

PLANEJAMENTO DE REDES SECUNDÁRIAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM FONTES DE ENERGIA FOTOVOLTAICAS E CARGAS ESPECIAIS

ANDRÉ G. NOGUEIRA¹, DIOGO RUPOLO¹, MARCEL C. CERBANTES^{1,2}, JOSÉ R. S. MANTOVANI¹

¹*Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
Caixa Postal 061, 15385-000, Ilha Solteira, SP, Brasil*

²*Instituto Federal do Mato Grosso do Sul – IFMS – Campus de Três Lagoas
Rua Angelo Melão, 790 – Jardim das Paineiras, Três Lagoas - MS
E-mails: andre.gusson94@gmail.com, rupolo.diogo@gmail.com,
marcel.chuma@gmail.com, mant@dee.feis.unesp.br*

Abstract— This work proposes a computational tool for the planning of low-voltage (secondary) distribution networks, considering high penetration of distributed energy resources (DER), such as photovoltaic generation (PV) and plug-in hybrid electric vehicles (PHEV). The planning decisions are optimized aiming to minimize: i) the investment cost, including line wires and distribution transformers; and ii) the cost of active line losses; while ensuring technical and economic constraints within acceptable limits. The network is represented through three-phase ac power flows equations. The resulting problem is characterized as a mixed integer non-linear programming problem (MINLP). An effective Tabu Search (TS) algorithm is applied as a solution technique. The network's power flow analysis is tackled running a three-phase backward-forward power flow sweep. The effectiveness of the proposed approach is shown on two real-life low-voltage distribution networks with 54 and 76 buses.

Keywords— Secondary circuits, Power flow, Tabu search, Photovoltaic generation, Plug-in hybrid electric vehicles.

Resumo— Neste trabalho propõe-se uma ferramenta computacional para o planejamento de redes de distribuição de baixa tensão (secundárias) considerando elevada penetração de recursos energéticos distribuídos (DER), tais como geração fotovoltaica (PV) e veículos elétricos híbridos (PHEV). As decisões de planejamento são otimizadas visando minimizar: i) os custos de investimento, incluindo o recondutoramento e substituição de transformadores; e ii) o custo das perdas ativas nos ramos da rede, respeitando as restrições técnicas e econômicas. A rede é representada através de equações de fluxo de potência AC trifásico. O problema é formulado como um modelo de programação não linear inteiro misto (PNLIM) e resolvido através de um algoritmo de Busca Tabu, que é capaz de manipular as não linearidades e variáveis não contínuas do problema de forma eficiente. A avaliação do estado da rede é obtida através de um algoritmo de cálculo de fluxo de potência do tipo varredura trifásico a quatro fios. A efetividade da ferramenta proposta é analisada em duas redes secundárias reais com 54 e 76 barras.

Palavras-chave— Redes de baixa tensão, Fluxo de potência, Busca tabu, Geração fotovoltaica, Veículos híbridos elétricos.

1 Introdução

Os sistemas de distribuição de energia elétrica são planejados com base em estimativas de crescimento temporal e espacial de cargas, que passam por processos de grandes mudanças, principalmente devido à ligação de novos consumidores aos sistemas existentes e a criação de novas áreas industriais, comerciais e residenciais que devem ser energizadas. Além disso, o fato de grande parte das empresas distribuidoras estarem sendo privatizadas, o planejamento otimizado dos sistemas de distribuição tem como consequência um maior controle da qualidade de energia elétrica fornecida aos consumidores finais (Kagan, Oliveira, & Robba, 2010).

No cenário de desenvolvimento tecnológico atual, novas tecnologias vêm se mostrando cada vez mais presentes nos sistemas de distribuição de energia, entre estas, a geração fotovoltaica e os carros híbridos elétricos (PHEV: *Plug-in hybrid electric vehicles*). Devido às suas vantagens ambientais e econômicas, tais tecnologias tornaram-se populares entre os consumidores nos últimos anos. Com isso, novos desafios são introduzidos no processo de planejamento das empresas distribuidoras, as quais

devem considerar os impactos físicos e econômicos deste novo cenário operacional (Nogueira, 2017).

O planejamento de redes secundárias de distribuição tem sido abordado na literatura sob diferentes metodologias, as quais na maioria das vezes, consistem somente na determinação dos melhores pontos de alocação dos transformadores abaixadores e na construção dos circuitos de baixa tensão, que são conectados aos alimentadores de média tensão existentes. Costa (2002) propõe para a solução do problema de planejamento de redes secundárias, metodologias baseadas em técnicas exatas, heurísticas, meta-heurísticas e um híbrido entre técnicas exatas e heurísticas. Cossi (2003) propõe um algoritmo evolutivo especializado para encontrar diferentes topologias para o sistema secundário, sendo a solução inicial, gerada por uma heurística de maneira aleatória. Garcia (2003), utiliza a metaheurística GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) para a solução do problema de planejamento de sistemas de baixa tensão. Souza (2006) e Cossi (2008) propõe uma heurística construtiva para a geração das soluções iniciais e uma metaheurística de Busca Tabu para a geração das topologias da rede secundária, visando encontrar soluções de qualidade para o planejamento.

Neste trabalho, é apresentado uma metodologia para a solução do planejamento de redes secundárias

de distribuição usando uma técnica meta-heurística de otimização conhecida como Busca Tabu (BT), que apresenta inúmeras vantagens, dentre elas, fornecer soluções otimizadas de boa qualidade, possibilitar resolver sistemas de grande porte e não necessitar a formulação formal e/ou simplificações (linearizações) do problema, como é o caso dos métodos de otimização clássica. Para obter o estado de operação da rede e o cálculo das perdas técnicas é utilizado também um programa de fluxo de potência trifásico a quatro fios (Ciric, Padilha, Ochoa, 2003). O algoritmo de fluxo de potência utiliza o método de varredura (*forward-backward*), recomendado pelo PRODIST para avaliar o estado das redes radiais.

Genericamente, nesta metodologia avalia-se cada configuração proposta de acordo com o critério de projeto adotado para os circuitos secundários. Na obtenção do modelo matemático do planejamento de redes secundárias, consideram-se os custos relativos à estrutura da rede e os custos de operação. As seguintes ações de planejamento são adotadas e implementadas para obtenção de soluções otimizadas de qualidade:

- Balanceamento das cargas nas respectivas fases do circuito;
- Recondutoramento dos circuitos;
- Localização, capacidade e quantidade de postos de transformação.

As principais contribuições deste trabalho, quando comparados aos outros trabalhos existentes na literatura consistem:

1. A proposta de uma ferramenta computacional eficiente baseada no algoritmo de Busca Tabu para solução do problema de planejamento de redes de distribuição secundárias, considerando alta penetração de geração fotovoltaica (PV) e cargas especiais do tipo PHEVs.
2. Uma abordagem realística do problema através do uso de equações de fluxo de potência AC trifásico a quatro fios.

Este artigo está organizado da seguinte forma: na seção 2 apresentam-se a formulação matemática genérica do problema de planejamento de redes secundárias de distribuição e a metodologia aplicada pelo algoritmo de BT na busca de soluções para o planejamento. Na seção 3 são apresentados os resultados dos testes com a implementação computacional e avaliação da metodologia proposta. Finalmente, apresenta-se na seção 4 as conclusões e a análise dos resultados obtidos.

2 Planejamento de Circuitos Secundários

2.1 Modelo Matemático

Na função objetivo do modelo do problema de planejamento de sistemas secundários de distribuição, representada pela equação (1), consideram-se os custos fixos e variáveis dos elementos que compõem os circuitos secundários, tanto na operação quanto na expansão. Os custos

fixos representam os investimentos na instalação de novos equipamentos (condutores, transformadores abaixadores) no sistema. Os custos variáveis representam as perdas elétricas durante o período de operação. O modelo matemático que considera o planejamento das redes secundárias é representado como:

$$Min W = \left[\sum_{ij \in L} \sum_{f \in F} \sum_{k \in C} \sum_{l \in P} [C_{kwh,l} \cdot T_l \cdot (V_{i,f} - V_{j,f}) \cdot I_{ij,f}] \right] + \sum_{k \in N} \sum_{t \in TR} CFT_{t,k} \cdot tr_k + \sum_{ij \in L} \sum_{k \in C} CFCS_{k,ij} \cdot cs_{ij} \quad (1)$$

Sujeitos à:

- *Atendimento da Demanda (Leis de Kirchhoff), representadas pelas equações estáticas de fluxo de potência.*
- *Radialidade dos circuitos secundários.*
- *Restrição de limites máximo e mínimo de tensão nos pontos de consumo das redes secundárias, em cada cenário de operação.*
- *Limite máximo de corrente nos condutores secundários, em cada cenário de operação.*
- *Capacidade máxima de operação dos transformadores, em cada cenário de operação.*
- *Máximo recurso financeiro disponível que pode ser aplicado no planejamento das redes secundárias.*

Em que:

W : custo da função objetivo (\$);

L : conjunto das linhas candidatas do sistema secundário;

F : conjunto das fases a , b , c e neutro do sistema.

C : conjunto dos tipos de cabos disponíveis para instalação no sistema secundário;

P : conjunto dos cenários de operação do sistema secundário.

TR : conjunto dos tipos de transformadores que podem ser instalados no sistema de BT.

N : conjunto que representa as possíveis barras candidatas para a instalação dos transformadores no sistema secundário;

$C_{kwh,l}$: custo fixo do quilowatt-hora (kWh) em \$ do cenário de operação l ;

T_l : período de operação do cenário l em horas;

$CFCS_{k,ij}$: custo fixo do condutor secundário k a ser instalado no ramo do circuito ij ;

$V_{i,f}, V_{j,f}$: tensão na barra i e j , respectivamente, na fase f do circuito ij ;

$I_{ij,f}$: corrente no ramo ij na fase f ;

$CFT_{t,k}$: custo fixo do transformador do tipo t instalado na barra k ;

tr_k : variável de decisão binária para a instalação ou não de um transformador no nó k do circuito u ;

cs_{ij} : variável de decisão binária para a instalação ou não de um condutor do tipo k na linha ij ;

2.2 Modelagem das Cargas

As cargas são modeladas como potência constante e apresentam um perfil diário típico de carga residencial, como apresentado na Figura 1

(Nogueira, 2017). Nesta curva apresentam-se valores que variam em escala percentual do máximo valor de demanda da carga, ou seja, cada hora do dia representa uma porcentagem do carregamento máximo das respectivas cargas do circuito.

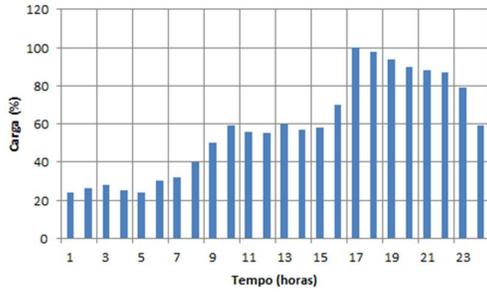


Figura 1. Curva de carga ao longo de um dia.

2.3 Modelagem dos Geradores Fotovoltaicos

Os geradores fotovoltaicos (GD) são modelados como nós tipo PQ, injetando potência aparente na rede. As Equações (2) e (3) modelam como as cargas podem ser expressas no nó i com a presença de gerador fotovoltaico.

$$P_i = P_{Li} - P_{gi} \quad (2)$$

$$Q_i = Q_{Li} - Q_{gi} \quad (3)$$

Sendo:

P_{Li} e Q_{Li} : potências ativas e reativa respectivamente das cargas, do tipo potência constante, conectadas ao nó i ;

P_{gi} e Q_{gi} : potências ativas e reativa respectivamente injetada pelo gerador fotovoltaico, conectado ao no i .

O perfil típico diário de geração FV utilizado neste trabalho é apresentado na Figura 2 (Nogueira, 2017). Os valores desta geração em cada hora do dia variam em escala percentual do pico de geração do sistema fotovoltaico utilizado.

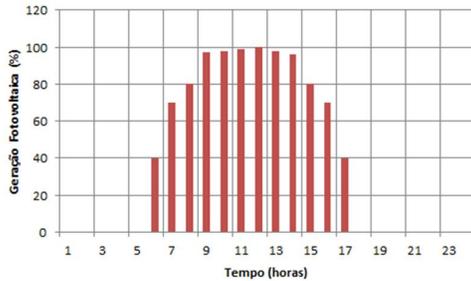


Figura 2. Perfil típico diário de geração fotovoltaica.

2.4 Modelagem dos Carros Híbridos Elétricos

Os carros híbridos elétricos (PHEVs: *Plug-in hybrid electric vehicles*) foram modelados apenas na configuração G2V (*grid to vehicle*), ou seja, os veículos comportam-se somente como carga. Para avaliar os impactos dos PHEVs no sistema de

distribuição é necessário explorar as principais características deste tipo de equipamento, como:

Capacidade da bateria (C): este parâmetro depende do tipo do veículo e da distância total que o mesmo é capaz de percorrer em modo elétrico (*AER: All electric range*) medida em milhas. Na Equação (4) representa-se a capacidade (C) da bateria dos PHEVs:

$$C = ECPM \times AER \quad (4)$$

Onde ECPM (*Electrical energy consumption per mile*) é o consumo de energia da bateria por milhas.

Estado de carga (SOC): trata-se da energia que permanece na bateria após o uso diário do veículo. A Equação (5) representa o estado de carga da bateria dos PHEVs:

$$SOC = \begin{cases} \left(1 - \frac{\lambda_d}{AER}\right) 100 & \lambda_d \leq AER \\ 0 & \lambda_d > AER \end{cases} \quad (5)$$

Onde λ_d é a distância total percorrida em modo elétrico, em milhas.

Energia necessária para carregar a bateria dos veículos: a energia demandada da rede de distribuição (E_{rede}) para carregar totalmente a bateria é apresentada pela Equação (6)

$$E_{rede} = \frac{\left(1 - \frac{SOC}{100}\right)C}{\eta} \quad (6)$$

Onde η é a eficiência no processo de recarga da bateria.

Na Tabela 1 apresentam-se os quatro tipos de veículos híbridos elétricos considerados nas simulações. Os dados de distância percorrida por dia (λ) e hora de chegada utilizada nas simulações foram extraídos e adaptados do NHTS (*National Household Travel Survey*) de 2009, que trata de um banco de dados com informações sobre transporte e viagem.

Devido os diferentes sistemas de potência existentes, muitos níveis de taxa de carga/descarga para as baterias são encontrados. Em Shafiee, Fotuhi-firuzabad & Rastegar (2013) são apresentados diversos níveis de taxa, de modo que neste trabalho a taxa de carga/descarga assumida é de $1,4\text{kWh}/127V_{AC}$.

2.5 Metodologia

A Busca Tabu (BT) é uma meta-heurística adequada para a solução de problemas com característica combinatória, como o planejamento de redes secundárias. Basicamente é um procedimento heurístico usado para gerenciar um algoritmo heurístico de busca local, que usa estratégias adequadas para controlar ou sair de soluções ótimas locais (GLOVER, 1995). O algoritmo realiza uma transição através do espaço de busca do problema, a fim de buscar a solução ótima ou soluções quase ótimas.

Tabela 1. Tipos de veículos híbridos elétricos.

Tipo	Veículo	AER	λ (milhas)	Hora de chegada	C (kwh)
1	Sedan Compacto	40	25	18	10,4
2	Sedan Compacto	60	30	19	15,6
3	Sedan tamanho médio	40	25	18	12,0
4	SUV tamanho médio	40	25	18	15,2

O espaço de busca consiste do conjunto de todas as soluções possíveis do problema. Na BT, a definição da estrutura de vizinhança está diretamente relacionada com o espaço de busca. Um conjunto de soluções vizinhas resulta de transformações locais a cada iteração da BT, que podem ser aplicadas à solução corrente.

O algoritmo BT aplicado neste trabalho é chamado algoritmo BT com memória de curto prazo. A memória de curto prazo usa basicamente atributos de configurações que foram modificadas no passado recente, um critério de aspiração e um critério de parada. Desta forma a memória de curto prazo consiste basicamente na criação de uma lista designada Lista Tabu (LT) que armazena as informações dos atributos das últimas transições. Com isso, as configurações candidatas que apresentam algum dos atributos proibidos são consideradas como tabu ou proibidas. Os atributos considerados tabus são utilizados para prevenir ciclagem quando se movimenta de um ponto de ótimo local, para outros pontos do espaço de busca, que não são direções de melhoria da função objetivo.

Para representar as possíveis soluções do problema de planejamento de circuitos secundários de distribuição utiliza-se um vetor de dimensão $(nl + 4nb)$ com variáveis inteiras e binárias, sendo nl número de ligações e nb o número de barras do sistema. Tal vetor representa a codificação, onde se armazenam as informações necessárias para avaliar a qualidade e a factibilidade de cada configuração através da função objetivo. Através da codificação é possível obter os custos dos condutores e transformadores de cada topologia encontrada através da meta-heurística de BT. Na Figura 3 (Souza, 2006) ilustra-se este esquema de codificação.

Neste esquema tem-se:

- As posições $C=1, 2, 3, \dots, nl$, que representam a bitola do condutor utilizado em cada um dos ramos C dos circuitos;
- As posições $T=1, 2, 3, \dots, nb$, que representam o tipo e a potência nominal do

transformador que será alocado na barra T da rede de distribuição, sendo possível verificar também a quantidade de circuitos do sistema. Nestas posições, os algarismos $1, 2, 3$ e 4 representam os diferentes tipos de transformadores utilizados nas simulações. O algarismo zero representa ausência de transformador na respectiva barra;

- As posições $B=1, 2, 3, \dots, 3nb$, que representam as conexões das cargas ativa e reativa em cada barra k do circuito. Os algarismos 1, 2 e 3, correspondem às cargas das fases a, b e c , respectivamente, porém sempre em relação às cargas declaradas na base de dados do sistema (Souza, 2006).

A característica das estruturas de vizinhança para o problema de planejamento de circuitos secundários é baseada na proposta de codificação para o problema. A estrutura de vizinhança é caracterizada pelas seguintes ações de planejamento:

Troca de ramos: este processo é realizado através da troca de ramos em duas zonas: *interzona* – realiza a troca de ramos conectados em transformadores diferentes; e *intrazona* - realiza a troca de ramos conectados a um mesmo transformador. A cada iteração avaliam-se todas as possibilidades de troca de ramos, sendo que a melhor configuração passa a ser a configuração corrente (Souza, 2006).

Posição e capacidade dos transformadores: a cada troca de ramos avalia-se a posição e capacidade dos transformadores de cada circuito. A busca de uma posição adequada do posto de transformação é obtida através do cálculo do momento elétrico. Tal procedimento tem como objetivo posicionar o transformador de modo a minimizar o módulo do momento elétrico de cada barra referente ao posto de transformação (Cossi, 2008).

Recondutoramento e balanceamento de cargas: têm por objetivo obter um nível adequado de tensões nas barras do sistema. A cada troca de ramos ou mudança de posicionamento dos transformadores são avaliados o recondutoramento dos alimentadores e o balanceamento de cargas. A escolha da bitola do cabo a ser substituído ou alocado em cada um dos ramais do circuito é realizada através da análise do fluxo de corrente nos alimentadores (Cossi, 2008).

Quantidade de transformadores: nessa etapa buscam soluções mais viáveis com a mudança da quantidade de transformadores. Ao se avaliar dois circuitos vizinhos e se identificar a possibilidade de transformá-los em um único circuito, realiza-se esta transição (Souza, 2006). De forma análoga, ao se avaliar um circuito e identificar a possibilidade de transformá-lo em dois circuitos, realiza-se esta transição.

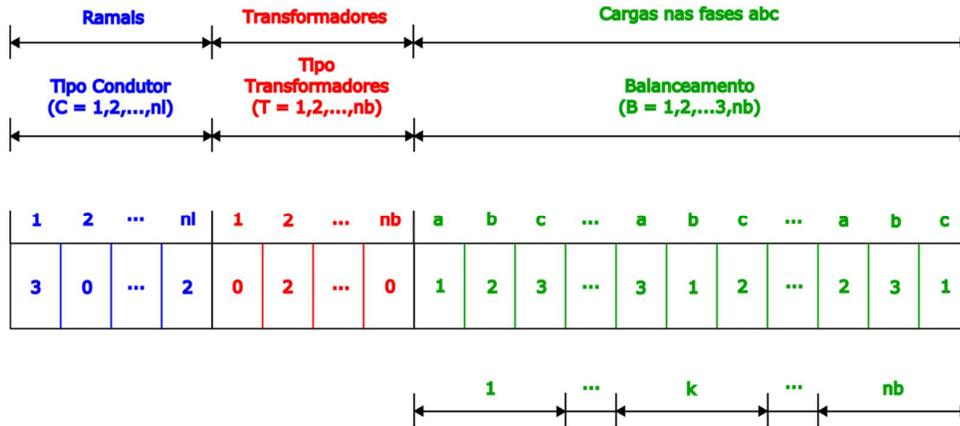


Figura 3. Codificação do problema de planejamento de circuitos secundários.

No algoritmo de BT implementado, utiliza-se um critério de aspiração, que estipula se uma configuração vizinha encontrada ao possuir um atributo proibido é de boa qualidade, então se deve eliminar a proibição. Considera-se que uma configuração vizinha é de boa qualidade quando apresenta uma função de adaptação com valor melhor que o da configuração incumbente do processo de BT. O critério de parada consiste em avaliar o número de transições do processo de BT sem melhorar o valor da função de adaptação da solução incumbente, ou seja, o processo de busca é interrompido se o número de iterações sem melhora na função de adaptação for superior ao número de iterações preestabelecido. Na Figura 4 ilustra-se o algoritmo BT implementado para o problema proposto (Nogueira, 2017). Na avaliação das soluções encontradas através da meta-heurística BT, é utilizado um fluxo de potência trifásico a quatro fios, com condutor neutro (CIRIC; PADILHA; OCHOA, 2003).

3 Testes e Resultados

O algoritmo de planejamento de redes secundárias foi implementado em linguagem de programação C++, utilizando a IDE (*Integrated Development Environment*), Microsoft Visual Studio 2008. Os dados referentes aos condutores e transformadores utilizados nas simulações são apresentados nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2. Dados dos condutores.

Tipo	Seção (mm ²)	R (Ω/m)	X (Ω/m)	I _{max} (A)	Custo (\$/m)
1	3x1x35 (35)	1,01. 10 ⁻³	1,138. 10 ⁻⁴	129	1,99
2	3x1x50 (50)	7,44. 10 ⁻⁴	1,092. 10 ⁻⁴	168	3,53
3	3x1x70 (70)	5,68. 10 ⁻⁴	9,450. 10 ⁻⁵	227	4,60
4	3x1x120 (120)	2,94. 10 ⁻⁴	9,420. 10 ⁻⁵	311	6,64

Tabela 3. Dados dos transformadores de distribuição.

Tipo	Potência	Custo Fixo (\$)
1	30kVA	1251,40
2	45kVA	1488,32
3	75kVA	2166,68
4	112,5kVA	2911,21

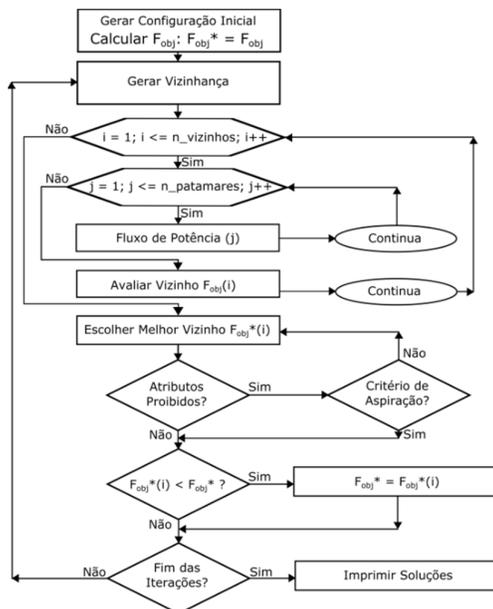


Figura 4. Proposta para o planejamento e projeto de redes secundárias de distribuição utilizando a meta-heurística BT.

Neste trabalho, são utilizados no planejamento, quatro níveis de demanda para considerar o perfil diário das curvas de carga e de geração. Cada nível de demanda é definido selecionando um ponto da curva diária que melhor representa o período do dia. Nas simulações foram utilizados os seguintes instantes das curvas diárias para representar os respectivos patamares: (i) Madrugada – 4 horas; (ii) Manhã – 10 horas; (iii) Tarde – 17 horas; (iv) Noite – 21 horas. Um horizonte de planejamento de um ano, isto é, com um total de 8760 horas foi considerado, sendo 2190 horas o período de cada cenário de operação (T_i).

A eficiência do modelo proposto e da metodologia de planejamento desenvolvida foram testadas em dois sistemas reais de distribuição com

76 e 54 barras, respectivamente. Na Tabela 4 são apresentados os parâmetros utilizados nos testes.

Tabela 4. Parâmetros utilizados no planejamento.

Parâmetros	Valor
Fator de Potência	0,92
Tensão Nominal do Circuito (Volts)	127
Limites de Variação de Magnitude de Tensão (Volts)	$116 \leq V_N \leq 133$
Custo do quilowatt-hora (US\$)	0,32

Caso I: o planejamento das redes secundárias é realizado sem considerar cargas especiais.

Caso II: o planejamento das redes secundárias é realizado considerando a presença de geradores do tipo PV.

Caso III: o planejamento das redes secundárias é realizado considerando a presença de PHEV's.

Caso IV: o planejamento das redes secundárias é realizado considerando a presença de PV e PHEV's.

3.1 Sistema I

O sistema de distribuição I consiste de um loteamento de classes de baixa e média renda, situado no município de Guapiaçu - SP. Composto por 167 lotes (característica: área média de 480m², ligação bifásica, consumo médio de 292 kWh/mês), uma área de lazer com demanda de 5kVA, uma estação de tratamento de esgoto com motor de 5 CV e um reservatório elevado com motor trifásico de 15 CV. Nas simulações foram utilizadas 35 unidades fotovoltaicas de 2,6 kW que totalizam em torno de 30% da carga instalada, e 32 unidades de baterias de PHEV divididas igualmente entre os quatro tipos apresentados na Tabela 1.

Na Tabela 5 apresentam-se os resultados obtidos pela ferramenta desenvolvida, considerando quatro casos de estudo:

Tabela 5. Custos das soluções obtidas para o sistema I (\$).

Tipo	Caso I	Caso II	Caso III	Caso IV
Cabos	6265,28	6163,23	5913,32	5943,36
Trafos	9371,36	8456,08	10622,76	9944,40
Perdas	9049,39	8495,28	8508,12	8012,68
Tempo (s)	73,95	45,04	93,64	65,62
Iterações	88	54	102	71
Total	24686,20	23114,59	25044,20	23900,44

Na Tabela 6 apresentam-se os resultados de tensão mínima, nos respectivos patamares de carregamentos das redes de distribuição secundárias.

Tabela 6. Magnitudes das tensões das soluções para o sistema I.

Patamar	Caso I	Caso II	Caso III	Caso IV
Madrugada	125,22	125,22	125,24	125,22
Manhã	122,73	123,47	122,79	124,02
Tarde	119,59	119,92	119,79	121,07
Noite	120,52	120,50	118,89	119,95

Na Figura 5 apresenta-se a topologia obtida como solução para o sistema I, considerando geração

distribuída e veículos híbridos elétricos na rede de distribuição.

3.2 Sistema II

O sistema II consiste em um loteamento de classe de baixa renda, situado no município de São José do Rio Preto - SP. Este loteamento possui 201 lotes (característica dos lotes: área média de 300m², ligação bifásica, consumo médio de 292 kWh/mês), uma área de lazer com demanda de 5kVA e um reservatório elevado com motor trifásico de 15CV. Nas simulações foram utilizadas 48 unidades fotovoltaicas de 2,6kW que totalizam em torno de 35% da carga instalada, e 53 unidades de baterias de PHEV.

Na Tabela 7 apresentam-se os resultados obtidos pela ferramenta desenvolvida, considerando os quatro diferentes cenários de simulação analisados.

Tabela 7. Custos das soluções obtidas para o sistema II.

Tipo	Caso I	Caso II	Caso III	Caso IV
Cabos	4934,76	4545,36	4952,98	5198,93
Trafos	10286,64	9371,35	9608,28	9608,28
Perdas	9870,08	7761,33	10696,90	7327,29
Tempo (s)	28,42	44,98	36,86	40,31
Iterações	46	67	56	60
Total	25091,48	21678,04	25258,16	22134,50

Na Tabela 8 apresentam-se os resultados de tensão mínima nos respectivos patamares de carregamentos das redes de distribuição secundárias obtidas como solução.

Tabela 8. Magnitude das tensões das soluções para o sistema II.

Patamar	Caso I	Caso II	Caso III	Caso IV
Madrugada	125,40	125,52	125,43	125,62
Manhã	123,18	125,28	123,26	124,98
Tarde	119,99	122,05	120,50	121,87
Noite	121,23	121,65	120,61	119,13

Na Figura 6 apresenta-se a topologia obtida como solução para o sistema II, considerando geração distribuída e veículos híbridos elétricos na rede de distribuição (caso IV).

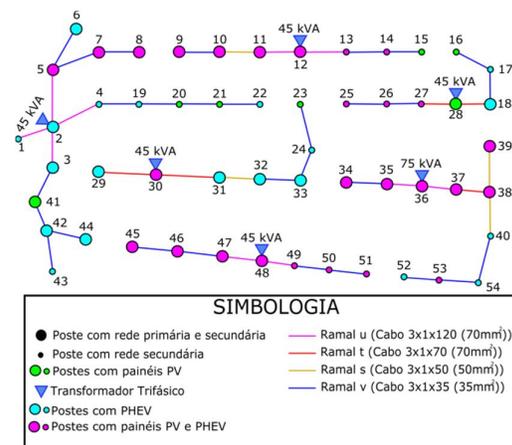


Figura 6. Topologia da rede de distribuição obtida pelo algoritmo de Busca Tabu considerando GD e PHEVs (caso IV).

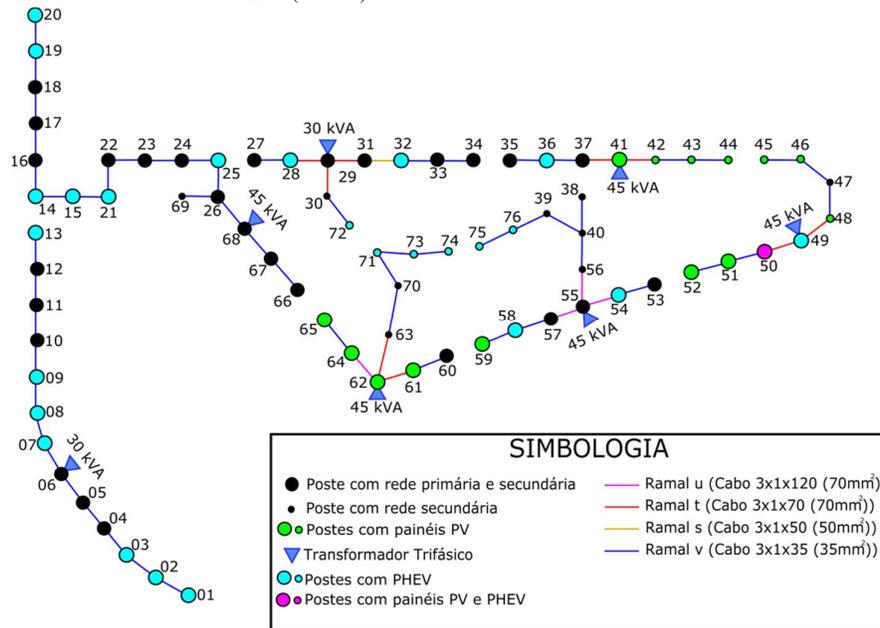


Figura 5. Topologia da rede de distribuição obtida pelo algoritmo de Busca Tabu considerando GD e PHEVs (caso IV).

3.3 Análise dos Resultados

Os resultados apresentados nas Tabelas 5 e 7 mostram o impacto das cargas especiais (i.e., PHEVs) e da GD no planejamento das redes secundárias. Os GDs instalados na rede reduzem os custos de investimentos com equipamentos (condutores, transformadores) e reduzem as perdas técnicas. As cargas do tipo PHEV's impactam nos custos de transformadores, provocando a necessidade da construção de mais circuitos secundários de menor dimensão, compensando em parte estes custos com a redução das perdas técnicas. O algoritmo apresentado também garante critérios de robustez, pois através de diferentes soluções iniciais, geradas de maneira aleatória, têm se a convergência do algoritmo para a mesma solução.

4 Conclusões

Os resultados obtidos ilustram o bom desempenho da metodologia proposta para solução do problema de planejamento de redes de distribuição secundárias considerando alta penetração de geração PV e cargas especiais PHEVs.

Os GDs e PHEVs impactam significativamente nas decisões de planejamento da rede. Com isso, torna-se necessário, por parte das empresas distribuidoras, o reconhecimento deste novo cenário operacional e seus impactos físicos e econômicos no planejamento de redes de baixa tensão. A ferramenta desenvolvida neste projeto mostrou-se como uma alternativa eficiente na análise e projeto de circuitos incluídos neste cenário.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq (processos 121193/2016-0, 305318/2016-0), CAPES e FAPESP (processo nº 2015/21972-6 e nº 2017/13599-9).

Referências Bibliográficas

- Ciric, R.; Padilha, A.; Ochoa, L. F. Power flow in four-wire distribution networks - general approach. IEEE Transactions on Power Systems, New York, v. 18, n. 4, p. 1263-1290, 2003.
- Cossi, A. M. Planejamento de circuitos secundários de distribuição usando um algoritmo evolutivo especializado. Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista 'Júlio de Mesquita Filho'- UNESP, Ilha Solteira, 2003.
- Cossi, A. M. (2008). Planejamento de redes de distribuição de energia elétrica de média e baixa tensão. Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira.
- Costa, A. M. Otimização do planejamento de redes secundárias de distribuição de energia elétrica. 2002. Faculdade de Engenharia e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.
- Garcia, V. J.; França, P. M.; Gonzalez, J. F. V.; Yoshimoto, E.; Lyra Filho, C.; Cavellucci, C. GRASP para o problema de planejamento de redes secundárias de distribuição de energia elétrica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 35., 2003, Natal: SBPO, 2003. p.1427-1437.

- Glover, F. (1995). Tabu search fundamentals and uses. University of Colorado. Boulder, Colorado.
- Kagan, N.; Oliveira, C. C. B. D.; Robba, E. J. (2010). Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica. Segunda. ed. São Paulo: Blucher, 328 p.
- NHTS: Our Nation's Travel. National Household Travel Survey. Disponível em: <<http://nhts.ornl.gov/>>. Acesso em: 4 Julho 2017.
- Nogueira, A. G. (2017). Planejamento de circuitos secundários de distribuição de energia elétrica através de um algoritmo busca tabu. Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira.
- Shafiee, S.; Fotuhi-Firuzabad, M.; Rastegar, M. (2013). Investigating the impacts of plug-in hybrid electric vehicles on power distribution systems. IEEE Transactions On Smart Grid, Vol. 4, No. 3, pp. 1351-1360.
- Souza, C. H. D. (2006). Planejamento e projeto de circuitos secundários de distribuição de energia elétrica por meio de algoritmo busca tabu. Ilha Solteira.