a expansão do SDAT. Portanto, a integração articulada de objetivos parciais é de grande importância para o sucesso de um plano.

4.2 Superfície de custo para roteamento de linhas elétricas

O modelo SIG-ADMC é usado para determinar uma área de custo; assim, o processo implica uma primeira etapa de coleta e discussão em que todos os critérios possíveis são avaliados, e, para posteriormente estabelecer o peso de influência de cada um deles no modelo. A Figura 11 mostra os critérios envolvidos na avaliação.

Figura 11 - Avaliação de critérios



Fonte: Elaboração do autor.

Cada um dos critérios apresentados na Figura 11 possui um fator ou área de cobertura associado, os quais são avaliados por julgamento especializado para determinar o nível de importância que representa cada um dos fatores para o modelo. Assim, foi definido que todos os fatores com nível de influência inferior a 4% não serão levados em consideração para o modelo. Uma breve descrição dos fatores é apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 - Descrição dos fatores espaciais

| Fator | Descrição |
|--------------------------------|---|
| Vegetação | Descreve o tipo de vegetação na área. |
| Corredor ecológico | Corredores destinados como zonas para recreação por seu valor ambiental ou estético. |
| Tipo de solo | Caracteriza o terreno de acordo com sua geologia, como argila rochosa, de baixa compactação, etc. |
| Uso do solo | Apresenta o planejamento do setor como tipo de moradia, atividade econômica e projetos de desenvolvimento. |
| Declive | Determina a elevação do terreno, cruzadas planas são os melhores candidatos. |
| Altitude | As terras baixas são propensas a inundações, assim como o topo das colinas é vulnerável a tempestades e descargas elétricas. |
| Rios | Áreas próximas a rios não são adequadas, pois é necessário manter uma certa distância de segurança contra inundações. |
| Córregos | Apresenta os mesmos requisitos em relação aos rios, mas com menos impacto. Constituído pela rede de água da região que alimenta os principais rios da cidade. |
| Parques lineares | É constituído por parques, praças e áreas recreativas. |
| Vias urbanas | Esta constituído pelas vias de trânsito rápido, avenidas, vias arteriais e coletoras. |
| Vias rurais | Constituído pelas estradas e rodovias. |
| Indústrias | Formada por todas as indústrias de alto e médio impacto da cidade. |
| Aeroportos | Definido como um fator de proximidade para estabelecer zonas de segurança para essas zonas. |
| Rede de média tensão existente | Áreas ideais estão presentes perto da rede de distribuição, tentando reforçar a rede de média tensão existente. |

Fonte: Elaboração do autor.

A partir da avaliação dos fatores, aqueles com maior nível de influência são analisados através da técnica de combinação por pares (AHP) para calcular seus pesos correspondentes. O critério de avaliação por pares é baseado na escala fundamental de Saaty, assim, a matriz de comparação é apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 - Matriz de combinação por pares (AHP)

| Fatores | Vegetação | Declives | Rios | Vias | Rede MT |
|-----------|-----------|----------|------|------|---------|
| Vegetação | 1 | 1/2 | 1/5 | 1/4 | 1/5 |
| Declive | 2 | 1 | 2 | 1/2 | 1/3 |
| Rios | 5 | 1/2 | 1 | 1/2 | 1/3 |
| Vias | 4 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| Rede MT | 5 | 3 | 3 | 1 | 1 |

O nível de consistência obtido de acordo com (6) foi $CR = 0,06$

Fonte: Elaboração do autor.

Os locais definidos como áreas restritas onde a passagem de uma linha elétrica não é adequada por suas características geográficas são avaliados com um custo muito alto. As áreas consideradas proibidas estão listadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Restrições espaciais para passagem de uma linha elétrica

| Áreas Restritas |
|----------------------|
| Reservas naturais |
| Vegetação florestal |
| Lagoas |
| Falhas geológicas |
| Parques |
| Praças |
| Rios |
| Mercados |
| Hospitais |
| Centros Educacionais |

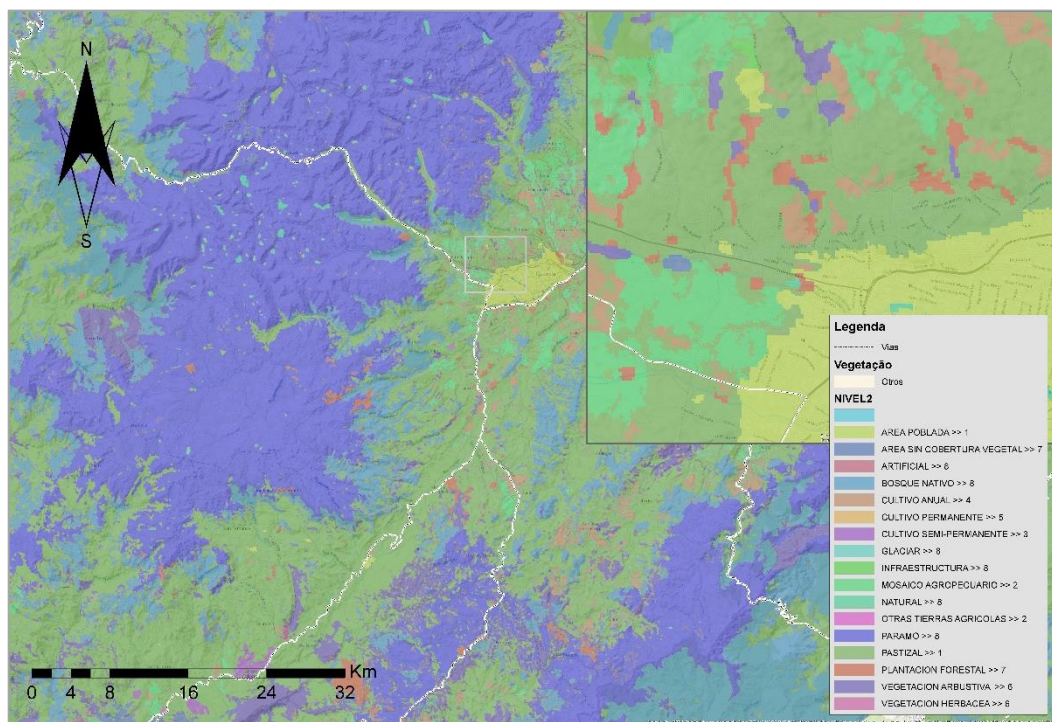
Fonte: Elaboração do autor.

Ponderar com um valor tão alto quanto necessário, em vez de restringir as áreas proibidas permite situações como conectar diretamente dois pontos que estão a poucos metros atravessando uma barreira em vez de cercá-lo por alguns quilômetros seja uma opção razoável. Assim, o modelo evita essas áreas, com exceção de certos casos extremos.

Um fator é definido como uma variável espacial quando é quantificado e cada atributo é associado a um valor numérico georeferenciado $T(a_{ik})$, conforme ilustra a equação (1). Esse recurso fornece uma maneira simples de organizar as informações e é usado como a informação básica para análise espacial, permitindo representar

dados geográficos na forma de superfícies que podem ser analisadas espacialmente a um custo mínimo de processamento. Um exemplo do fator de vegetação é apresentado na Figura 12, com uma avaliação de seus atributos e representado como uma estrutura de dados raster (¿QUÉ SON LOS DATOS RÁSTER?—AYUDA | ARCGIS FOR DESKTOP, [s.d.]).

Figura 12 - Fator vegetação definido como variável espacial com estrutura raster



Fonte: Elaboração do autor.

A combinação dos fatores envolve um processo de padronização em que cada variável é discretizada e suas unidades de medida são calibradas em uma escala comum. Para discretizar uma variável espacial, existem várias metodologias de classificação (CLASIFICAR CAMPOS NUMÉRICOS PARA SIMBOLOGÍA GRADUADA—AYUDA | ARCGIS FOR DESKTOP, [s.d.]). Uma das metodologias utilizadas em trabalhos semelhantes com foi a metodologia de classificação por variação mínima (DALENIUS; HODGES, 1959). No entanto, ao obter resultados parecidos nessa ocasião, foi escolhida a metodologia de classificação de quantil para definir os intervalos de classe.

A normalização das unidades de medida é determinada em correspondência com as equações (7) e (8), com uma escala de 9 pontos, a pontuação mínima de 1 representa a máxima aptidão, enquanto a pontuação máxima de 9 representa a

aptidão mínima. Todos os fatores são calibrados nessa escala e, dessa forma, a discrepância das unidades entre eles é eliminada.

Tanto o peso (importância) dos fatores obtidos com o AHP quanto os critérios e fatores envolvidos no desenho das rotas com uma abordagem de custo mínimo de construção e manutenção de linhas elétricas estão resumidos na Tabela 11.

Tabela 11 - Ponderação e calibração dos parâmetros do modelo SIG-ADMC

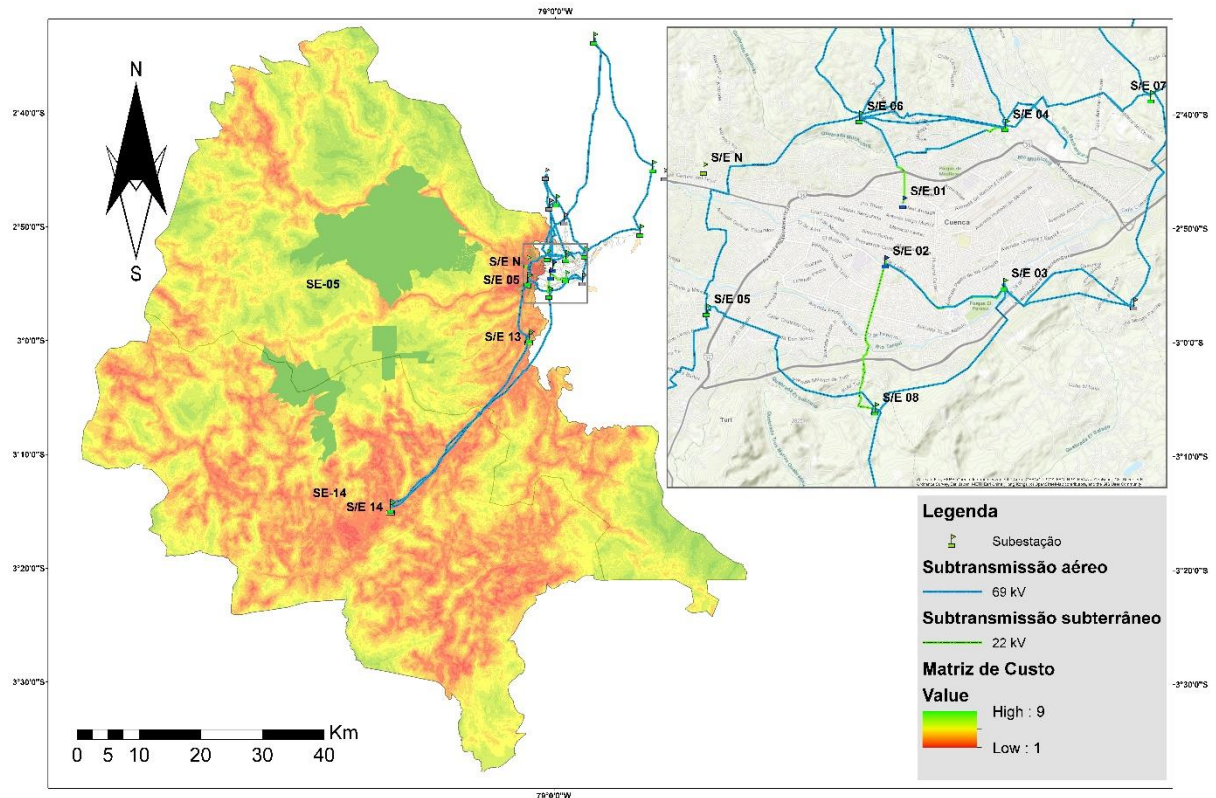
| Áreas restringidas | Ambiental | | Orografia | | Hidrologia | | Acesso | | Rede existente | |
|---------------------|---|----|-------------|-----|--------------------|-----|--------------------|-----|-----------------------|-----|
| | | | | | | | | | | |
| Reservas naturais | Vegetação | 6% | Declive | 16% | Proximidade a rios | 15% | Proximidade a vias | 28% | Proximidade a rede MT | 35% |
| Vegetação florestal | Áreas povoadas e pastagens | 1 | 0-1 graus | 1 | 0-40 metros | 9 | 0-18 metros | 1 | 0-20 metros | 1 |
| Lagoas | Mosaico agrícola | 2 | 1-9 graus | 2 | 40-82 metros | 8 | 18-49 metros | 2 | 20-56 metros | 2 |
| Riscos | Cultivo semipermanente | 3 | 9-14 graus | 3 | 82-126 metros | 7 | 49-98 metros | 3 | 56-82 metros | 3 |
| Parques | Cultivo anual | 4 | 14-18 graus | 4 | 126-170 metros | 6 | 98-148 metros | 4 | 82-116 metros | 4 |
| Praças | Cultivo permanente | 5 | 18-22 graus | 5 | 220-263 metros | 5 | 148-197 metros | 5 | 116-152 metros | 5 |
| Mercados | Vegetação arbustiva e herbácea | 6 | 22-26 graus | 6 | 263-310 metros | 4 | 197-247 metros | 6 | 152-184 metros | 6 |
| Hospitais | Plantações florestais | 7 | 26-31 graus | 7 | 310-356 metros | 3 | 247-269 metros | 7 | 184-223 metros | 7 |
| Centros Educativos | Bosque natural, artificial, glacial, paramo, infraestrutura | 8 | 31-36 graus | 8 | 356-383 metros | 2 | 296-346 metros | 8 | 223-260 metros | 8 |
| | | | 36→ graus | 9 | 383→ metros | 1 | 346→ metros | 9 | 260→ metros | 9 |

Fonte: Elaboração do autor.

Considerando os critérios da Tabela 11, é determinado o mapa de custos definido como uma matriz de custos. Cinco fatores foram utilizados na análise para determinar um mapa de cobertura geográfica na qual as possíveis rotas serão avaliadas a partir da perspectiva de otimização de custos e impactos ocasionados pela construção de linhas de energia elétrica em AT.

Um mapa de custos apresentada na Figura 13 é graduada por uma escala de cores em que a cor vermelha representa locais ideais (de maior preferência) para o layout de uma rede elétrica. Além é aproveitado para apresentar a maneira em que SDAT estão distribuídos geograficamente, as subestações que estão na área de estudo são destacadas.

Figura 13 - Mapa de custos



Fonte: Elaboração do autor.

4.3 Alocação de uma nova subestação

Neste caso, o modelo SIG-ADMC é usado para determinar um mapa de preferências que define os locais ideais para a construção de uma nova subestação, mas é um dado de entrada no modelo. Os fatores espaciais, a seleção e a ponderação de cada um dos fatores são obtidos com base no processo de análise hierárquica do AHP (ZAMBRANO-ASANZA et al., 2020).

A Tabela 12 apresenta os fatores espaciais usados no modelo, e a Tabela 13 lista as restrições. A descrição completa da configuração dos parâmetros determinadas para alocar a subestação é apresentada no Anexo A.

Tabela 12 - Fatores espaciais para a localização de uma nova subestação

| Fatores | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Pesos |
|-------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|
| 1.Densidade de carga | 1 | 7 | 3 | 2 | 5 | 44% |
| 2.Declive | 1/7 | 1 | 2 | 1/2 | 3 | 14% |
| 3.Estradas | 1/3 | 1/2 | 1 | 1 | 3 | 14% |
| 4.Redes subtransmissão | 1/2 | 2 | 1 | 1 | 8 | 23% |
| 5.Usos especiais | 1/5 | 1/3 | 1/3 | 1/8 | 1 | 5% |
| CR | | | | | | 0,094 |

Fonte:Elaboração do autor.

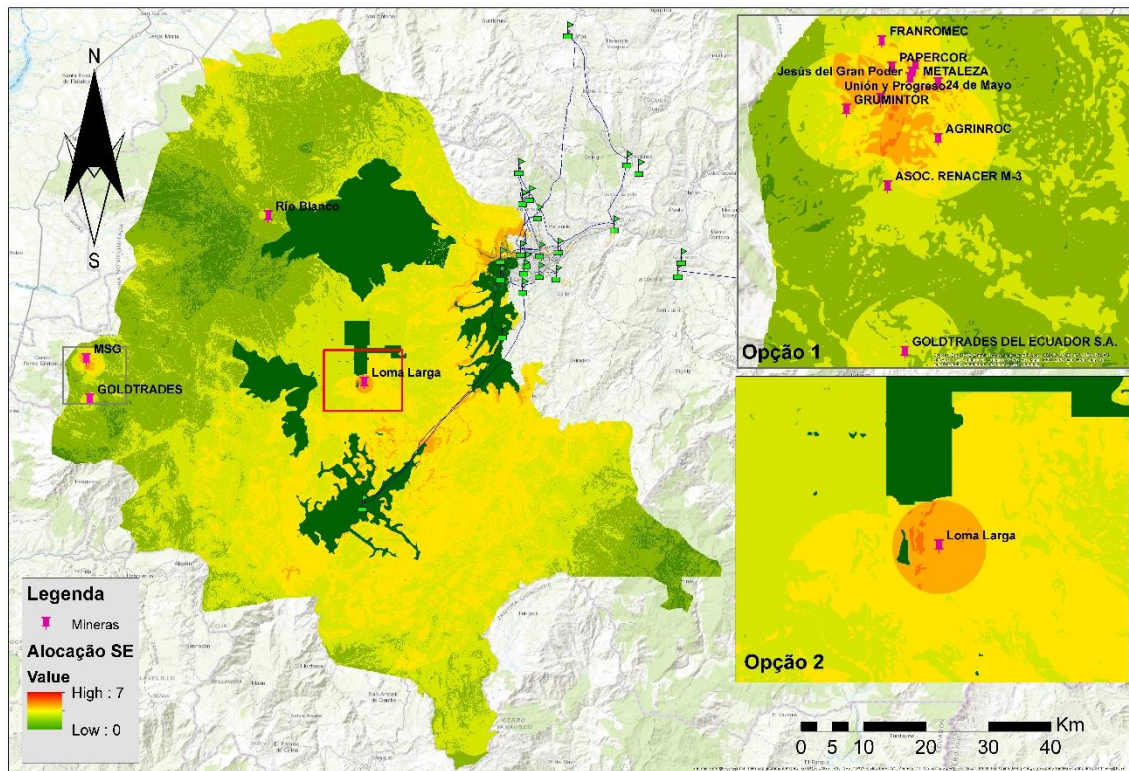
Tabela 13 - Restrições espaciais para a localização de uma nova SE

| Áreas Restritas |
|---|
| Áreas protegidas: parques naturais |
| Cursos de água, lagoas e riachos |
| Florestas e áreas de alta paisagem |
| Áreas de maior declividade: maior a 30 graus |
| Áreas de patrimônio cultural e zonas restritas: parques, praças, escolas, centros de saúde |
| Áreas de serviço das subestações nos primeiros 15km: carga base da SE-14 10MW |

Fonte: Elaboração do autor.

Os locais altamente adequados para alocar uma nova subestação são pontuados com um máximo valor de 7. Com base nesta concepção duas alternativas são encontradas e destacadas na Figura 14.

Figura 14 - Mapa de preferências para alocação de uma nova SE



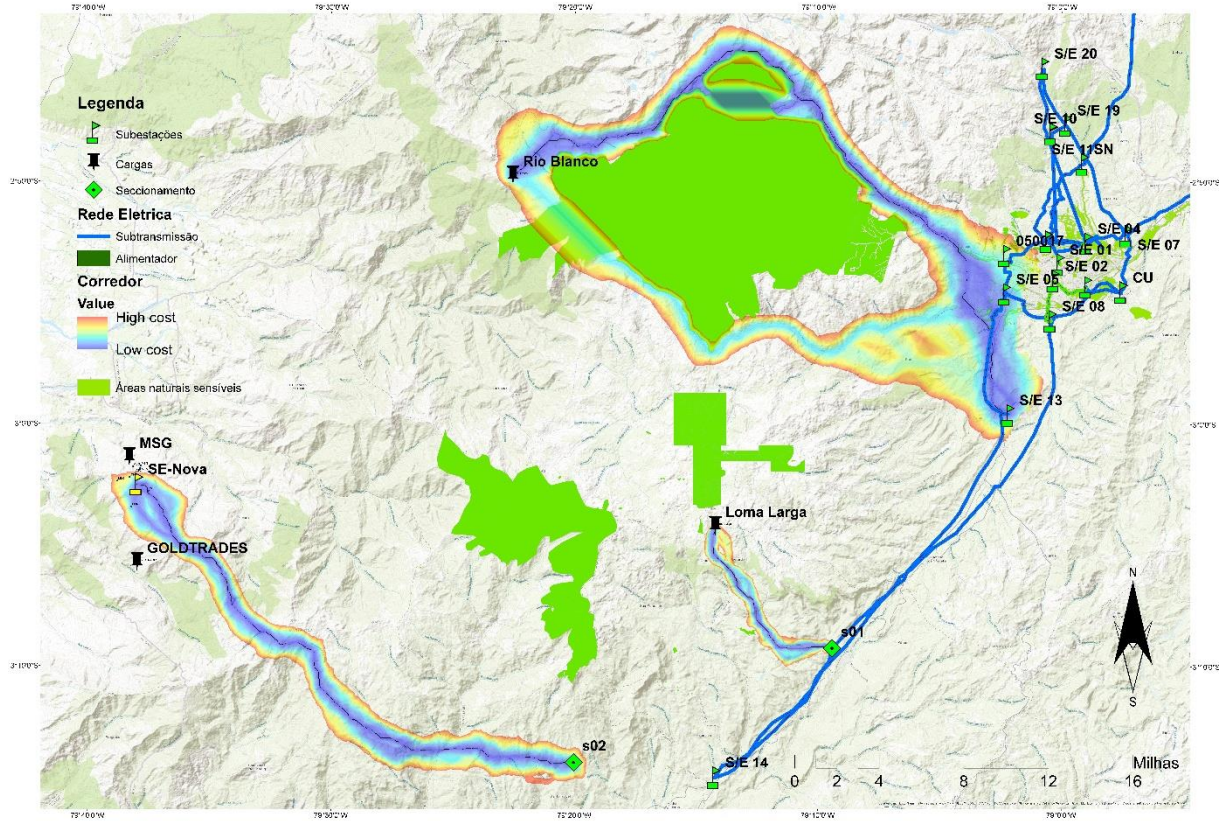
Fonte: Elaboração do autor.

4.4 Cenários de estudo

Em relação às avaliações subjetivas em favor dos interesses econômicos e técnicos, o departamento de planejamento do CENTROSUR propõe três alternativas de expansão para atender às exigências da demanda. Assim, a Figura 15, Figura 17, Figura 19 são as propostas enquanto que a Figura 16, Figura 18, Figura 20 são os resultados obtidos respectivamente.

Alternativa 1: Fornecimento de SE-14 (Léntag) à uma nova subestação localizada na zona da Mineração San Gerardo a 69 kV passando pela seção de linha em Santa Isabel.

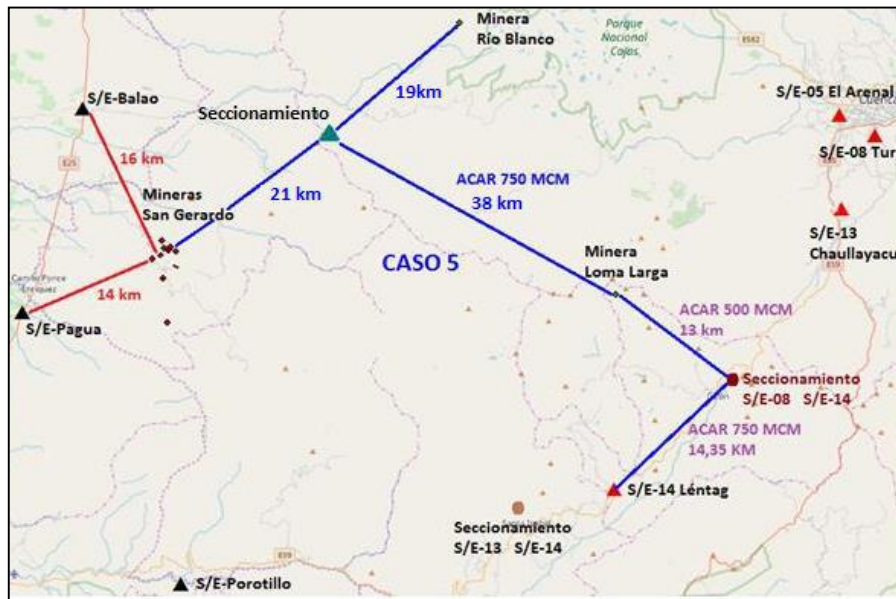
Figura 16 - Roteamento baseado na alternativa 1



Fonte: Elaboração do autor.

Alternativa 2: Fornecimento para MSG e o projeto de mineração Rio Blanco a 69 kV de um ponto de corte a 35 km do projeto Loma Larga.

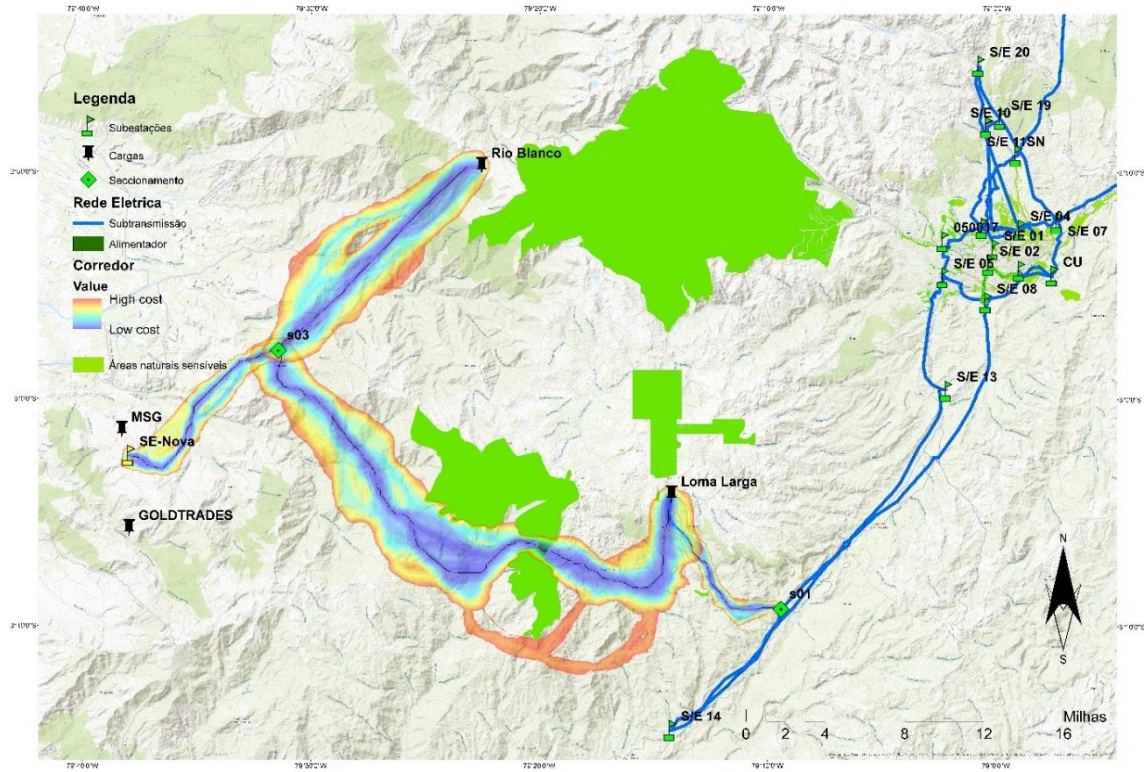
Figura 17 - Alternativa 2 proposta



Fonte: CENTROSUR.

As mineradoras de Rio Blanco e San Gerardo são conectadas através de uma linha única com um seccionador S03 como ponto de derivação. A linha começa no seccionador de linha S01, passa pela mina de Loma Larga e termina no seccionador de derivação S03.

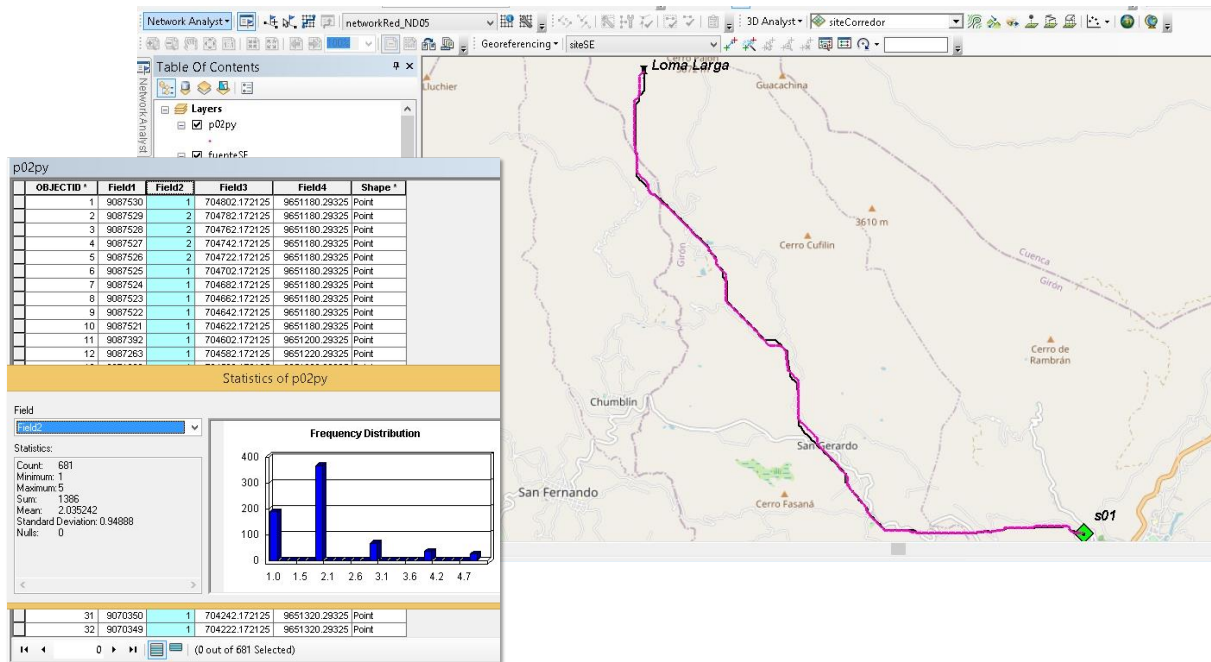
Figura 18 - Roteamento baseado na alternativa 2



Fonte: Elaboração do autor.

Alternativa 3: Fornecimento do seccionamento de linha SE-13 e SE-14 do projeto Loma Larga para MSG a 69 kV.

Figura 21 - Resultados baseados na estrutura raster e estrutura de grafos



Fonte: Elaboração do autor.

A Figura 21 resume os resultados dos testes, mostrando que ambos, tanto o algoritmo baseado em análise raster utilizando ArcGIS como em grafos conseguem a mesma precisão, com um custo acumulado igual (de 1386 na Figura 21) e com trajetórias quase idênticas. Os resultados baseados na estrutura raster apresentasse como rota em cor preto enquanto que os resultados baseados na estrutura de grafos apresentasse como rota em cor rosa. Além disso, a Tabela 14 mostra características adicionais dos testes realizados para comparar a eficiência dos algoritmos.

Tabela 14 - Testes de processamento dos algoritmos de roteamento

| Teste | Área Km ² | Comprimento Km | $\sum_{k \in S} C_k$ | R_{opt}/r | Tempo Seg. | |
|----------|-------------------------|-------------------|----------------------|-------------|---------------|-------|
| 1 | Raster | 91.07 | 15.77 | 1386 | 1249.11 | 6.84 |
| | Grafo | | 15.76 | 1386 | 1249.11 | 8.04 |
| 2 | Raster | 724.6 | 46.1 | 3787 | 3352.05 | 12.71 |
| | Grafo | | 46.08 | 3787 | 3352.03 | 15.98 |
| 3 | Raster | 121.73 | 18 | 1706 | 1385.07 | 8.45 |
| | Grafo | | 18 | 1706 | 1385.07 | 10.13 |
| 4 | Raster | 259.4 | 22.97 | 3782 | 2967.14 | 8.96 |
| | Grafo | | 22.95 | 3782 | 2967.13 | 12.15 |

Fonte: Elabora do autor.

Os testes foram executados sobre uma plataforma de hardware Intel Core i5, 1,7 GHz, 8 GB de RAM. Também foi usado a ferramenta de código aberto Python 2.7 compatível com o pacote ArcPy de ArcGIS 10.5, e Python 3.7.6 foi usada com o pacote Networkx 2.4.

4.6 Discussão

Os resultados sugerem que, se as cargas de Rio Blanco e San Gerardo forem conectadas através de uma linha única com o seccionador de linha S03, é recomendável desenhar com uma linha independente, um para a carga localizada na área de Loma Larga e o outro para as cargas alocadas em Rio Blanco e San Gerardo.

Se a carga alocada na zona de Rio Blanco for alimentada da subestação SE-13, uma boa alternativa seria considerar que elas formem parte da carga da subestação SE-05 ou da nova subestação planejada SE-050017 (ZAMBRANO-ASANZA et al., 2020).

Dos resultados fornecidos, eles devem ser considerados como parte de um plano estratégico geral do sistema. Onde a expansão do SDMT e SDAT deve ser coordenada com o planejamento da expansão de subestações (PES) do SDAT e alcançar a avaliação das opções nos níveis de AT e MT, como sugere (WILLIS, 2004).

5 CONCLUSÕES

O estudo apresenta uma metodologia de análise espacial com processo estruturado, utilizando uma combinação de modelos, eficientes algoritmos de processamento e as habilidades apropriadas na tomada de decisão. Esta estrutura híbrida prova ser possível baseado no ciclo dados-conhecimento chamado gestão de dados.

A metodologia foi aplicada a um problema real de expansão do SDAT da concessionária de distribuição elétrica CENTROSUR.

O layout de uma rede elétrica depende de fatores técnicos ambientais e econômicos. A maioria dos trabalhos concentra-se em planejar um sistema ideal com base na análise de fatores técnico-econômicos; no entanto, neste caso, os fatores econômico-ambientais que interferem no layout das linhas de energia foram definidos. Além disso, através de um estudo de caso, os fatores mais importantes no traçado de rotas para SDAT e SDMT foram identificados.

O desempenho dos algoritmos e ferramentas computacionais demonstra que, embora o roteamento baseado em grafos não sejam tão rápidos como os desenvolvidos por ferramentas comerciais, a precisão é praticamente semelhante, mas o ganho fica na flexibilidade conseguida através da personalização de modelos em código livre e a facilidade para incorporar análises e simulações complementares.

A resolução do modelo (tamanho da quadricula) depende diretamente da qualidade dos dados de entrada, quanto mais informações disponíveis e o nível de detalhe, maior a precisão da análise pode ser conseguido.

Em relação à qualidade dos resultados e com ela o sucesso da metodologia depende de dois aspectos. Um deles está envolvido com a resolução espacial utilizada, porém a mais importante fica na calibração dos fatores, portanto, essa parte precisa ser trabalhada com prudência.

5.1 Trabalhos futuros

O objetivo da linha de pesquisa é integrar uma área que atualmente é considerada de grande importância, isto é a combinação do análise espacial em métodos convencionais de otimização por meio dos SIG.

Procurar a configuração ideal do sistema que atenda aos requisitos de demanda de maneira confiável, eficiente e com custo mínimo responde a duas etapas principais. O primeiro está relacionado à definição de alternativas de expansão e o segundo é a aplicação de métodos de otimização na primeira etapa.

Assim, um trabalho futuro que complementa este estudo é adicionar técnicas de otimização ao modelo para solucionar o problema de expansão do sistema de distribuição (PESD), incorporando fluxos de carga, minimizando os custos de investimento e operação.

Além disto, o contínuo desenvolvimento tecnológico e as políticas de incentivo à exploração de recursos renováveis (Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL) produzem transformações fundamentais no paradigma dos sistemas de energia elétrica tradicionais.

Então a transição de redes de distribuição passiva para redes de distribuição ativas (*Active Distribution Networks* ADNs) através da integração ótima de fontes de energia distribuída (*Distributed Energy Resources* DERs) e novos tipos de cargas com alto consumo de energia podem ser alcançadas com um planejamento adequado da expansão espaço-temporal do sistema de distribuição.

Portanto, responder à maneira como os investimentos devem ser direcionados através do desenvolvimento de modelos de otimização baseados nos SIG, definindo quando e onde serão as mudança nas redes de distribuição passiva é um trabalho futuro.

REFERÊNCIAS

¿Qué son los datos ráster?—Ayuda | ArcGIS for Desktop. [s.d.]. Disponível em: <<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>>. Acesso em: 4 mar. 2020.

BOULAXIS, N. G.; PAPADOPOULOS, M. P. Optimal Feeder Routing in Distribution System Planning Using Dynamic Programming Technique and GIS Facilities. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [s. l.], v. 17, n. 1, p. 242–247, 2002.

CHENG, M. Y.; CHANG, G. L. Automating Utility Route Design and Planning through GIS. **Automation in construction**, [s. l.], v. 10, n. 4, p. 507–516, 2001.

CHURCH, R. L.; MURRAY, A. T. **Business Site Selection, Location Analysis, and GIS**. New Jersey.

Clasificar campos numéricos para simbología graduada—Ayuda | ArcGIS for Desktop. [s.d.]. Disponível em: <<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/map/working-with-layers/classifying-numerical-fields-for-graduated-symbols.htm>>. Acesso em: 4 mar. 2020.

Cómo funcionan las herramientas de coste de distancia—Ayuda | ArcGIS for Desktop. [s.d.]. Disponível em: <<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-the-cost-distance-tools-work.htm>>. Acesso em: 4 mar. 2020.

Crear un corredor de menor coste—Ayuda | ArcGIS for Desktop. [s.d.]. Disponível em: <<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/creating-a-least-cost-corridor.htm>>. Acesso em: 4 mar. 2020.

DALENIUS, T.; HODGES, J. L. Minimum Variance Stratification. **Journal of the American Statistical Association**, [s. l.], v. 54, n. 285, p. 88–101, 1959.

DE LIMA, R. M.; OSIS, R.; DE QUEIROZ, A. R.; MOREIRA SANTOS, A. H. Least-Cost Path Analysis and Multi-Criteria Assessment for Routing Electricity Transmission Lines. **IET Generation, Transmission and Distribution**, [s. l.], v. 10, n. 16, p. 4222–4230, 2016.

DEDEMEN, Y. **A Multi-Criteria Decision Analysis Approach to GIS-Based Route Selection for Overhead Power Transmission Lines**. 2013. Middle East Technical University, [s. l.], 2013. Disponível em: <https://www.bertelsmann-stiftung.de/fileadmin/files/BSt/Publikationen/GrauePublikationen/MT_Globalization_Report_2018.pdf><http://eprints.lse.ac.uk/43447/1/India_globalisation%2C_society_and_inequalities%28Isero%29.pdf><<https://www.quora.com/What-is-the>>

DIJKSTRA, E. W. A Note in Two Problems in Connection with Graphs. **Numerische mathematik**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 269–271, 1959.

EKEL, P. Y.; LISBOA, A. C.; PEREIRA, J. G.; VIEIRA, D. A. G.; SILVA, L. M. L.; D'ANGELO, M. F. S. V. Two-Stage Multicriteria Georeferenced Express Analysis of New Electric Transmission Line Projects. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, [s. l.], v. 108, n. January, p. 415–431, 2019.

Entender el análisis de coste-distancia—Ayuda | ArcGIS for Desktop. [s.d.]. Disponível em: <<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/understanding-cost-distance-analysis.htm>>. Acesso em: 31 jul. 2020.

EPRI-GTC. **Overhead Electric Transmission Line Siting Methodology** EPRI. EPRI, Palo Alto, CA, and Georgia Transmission Corporation, Tucker,. Disponível em: <<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:EPRI-GTC+Overhead+Electric+Transmission+Line+Siting+Methodology#0>>.

FLETCHER, J. R. E.; FERNANDO, T.; IU, H. H. C.; REYNOLDS, M.; FANI, S. Spatial Optimization for the Planning of Sparse Power Distribution Networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, [s. l.], v. 33, n. 6, p. 6686–6695, 2018.

FLETCHER, R. H.; STRUNZ, K. Optimal Distribution System Horizon Planning - Part I: Formulation. **IEEE Transactions on Power Systems**, [s. l.], v. 22, n. 2, p. 791–799, 2007.

GARRIDO, E. G. **Modelos Espaciales para la Optimización de Trazados de Líneas Eléctricas Mediante Sistemas de Información Geográfica.** 2015. Universidad de la Rioja, [s. l.], 2015. Disponível em: <<http://dialnet.unirioja.es/descarga/tesis/46126.pdf>>

GILL, R. S.; JEWELL, W. T.; GROSSARDT, T.; BAILEY, K. Landscape Features in Transmission Line Routing. **Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference**, [s. l.], v. 67220, p. 1122–1126, 2006.

GÓMEZ DELGADO, M.; BARREDO CANO, J. **Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación Territorial.** 2nd. ed. México D.F., 2006.

GÖNEN, T. **Electric Power Distribution Engineering.** 3rd. ed. New York: CRC Press, 2014.

HAGBERG, A.; SCHULT, D.; SWART, P. **NetworkX Reference**, 2011.

KIM, S. P.; CHO, H. S.; HONG, S. H.; CHO, H. J.; SOHN, H. G. Genetic Algorithm to Find the Shortest Path on Raster Data. **The 2014 International Conference on Control, Automation and Information Sciences, ICCAIS 2014**, [s. l.], n. Iccais, p. 144–147, 2014.

KUMAR, D.; SAMANTARAY, S. R.; KAMWA, I. A Radial Path Building Algorithm for Optimal Feeder Planning of Primary Distribution Networks Considering Reliability Assessment. **Electric Power Components and Systems**, [s. l.], v. 42, n. 8, p. 861–877, 2014.

LIN, W. M.; TSAY, M. T.; WU, S. W. Application of geographic information system for substation and feeder planning. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, [s. l.], v. 18, n. 3, p. 175–183, 1996.

LIN, W. M.; TSAY, M. T.; WU, S. W. Application of Geographic Information System Technology to Substation and Service Area Planning. **Journal of the Chinese Institute of Engineers, Transactions of the Chinese Institute of Engineers, Series A/Chung-kuo Kung Ch'eng Hsuch K'an**, [s. l.], v. 20, n. 5, p. 573–578, 1997.

MALCZEWSKI, J.; RINNER, C. **Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science**. New York: Springer, 2015. Disponível em: <http://www.amazon.com/Multicriteria-Decision-Analysis-Geographic-Information/dp/3540747567/ref=sr_1_1?ie=UTF8&qid=1430864854&sr=8-1&keywords=Multicriteria+decision+analysis+in+geographic+information+science>

MEEHAN, B. **GIS for Enhanced Electric Utility Performance**. Boston: House Artech, 2013.

Modified Python implementation of Dijkstra's Algorithm GitHub. [s.d.]. Disponível em: <<https://gist.github.com/mdsrosa/c71339cb23bc51e711d8>>. Acesso em: 1 ago. 2020.

MONTEIRO, C.; MIRANDA, V.; RAMÍREZ-ROSADO, I. J.; ZORZANO-SANTAMARÍA, P. J.; GARCÍA-GARRIDO, E.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, L. A. Compromise Seeking for Power Line Path Selection Based on Economic and Environmental Corridors. **IEEE Transactions on Power Systems**, [s. l.], v. 20, n. 3, p. 1422–1430, 2005. a.

MONTEIRO, C.; RAMÍREZ-ROSADO, I. J.; MIRANDA, V.; ZORZANO-SANTAMARÍA, P. J.; GARCÍA-GARRIDO, E.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, L. A. GIS Spatial Analysis Applied to Electric Line Routing Optimization. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [s. l.], v. 20, n. 2 I, p. 934–942, 2005. b.

NetworkX — NetworkX documentation. [s.d.]. Disponível em: <<http://networkx.github.io/>>. Acesso em: 2 ago. 2020.

QUIRÓS-TORTÓS, J.; VALVERDE, G.; ARGUELLO, A.; OCHOA, L. (Nando). Geo-Information Is Power. **IEEE Power and Energy Magazine**, [s. l.], v. 15, n. 2, p. 48–56, 2017.

RAMÍREZ-ROSADO, I. J.; MONTEIRO, C.; GARCÍA-GARRIDO, E.; MIRANDA, V.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, L. A.; ZORZANO-SANTAMARÍA, P. J. Negotiation Aid System to Define Priority Maps for Wind Farm Development. **IEEE Transactions on Power Systems**, [s. l.], v. 20, n. 2, p. 618–626, 2005.

RAMIREZ CASTAÑO, S. **Redes de Distribución de Energía**. 3rd. ed. Manizales: Universidad Nacional de Colombia, 2004.

RAO TUMMALA, V. M.; WAN, Y. wah. On the Mean Random Inconsistency Index of Analytic Hierarchy Process (AHP). **Computers and Industrial Engineering**, [s. l.], v. 27, n. 1–4, p. 401–404, 1994.

SAVIĆ, M.; IVANOVIĆ, M.; JAIN, L. C. **Complex Networks in Software, Knowledge, and Social Systems**. [s.l.] : Springer, 2019. v. 148 Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-91196-0>>

SHU, J.; WU, L.; LI, Z.; SHAHIDEHPOUR, M.; ZHANG, L.; HAN, B. A New Method for Spatial Power Network Planning in Complicated Environments. **IEEE Transactions on Power Systems**, [s. l.], v. 27, n. 1, p. 381–389, 2012.

TOBISZEWSKI, M.; TSAKOVSKI, S.; SIMEONOV, V.; PENA-PEREIRA, F. **GIS and Multicriteria Decision Analysis**. New York: Jhon Wiley and Sons, Inc, 1999.

VEGA, M.; SARMIENTO, H. G. Image Processing Application Maps Optimal Transmission Routes. **IEEE Computer Applications in Power**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 47–51, 1996.

VISWARANI, C. D.; VIJAYAKUMAR, D.; SUBBARAJ, L.; UMASHANKAR, S.; KATHIRVELAN, J. Optimization on Shortest Path Finding for Underground Cable Transmission Lines Routing Using GIS. **Journal of Theoretical and Applied Information Technology**, [s. l.], v. 65, n. 3, p. 639–643, 2014.

WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION. **Electrical Transmission and Distribution Reference Book**. 4th. ed. Pennsylvania. Disponível em: <http://www.amazon.com/Electrical-Transmission-Distribution-Reference-Book/dp/B000AOMQV2/ref=sr_1_1?ie=UTF8&qid=1429400169&sr=8-1&keywords=Electrical+Transmission+And+Distribution+Reference+Book+Of+Westinghouse>

WILLIS, H. L. **Power Distribution Planning Reference Book, Revised and Expanded**. 2nd. ed. New York.

YILDIRIM, V.; NISANCI, R. Developing a Geospatial Model for Power Transmission Line Routing in Turkey. **Developing a Geospatial Model for Power Transmission Line Routing in Turkey**, [s. l.], n. April 2010, p. 11–16, 2010.

ZAMBRANO-ASANZA, S.; CHUMBI, W. E.; FRANCO, J. F.; PADILHA-FELTRIN, A. Análise de Decisão Multicritério em Sistemas de Informações Geográficas para Identificação de Locais Ideais de Novas Subestações. In: 2020, **Anais...** [s.l: s.n.]

ZAMBRANO, S.; MOLINA, M.; CHUMBI, W.; PATIÑO, C. A Hierarchical Simulation Model for Spatial-Temporal Electric Load Forecasting: Case Study in CENTROSUR. **Revista técnica Energia**, [s. l.], v. 14, p. 7–16, 2017.

ZINOVIEV, D. **Complex Network Analysis in Python**. [s.l.] : The pragmatic programmers, LLC, 2018.

ANEXOS

Anexo A - Fatores espaciais para alocar uma SE

Tabela 15 - Ponderação e calibração dos fatores espaciais para alocar uma SE

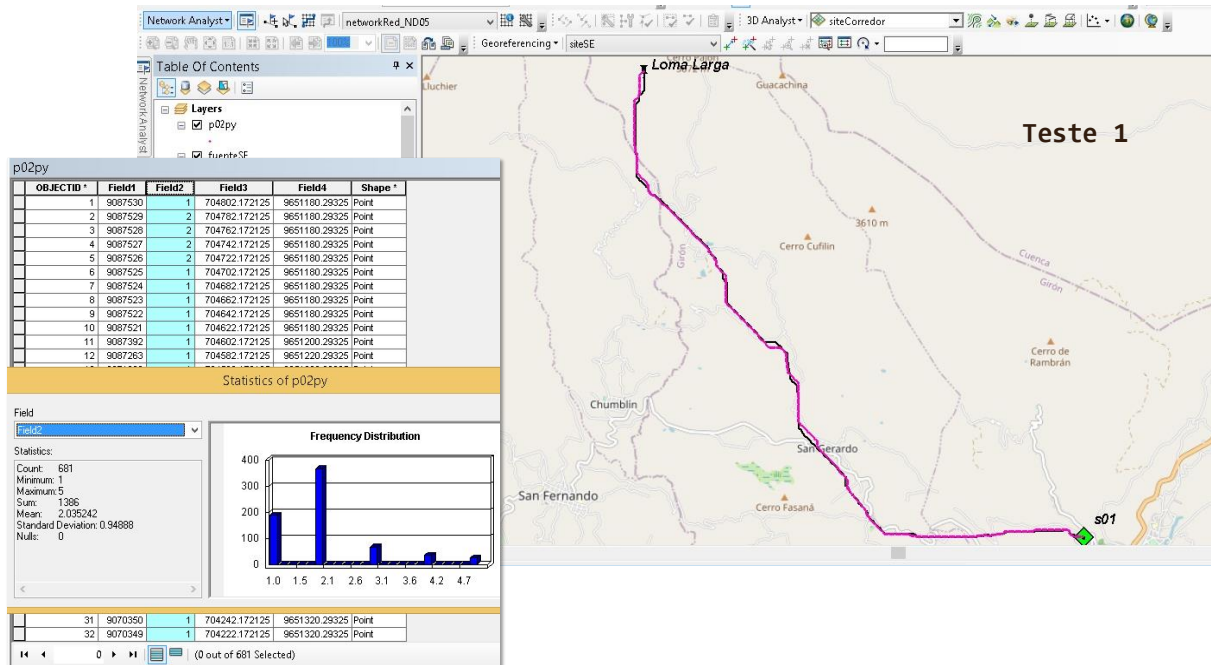
| Critério | Fator | U. | Peso | Rango | Grau |
|--------------------|---------------------|-----------|-------------|--------------|-------------------------------|
| Localização | Distância para vias | Km | 14% | 0-0,3 | 8 |
| | | | | 0,3-0,9 | 7 |
| | | | | 0,9-1,6 | 6 |
| | | | | 1,6-2,1 | 5 |
| | | | | 2,1-3,5 | 4 |
| | | | | 3,5-4 | 3 |
| | | | | 4-6 | 2 |
| | | | | 6 → | 1 |
| | | | | | Distância para infraestrutura |
| 8,8-15,6 | 2 | | | | |
| 15,6-22 | 3 | | | | |
| 22-27,6 | 4 | | | | |
| 27,6-34,5 | 5 | | | | |
| 34,5-41,4 | 6 | | | | |
| 41,4-48 | 7 | | | | |
| 48-> | 8 | | | | |
| Orografia | Declive | Graus | 14% | | |
| | | | | 1-7 | 7 |
| | | | | 7-13 | 6 |
| | | | | 13-18 | 5 |
| | | | | 18-23 | 4 |
| | | | | | |

| | | | | | |
|----------------|--|--------------------|-----|-------------------|---|
| | | | | 23-28 | 3 |
| | | | | 28-30 | 2 |
| | | | | 30 → | 1 |
| Técnico | Densidade de carga | kW/km ² | 44% | 0-82,9 | 1 |
| | | | | 82,9-356,5 | 2 |
| | | | | 356,6- 613,5 | 3 |
| | | | | 613,5- 754,4 | 4 |
| | | | | 754,5- 928,5 | 5 |
| | | | | 928,5- 1177,2 | 6 |
| | | | | 1177,2- 1707,8 | 7 |
| | | | | 1707,8→ | 8 |
| | Distância para rede de subtransmissão | Km | 23% | 0-1 | 8 |
| | | | | 1-2 | 7 |
| | | | | 2-5,5 | 6 |
| | | | | 5,5-8 | 5 |
| | | | | 8-11,2 | 4 |
| | | | | 11,2-15,6 | 3 |
| | | | | 16,6-22 | 2 |
| | | | | 22 → | 1 |

Fonte: Elaboração do autor.

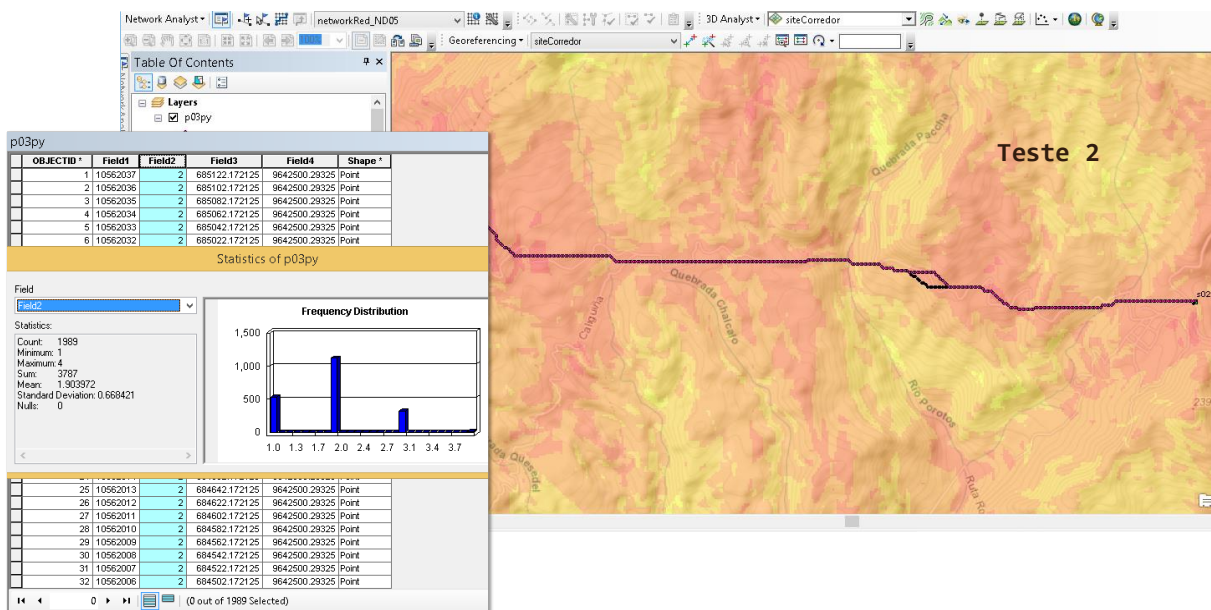
Anexo B - Comparação de resultados

Figura 22 - Teste 1, comparação de resultados entre os algoritmos baseados em uma estrutura de dados raster e de grafos



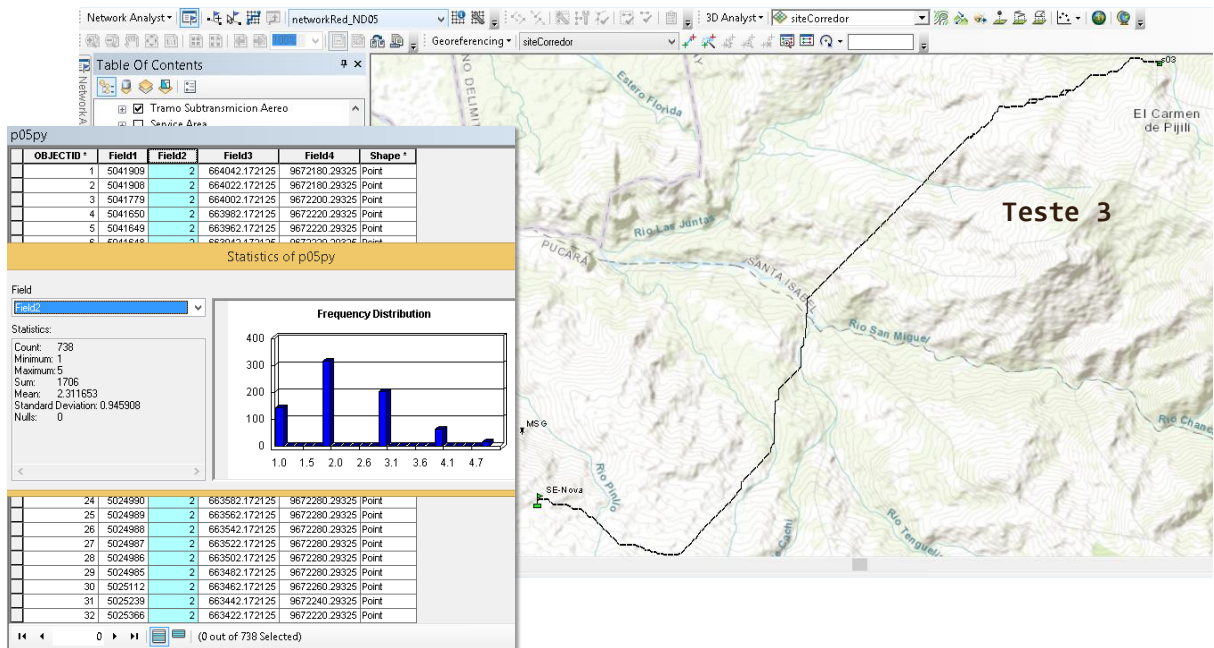
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 23 - Teste 2, comparação de resultados entre os algoritmos baseados em uma estrutura de dados raster e de grafos



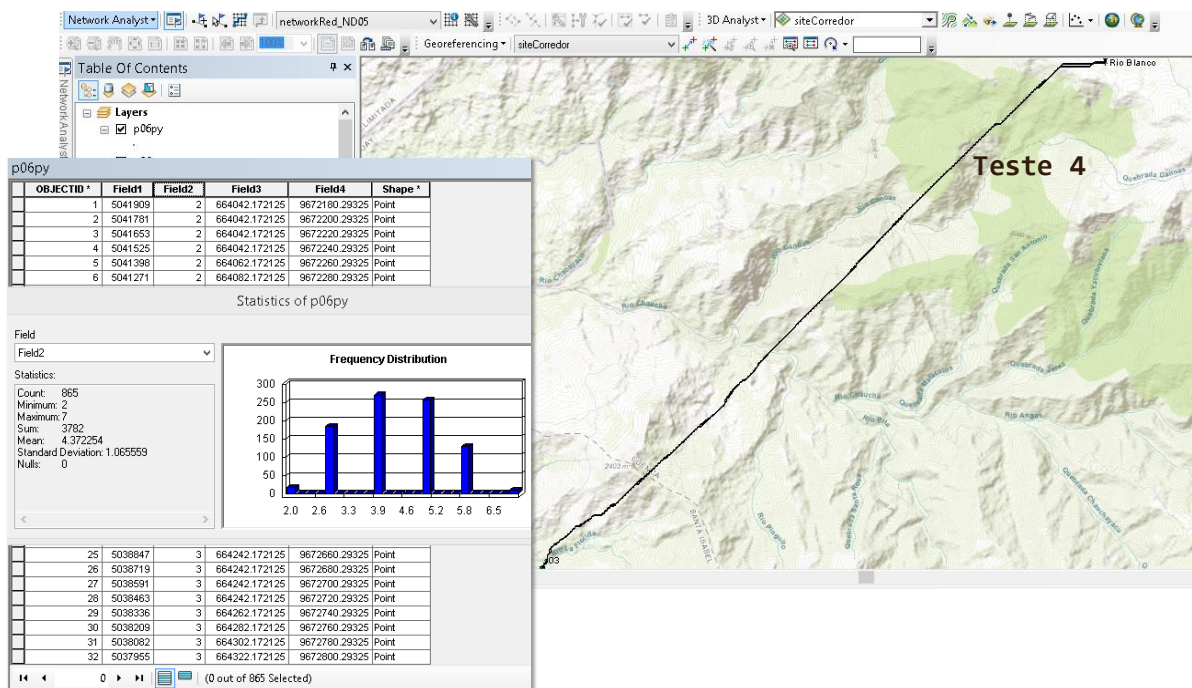
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 24 - Teste 3, comparação de resultados entre os algoritmos baseados em uma estrutura de dados raster e de grafos



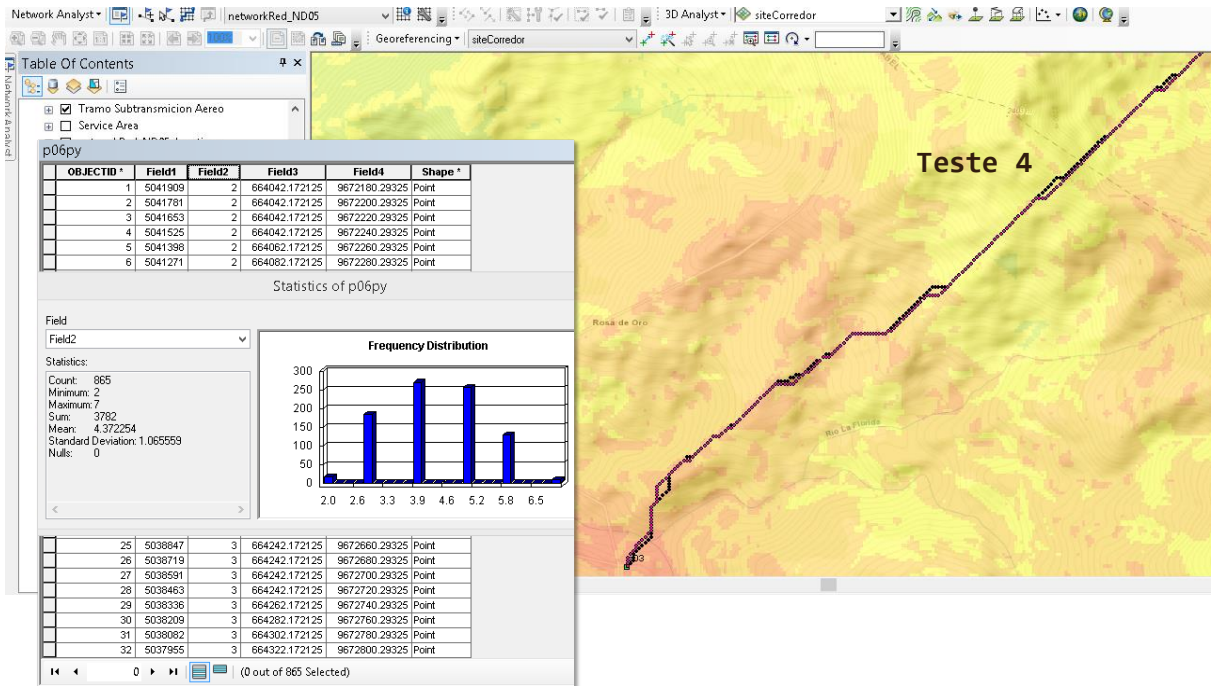
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 25 - Teste 4, comparação de resultados entre os algoritmos baseados em uma estrutura de dados raster e de grafos



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 26 - Teste 4, comparação de resultados entre os algoritmos baseados em uma estrutura de dados raster e de grafos



Fonte: Elaboração do autor.