

GRUPO DE ESTUDO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO - GDI

MODELAGEM PRELIMINAR DA VIABILIDADE DE TERRENOS A TRAÇADOS DE REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM ÁREAS RURAIS, POR ANÁLISE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO

**EDUARDO CHIARANI(1);MARICLER TOIGO(1);CHARLES JAREK IJAILLE(3)
LACTEC(1);COPEL DISTRIBUIÇÃO(3)**

RESUMO

A ampliação de serviços no setor de distribuição de energia elétrica em áreas rurais, passa pelo planejamento de novos traçados de rede. Com objetivo de minimizar o retrabalho e padronizar tomadas de decisão para novos traçados, o LACTEC em parceria com a COPEL-DIS estão desenvolvendo uma solução metodológica e computacional baseada em dados geoespaciais, geotecnologias, análise multicritério e inteligência artificial, em um sistema composto por quatro módulos. O primeiro módulo visa modelar a superfície terrestre por meio de dados geoespaciais e regras de decisão, para determinação de áreas preliminares de viabilidade a novos traçados, auxiliando no planejamento de traçados de redes em áreas rurais.

PALAVRAS-CHAVE

1.0 INTRODUÇÃO

O sistema de energia elétrica pode ser representado de forma simplista em geração, transmissão, distribuição e consumo. Por anos, muito esforço foi aplicado nos setores de geração e transmissão de forma a garantir a sua continuidade e confiabilidade, o que resultou em uma rede robusta e em constante crescimento. Com o avanço de tecnologias no setor de consumo e para garantir a crescente demanda da energia no Brasil (1), faz-se necessário a ampliação de estudos no planejamento de novas redes de distribuição ou expansão de redes existentes, alcançando novos consumidores e ampliando a qualidade da energia ofertada.

Neste contexto, um importante e complexo processo é a ampliação e elaboração de novos traçados de redes de distribuição de baixa e média tensões em áreas rurais. Novos traçados podem ser tratados em duas grandes etapas, anteprojeto e projeto (2), respectivamente, na obtenção de dados preliminares e dados de carga, e na execução de levantamento topográfico, locação de estruturas no perfil, dimensionamento mecânico, elétrico e geométrico, proteção e seccionamento, arquivamento e apresentação do projeto.

Com a alta demanda, as diversas etapas de planejamento podem dispendir morosidade ou custos sobressalentes aos projetos. Duas etapas diretamente afetadas são o levantamento topográfico e a locação em campo, em que há a necessidade de profissionais de topografia experientes e com conhecimentos nas particularidades da área energética. A carência destes profissionais pode culminar em decisões equivocadas, causando a falta de padronização nos traçados e, por vezes, gerando retrabalho que atrasam e aumentam os custos dos projetos.

Desta forma, com o objetivo de atender a alta demanda de serviços, minimizar o retrabalho e padronizar a tomada de decisões no planejamento de novos traçados em áreas rurais, o LACTEC em parceria com a COPEL-DIS está desenvolvendo no P&D ANEEL (02866-0509-2019), uma solução metodológica automatizada para o planejamento de novos traçados. A solução baseia-se na coleta de dados geoespaciais, uso de geotecnologias, análise multicritério e inteligência artificial, em um sistema composto por quatro módulos: Análise Multicritério Preliminar (AMP) para otimização de áreas extensas; Classificação Automática (CA) de imagens obtidas por meio de aerolevantamento com aeronaves remotamente pilotadas - ARP; Análise multicritério final (AMF) para ponderação de áreas classificadas em escala detalhada; E Algoritmos Genéticos (GA) para a determinação de traçados ótimos das redes de distribuição.

Neste documento é discutido o primeiro módulo 'AMP', que a partir de métodos multicritério, bases cartográficas existentes e algoritmos de traçados de custo mínimo, visa determinar áreas preliminares de viabilidade a novos traçados de redes de distribuição, para posteriormente, serem sobrevoadas com ARP e inseridas nos demais módulos do sistema.

2.0 PLANEJAMENTO DE NOVOS TRAÇADOS DE RDE DE DISTRIBUIÇÃO

Na literatura, autores propõem metodologias de auxílio em planejamentos de linhas de transmissão (LT) e distribuição (LD), utilizando modelagem da superfície terrestre por métodos de decisão multicritério (MCDA) e

definição de traçado por algoritmos de caminhos com menores custos ou caminhos mínimos (least cost path, shortest path). Monteiro (6) apresenta uma análise de múltiplos critérios para modelagem espacial e definição do traçado de linhas de distribuição de energia elétrica. Para isso, utiliza como precondições variáveis econômicas e ambientais, gerando corredores a partir de algoritmos de análise de caminho de menor custo. A partir de diferentes cenários criados com a alteração das ponderações dos critérios modelados, o autor tem como resultado, diferentes traçados para auxílio à tomada de decisão no projeto. Já Santos (8), gera uma metodologia para determinação de traçados de LT em múltiplas etapas, pela modelagem de critérios geográficos por ponderação e álgebra de mapas, definição do traçado de menor custo com algoritmos de menor caminho, definição de vértices para locação das torres com algoritmo Dijkstra e especificação de características da torre por algoritmo.

2.1 Métodos de decisão multicritério (MCDA)

O MCDA permite avaliar a potencialidade de alternativas pela ponderação de múltiplos critérios, mensuráveis e imensuráveis, através de regras de decisão. Um dos métodos amplamente utilizados é o Processo de análise hierárquico (Analytic Hierarchy Process - AHP), um método heurístico de MCDA que consiste na análise de possíveis alternativas através de regras de decisão, baseadas na comparação pareada de múltiplos critérios ponderados, podendo ser aplicado a diferentes níveis de hierarquia, visando o auxílio à tomada de decisão em torno de um objetivo (Figura 1) (7).

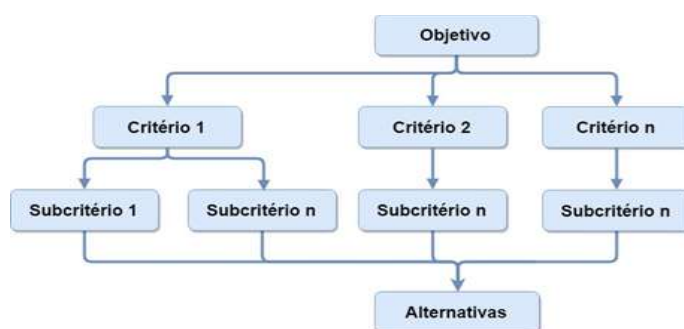


Figura 1 – Hierarquização AHP

No método AHP, a ponderação dos critérios é feita a partir de indicadores ou consulta a profissionais especialistas na área de estudo, conforme a escala fundamental de indicadores de Saaty (Tabela 1).

Tabela 1 – escala fundamental de indicadores de Saaty

Grau	Indicador	Característica
1	Igual importância	O critério é pouco relevante
3	Importância fraca	O critério é relevante
5	Importância forte	O critério é decisivo
7	Importância muito forte	O critério é dominante
9	Importância absoluta	O critério se sobressai de forma absoluta
2,4,6,8	Valores intermediários	

Para análises espaciais, é comumente utilizado o MCDA baseado em SIG (GIS-based MCDA)(3)(5). Neste, as precondições e alternativas são representadas com variáveis espaciais, inserindo propriedades geográficas que permitem o uso de técnicas de modelagem de dados para análise. Uma das técnicas de modelagem é a álgebra de mapas, que consiste na combinação de duas ou mais camadas de informações ou dados espaciais, na qual, o modelo Combinação Linear Ponderada (CLP) utiliza modelagem cartográfica e operadores algébricos para combinação dos dados. Malczewski (5) destaca que, na aplicação do modelo os dados geoespaciais de entrada devem ser mensuráveis permitindo a atribuição de valores numéricos e possibilitando o uso de equações algébricas. Para tal, é necessário o processamento dos dados geoespaciais para o formato matricial (raster), em que cada célula (pixel) apresenta um atributo de localização com coordenadas, e um atributo numérico associado à representação da realidade (valor do pixel). Os métodos citados quando utilizados em conjunto são chamados de AHP baseado em SIG, AHP para definição de ponderação e SIG para análise e ranqueamento das alternativas.

2.2 Algoritmos de traçado mínimo

Um algoritmo de traçado mínimo analisa o custo ponderado da distância e dos valores da superfície para determinar uma rota econômica entre uma origem e um destino. Lima (4) descreve o Dijkstra como um algoritmo de determinação de caminho mínimo, com o objetivo de selecionar um conjunto de arestas que tenham os menores custos associados aos nós. Sendo um método baseado em grafos, para o seu uso em um sistema SIG, uma rede virtual pode ser construída considerando os centros de cada célula de varredura como nós e as conexões de adjacência entre as células como arestas, conforme representação na Figura 2.



Figura 2 – Representação da superfície com custos acumulados de distância partindo do pixel com valor igual a 0

O caminho de menor custo de qualquer ponto dessa superfície pode ser encontrado apenas pesquisando o pixel adjacente com o menor peso acumulado em direção ao ponto de origem. Desta forma, é uma análise local com viés de traçado global.

3.0 ESTUDO DE CASO

Para análise da metodologia foram elencadas áreas no Paraná que estão em processo de planejamento ou execução de traçado com metodologia convencional. Como estudo de caso, é apresentada a área da Figura 3.

3.1 Definição de critérios

Os critérios foram analisados conforme precondições expostas nas normativas da concessionária de energia elétrica e contribuições de profissionais especialistas na área. Estes foram divididos em grupos de critérios ponderados (custos e benefícios), e critérios restritivos (restrições), e hierarquizados em uma série de subcritérios (Tabela 2).

Para cada subcritério foram determinadas ponderações por intermédio de indicadores normativos e internos da concessionária ou análise paritária por matrizes de comparação. Ambos foram inseridos com valores da escala fundamental de Saaty (valores de 1 a 9).

Tabela 2 – Critérios, subcritérios e ponderações

Critério	Ponderação critério	Subcritério	Ponderação subcritério	Ponderação global (<i>p</i>)
1 – Custo pelo fator tempo	1	UC de proteção integral	9	1.00
		UC de uso sustentável	7	0.78
		Zonas de amortecimento de UC	9	1.00
		Comunidades tradicionais	9	1.00
		APP	7	0.78
		Reserva legal	7	0.78
		Faixas de domínio de Estradas Federais	7	0.78
		Faixas de domínio de Estradas Rurais	1	0.11
		Área estratégica para conservação da biodiversidade	7	0.78
2 – Custo socioeconômico	1	Floresta Nativa	9	1.00
		Plantios Florestais	2	0.22
		Agricultura Perene	4	0.44
		Agricultura Anual	2	0.22
		Pastagem/Campo	1	0.11
		Corpos d'água	9	1.00
		Várzea	9	1.00
		Mangue	9	1.00
		Restinga	7	0.78
		Linha de Praia	7	0.78
		Solo Exposto/Mineração	1	0.11
		Área Urbanizada	9	1.00
		Área Construída	9	1.00
3 – Custo técnico	1	Distância de locais de acesso	0 a dist.máx.	0 a 1
4 – Custo ambiental	1	Uso de solo e vulnerabilidade geoambiental	1 a 9	0 a 1
		Áreas protegidas (unidades conservação, áreas prioritárias, APP, Reserva legal, Geossítios, Cavidades naturais)	1 a 9	0 a 1
		Patrimônios e comunidades tradicionais	1 a 9	0 a 1

Critério	Ponderação critério	Subcritério	Ponderação subcritério	Ponderação global (p)
5 – Benefício com o uso do sistema viário (faixas de domínio e área não edificante)	1	Rodovias Federais	5	0.556
		Rodovias Estaduais	6	0.667
		Rodovias Municipais	6	0.667
		Caminho Carroçável	1	0.111
		Rodovia rural tráfego periódico	7	0.778
		Rodovia rural tráfego constante	9	1.000
6 – Benefício com o uso de redes existentes	1	Redes de distribuição existentes	3	0.33

A ponderação dos critérios poderá ser alterada para cada traçado, por meio de inserção manual das ponderações, já os subcritérios não devem ser alterados. As ponderações globais são o resultado da ponderação do critério aplicada junto à ponderação do subcritério normalizada. Os critérios de custos tem caráter de adição ao modelo, já os critérios de benefício, tem caráter de subtração, conforme equação (1).

3.2 Obtenção de dados geoespaciais e geoprocessamento

Para cada subcritério foram obtidos dados geoespaciais em estrutura vetorial. A aquisição dos dados foi realizada através de repositórios digitais governamentais, assegurando a sua integridade. Também foram fatores relevantes para a aquisição a escala e resolução temporal dos dados.

Desta forma, cada subcritério foi tratado e combinado a partir de algoritmos de processamento em linguagem de programação Python, e bibliotecas como GDAL, Geopandas, Numpy, (...), compondo os seguintes itens:

- (a) Rasterização dos dados vetoriais;
- (b) Tratamento do valor do pixel dos dados (cálculo de proximidade critério 3 e 4)
- (c) Normalização;
- (d) Aplicação dos pesos (CLP);
- (e) Combinação das imagens raster (CLP).

No processo CLP, a combinação das imagens raster em um modelo final, foi obtida a partir da somatória dos subcritérios de custo (C_{sc}) multiplicados pelo respectivo peso global (p), subtraídos da somatória dos subcritérios de benefícios (B_{sc}) multiplicados pelo respectivo peso global (1).

$$M = \sum_{i=1}^n (C_{sc_i} * p_i) - \sum_{i=1}^n (B_{sc_i} * p_i) \quad (1)$$

3.3 Definições de traçado e teste com diferentes cenários

Para geração do traçado foi utilizado o algoritmo em Python *route_through_array* da biblioteca *Scikit-image*, que a partir de parâmetros de entrada de coordenadas dos pontos A e B (pontos de início e fim do traçado) e o modelo resultante da combinação entre subcritérios, gera uma rota com custos mínimos. Para análise de premissas e sensibilidade das ponderações, foram gerados traçados para diferentes cenários com variações nas ponderações dos critérios, conforme Tabela 3 e Figura 3.

Tabela 3 – Ponderação de traçados alternativos gerados

Cenário	Critério preponderante	Critério 1	C2	C3	C4	C5	C6
1	Igualdade entre critérios	1	1	1	1	1	1
2	Premissa de uso de sistema viário	1	1	1	1	100	1
3	Premissa de uso de redes existentes	1	1	1	1	1	100
4, 5, 6, 7	Variações de sensibilidade entre critérios	2, 1, 1, 1	1,2,1,1	1,1,2,1	1,1,2,1	1	1

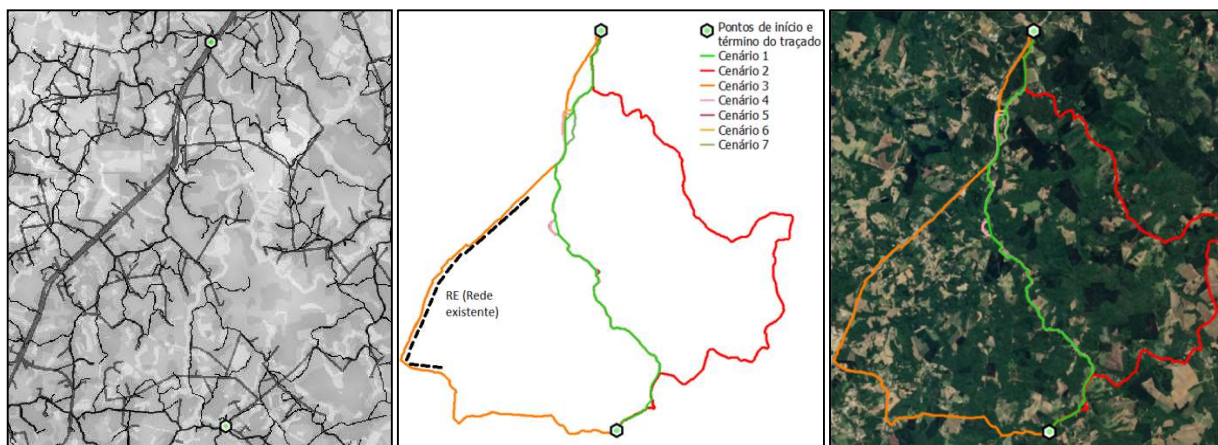


Figura 3 – (a) Modelo gerado para Cenário 1; (b) Definição de traçados com diferentes cenários; (c) Visualização de traçados com imagem de satélite ao fundo.

4.0 RESULTADO E DISCUSSÕES

Com a obtenção dos diferentes traçados pelos cenários de ponderação, foi possível definir sugestões e premissas para geração de novos traçados:

- Na análise de sensibilidade entre critérios (cenários 4, 5, 6 e 7) não houve diferenças dos traçados com o traçado de igualdade entre ponderações (cenário 1), logo, o cenário 1 representa o traçado com melhor equilíbrio entre resultados;
- Para traçados com exigência do acompanhamento dos sistemas viários, é indicado o cenário 2;
- Para traçados com exigência do uso de traçados de redes existentes, indica-se o cenário 3. Para utilizar redes existentes específicas, estas devem ser inseridas na base cartográfica em tempo de execução (item que está em desenvolvimento).

Desta forma, aconselha-se o uso de um ou mais cenários para traçados alternativos com diferentes ponderações. Por fim, é apresentado como resultado a área de abrangência de 200 metros, sendo 100 metros para cada um dos lados do traçado preliminar, indicando a viabilidade inicial do terreno a futuros traçados de rede, conforme Figura 4.

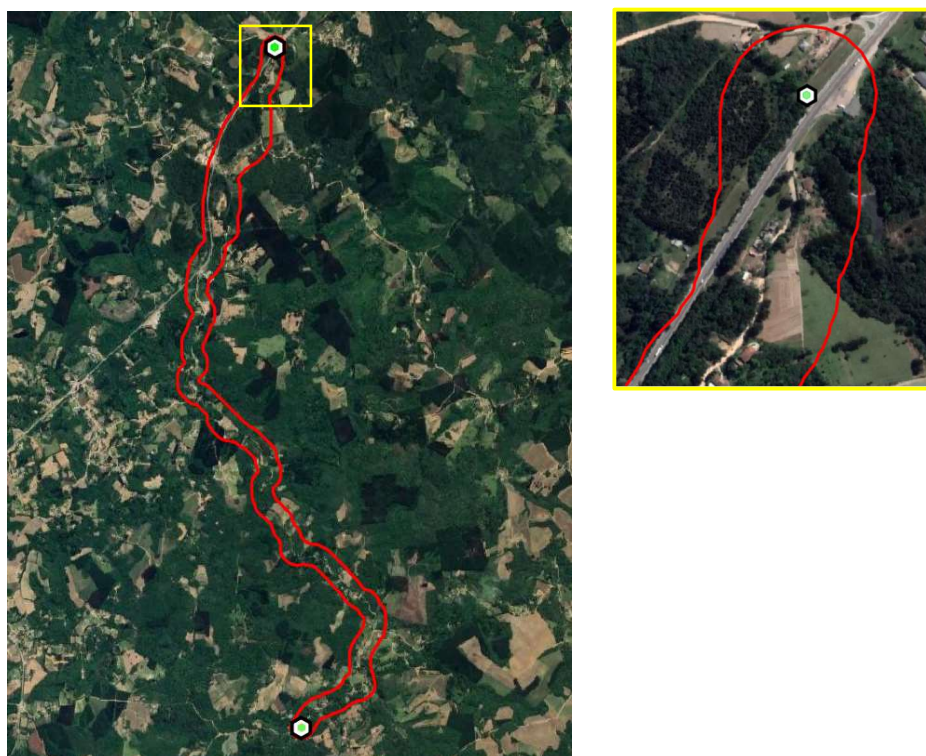


Figura 4 – (a) Resultado para traçado com igualdade entre critérios; (b) Visualização do terreno.

5.0 CONCLUSÕES

A aplicação da metodologia ao estudo de caso indicou a área com maior viabilidade à construção de traçados de rede de distribuição de energia elétrica em uma área rural do estado do Paraná, de forma padronizada e automatizada.

Como um módulo de um sistema, as tarefas computacionais de geoprocessamento foram automatizadas em linguagem python, desta forma, não é necessário o usuário possuir conhecimento em softwares de SIG e em especificidades da área de energia elétrica.

As ponderações aplicadas ao modelo são ajustáveis, porém recomenda-se mantê-las com os valores atuais, pois foram obtidas e calibradas por meio de estudos junto a técnicos e a literatura atual.

Os próximos passos são agregar aos demais módulos do sistema, e utilizar os resultados para execução de aerolevantamentos com ARP para obtenção de dados geoespaciais com maior detalhamento, e sequência do planejamento no sistema.

Ressalta-se que os traçados aqui obtidos são preliminares e diferem dos traçados ótimos, pois, as linhas e vértices não correspondem à localização dos cabos e postes da rede, contendo coordenadas planimétricas e altimétricas incompatíveis com a execução da locação das redes de distribuição em campo. Contudo, estes resultados podem ser utilizados como auxílio à tomada de decisão na etapa de planejamento de novos traçados de redes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) Empresa de Pesquisa Energética (EPE). 2018. Plano decenal de expansão de energia 2027. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202027_aprovado_OFICIAL.pdf> Acesso em: 16 ago. 2021.

(2) Companhia Paranaense de Energia (COPEL). 2002. NTC 831001 - Norma técnica para projeto de redes de distribuição rural. Disponível em: <[https://www.copel.com/hpcopel/root/pagcopel2.nsf/0/AA61592F6376CB95032574FD006D2347/\\$FILE/Ntc%20RDR%20-%20Jul02.pdf](https://www.copel.com/hpcopel/root/pagcopel2.nsf/0/AA61592F6376CB95032574FD006D2347/$FILE/Ntc%20RDR%20-%20Jul02.pdf)> Acesso em: 16 ago. 2021.

(3) Greene, R. Devillers, R. Luther, J. E. Eddy, B. G. 2011. GIS-Based Multiple-Criteria Decision Analysis. *Geography Compass*. 5(6), pp. 412–432. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2011.00431.x>

(4) Lima et al. 2016. Least-cost path analysis and multi-criteria assessment for routing electricity transmission lines. *IET Generation, Transmission & Distribution*. pp. 1–9. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.1119>.

(5) Malczewski, J. 2000. On the Use of Weighted Linear Combination Method in GIS: Common and Best Practice Approaches. *Transactions in GIS*. 4(1), pp. 1–9. <https://doi.org/10.1111/1467-9671.00035>.

(6) Monteiro et al. 2005. Compromise Seeking for Power Line Path Selection Based on Economic and Environmental Corridors. *IEEE Transactions on Power Systems*. 20(3), p1422–1430. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.852149>.

(7) Saaty, T. 2004. Decision making — the Analytic Hierarchy and Network Processes (AHP/ANP). *Journal of Systems Science and Systems Engineering*. 13(1), pp. 1-35. <https://doi.org/10.1007/s11518-006-0151-5>.

(8) Santos et al. 2019. Optimizing routing and tower spotting of electricity transmission lines: An integration of geographical data and engineering aspects into decision-making. *Electric Power Systems Research*. 176 (2019) 105953.

DADOS BIOGRÁFICOS



Possui graduação em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura (2017) e Pós-graduação em Ciências Geodésicas (2019), ambas pela Universidade Federal do Paraná – UFPR. Atualmente, é Pesquisador Trainee no setor de Geossoluções do LACTEC com participação em projetos com aplicação de geotecnologias para planejamento energético, com uso de geoprocessamento, métodos de análise de decisão por múltiplos critérios, e linguagem de programação Python.

(2)

MARICLER

TOIGO

Especialista em Geoprocessamento pela Universidade do Paraná - UFPR (2009), possui graduação em Tecnologia em Processamento de Dados - Faculdades Santa Cruz de Curitiba (1997). Experiência na área de Geociências, com ênfase em Geocartografia. Pesquisadora nos Institutos Lactec desde 2011, atua na área de Geossoluções coordenando projetos de geoprocessamento e geração de bases cartográficas decorrentes de perfilamento aéreo a laser e coberturas aerofotogramétricas, tanto de aerolevantamento convencional, como de aerolevantamento por ARP (aeronave remotamente pilotada).

(3)

CHARLES

JAREK

IJAILLE

Possui graduação em Engenharia Eletrotécnica. Atua como técnico de Normas e Procedimentos na empresa Copel Distribuição. Tem experiência na área de Projetos Industriais e projetos de Redes de Distribuição, bem como fiscalização de obras.