

Análise de Decisão Multicritério em Sistemas de Informações Geográficas para Identificação de Locais Ideais de Novas Subestações

Zambrano-Asanza S. * **; Chumbi W. E.*
Franco John F. *; Padilha-Feltrin A. *, ***

*Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil (Tel: (18) 3743-1000; e-mail: s.asanza@unesp.br, enrique.quito@unesp.br, fredy.franco@unesp.br)

**Departamento de Planejamento, “Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A.” - CENTROSUR, Cuenca, Equador (Tel: +593 (07)4135136; e-mail: sergio.zambrano@centrosur.gob.ec)

*** Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, (e-mail: antonio.padilha-feltrin@unesp.br)

Abstract: The location of a new substation is a key factor in the expansion of electric distribution systems. Thus, this location is strategic from the point of view of the costs associated with energy supply, and holistic and integral planning of sub-transmission and primary distribution subsystems should be considered. Although future electric load growth is a determining factor for its capacity and location, other technical, environmental, soil characteristics, risk, social and administrative criteria that influence the final location have been identified. A multi-criteria decision analysis based on geographic information system is used to combine these criteria, taking into account decision makers' preferences and physical restrictions on land use. The main contributions of this paper are the identification of the criteria, among which stands out a load density analysis based on the spatial-temporal load forecasting. The product of this analysis, called suitability, is a decision map to identify ideal locations for new substations. The performance of the proposed method is evaluated in the service area of an Ecuadorian distribution energy utility, which adds more value to this proposal, so that it can be applied in real cases.

Resumo: A localização de uma nova subestação é um fator chave na expansão dos sistemas de distribuição de energia elétrica. Assim, esse local é estratégico do ponto de vista dos custos associados ao suprimento de energia, devendo-se considerar um planejamento holístico e integral dos subsistemas de subtransmissão e distribuição primária. Embora o crescimento futuro da carga seja um fator determinante para sua capacidade e localização, foram identificados outros critérios técnicos, ambientais, características do solo, risco, critérios sociais, e administrativos que influenciam a localização final. Uma análise de decisão multicritério, baseada em sistemas de informações geográficas, é usada para combinar esses critérios, considerando as preferências dos tomadores de decisão e as restrições físicas do uso da terra. As principais contribuições deste trabalho são a identificação dos critérios, dentre os quais se destaca uma análise de densidade de carga baseada na previsão espaço-temporal da demanda. O produto dessa análise, chamado de adequação, é um mapa de decisão para identificar locais ideais para novas subestações. O desempenho do método proposto é avaliado na área de serviço de uma concessionária de energia equatoriana, o que agrega mais valor a essa proposta, com o intuito que possa ser aplicada em casos reais.

Keywords: analytic hierarchy process; electric load; GIS; multicriteria decision analysis; substation planning; suitability analysis.

Palavras-chaves: análise hierárquica; demanda elétrica; sistemas de informações geográficas; análise de decisão multicritério; planejamento de subestações; análise de adequação.

1. INTRODUÇÃO

A localização de uma nova subestação é essencial para determinar o sucesso de qualquer projeto futuro de construção e operação para sistemas de distribuição elétrica. Embora a determinação do local seja baseada em estudos de crescimento da carga, sua localização final pode depender da satisfação do público e da resolução de possíveis problemas de aceitação (McDonald, 2012). Também é um erro permitir que somente o custo da terra conduza o processo de localização da subestação, como acontece em muitos casos (Willis, 2004). A escolha da localização de uma nova subestação é um

compromisso entre fatores técnicos, econômicos, ambientais, sociais e administrativos (Meehan and Kane, 2013; Krieg and Finn, 2019), onde a maioria desses fatores tem uma dimensão espacial. A localização de uma nova subestação define o ponto final de entrega do sistema de distribuição de alta tensão (SDAT) ou subtransmissão, bem como os pontos de partida para os alimentadores de distribuição primária no sistema de distribuição de média tensão (SDMT). Uma má localização pode aumentar significativamente os custos do sistema em toda a sua integralidade (Willis, 2004).

A construção de uma nova usina de geração ou subestação de distribuição requer duas fases: exploração e desenvolvimento (Meehan and Kane, 2013). Este artigo abordará apenas a primeira, a fim de realizar uma análise de adequação usando um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Neste contexto, a integração de um Análise de Decisão Multicritério (ADMC) com SIG é conhecida como SIG-ADMC (Malczewski and Rinner, 2015). Este procedimento transforma e combina dados geográficos e preferências do tomador de decisão em um mapa de decisão. As abordagens do ADMC foram aplicadas em gerenciamento de energia, avaliação de impacto ambiental, avaliação de sustentabilidade, energia renovável, sustentabilidade energética e outras áreas de energia (Mardani *et al.*, 2016). Em consequência, um mapa de adequação se torna uma ferramenta útil para entender a relação dos critérios espaciais e planejar adequadamente os locais das novas subestações.

O planejamento da expansão de subestações (PES) de distribuição inclui determinar a área de serviço, tamanho, localização e data de entrada em operação. O PES é definido como um problema de otimização para determinar a construção de novas subestações e/ou o reforço de subestações existentes (Franco, Rider and Romero, 2016). Existe uma localização ideal para uma subestação do ponto de vista dos custos do sistema para distribuir energia aos consumidores (Willis, 2004). No entanto, na maioria dos casos relatados na literatura, durante o processo de otimização do PES, a localização é encontrada com base nos locais candidatos pré-estabelecidos. A proposta de Lin, Tsay e Wu (Lin *et al.*, 1997) trata o problema do PES em duas etapas: na primeira encontra locais potenciais e na segunda realiza a otimização da área de serviço. Dessa forma, o objetivo deste artigo é encontrar locais ideais de novas subestações como uma entrada essencial para o processo de PES.

Neste artigo propõe-se um método SIG-ADMC para determinar os locais ideais para a construção de novas subestações de distribuição, que combina mapas gerados a partir de critérios espaciais e restrições físicas do uso da terra. Com isso, as principais contribuições deste trabalho são:

- Uma análise de adequação que satisfaça critérios da densidade de carga, localização, orografia e risco;
- Uma análise de densidade de carga baseada na previsão espaço-temporal da demanda elétrica para longo prazo, que atenda requisitos realistas e utiliza uma alta resolução espacial.

2. MÉTODO PROPOSTO

Propõe-se o uso de uma análise de adequação para identificar os locais ideais para novas subestações de distribuição. A integração SIG-ADMC é usada para resolver a análise de adequação com a técnica de Combinação Linear Ponderada (CLP). Os locais possíveis para a localização de subestações atendem a critérios de seleção, como densidade de carga, proximidade ou localização geográfica, orografia e risco. Um método de Análise Hierárquica (*Analytic Hierarchy Process - AHP*) é adotado para obter os pesos de cada critério. Uma abordagem relativa é usada para avaliar essa adequação de

acordo com uma escala de adequação refletida em um mapa de calor.

2.1 Combinação linear ponderada (CLP)

O modelo CLP, definido em (1), consiste na combinação de mapas gerados a partir dos n critérios considerados. Se a_{ik} é o nível do critério k , então $v(a_{ik})$ é uma função de pontuação ou preferência dessa alternativa em relação a esse critério (Malczewski and Rinner, 2015). Um peso w_k é um valor atribuído a um critério k de avaliação que indica sua importância em relação aos outros critérios.

$$V(A_i) = \sum_{k=1}^n w_k v(a_{i,k}) \prod r_i \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^n w_k = 1 \quad (2)$$

em que $V(A_i)$ é o valor total da alternativa i na localização geográfica (x_i, y_i) . Os pesos dos critérios atendem à restrição (2). O componente r_i é usado para representar a restrição de uso do solo ($r = 0$ para restrito e $r = 1$ para permitido).

2.2 Pesos de critérios

O método de comparação pareada é usado para determinar os pesos dos n critérios; foi desenvolvido por (Saaty, 1980) no contexto do AHP. As comparações são organizadas em uma matriz recíproca C_{nm} (3), onde todos os elementos diagonais tem valor igual a 1. Os pesos relativos C_{kp} são determinados em uma escala de 9 pontos, segundo a Tabela 1, também chamada de “Escala Fundamental de Saaty”. Os tomadores de decisão fornecem a matriz de comparação e o vetor de ponderação de critérios w pode ser calculado com base no procedimento estabelecido em (Saaty, 1980).

$$Cw = \begin{bmatrix} 1 & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ 1/c_{12} & 1 & \dots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/c_{1n} & 1/c_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

Tabela 1. Intensidade de importância (Saaty, 1980)

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 “↓” corresponde a valores intermediários entre duas categorias, indicando progressivo aumento de importância

O julgamento humano na comparação pareada de tomadores de decisão pode violar os princípios da transitividade (Malczewski and Rinner, 2015), isto é, gerar inconsistências ao formular preferências entre critérios. Portanto, além de determinar os pesos é necessário avaliar o nível de consistência. Uma razão de consistência dos pesos CR é proposta em (4), que depende de um índice de consistência CI do processo, definido em (5), onde λ_{max} é o maior autovalor de C . RI é um índice randômico, que é o índice de consistência de uma matriz de comparação gerada de diferentes tamanhos. De acordo com (Saaty, 1980), para $n = 5; 6; 7$ e $8; RI = 1,12; 1,25; 1,35$ e $1,40$, respectivamente. Uma razão de consistência $CR < 0,10$ indica um nível razoável de consistência.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n - 1)} \quad (5)$$

2.3 Padronização ou normalização de critérios

Os métodos da ADMC requerem a conversão de critérios de avaliação em unidades comparáveis na matriz de decisão por meio de padronização. As alternativas de decisão para cada critério usando o SIG geralmente são baseadas nos princípios de relação espacial: conectividade, contiguidade, proximidade e sobreposição. Neste trabalho é usada uma adequação relativa, onde as pontuações são classificadas em uma escala de 1 a 8 pontos. O uso de estratificação por variação mínima (Dalenius and Hodges Jr., 1959) é proposta para estabelecer os intervalos (classificação). Uma reversão total de classificação deve ser levada em consideração para critérios cuja ordem, na função de pontuação, é totalmente invertida.

3. CRITÉRIOS E RESTRIÇÕES

Nesta seção é proposta uma classificação dos critérios assim como uma breve definição com base nas referências adotadas (CIGRE, 2000; Willis, 2004; McDonald, 2012).

3.1 Meio Ambiente

Área de terreno: O terreno deve ser grande e ter espaço suficiente para abrigar todos os equipamentos e serviços da subestação. A área do local da subestação não deve ser propensa a inundações.

Vegetação: A subestação deve estar localizada em áreas agrícolas de baixa produtividade ou em terras não cultivadas, evitando florestas formadas por espécies protegidas.

Áreas protegidas: A subestação deve estar localizada fora e o mais longe possível de qualquer área listada como local natural protegido, especialmente parques nacionais e naturais.

Água: O local deve ser escolhido para evitar danos à rede de drenagem natural.

Panorama: A escolha do local deve levar em consideração o tamanho e a forma do campo visual afetado, onde os locais que fazem parte de paisagens naturais notáveis devem ser evitados.

3.2 Orografia e Características do Solo

Declive: O local deve preferencialmente estar em terreno plano. Isso reduziria significativamente os possíveis efeitos no substrato, reduzindo a necessidade de terraplenagem.

Geológico: A existência de falhas geológicas geralmente é motivo suficiente para rejeitar um local específico. O solo deve permitir a construção de estradas e fundações. É melhor evitar locais de minas devido à subsidência do solo.

Geotécnico: Um baixo valor de resistividade do solo é desejável, o que deve ser medido antes da construção da subestação. No entanto são necessárias ações adicionais, como a introdução de instalações de aterramento.

3.3 Localização

Distância para áreas urbanas: O planejamento urbano deve ser considerado para evitar centros urbanos, áreas históricas, terrenos em potencial de desenvolvimento ou em reserva.

Distância para rodovias: Fácil acesso de/para o local, permitindo o transporte de grandes equipamentos (transformadores de potência), bem como o transporte de pessoal para operação ou manutenção.

Infraestruturas e outras instalações: Deve ser considerada a presença de infraestrutura, usinas ou subestações geradoras, tanques de combustível ou material inflamável, aterros sanitários, locais militares, entre outros.

3.4 Risco

Poluição: O risco de falha do equipamento e os custos de manutenção aumentam dependendo do nível de contaminação. Por exemplo, pequenas partículas em isoladores, soluções salinas e alguns tipos de poluição industrial podem corroer estruturas.

Interferência: Possível interferência em estações de rádio e televisão e outros meios de comunicação como em aeroportos e aeródromos.

3.5 Sociais

Aceitação do público: Envolvimento da comunidade no processo de aprovação. As subestações do tipo GIS (*Gas-Insulated Switchgear*) podem mitigar o impacto estético, os níveis de poluição, os riscos de falhas, os custos de manutenção, etc.

Herança cultural: Áreas pertencentes ao patrimônio cultural devem ser avaliadas para evitar danos diretos, como destruição de restos arqueológicos, ou danos indiretos, como colocar a subestação perto de um monumento e afetar o ambiente visual.

3.6 Técnicos

Demanda de eletricidade: Dependendo da localização da carga e de sua taxa de crescimento, pode ser necessário adicionar capacidade ao sistema construindo uma nova subestação. Uma alta densidade de carga torna sua alimentação sensível à localização ideal da subestação.

Distância para linhas de energia: A subestação será conectada à rede elétrica, sendo necessário estudar a vegetação, os corredores da linha (torres) nas proximidades da subestação e futuras extensões.

Confiabilidade: Em algumas circunstâncias, uma nova subestação pode ser justificável para atender os objetivos de confiabilidade, e não apenas por razões de capacidade.

4. ESTUDO DE CASO

O presente estudo foi testado usando a rede de distribuição da “Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A.” (CENTROSUR), localizada em Cuenca, Equador, Fig. 1. A área de serviço de CENTROSUR é de 30.234 km² (11,8% do território equatoriano). Em dezembro de 2018, a energia faturada dos consumidores foi de 1.074,09 GWh, com uma demanda máxima de 195,51 MW.

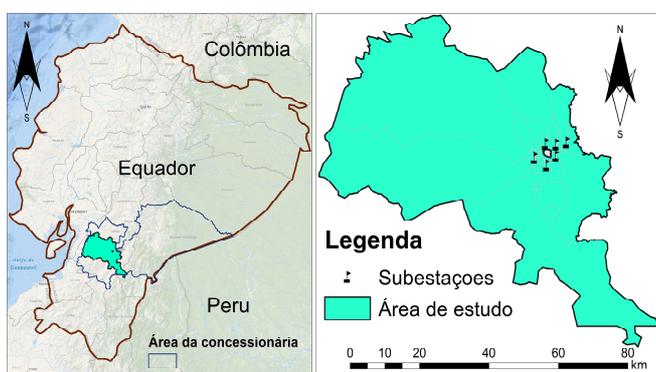


Fig. 1 Estudo de caso: CENTROSUR, Cuenca, Equador.

O método descrito foi implementado com a ferramenta ArcGIS 10.6 da ESRI (ESRI, 2019). O geoprocessamento é realizado com análise espacial e o pacote ArcPy na linguagem Python. Além disso, o “Model Builder” foi usado para criar o fluxo de processo e uma análise de rede (*Network Analysis*) para resolver o problema da cobertura. O formato para os mapas é *raster* com resolução de 100m x 100m.

4.1 Área de estudo

A Fig. 2 mostra a área de estudo, que compreende o SDAT ou subtransmissão a 69 kV (linha em azul), com 5 subestações de carga (69/22 kV): S/E 03, 04, 05, 07 e 08. Atualmente, a subestação S/E 06 é apenas de transferência. As subestações S/E 01 e 02, circunscrevem o centro histórico da cidade de Cuenca, subterrâneas e com níveis de tensão diferente, não fazendo parte deste estudo. A capacidade nominal total da área de estudo é 190,5/249 MVA (ONAN/ONAF “Oil–Natural Air–Natural / Oil–Natural Air–Forced”).

Para o ano de 2019, a demanda nestas 5 subestações é de 123 MW e sob um crescimento médio aumentaria 69 MW até o ano 2034 (56% a mais em 15 anos). A Tabela 2 apresenta o carregamento das subestações durante o horizonte de planejamento, com base na capacidade nominal ONAN (Óleo Natural Ar Natural). Se forem adicionados cenários de novos projetos de infraestrutura e a inserção de novos tipos de carga com alto consumo (Mejía *et al.*, 2017; Mejia *et al.*, 2020), o carregamento das subestações seria maior. Em geral, o

problema seria avaliar a idoneidade de novos locais de subestação, perto da rede de subtransmissão a 69 kV.

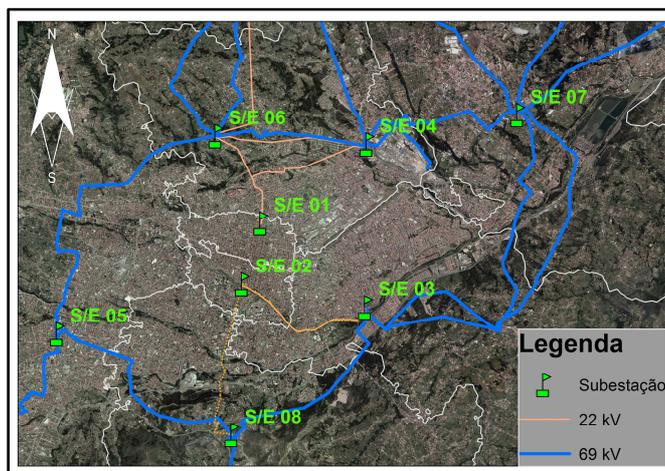


Fig. 2 Linhas de subtransmissão a 69 kV e subestações existentes (cidade de Cuenca com 600.000 habitantes).

Tabela 2. Carregamento das subestações de distribuição sob as condições atuais (dependendo da capacidade nominal ONAN).

Ano	S/E 03	S/E 04	S/E 05	S/E 07	S/E 08
2019	56%	57%	73%	59%	53%
2020	57%	60%	77%	61%	54%
2021	58%	61%	80%	64%	56%
2022	59%	63%	83%	66%	58%
2023	60%	65%	86%	69%	59%
2024	61%	66%	88%	71%	60%
2025	62%	67%	91%	74%	62%
2026	63%	69%	94%	76%	63%
2027	64%	70%	97%	78%	65%
2028	64%	71%	99%	81%	66%
2029	65%	73%	102%	83%	67%
2030	66%	74%	105%	86%	68%
2031	67%	75%	108%	88%	69%
2032	67%	76%	110%	90%	70%
2033	68%	77%	113%	93%	72%
2034	68%	78%	115%	95%	73%

4.2 Avaliação da densidade de carga

A análise da densidade de carga é baseada em resultados anteriores de previsão espaço-temporal da demanda (Zambrano *et al.*, 2018), que é uma informação de entrada fornecida pela CENTROSUR. Esse valor da demanda corresponde ao ano de 2034 em um cenário de crescimento chamado “médio” (taxa de crescimento anual de 4,83% em toda a área de concessão e de 3,75% na área de estudo).

Para avaliar a concentração de carga em torno das subestações existentes e considerar a restrição de uma demanda de referência e área associada, foi proposta uma análise de cobertura usando um fluxo em rede. A rede de transporte é configurada de acordo com a rede elétrica de média tensão existente, fechando todas as chaves de interconexão normalmente abertas. Em seguida, usando a ferramenta “Network Analysis” de ArcGIS (ESRI, 2019), uma análise da área de serviço foi executada para diferentes distâncias na rede correspondente (Fig. 3).

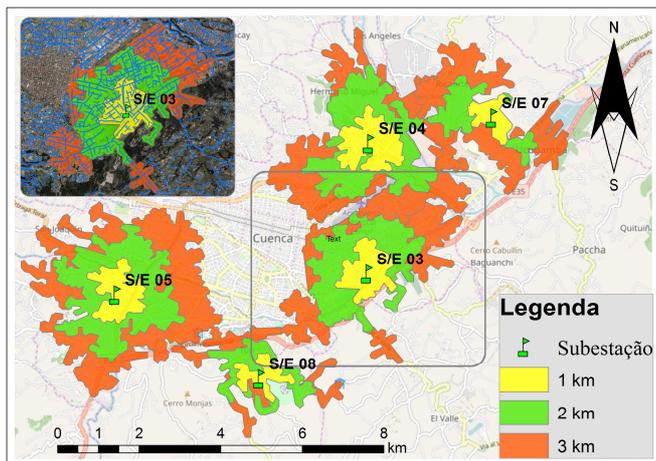


Fig. 3 Área de serviço de subestações existentes através de um fluxo em rede.

A demanda acumulada associada a cada subestação, usando a análise anterior, é mostrada na Fig. 4. A subestação S/E 04 fornece energia para uma área industrial, portanto, a demanda é maior em comparação com as outras subestações onde o consumo residencial é predominante. Com base nisso, uma distância de 2 km é estabelecida como uma restrição, com o objetivo de que um novo local de subestação seja localizado fora desta área.

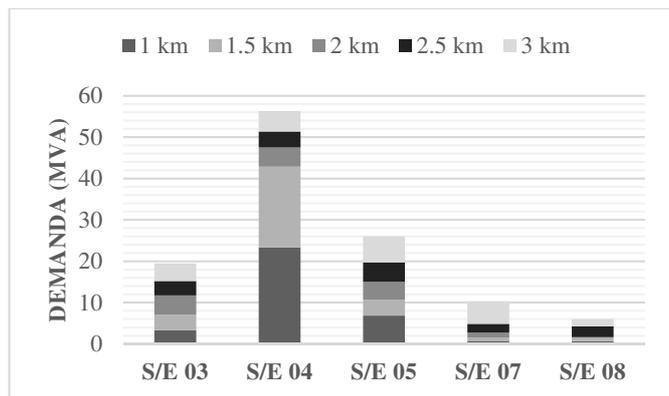


Fig. 4 Demanda acumulada a cada distância da área de serviço.

4.3 Critérios e restrições usados

Com base na disponibilidade de fontes de dados geográficos da área de estudo e uma análise de critérios mais representativos, foram definidos 5 critérios. A Tabela 3 detalha a intensidade da importância de cada critério, de acordo com o consenso de especialistas. Os pesos de cada critério, encontrados pelo AHP em (3), são apresentados na Fig. 5. O critério com maior peso é a densidade de carga elétrica, conforme destacado na literatura. Um nível razoável de consistência $CR = 0,09$ foi obtido do processo.

Tabela 3. Critérios usados e matriz recíproca

Critério	1	2	3	4	5
1: Densidade de carga	1	7	3	2	5
2: Declive	1/7	1	2	1/2	3
3: Rodovias	1/3	1/2	1	1	3
4: Rede de subtransmissão	1/2	2	1	1	8
5: Infraestrutura	1/5	1/3	1/3	1/8	1

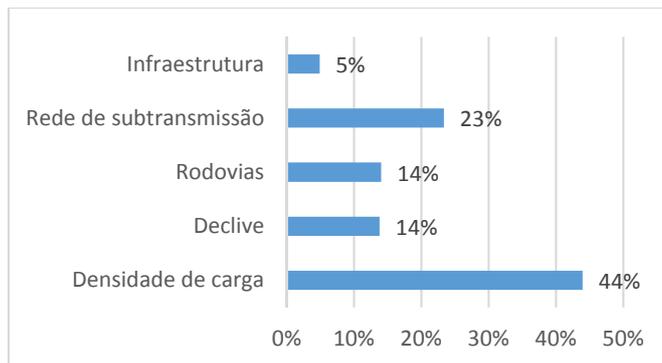


Fig. 5 Critérios utilizados e pesos determinados pelo AHP.

Por outro lado, foram utilizadas as seguintes restrições espaciais: áreas protegidas, cursos de água e riachos, áreas cultivadas e de alta paisagem, áreas de maior declividade, áreas de patrimônio cultural, montanhas, aeroportos e zonas militares; também a área de serviço, nos primeiros 2 km, das subestações existentes foi adoptada (Fig. 3).

4.4 Mapa de localização ideal

Os três critérios de proximidade, quantificados com uma distância euclidiana, são infraestrutura, rede de subtransmissão e rodovias. Para o primeiro, a relação de proximidade é inversa, ou seja, quanto mais distante a infraestrutura que causa interferência, poluição ou algum perigo, mais favorável é o uso da terra para uma subestação.

A estimativa da densidade da carga é construída com base em uma análise da densidade dos pontos (Silverman, 1986). Esses pontos correspondem aos consumidores do ano base e ao resultado da previsão espacial (centroides de quadriculas com resolução de 100m x 100m). Dependendo da demanda de cada ponto e considerando um raio de 2 km para uma vizinhança circular de cada célula, é obtido o mapa de densidade de carga.

Esses mapas dos critérios, depois do geoprocessamento e usando as técnicas de classificação (seção 2.3), foram combinados por meio de (1) para obter o mapa final de adequação. O mapa de adequação é reduzido para áreas de escala de quatro níveis: excluídos, moderadamente adequados, adequados e altamente adequados (Fig. 6).

4.5 Discussão final

Locais altamente adequados são observados ao norte na Fig. 6 (círculo destacado com uma cor turmalina verde). Este site competirá durante o processo de otimização do PES, com o aumento da capacidade das subestações existentes S/E 04 e 07.

Locais adequados presentes a oeste da cidade de Cuenca, próximos à rede de subtransmissão, entre as subestações S/E 05 e 06, podem constituir alternativas ideais para avaliações no PES (quadrado turmalina verde da Fig. 6). Nesse caso, a subestação S/E 05 já estaria no limite com o espaço físico e a capacidade. Essa alternativa competirá (na otimização do PES) se a subestação S/E 06 existente começar a receber demanda.

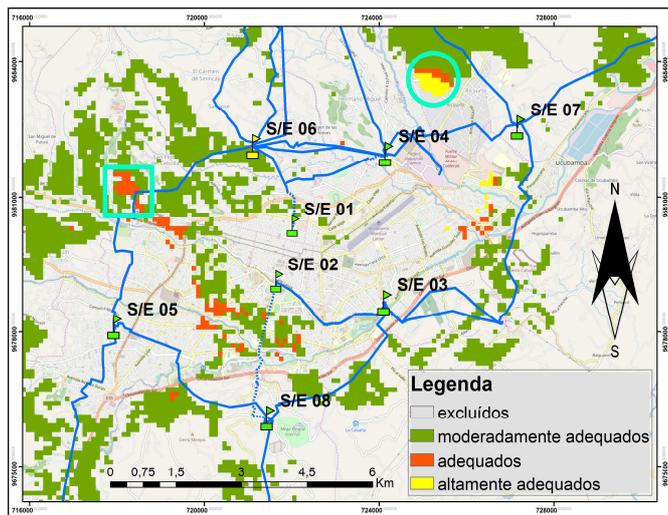


Fig. 6 Mapa de locais ideais para novas subestações.

5. CONCLUSÕES

O método multicritério proposto em este trabalho para a identificação de locais ideais de novas subestações pode ser aplicado com relativa facilidade, ajustando os critérios de acordo com cada caso. As técnicas usadas em um ambiente SIG-ADMC estão disponíveis ou podem ser desenvolvidas nas ferramentas atuais. A inclusão de outros fatores, como confiabilidade e resiliência, pode ser considerada futuramente de modo a agregar mais valor à proposta.

A aplicação do método proposto em um caso de estudo da concessionária de energia de Cuenca, Equador, permitiu obter o mapa de locais ideais para novas subestações, que permite identificar as melhores alternativas para a expansão da rede.

Um outro trabalho futuro que complementa esta pesquisa, dentro do planejamento da expansão a longo prazo, é encontrar novas rotas (*path corridor*) para linhas de subtransmissão e os alimentadores do SDMT a partir dos locais ideais para novas subestações.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CENTROSUR, concessionária de distribuição elétrica do Equador, pelas informações fornecidas e pelo apoio colaborativo. Este trabalho foi apoiado pelas instituições brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código Financeiro 001, e pela Fundação de Pesquisa de São Paulo (FAPESP), processos 2015/21972-6 e 2017/02831-8.

REFERÊNCIAS

CIGRE (2000) *General guidelines for the design of outdoor AC substations. (2nd version)*. Working Group 23.03, 161.

Dalenius, T. and Hodges Jr., J. L. (1959) 'Minimum Variance Stratification', *Journal of the American Statistical Association*, 54(54), pp. 88–101. doi: 10.1080/01621459.1959.10501501.

ESRI (2019) *ArcGIS: The mapping and analytics platform*. Available at: <https://www.esri.com/en-us/home> (Accessed: 24 April 2019).

Franco, J. F., Rider, M. J. and Romero, R. (2016) 'Robust Multi-Stage Substation Expansion Planning Considering Stochastic Demand', *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(3), pp. 2125–2134. doi: 10.1109/TPWRS.2015.2443175.

Krieg, T. and Finn, J. (2019) *Substations*. 1st edn. Springer International Publishing (CIGRE Green Books).

Lin, W. M., Tsay, M. T. and Wu, S. W. (1997) '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 Hsueh K'an*, 20(5), pp. 573–578. doi: 10.1080/02533839.1997.9741863.

Malczewski, J. and Rinner, C. (2015) *Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Advances in Geographic Information Science). doi: 10.1007/978-3-540-74757-4.

Mardani, A. *et al.* (2016) 'A review of multi-criteria decision-making applications to solve energy management problems: Two decades from 1995 to 2015', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Pergamon, 71, pp. 216–256. doi: 10.1016/j.rser.2016.12.053.

McDonald, J. D. (2012) *The Electric Power Engineering Handbook. Electric Power Substations Engineering*. 3rd edn. CRC Press.

Meehan, B. and Kane, V. (2013) *GIS for enhanced electric utility performance*. Norwood, United States: Artech House.

Mejia, M. A. *et al.* (2020) 'Spatial-temporal growth model to estimate the adoption of new end-use electric technologies encouraged by energy-efficiency programs', *Energy*, 191, p. 116531. doi: 10.1016/j.energy.2019.116531.

Mejía, M. A. *et al.* (2017) 'Spatial-Temporal model for demand estimation due to appliances with high energy consumption', *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America, ISGT Latin America 2017*, 2017-Janua, pp. 1–6. doi: 10.1109/ISGT-LA.2017.8126719.

Saaty, T. L. (1980) *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*, MacGraw-Hill, New York International Book Company. New York, United States: McGraw-Hill.

Silverman, B. W. (1986) *Density estimation for statistics and data analysis*. Chapman and Hall.

Willis, H. L. (2004) *Power Distribution Planning Reference Book*. 2nd edn, *Power Distribution Planning Reference Book*. 2nd edn. Marcel Dekker.

Zambrano, S. *et al.* (2018) 'Modelo de Simulación Jerárquico para la Proyección Espacio Temporal de la Demanda Eléctrica: caso de estudio en CENTROSUR.', *Revista Técnica Energía*. Centro Nacional de Control de Energía CENACE, (14), pp. 7–16.