



**NOVA METODOLOGIA PARA PROPOSIÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE SUBESTAÇÕES COM ANÁLISE ESPACIAL DO COMPORTAMENTO DA CARGA**

**Tema: Smart Grid**

**Autores:** CARVALHO<sup>1</sup>, Marcus Rodrigo (Responsável). DI SALVO<sup>1</sup>, Marcello Pek. NETO<sup>1</sup>, Samuel Martins Barbosa. JUNIOR<sup>1</sup>, Paulo Francisco Bruno. ANTUNES<sup>1</sup>, Alden Uehara. OLIVEIRA<sup>1</sup>, Carlos Cesar Barioni. SILVA<sup>2</sup>, Luiz Gonzaga Fernandez.

**Empresa ou Entidade:** <sup>1</sup> DAIMON ENGENHARIA E SISTEMAS. <sup>2</sup> CPFL.

**DADOS DO AUTOR RESPONSÁVEL**

Nome: Marcus Rodrigo Carvalho

Cargo: Gerente de Projetos

Endereço: Av. Paulista, 1776 - 22B; São Paulo/SP

Telefone: (11)3266-2929

Fax: (11)3266-2929

E-mail: [marcus@daimon.com.br](mailto:marcus@daimon.com.br)

**PALAVRAS-CHAVE:** Subestação, Planejamento, Otimização, Localização, Ampliação, Heurística.

**RESUMO**

Este artigo apresenta os resultados do projeto de P&D que teve por objetivo realizar proposição cronológica de construção de novas subestações e ampliação das existentes, visando a determinação do Plano Ótimo de Investimentos para obras de grande vulto. A ampliação de capacidade do sistema (acréscimo, troca de transformadores ou ainda proposição de novas subestações), juntamente com a determinação da localização das novas instalações e o ano de construção/ampliação, é problema extremamente complexo e visa atender uma projeção da demanda futura. Neste artigo é apresentado um novo método de três fases que permite fornecer uma solução ótima para o problema. Na primeira fase foi construído um modelo linear para determinar qual a necessidade de incremento no fornecimento no ano horizonte, ou seja, quais subestação deveriam ser ampliadas e quantas novas devem ser construídas. Foi utilizado o algoritmo

simplex para resolvê-lo. Na segunda fase, localização das novas subestações, foi utilizada uma variação do método de Particle Swarm. Finalmente, na terceira fase, para o planejamento no tempo, foi utilizada uma técnica de Scoring dos pontos candidatos. A metodologia proposta foi aplicada em uma rede da CPFL Paulista e os resultados demonstraram um sistema eficiente, de rápida convergência e robustez.

**INTRODUÇÃO**

Com a crescente regulação do setor elétrico brasileiro, com destaque aos novos Procedimentos de Distribuição – PRODIST tornou-se obrigatório o envio do Plano de Obras do Sistema de Distribuição ao órgão regulador, Aneel, com previsão de 10 anos para expansão e construção de novas subestações. Para elaborar um plano que seja eficiente técnica e economicamente, devem ser consideradas todas as alternativas dos locais de instalação e potência nominal dessas novas subestações de



forma a se atender as metas de qualidade e valores limite dos indicadores técnicos estabelecidos no PRODIST, bem como analisar os custos necessários de cada alternativa, garantindo assim investimentos que não onerem em demasia os consumidores.

O alinhamento e compatibilização dos dados de curvas de carga típicas de todas as classes de consumidores de cada distribuidora apuradas periodicamente nos respectivos ciclos tarifários, bem como a informação do consumo mensal de cada cliente, além das apurações regulares de medição efetuadas em alguns segmentos permitem a proposição, mediante estudo e utilização de técnicas adequadas de clusterização, de uma concepção metodológica que viabilize a caracterização da carga (curva resultante) em entidades menores como as quadrículas, inclusive, num contexto de uso final (desagregada nas diversas classes de consumidores situados na área correspondente). O estudo de planejamento inicia-se a partir de uma modelo de previsão de carga. Neste trabalho foi desenvolvida uma nova metodologia, onde se determina uma taxa de crescimento por quadrícula, através de extrapolação do histórico de consumo segregado por classe de consumo (residencial, industrial, comercial e outros) ponderada por uma taxa de crescimento Global da região ou conjunto de subestações em estudo. A taxa Global é calculada com base nos modelos de previsão como Box Jenkins ou SARIMA (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average), representante das técnicas de previsão multivariadas ou que correlacionam o registro histórico do parâmetro em análise com outros atributos explicativos.

O resultado dessa aplicação permite a obtenção do diagnóstico da rede, durante o período de planejamento, com relação à necessidade das subestações que requererão, efetivamente, ampliação de capacidade através acréscimo de transformadores, ou ainda proposição de novas subestações (localização e dimensionamento). Para atender a esse objetivo foi desenvolvido um método heurístico, baseado em PSO

(*Particle Swarm Optimization*), que nos permite encontrar uma solução para este problema de alta complexidade e cuja abordagem muitas vezes não dispunha de metodologia definida. Tal método foi desenvolvido sobre uma base espacial da área de concessão da distribuidora (desagregada em quadrículas), considerando concepções de tipo de consumidor (contribuição de cada classe de consumidores), de ocupação do solo (ocupação espacial) e que determine os montantes de investimentos de natureza indicativa de forma a minimizar o custo de expansão do sistema até o horizonte de estudo. Também foram desenvolvidas metodologias inovadoras que se constituem em instrumentos efetivos de apoio à análise de planejamentos estratégicos, como a determinação de mapas temáticos de vetores de migração espacial da carga, definição de áreas ociosas e de pólos de atração da demanda.

Previamente à proposição de ampliação ou construção de novas subestações é realizado um estudo na tentativa de otimizar a distribuição da carga entre as subestações existentes, permitindo assim a postergação de investimentos pesados.

Essas metodologias viabilizaram o desenvolvimento de um algoritmo e um sistema de planejamento estratégico que fornecem como principais resultados a indicação cronológica da data de inserção de novas subestações e ampliações das existentes no sistema de distribuição, além da indicação de áreas nas quais sejam cabíveis ações de gerenciamento pelo lado da demanda e/ou gerenciamento pelo lado da oferta, viabilizando-se a mensuração econômico-financeira correspondente.

### **METODOLOGIA**

A definição dos critérios técnicos de planejamento é baseada em resoluções normativas que estipulam os índices técnicos a serem respeitados pelas empresas concessionárias, na aversão ao risco de não atendimento dos critérios citados em situações



de contingências e em estudos econômicos de utilização de seus ativos.

A metodologia de planejamento concebida pode ser descrita através das seguintes fases:

i. Caracterização do sistema em estudo:

Caracterização da rede:

Definição dos atributos necessários à caracterização da rede atual, de forma a possibilitar a análise do desempenho mediante a definição de critérios técnicos de planejamento e eventuais proposições de reforços em casos de transgressões.

Caracterização do mercado:

Definição, com base em dados históricos de consumo e utilização de curvas de cargas típicas, do mercado atendido por cada subestação, com sua representação espacial definida através de plataforma georreferenciada.

Projeção de demanda futura:

Projeção das taxas de crescimento de demanda de forma a balizar a análise da necessidade de proposição de obras de reforço para atendimento da expansão do mercado.

ii. Definição de quadrículas e vinculação destas às subestações:

Divisão da área em estudo em quadrículas espaciais para que os estudos de planejamento levem em consideração as características particulares de diferentes regiões.

iii. Análise do sistema e proposição de obras para expansão da oferta.

Uma vez definidas as quadrículas e sua respectiva vinculação às subestações envolvidas no estudo, dar-se-á a análise de rede propriamente dita, com a verificação de transgressões de critérios de planejamento e proposição de reforços para atendimento do mercado.

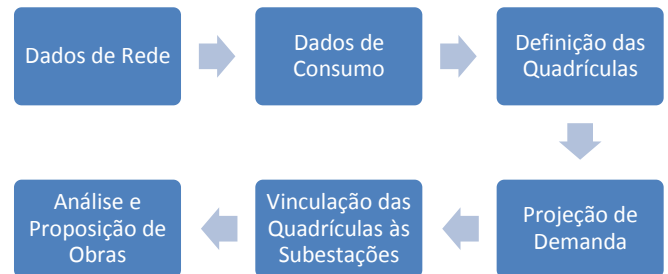


Figura 1 – Diagrama de Blocos da Metodologia de Planejamento

**LOCALIZAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE NOVAS SUBESTAÇÕES**

Pode-se argumentar que a localização de subestações é estratégica por três motivos:

- A localização das subestações em cada centro de cargas estabelece os requisitos do fornecimento para os sistemas de transmissão;
- Subestações são caras (tanto financeiramente como politicamente), representam entre 10% – 50% dos custos totais em um sistema de distribuição;
- A localização e a capacidade das subestações definem as restrições dos sistemas de distribuição (considerações sobre capacidade dos novos alimentadores, de novas vias de passagem, desenvolvimento de novos centros urbanos, avaliação econômica, etc.).

Já o montante de investimento necessário para as propostas é calculado a partir de módulos que contém o valor médio dos trafos, religadores, chaves e etc., uma vez que são definidos os números máximos desses componentes comportados por uma SE, para se evitar que o programa proponha soluções infactíveis.

Nesta seção é apresentado um novo método de três fases que permite fornecer uma solução ótima para o problema de determinação da ampliação da capacidade, localização e o ano de entrada (no horizonte de estudos) de subestações. Na primeira fase foi construído um modelo linear para determinar qual a



necessidade de incremento no fornecimento no ano horizonte, ou seja, quais subestações deveriam ser ampliadas e quantas novas devem ser construídas. Foi utilizado o algoritmo simplex para resolvê-lo. Na segunda fase, localização das novas subestações, foi utilizada uma variação do método de *Particle Swarm*. Finalmente, na terceira fase, para o planejamento no tempo, foi utilizada uma técnica de Scoring dos pontos candidatos.

Tais ferramentas foram desenvolvidas sobre uma base espacial da área de concessão da distribuidora (desagregada em quadrículas), considerando concepções de tipo de consumidor (contribuição de cada classe de consumidores), de ocupação do solo (ocupação espacial) e que determine os montantes de investimentos de natureza indicativa de forma a minimizar o custo de expansão do sistema durante o horizonte de estudo.

Determinar quando e quais subestações devem ser ampliadas, quando novas subestações devem ser construídas bem como a localização dessas e o ano de realização das obras é um problema de grande complexidade. Abordagens que utilizam modelos lineares inteiros costumam se mostrar ineficientes para a resolução do problema, o que exige a utilização de métodos heurísticos.

No algoritmo desenvolvido, a região em análise é dividida em quadrículas de tamanho definido pelo planejador e as cargas são agrupadas em um único ponto de carga por quadrícula. Com isso, é possível determinar a área de influência de cada subestação e seu carregamento.

Para realizar a vinculação das quadrículas às subestações, foi implementado o método de Carareto, descrito na seção **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, que vincula cada quadrícula à subestação mais próxima com carregamento disponível, respeitando assim o carregamento máximo de todas as subestações.

Depois disso, para cada quadrícula é associada uma taxa de crescimento, permitindo assim a obtenção das energias e demandas até o ano horizonte, conforme a seção **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Uma vez definido o sistema em estudo, calculadas ou informadas as

taxas de crescimento de carga da região e, tendo a área em estudo sido devidamente dividida em quadrículas e estas associadas à cada subestação da região, resta apenas analisar o sistema ano a ano verificando possíveis transgressões de critérios de carregamento e propondo alternativas de expansão do sistema.

A seguir é apresentado modelo para proposição de novas SE's e ampliação das existentes, baseado em técnicas de otimização, dividido em três passos. O primeiro trata de definir quais SE's existentes serão ampliadas e quantas novas SE's serão construídas. O segundo otimiza a localização da construção das novas SE's. O terceiro utiliza dos dados de crescimento da demanda ano a ano até o ano horizonte para definir quando as obras de construção ou ampliação devem ser realizadas.

#### *Passo 1*

##### **Cálculo dos coeficientes da Função Objetivo**

Para determinarmos quantas subestações novas serão construídas e quantas das existentes devem ser ampliadas, assim como quais os valores de suas capacidades, foi utilizado um modelo relaxado da alocação de carga das quadrículas para estimar qual deve ser a capacidade total das SE's de modo que elas atendam toda a demanda no ano horizonte.

O objetivo neste ponto é de minimizar as distâncias das quadrículas alocadas às SE's ( $D$ ), as perdas com transmissão ( $P$ ) e o custo das obras ( $C$ ). Sabendo que estes valores obedecem as seguintes proporções (o custo é um fator conhecido que independe de outras variáveis):

$$D \propto \sum_{i \in S} \sum_{j \in Q_i} r_{ij}$$
$$P \propto \sum_{i \in S} \sum_{j \in Q_i} l_j^2 r_{ij}$$

Onde  $S$  é o conjunto de índices das SE's,  $Q_i$  é o conjunto de índices das quadrículas associadas à subestação  $i$ ,  $l_j$  é a demanda da quadrícula  $j$ , e  $r_{ij}$  é a distância da quadrícula  $j$  à subestação  $i$ . Foi considerada inicialmente a demanda de cada quadrícula para uma SE, que chamamos de  $\bar{l}_i$



para a  $i$ -ésima subestação. Sendo assim, aproximando os valores das demandas das quadrículas para as médias, tem-se, para uma SE, as seguintes proporções.

$$D_i \propto \sum_{j \in Q_i} r_{ij}$$
$$P_i \propto \bar{l}_i^{-2} \sum_{j \in Q_i} r_{ij}$$

Com isso, basta aproximar as somas das distâncias das quadrículas à cada subestação. Para isto, foram utilizadas duas hipóteses: que a distribuição de quadrículas associadas a uma subestação é circular, com a subestação no centro e raio igual à distância da quadrícula mais distante alocada ( $r_{max}$ ) e que a seguinte representação do somatório das distâncias é utilizada.

$$\sum_{j \in Q_i} r_{ij} = \sum_{j \in Q_i} r_{ij} n_j$$

Onde  $n_j$  é o número de quadrículas associadas ao raio  $r_{ij}$ . Como fica claro,  $n_j = 1$  no caso discreto, mas vamos tomar a seguinte representação contínua do somatório

$$D_i \propto \int_G r dn$$

Onde  $G$  é a região em que as quadrículas da subestação  $i$  estão alocadas. Assim, dada a área  $a_q$  de uma quadrícula, temos que

$$n = \frac{a}{a_q}$$
$$\therefore dn = \frac{da}{a_q}$$

Assim, dado que a região é circular, tem-se

$$D_i \propto \int_G r dn = \int_{A_G} \frac{r}{a_q} da = \frac{2\pi}{a_q} \int_r r^2 dr$$

E analogamente:

$$P_i \propto \frac{2\pi \bar{l}_i^{-2}}{a_q} \int_r r^2 dr$$

Portanto, foi definido o valor de demanda para as SE's existentes da seguinte forma: foram alocadas quadrículas até que toda a capacidade das SE's existentes seja utilizada e gerado, para

cada SE, a média das demandas das quadrículas alocadas. Para as novas SE's, é definido a média como a média das médias das demandas das SE's existentes ( $\bar{l}$ ). Dessa forma, pode-se identificar o quanto a construção ou ampliação de uma SE influencia na função objetivo  $FO$ .

Para uma SE existente, tem-se que uma decisão de ampliação significa o aumento da capacidade da SE em:

$$\Delta Amp_i = \frac{\bar{l}_i}{a_q} \pi (r_{amp}^2 - r_{max}^2)$$

Assim, o novo raio após a ampliação é

$$r_{amp} = \left( \frac{\Delta Amp_i a_q}{\pi \bar{l}_i} + r_{max}^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

Portanto, tem-se que a variação na função objetivo dada uma ampliação na SE  $i$  é

$$\Delta FO_i = \alpha \frac{2\pi \bar{l}_i^{-2}}{a_q} \int_{r_{max}}^{r_{amp}} r^2 dr + \beta \frac{2\pi}{a_q} \int_{r_{max}}^{r_{amp}} r^2 dr + C_i$$

Onde  $\alpha$  e  $\beta$  são os fatores de ajuste dos valores da função objetivo.

Analogamente, para uma SE nova, o raio estimado alocado para a sua capacidade será:

$$r_{amp} = \left( \frac{\Delta Amp_i a_q}{\pi \bar{l}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Portanto

$$\Delta FO_i = \alpha \frac{2\pi \bar{l}^2}{a_q} \int_{r_{max}}^{r_{amp}} r^2 dr + \beta \frac{2\pi}{a_q} \int_{r_{max}}^{r_{amp}} r^2 dr + C_i$$

### O modelo linear

Através do cálculo da variação na função objetivo, pode-se então definir as variáveis do modelo linear. Definido  $x_{ijk}$  como uma variável binária, tais que  $i$  é o índice da subestação,  $j$  é o número de transformadores a serem construídos e  $k$  é o tipo do trafo a ser construído. Sendo assim:



$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{se a obra da subestação } i \\ & \text{com } j \text{ transformadores} \\ & \text{do tipo } k \text{ deve ser realizada;} \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Onde a realização da obra significa a ampliação da subestação  $i$  se essa já existir em  $j$  transformadores do tipo  $k$ . Caso a subestação  $i$  não exista, a sua construção com  $j$  transformadores do tipo  $k$ . Por conveniência, representa-se por  $I$  o conjunto de todos os índices  $i$  existentes,  $T_i$  o conjunto de todas as variáveis de índices  $(j, k)$  possíveis para a construção de transformadores em uma subestação existentes (estas variáveis são geradas automaticamente para as SE's existentes contemplando todas as possibilidades e são selecionadas dentre uma série de modelos de construção para as novas SE's) e  $T$  o conjunto de todas as variáveis de índices  $(i, j, k)$  existentes.

Define-se  $C_{ijk}$  como o coeficiente da função objetivo associado à obra  $x_{ijk}$ . Fica evidente como relacionar o custo da obra e o delta na capacidade no método descrito anteriormente tendo o tipo e do número de transformadores, uma vez que o tipo determina o custo de um transformador e sua capacidade. Da mesma forma, se for considerada a construção de uma nova subestação, isto é, o índice  $i$  for de uma SE que ainda não existe, deve-se incluir no custo o valor de construção da SE além dos custos dos transformadores.

$A_{ijk}$  é definido como o aumento na capacidade associado à obra  $x_{ijk}$ ,  $D$  como o excedente na demanda além da capacidade já existente na região de estudo no ano horizonte e  $\alpha > 1$  como um fator de folga para garantir que todas as quadriculas serão atendidas. Portanto, tem-se:

Minimizar

$$F = \sum_{(i,j,k) \in T} x_{ijk} C_{ijk}$$

Sujeito a

$$\sum_{(j,k) \in T_i} x_{ijk} \leq 1, \forall i \in I$$

$$\sum_{(i,j,k) \in T} A_{ijk} x_{ijk} \geq \alpha D$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\}, (i,j,k) \in T$$

Onde a primeira restrição garante que no máximo uma obra deverá ser realizada em cada subestação e a segunda garante que a capacidade total da região no ano horizonte é maior que a demanda total da região.

### Passo 2

Para determinar a localização das novas SE's no ano horizonte foi utilizada uma variação do método de Particle Swarm. Este método tenta simular o comportamento de enxames de animais na natureza, sendo que ele utiliza memória da posição ótima de cada indivíduo e da posição ótima de todo o enxame de indivíduos, assim como a velocidade e inércia de cada um.

Seja então o indivíduo de índice  $i$  no instante  $t$ , sua velocidade como  $v_{i,t}$  e a sua posição como  $x_{i,t}$ . Define-se também a melhor posição em que o indivíduo  $i$  já esteve como  $x_{i,t}^{best}$ . Denomina-se enxame o conjunto de todos os indivíduos, sendo que a melhor posição que o enxame conhece, isto é, a melhor posição dentre todas as posições que os seus indivíduos já estiveram, é  $x_{e,t}^{best}$ . Sendo assim, a atualização da velocidade e posição é dada por:

$$v_{i,t+1} = c_1 v_{i,t} + c_2 rand() (x_{i,t}^{best} - x_{i,t}) + c_3 rand() (x_{e,t}^{best} - x_{i,t})$$

$$x_{i,t+1} = x_{i,t} + v_{i,t+1}$$

Onde  $rand()$  é uma função geradora de números aleatórios com distribuição  $U(0,1)$ .

Optou-se por uma normalização da velocidade em cada iteração, para impedir saltos grandes da posição devido à distância dos pontos ótimos conhecidos, além de representar mais fielmente o comportamento de um indivíduo na natureza, pois este tem uma velocidade limite que não pode ser ultrapassada pelo simples fato que o indivíduo ótimo se encontra mais distante. Entretanto, a atualização da velocidade descrita continua a orientar a direção do passo do indivíduo. Tem-se então:



$$\begin{aligned}v_{i,t+1} &= c_1 v_{i,t} + c_2 \text{rand}() (x_{i,t}^{\text{best}} - x_{i,t}) \\ &\quad + c_3 \text{rand}() (x_{e,t}^{\text{best}} - x_{i,t}) \\ v_{i,t+1} &= \frac{v_{i,t+1}}{\|v_{i,t+1}\|} d_t \\ x_{i,t+1} &= x_{i,t} + v_{i,t+1}\end{aligned}$$

Desta forma, o tamanho do passo dado no instante  $t$  é determinado pelo escalar  $d_t$ , que é variável a cada iteração.

Cada indivíduo é um possível posicionamento das novas subestações no mapa, ou seja,  $x_{i,t} \in \mathbb{R}^{2n}$ , onde  $n$  é o número de novas subestações, com coordenadas  $x$  e  $y$  que localizam sua posição na região. Desse modo, em cada iteração do algoritmo é realizado um passo com as velocidades e posições descritas acima.

Calcula-se, então, a função objetivo para a associação das quadrículas com o novo posicionamento das SE's, através dos termos descritos no passo 1: distâncias das quadrículas alocadas às SE's (D), fator de perdas (P) e o custo das obras (C), e também as distâncias das novas subestações às linhas de transmissão (LT). Caso a posição avaliada seja melhor do que a conhecida de um indivíduo, seu valor de  $x_{i,t}^{\text{best}}$  passa a ser  $x_{i,t}$ . Da mesma forma, se for melhor que o conhecido pelo enxame, temos que  $x_{e,t}^{\text{best}}$  passa a ser  $x_{i,t}$ . Assim, o processo continua por um número pré-determinado de iterações e tomamos no final o valor de  $x_{e,t}^{\text{best}}$  como solução encontrada pela heurística.

### Passo 3

Para decidir quando as obras devem ser realizadas no período do ano base até o horizonte de estudo, utiliza-se um processo de *Scoring* para determinar os candidatos mais interessantes ano a ano. A princípio, para cada excedente na demanda em um ano  $j$ , pode-se criar o conjunto de todas as combinações de obras que satisfazem este excedente e que ainda não foram realizadas e garantindo que alguma dessas combinações seria utilizada. Entretanto, a quantidade de elementos nestes conjuntos mostrou-se muito elevada, e o custo de processamento para calcular o *score* de cada

possível solução muito alto. Sendo assim, decidiu-se por outra abordagem heurística.

O *score* é composto a partir de dois elementos, um que considera a semelhança da alocação das quadrículas com a alocação final no ano horizonte e outro que considera o custo das obras em cada ano.

Temos  $T$  o conjunto de todos os transformadores que existem no ano horizonte. Seja ainda  $T_j$  o subconjunto de  $T$  dos transformadores construídos no ano  $j$  e  $\bar{T}_j$  o conjunto dos transformadores que ainda podem ser construídos no ano  $j$ , considerando conhecida a alocação das quadrículas no ano horizonte com todas as obras realizadas.

Define-se então  $S(C)$  como a função que conta o número de quadrículas que, quando associadas com o conjunto de transformadores  $C$ , encontram-se associadas à mesma subestação que a associação realizada no ano horizonte. Isto é, se dada uma quadrícula  $q$ , ela será contada por  $S(C)$  se a associação das quadrículas com o conjunto  $C$  associa  $q$  com a mesma subestação que a associação das quadrículas com o conjunto  $T$ . Lembramos que a associação pode ser realizada até que a capacidade total das subestações seja atingida sem necessariamente atender toda a demanda da região.

Sendo assim, dado um trafo  $t \in \bar{T}_j$ , define-se o termo que indica a semelhança com a alocação no ano horizonte com a construção de  $t$  como:

$$s_{tj} = S(T_j \cup \{t\})$$

Define-se  $c_{tj}$  como custo de construção do trafo  $t$  no ano  $j$ . Este custo deve ter como referência o ano base de início do planejamento e deve considerar o valor da obra no ano  $j$  e o valor que foi "poupado" por se deixar a obra  $t$  para ser realizada somente no ano  $j$ , isto é, o valor que teria sido ganho caso o valor da obra  $t$  no ano 0 tivesse sido investido até o ano  $j$ . Fica claro então que  $c_{tj}$  respeita a seguinte desigualdade

$$c_{tj} > c_{tj'}, \text{ se } j < j'$$

Em outras palavras, quanto mais tarde for possível realizar a obra  $t$ , melhor.

Assim, o *score* final para uma obra  $t$  no ano  $j$ , denominado  $F_{tj}$ , é dado por:



$$F_{tj} = \alpha s_{tj} + \beta \frac{1}{c_{tj}}$$

Onde  $\alpha$  e  $\beta$  são constantes que indicam o peso dado da proximidade do mapa final e o custo das obras, respectivamente. Para decidir quais obras  $t$  serão realizadas no ano  $j$ , tomam-se aquelas com o maior valor de  $F_{tj}$  e que com suas capacidades somadas satisfaçam o excedente na demanda daquele ano.

Outras Funcionalidades

**Inserção de Grandes Consumidores:** Devido às suas características particulares, a demanda dos grandes consumidores deve ser inserida em um módulo especial.

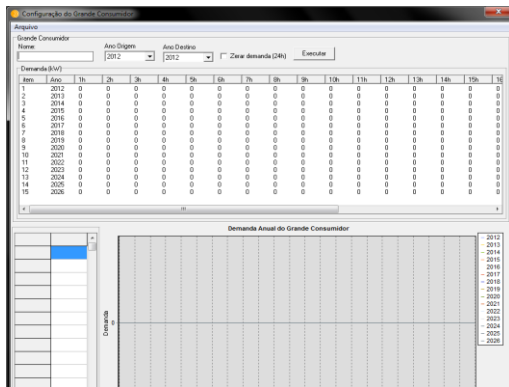


Figura 2 – Inserção de grandes consumidores

**Restrições e barreiras geográficas:** Também é possível bloquear determinadas regiões ou quadriculas com objetivo de não serem alocadas novas subestações nessas áreas. A barreira geográfica dificulta a troca de carga entre duas Subestações.

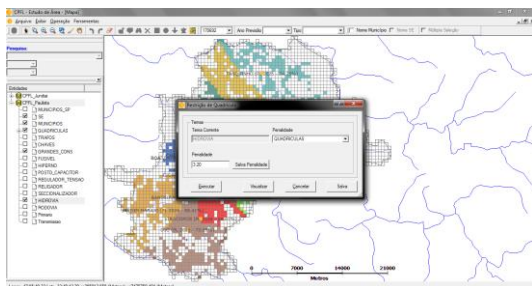


Figura 2 – Restrições e barreiras geográficas

**Cálculo IAS:** Esta ferramenta executa o cálculo do IAS – Índice de Aproveitamento das

Subestações, conforme o Submódulo 2.3 do PRORET, para qualquer subestação e período de estudo definidos pelo usuário.



Figura 3 – Cálculo do IAS

## TESTES E RESULTADOS

O método proposto foi aplicado em um município de Campinas e os resultados demonstraram um sistema eficiente e robusto que converge muito rapidamente.

Tabela 1 – Dados do Caso teste

Caso Teste	
Cidade	Campinas
Nº Subestações Existentes	17
Potência Total Instalada	729.45 MVA
Nº Consumidores	388.612
Carga	603,03 MVA
Taxa de Crescimento	4.5%

Uma vez definido o sistema em estudo, calculadas ou informadas as taxas de crescimento de carga da região e, tendo a área de estudo sido devidamente dividida em quadriculas e estas associadas à cada subestação da região, resta apenas analisar o sistema ano a ano verificando possíveis transgressões de critérios de carregamento e propondo alternativas de expansão do sistema.





Item	Sem Vent. (MVA)	Com Vent. (MVA)	Primária (kV)	Secundária (kV)	Custo (R\$)
1	6,25	0,00	69,00	11,90	880000,00
2	6,25	0,00	69,00	11,90	915000,00
3	12,50	0,00	138,00	13,80	1067000,00
4	12,50	0,00	69,00	13,80	1001000,00
5	12,50	0,00	34,50	13,80	957000,00
6	15,00	20,00	138,00	13,80	1231340,00
7	15,00	20,00	138,00	13,80	1650000,00
8	15,00	20,00	138,00	23,10	1650000,00
9	20,00	26,60	138,00	13,80	1478400,00
10	25,00	33,00	138,00	11,90	2093300,00
11	25,00	33,00	138,00	23,10	2200000,00
12	50,00	60,00	138,00	11,90	2255000,00
13	30,00	40,00	138,00	13,80	2255000,00
14	30,00	40,00	138,00	23,10	2315500,00
15	10,00	5,00	58,00	0,00	78,00
16	8999,00	899,00	899,00	899,00	899,00
17	111,00	111,00	111,00	111,00	111,00
18	25,00	33,00	138,00	11,90	21000,00
19	26500,00	33000,00	138,00	11,90	23000,00
20	26,60	33,00	138,00	11,90	2300000,00
21	40,00	50,00	138,00	11,90	1000000,00
22	5,00	6,25	69,00	11,90	99999,00

Figura 4 – Cadastro de Transformadores

Quando houver uma transgressão, o módulo de otimização fará uma análise das alternativas de ampliação do sistema, podendo propor tanto a construção de novas subestações como a repotencialização das existentes quando houver tal possibilidade, de acordo com os seguintes critérios: custo dos alimentadores, custo das perdas nos condutores, custo de construção de novas subestações e custo de novos transformadores. Os resultados desta otimização serão as coordenadas de cada nova subestação proposta e a quantidade de novos transformadores a ser instalada em cada subestação proposta ou ampliada, bem como o ano de entrada em operação de cada equipamento. Os resultados obtidos foram muito promissores.

Utilizar	Nº Totais	Sem Vent. (MVA)	Com Vent. (MVA)	Primária (kV)	Secundária (kV)	Custo (R\$)	
<input type="checkbox"/>	0	1	6,25	0,00	69,00	11,90	880000,00
<input type="checkbox"/>	1	2	6,25	0,00	69,00	11,90	880000,00
<input type="checkbox"/>	2	3	6,25	0,00	69,00	11,90	880000,00
<input type="checkbox"/>	3	4	6,25	0,00	69,00	11,90	880000,00
<input type="checkbox"/>	4	1	6,25	0,00	69,00	11,90	915000,00
<input type="checkbox"/>	5	2	6,25	0,00	69,00	11,90	915000,00
<input type="checkbox"/>	6	3	6,25	0,00	69,00	11,90	915000,00
<input type="checkbox"/>	7	4	6,25	0,00	69,00	11,90	915000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	8	1	12,50	0,00	138,00	13,80	1067000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	9	2	12,50	0,00	138,00	13,80	1067000,00
<input type="checkbox"/>	10	3	12,50	0,00	138,00	13,80	1067000,00
<input type="checkbox"/>	11	4	12,50	0,00	138,00	13,80	1067000,00
<input type="checkbox"/>	12	1	12,50	0,00	69,00	13,80	1001000,00
<input type="checkbox"/>	13	2	12,50	0,00	69,00	13,80	1001000,00
<input type="checkbox"/>	14	3	12,50	0,00	69,00	13,80	1001000,00
<input type="checkbox"/>	15	4	12,50	0,00	69,00	13,80	1001000,00
<input type="checkbox"/>	16	1	12,50	0,00	34,50	13,80	957000,00
<input type="checkbox"/>	17	2	12,50	0,00	34,50	13,80	957000,00
<input type="checkbox"/>	18	3	12,50	0,00	34,50	13,80	957000,00

Figura 5 – Cadastro do padrão de novas subestações

Para iniciar o módulo de otimização o sistema define automaticamente o horário de ponta para

os cálculos. Caso queira analisar outro cenário o planejador pode alterar esse horário.

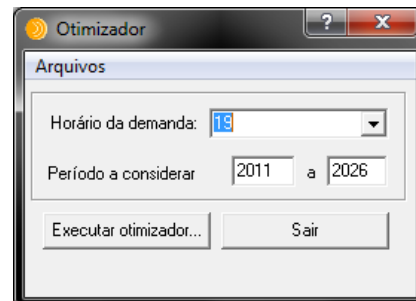


Figura 6 – Módulo de Otimização

Além disso, são necessários o cadastro dos custos médios e numero de iterações do PSO.

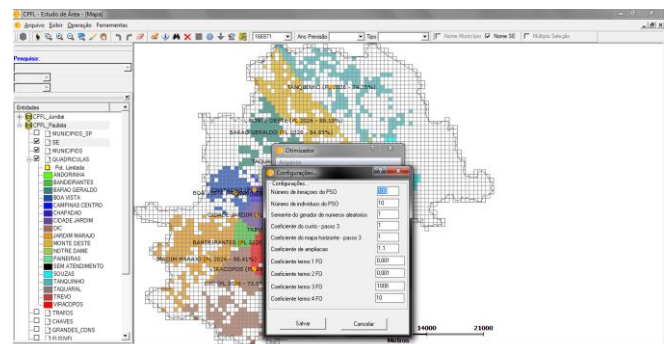


Figura 7 – Configurações modulo de otimização

Os resultados do Caso Teste podem ser observados na tabela a seguir.

Tabela 2 - Resultados

Resultados			
Horizonte de Planejamento - 10 anos			
Subestações Capacidade Incrementada		Novas Subestações	
Ano Proposto	Capacidade	Ano Proposto	Capacidade
2015	2 x 25 MVA	2017	1 x 75 MVA
2019	2 x 25 MVA	2020	1 x 33,3 MVA
2022	1 x 25 MVA		

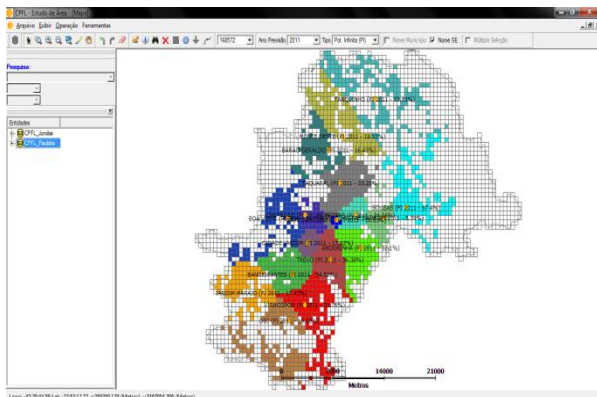


Figura 8 – Área de influência com novas SEs

### CONCLUSÃO E COMENTÁRIOS FINAIS

Neste artigo foram apresentadas metodologias para auxiliar na previsão e análise espacial de cargas.

Como principais resultados destas novas metodologias de planejamento para obras de grandes investimentos, podem-se destacar:

- A previsão espacial da carga, pela representação de áreas de estudo por quadrículas, caracterizando-se a carga por meio de curvas típicas para análise de uso final e uso do solo;
- Aspectos específicos e de difícil tratamento num planejamento em longo prazo: Saturação de quadrículas e avaliação do crescimento horizontal.
- Indicação cronológica da data de inserção de novas obras no sistema de distribuição;
- técnicas de otimização que buscam representar alocar e dimensionar automaticamente novas subestações;
- Otimização dos recursos de ativos na base de remuneração regulatória atendendo as necessidades regulatórias de se melhorar os níveis de qualidade do serviço prestado.

Pode-se concluir que o trabalho cumpriu com os objetivos propostos de difusão tecnológica e transferência de tecnologia. No âmbito do projeto, o módulo computacional desenvolvido permite elencar as melhores obras de expansão e melhoria em seu sistema de distribuição. O

software foi testado com redes reais da CPFL e possibilita a criação de diversos cenários, o que dá flexibilidade e agilidade nos estudos realizados pelos engenheiros da concessionária, refletindo diretamente numa maior satisfação dos usuários e permitindo a redução dos custos de manutenção promovendo a modicidade tarifária.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- i. ANEEL - PRODIST – Procedimentos de Distribuição, Módulo 2 – “Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição”. ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>.
- ii. Makridakis, Wheelwright and Hyndman, 1998, Forecasting: Methods and applications, John Wiley & Sons, New York, 3rd edition.
- iii. Russell, Stuart J.; Norvig, Peter, 2003, Artificial Intelligence: A Modern Approach (2nd ed.), Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, pp. 111–114.
- iv. Liu Zifa; Zhang Jianhua; Optimal Planning of Substation of Locating and Sizing Based on GIS and Adaptive Mutation PSO Algorithm, Power System Technology, 2006.
- v. Gill, P.E., W. Murray, M.A. Saunders, and M.H. Wright, 1984, Procedures for Optimization Problems with a Mixture of Bounds and General Linear Constraints, ACM Trans. Math. Software, Vol. 10, pp 282–298.
- vi. Cormen, Thomas H.; Leiserson, Charles E.; Rivest, Ronald L.; Stein, Clifford (2001). Introduction to Algorithms (2nd ed.). MIT Press and McGraw-Hill. pp. 651–664.