

MODELOS DE PROGRAMAÇÃO INTEIRA PARA ALOCAÇÃO DE RECURSOS DE MANUTENÇÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Mateus Pereira Martin

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - UNICAMP
Av. Albert Einstein, 400. CEP: 13083-852, Campinas/SP - Brasil
mateus.pmartin@gmail.com

Christiano Lyra Filho

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - UNICAMP
Av. Albert Einstein, 400. CEP: 13083-852, Campinas/SP - Brasil
christi@denisis.fee.unicamp.br

RESUMO

O trabalho propõe dois modelos de programação linear inteira mista ao problema de alocação ótima de recursos de manutenção em redes de distribuição de energia elétrica. As companhias de distribuição de energia precisam planejar a manutenção de seus recursos para atingir determinados níveis de confiabilidade, com menor custo possível. Modelos de otimização podem contribuir neste processo. Para tanto, devem considerar as características intrínsecas desses sistemas, como a natureza radial das redes, os distintos tipos de equipamentos, níveis de manutenção e os ciclos periódicos de planejamento. Adicionalmente, é necessário que seja obtido um conjunto de planos de manutenção otimizados para diferentes compromissos entre custo e confiabilidade para cada uma das redes locais e para a companhia de distribuição como um todo. O trabalho propõe representações matemáticas para esses problemas e manipulações adequadas para implementá-las. Os estudos de casos ilustram a adequação da metodologia e perspectivas de aplicação.

PALAVRAS CHAVE. Otimização da Manutenção, Redes de Distribuição, Confiabilidade, Sistemas de Potência.

Área Principal: PO na Área da Energia, Apoio à Decisão Multicritério.

ABSTRACT

This paper proposes two mixed integer linear programming models to optimal allocation problem of maintenance resources on power distribution networks. The distribution facilities need to plan the resource of their maintenance to achieve certain levels of reliability with the lowest possible cost. Optimization models can help this process. For this, they should consider the intrinsic characteristics of these systems, such as the radial nature of the networks, the different types of equipments, maintenance levels and periodic planning cycles. In addition, it must be obtained a set of maintenance plans optimized for different trade-offs between cost and reliability for each local networks and the whole distribution facility. The paper proposes mathematical representations for each of these problems and appropriate manipulations to interpret them. The case studies illustrate the appropriateness of the methodology and application prospects.

KEYWORDS. Maintenance Optimization, Distribution Networks, Reliability, Power Systems.

Main Area: OR in Energy, Multicriteria Decision Support.

1. Introdução

A cadeia de produção e suprimento de energia elétrica é constituída por 3 subsistemas distintos: geração, transmissão e distribuição. Cabe aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) o fornecimento de energia aos consumidores finais. As subestações de distribuição são responsáveis por receber energia das linhas de subtransmissão; através de transformadores na subestação e ao longo da rede de distribuição, a voltagem é reduzida aos níveis de serviço.

Segundo Brown (2009), o planejamento feito pelas empresas distribuidoras historicamente esteve associado à capacidade do sistema, isto é, ao atendimento da demanda esperada. O conceito de confiabilidade estaria na porcentagem adicional de capacidade em relação à demanda máxima. Entretanto, aproximadamente 50% do custo de sistemas de distribuição está associado à confiabilidade, enquanto os demais 50% à capacidade do sistema (Brown & Howe 2000). A otimização dos recursos de manutenção nos SDEE é uma forma de garantir a confiabilidade dos sistemas. No entanto, distintas políticas de manutenção podem ser elaboradas diante dos objetivos conflitantes de custo de manutenção e nível de confiabilidade da rede.

A literatura sobre a otimização da alocação de recursos de manutenção em SDEE é relativamente recente. Sittithumwat et al. (2004) propuseram uma formulação de programação binária para direcionar o foco da manutenção a componentes críticos, com alto impacto na confiabilidade da rede de distribuição. O artigo propõe considerar cenários de informações limitadas por conjuntos *fuzzy* e a utilização de níveis de manutenção (intensiva, mínima ou nenhuma manutenção); cada nível possui um multiplicador de taxa de falha associado que afeta diferentemente a variação anual da taxa de falha dos equipamentos. Adicionando o conceito de horizonte de planejamento na proposta de Sittithumwat et al. (2004), Reis (2007) abordou o problema multi-período com a metaheurística GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) e um Algoritmo Genético Híbrido para minimizar custos de manutenção, restritos a um nível de confiabilidade mínimo. Usberti et al. (2015) utilizaram e estenderam a abordagem de Reis (2007) ao desenvolver uma abordagem multiobjetivo para propor distintos planos de manutenção para atender o “trade-off” custo-confiabilidade; além disso, o artigo propõe uma estratégia para combinar distintos planos de manutenção de redes locais para gerar planos para grupos elétricos, procurando atender as normas estabelecidas e supervisionados pela ANEEL¹.

Este trabalho propõe dois modelos de Programação Linear Inteira Mista para os problemas estudados por Reis (2007) e Usberti et al. (2015). O primeiro lida com o problema de alocação de recursos de manutenção em redes de distribuição e foi desenvolvido ao reformular a abordagem não-linear de Reis (2007) – Usberti et al. (2015) afirmaram que se trata de um problema NP-Difícil. Uma abordagem linear é aqui proposta ao problema que atende às extensões de ciclos periódicos de planejamento e distintos níveis de manutenção. Motivado pela abordagem de Usberti et al. (2015), uma extensão foi desenvolvida para construir planos de manutenção correspondentes aos diferentes compromissos entre custo e confiabilidade da rede.

O segundo modelo desenvolvido foi inspirado na abordagem de Usberti et al. (2015) de propor planos de manutenção para determinado grupo elétrico, ao combinar os planos de redes locais que foram elaborados previamente. Os estudos de casos realizados ilustram a adequação da metodologia. Nos estudos realizados com redes de distribuição reais (grande porte), os resultados obtidos foram superiores e em tempo computacional inferior à abordagem de Usberti et al. (2015), utilizando ambiente computacional próximo ao utilizado por esses autores.

2. Definição do Problema

Uma rede de distribuição de energia elétrica possui diversos equipamentos, como transformadores, cabos, fusíveis, equipamentos de proteção, recursos de infra-estrutura, entre outros,

¹Agência Nacional de Energia Elétrica: <http://www.aneel.gov.br/>

que estão sujeitos a falhas, isto é, a eventos que conduzem a interrupção do serviço. Em geral, um SDEE possui configuração radial (Brown 2009), o que em terminologia de grafos, pode ser representado como uma árvore cuja raiz é a subestação. Logo, existe um caminho único de qualquer elemento da rede até a subestação. Dessa forma, qualquer falha em um elemento leva à atuação de equipamentos de proteção, e rede à jusante da proteção tem seu fornecimento interrompido – o que indica a relevância dos equipamentos mais próximos à subestação, pois em caso de falha, maior número de consumidores serão afetados.

Sittithumwat et al. (2004) utilizaram o conceito de seções, cujas fronteiras são delimitadas por equipamentos de proteção, para caracterizar o conjunto de componentes das redes afetadas por uma determinada falha. Assim, a rede de distribuição pode ser dividida em várias seções, de acordo com o número de equipamentos de proteção, e cada uma delas servirá uma determinada quantidade de clientes da rede. Billinton & Billinton (1989) recomendaram essa metodologia no cálculo do índice de confiabilidade FEC (frequência equivalente de interrupção por consumidor) – conforme indicado na Equação (8). Outros autores, como Reis (2007), Bacalhau et al. (2013) e Usberti et al. (2015) também utilizaram esse conceito. A Figura 1 exemplifica uma simples rede de distribuição de energia.

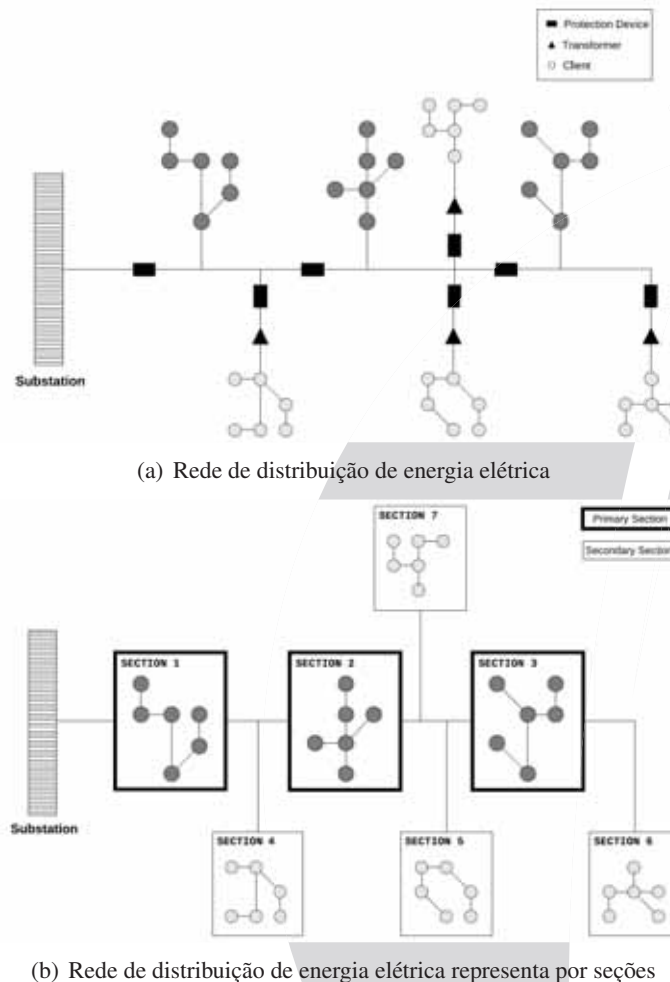


Figura 1: Rede de Referência. Fonte: Usberti et al. (2015).

O MRAP (*Hierarchical Multiple Criteria Maintenance Resources Allocation Problem*) proposto por Usberti et al. (2015) define políticas de manutenção para redes em nível local e em

Tabela 1: Notações

x_e^t	variável de decisão binária cujo valor é (1) se o equipamento e recebe manutenção ou não (0)
λ_e^t	variável de decisão que representa a taxa de falha do equipamento e no ano t
N_s	número de clientes servidos pela seção s e todas seções à jusante
NT	número total de clientes servidos pela rede
E_s	conjunto de equipamentos pertencentes à seção s
p_e	custo de manutenção preventiva do equipamento e
c_e	custo de manutenção corretiva do equipamento e
m_{e0}	multiplicador da taxa de falha no equipamento e na ausência de manutenção preventiva
m_{e1}	multiplicador da taxa de falha no equipamento e quando manutenção preventiva é realizada
m_e^t	multiplicador da taxa de falha aplicado no equipamento e no ano t
r	taxa de juros

nível global ao combinar políticas de nível local. O modelo de nível local desses autores é uma adaptação da abordagem de Reis (2007) ao caso biobjetivo de custos de manutenção e confiabilidade da rede. Assim, o MRAP de nível local é um modelo biobjetivo não-linear inteiro para alocação de recursos de manutenção preventiva e é apresentado a seguir. A Tabela 1 apresenta a notação da formulação matemática utilizada no modelo.

(MRAP biobjetivo não-linear inteiro de Usberti et al. (2015))

$$\min \quad CT = \sum_t \frac{1}{(1+r)^t} (PC^t + CC^t) \quad (1)$$

$$\min \quad FEC = \max_t (FEC^t) \quad (2)$$

$$s.a. \quad m_e^t = x_e^t m_{e1} + (1 - x_e^t) m_{e0} \quad \forall e, \forall t \quad (3)$$

$$\lambda_e^t = \lambda_e^{t-1} m_e^t \quad \forall e, \forall t \quad (4)$$

$$x_e^t \in \{0, 1\} \quad \forall e, \forall t \quad (5)$$

Nota-se que λ_e^0 é conhecido para todos os equipamentos. A Equação (1) indica o objetivo de minimização de custos de manutenção preventiva e corretiva. As Equações (6) e (7) detalham a forma de cálculo.

$$PC^t = \sum_s \sum_{e \in E_s} p_e x_e^t \quad (6)$$

$$CC^t = \sum_s \sum_{e \in E_s} c_e \lambda_e^t \quad (7)$$

A Equação (2) apresenta o objetivo de minimizar o índice FEC (frequência equivalente de interrupção por consumidor) de confiabilidade do sistema, que indica o valor esperado (médio) de falhas do equipamento em determinado período. A Equação (8) detalha seu cálculo.

$$FEC^t = \frac{\sum_s (N_s \sum_{e \in E_s} \lambda_e^t)}{NT} \quad (8)$$

As restrições apresentadas nas Equações (3) e (4) indicam o modelo de taxas de falha considerado. O valor esperado de falhas de um equipamento é alterado ao longo do horizonte

de planejamento pela alocação ou não de manutenção preventiva, de acordo com o multiplicador associado. Nota-se que a taxa de falha é reduzida pelo multiplicador m_{e1} ($0 < m_{e1} \leq 1$) e incrementada pelo multiplicador m_{e0} ($m_{e0} > 1$).

3. Modelos Matemáticos Lineares ao Problema de Manutenção

O modelo de alocação de recursos de manutenção para redes locais é desenvolvido na Seção 3.1 pela proposição de nova formulação ao modelo proposto por Usberti et al. (2015). Em seguida, uma abordagem alternativa a esses autores para o problema de composição de planos de manutenção para determinado grupo elétrico é desenvolvida na Seção 3.2.

3.1. Problemas de Nível Local

A não linearidade do MRAP de nível local pode ser verificada nas Equações (2) e (4), que representam o objetivo de confiabilidade e restrição de taxa de falha, respectivamente. As Seções 3.1.1 e 3.1.2 apresentam propostas para linearização do modelo MRAP de nível local.

3.1.1. Função Máximo

A função máximo utilizada na Equação (2) pode ser linearizada pela introdução de um bloco de restrições de acordo com a Equação (9).

$$FEC \geq FEC^t \quad \forall t \quad (9)$$

Pela utilização de restrições do tipo maior ou igual (\geq) e visto que objetivo será minimizado, garante-se que a igualdade será obtida, conforme a Equação (2).

3.1.2. Eliminação de Multiplicação de Variáveis

Por meio de restrições, é possível eliminar o produto de variáveis binárias e/ou contínuas (Williams 1999). Por exemplo:

1. Seja x_{bin} uma variável binária e x_{con} uma variável contínua, tal que $l \leq x_{con} \leq u$;
2. Uma nova variável contínua y é introduzida para substituir o produto $x_{bin}x_{con}$;
3. As Equações (10) e (11) apresentam restrições que devem ser adicionadas.

$$lx_{bin} \leq y \leq ux_{bin} \quad (10)$$

$$x_{con} - u(1 - x_{bin}) \leq y \leq x_{con} \quad (11)$$

Dessa forma, a não linearidade da Equação (4) pode ser evitada. Para propor uma nova formulação ao MRAP usando tais restrições, pode-se reescrever as Equações (3) e (4) para se obter o produto da variável binária x_e^t pela variável contínua λ_e^{t-1} , conforme a Equação (12).

$$\lambda_e^t = \lambda_e^{t-1} x_e^t m_{e1} + \lambda_e^{t-1} (1 - x_e^t) m_{e0} \quad \forall e, \forall t \quad (12)$$

Para deixar o modelo proposto com capacidade de lidar com distintos níveis de manutenção, de forma análoga a Sittithumwat et al. (2004), um índice referente ao tipo de nível de manutenção k deve ser incorporado à variável binária de alocação de manutenção preventiva (x_e^t). Dessa forma, tem-se a variável binária $x_{e,k}^t$ que apresenta valor um se o tipo de manutenção k foi alocado ao equipamento e no período t , e valor zero caso contrário. Semelhantemente, o parâmetro m_e^k representa o multiplicador associado à variável $x_{e,k}^t$. Assim, a variável contínua $\delta_{e,k}^t = \lambda_e^{t-1} x_{e,k}^t$ é incluída ao modelo, como a variável y nas Equações (10) e (11). Ressalta-se que a Equação (6) também deve ser estendida para que cada tipo de manutenção apresente um custo associado.

A variável referente à taxa de falha linearizada ($\delta_{e,k}^t$) está canalizada conforme as Equações (10) e (11). No entanto, para reformular o modelo de Reis (2007) como um problema de programação linear inteira mista, o limitante inferior da Equação (10) não é necessário; bastaria a restrição de não-negatividade dessa variável e, assim, se teria menor quantidade de restrições. Porém, os métodos de solução de programação inteira canalizam as variáveis binárias entre zero e um – no caso, a variável $x_{e,k}^t$, e resolvem diversos problemas de programação linear controlados pelo algoritmo *Branch & Bound* (Wolsey 1998). Assim, é relevante a utilização de bons limitantes para evitar a maior quantidade possível de soluções fracionárias neste processo e ter ganhos de desempenho. Um limitante inferior (λ_e^t) e um limitante superior ($\bar{\lambda}_e^t$) podem ser obtidos, respectivamente, ao simular a alocação de manutenção de máximo nível ou a degradação dos equipamentos pela aplicação dos respectivos multiplicadores de taxa de falha ao longo do horizonte de planejamento para cada equipamento e no período t .

Diante das proposições feitas, o MRAP de nível local pode ser escrito como um problema linear inteiro biobjetivo, conforme apresentado a seguir.

(MRAP biobjetivo linear inteiro de nível local)

$$\min \quad CT = \sum_t \frac{1}{(1+r)^t} (PC^t + CC^t) \quad (13)$$

$$\min \quad FEC \quad (14)$$

$$sa \quad FEC \geq FEC^t \quad \forall t \quad (15)$$

$$\lambda_e^t = \sum_{\forall k} \delta_{e,k}^t m_e^k \quad \forall e, \forall t \quad (16)$$

$$\lambda_e^{t-1} x_{e,k}^t \leq \delta_{e,k}^t \leq \bar{\lambda}_e^{t-1} x_{e,k}^t \quad \forall e, \forall t \quad (17)$$

$$\lambda_e^{t-1} - \bar{\lambda}_e^{t-1} (1 - x_{e,k}^t) \leq \delta_{e,k}^t \leq \lambda_e^{t-1} \quad \forall e, \forall t \quad (18)$$

$$\sum_{\forall k} x_{e,k}^t = 1 \quad \forall e, \forall t \quad (19)$$

$$x_{e,k}^t \in \{0, 1\} \quad \delta_{e,k}^t \geq 0 \quad \forall e, \forall t, \forall k \quad (20)$$

As Equações (17) e (18) estabelecem as condições necessárias para que as taxas de falha assumam valor zero ou o valor das taxas de falha do período anterior. A Equação (19) garante que apenas um tipo de manutenção é aplicado a cada equipamento e no período t . A Equação (16) representa a atualização da taxa de falha no período seguinte.

3.1.3. Método ε -Restrito

Seguindo a metodologia de Usberti et al. (2015), a técnica de escalarização ε -Restrito foi utilizada para resolver o MRAP de nível local. Apenas um dos objetivos (custos de manutenção) é otimizado e o outro objetivo (FEC) é restringida pelo escalar ε_k . Dessa forma, tem-se o MRAP linearizado e mono-objetivo, que pode ser resolvido por técnicas de programação linear inteira mista.

(MRAP linear inteiro de nível local)

$$\min \quad CT = \sum_t \frac{1}{(1+r)^t} (PC^t + CC^t) \quad (21)$$

$$sa \quad FEC \leq \varepsilon_k \quad (22)$$

$$FEC \geq \overline{FEC}^t \quad \forall t \quad (23)$$

$$\lambda_e^t = \sum_{\forall k} \delta_{e,k}^t m_e^k \quad \forall e, \forall t \quad (24)$$

$$\lambda_e^{t-1} x_{e,k}^t \leq \delta_{e,k}^t \leq \overline{\lambda_e^{t-1}} x_{e,k}^t \quad \forall e, \forall t \quad (25)$$

$$\lambda_e^{t-1} - \overline{\lambda_e^{t-1}} (1 - x_{e,k}^t) \leq \delta_{e,k}^t \leq \lambda_e^{t-1} \quad \forall e, \forall t \quad (26)$$

$$\sum_{\forall k} x_{e,k}^t = 1 \quad \forall e, \forall t \quad (27)$$

$$x_{e,k}^t \in \{0, 1\} \quad \delta_{e,k}^t \geq 0 \quad \forall e, \forall t, \forall k \quad (28)$$

Para obter um conjunto de p soluções, é necessário variar o valor de ε_k entre o melhor (\underline{FEC}) e o pior (\overline{FEC}) nível de confiabilidade da rede e executar o MRAP linear inteiro p vezes. Para calcular \underline{FEC} e \overline{FEC} de determinada rede é necessário simular a aplicação de manutenção de melhor nível e a degradação da rede, respectivamente, para todos os equipamentos da rede ao longo do horizonte de planejamento. Particularmente, seguindo a metodologia de Reis (2007), o cálculo de \underline{FEC} considera apenas o primeiro período do horizonte de planejamento. A Equação (29) distribui os p valores de ε_k uniformemente entre os valores limites de FEC (Usberti et al. 2015).

$$\varepsilon_k = \underline{FEC} + \frac{(\overline{FEC} - \underline{FEC})(k-1)}{p-1} \quad k = 1, \dots, p \quad (29)$$

Usberti et al. (2015) utilizaram o Algoritmo Genético Híbrido (AGH) de Reis (2007) para resolver o MRAP de nível local. Destaca-se que o modelo aqui proposto é uma forma alternativa para obtenção de soluções.

3.2. Problemas de Nível Global

Após construção de curvas de Pareto das redes locais, isto é, de diferentes planos de manutenção terem sido elaborados para atender ao “trade-off” custo-confiabilidade, pode-se construir uma curva de Pareto global ao combinar planos de manutenção de diversas redes. Esta ideia foi proposta por Usberti et al. (2015) ao elaborar os operadores filtro, agregação e composição.

A seguir, um modelo de programação linear inteira é proposto para resolver o problema de criar a curva de Pareto global de forma alternativa à abordagem de ordenamento de soluções de Usberti et al. (2015). A variável binária $x_{k,p}$ representa a alocação (valor 1) ou não (valor 0) do ponto p da rede k na curva de Pareto do conjunto de redes, isto é, adoção do plano de manutenção p da rede k na curva de Pareto global.

(MRAP biobjetivo de nível global)

$$\min CT_{global} \quad (30)$$

$$\min FEC_{global} \quad (31)$$

$$s.a. CT_{global} = \sum_{\forall(k,p)} CT_{k,p} x_{k,p} \quad (32)$$

$$FEC_{global} = \frac{\sum_{\forall(k,p)} FEC_{k,p} NT_k x_{k,p}}{\sum_k NT_k} \quad (33)$$

$$\sum_{\forall p} x_{k,p} = 1 \quad \forall k \quad (34)$$

$$x_{k,p} \in \{0, 1\} \quad \forall p, \forall k \quad (35)$$

Neste modelo, $CT_{k,p}$ e $FEC_{k,p}$ são parâmetros, visto que seus valores foram obtidos ao construir o conjunto de soluções não dominadas, isto é, o MRAP de nível local. Destaca-se que para obtenção desses parâmetros, algum entre os algoritmos de Reis (2007), a abordagem de Bacalhau et al. (2013) ou o modelo da Seção 3.1.3 pode ser escolhido.

O Método ε -Restrito pode também ser utilizado para escalar o MRAP de nível global biobjetivo em mono-objetivo. Neste caso, opta-se mais uma vez por restringir a confiabilidade (FEC_{global}) a um escalar ε_k e otimiza-se o objetivo de custo. De forma semelhante ao cálculo de FEC e \overline{FEC} , pode-se calcular o intervalo factível de FEC_{global} $[FEC_{global}, \overline{FEC}_{global}]$ ao combinar as redes em seus planos de menor e maior FEC, respectivamente.

4. Estudos de Casos

As implementações foram desenvolvidas e executadas em um computador com processador Intel Core 2 Quad (3.30 GHz), 4 GB de memória RAM e com sistema operacional *Windows*. O modelo matemático foi implementado na plataforma *AIMMS 4.0²*, utilizando o *solver GUROBI 6.0*.

Os estudos de casos realizados com redes de grande porte indicaram a adequação da metodologia. Em ambiente computacional próximo ao utilizado por Usberti et al. (2015), os resultados foram superiores e o tempo de processamento abaixo do tempo requerido pela abordagem heurística.

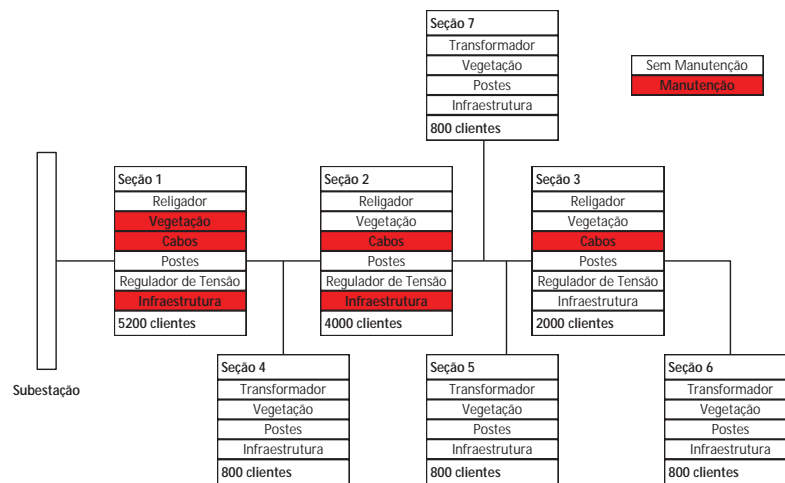
Para este trabalho, os estudos de casos ilustram a qualidade das soluções obtidas ao considerar 3 redes de pequeno porte semelhantes a rede de referência utilizada por Usberti et al. (2015). Para permitir comparação aos resultados desses autores, o problema trata sobre alocação de manutenção preventiva. Ressalta-se que a otimalidade foi atingida em todos os testes feitos.

4.1. Estudo de Caso de Nível Local

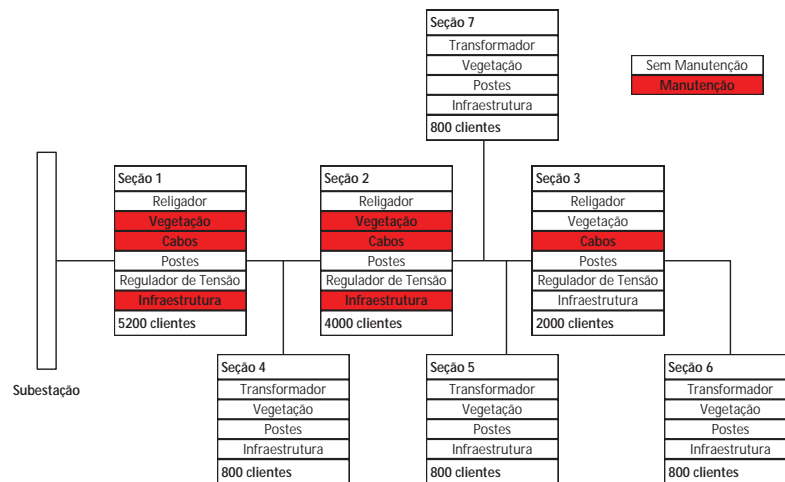
A primeira rede de referência possui 34 equipamentos, 7 seções (semelhante à Figura 1), 5200 consumidores e 7 tipos de equipamentos distintos. A Figura 2, inspirada em Usberti et al. (2015), ilustra o plano de manutenção ótimo para esta rede com horizonte de planejamento de 3 anos, taxa de juros de 10% e $\varepsilon_k = 0,5574$. Para estes resultados, o modelo da Seção 3.1.3 foi utilizado. Os valores de FEC e \overline{FEC} dessa rede são, respectivamente, 0,3733 e 0,9894, enquanto a FEC inicial da rede é 0,4237.

Os planos de manutenção gerados (Figuras 2(a) à 2(c)) indicam a proeminência das seções que servem maior número de consumidores, visto que tais seções tiveram maior quantidade de

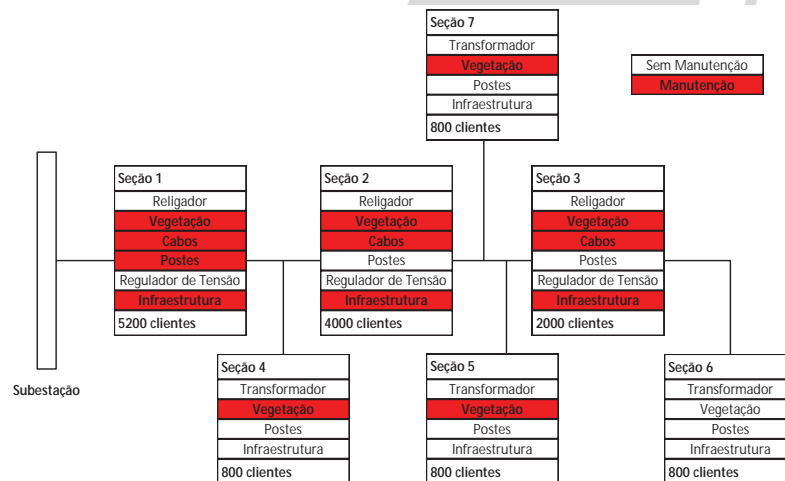
²Advanced Integrated Multidimensional Modeling Structure: www.aimms.com.



(a) Plano do Ano 1



(b) Plano do Ano 2



(c) Plano do Ano 3

Figura 2: Planos de manutenção das redes de referência 1

equipamentos sob manutenção preventiva. Esta característica já era esperada; afinal, o cálculo de FEC leva em conta o parâmetro N_s como forma de indicar a característica radial das redes de

distribuição.

A Tabela 2 apresenta informações referentes às 3 redes de referência utilizadas no estudo de caso desta seção e o tempo computacional requerido para construção das Figuras 3(a) à 3(c), referentes às curvas de Pareto de cada rede. Nota-se que a topologia das redes 2 e 3 são distintas. Usberti et al. (2015) utilizaram a rede 1 em seu trabalho e o tempo necessário para construir a curva de Pareto foi 8,65 segundos. Às 3 redes, foi utilizado taxa de juros igual a 10% e horizonte de 3 anos de planejamento. Destaca-se que essas curvas apresentam soluções para todo o intervalo factível do índice de confiabilidade FEC.

Tabela 2: Características das redes de referência e tempo computacional

	Rede 1	Rede 2	Rede 3
Seções	7	8	8
Consumidores	34	38	38
Componentes	4000	5200	5200
Tempo [s]	8, 16	25, 72	15, 23

4.2. Estudos de Casos de Nível Global

A Figura 3 apresenta as curvas de Pareto obtidas às redes de referência. Nota-se que cada curva da Figura 3 apresenta 30 pontos, ou seja, são 30 planos de alocação de recursos de manutenção preventiva distintos. A Figura 3(d) foi obtida por meio do modelo da Seção 3.2 e representa o plano de manutenção do grupo elétrico formado pelas 3 redes de referência.

Em relação aos resultados das Figuras 3(a) à 3(c), nota-se que o MRAP linear inteiro obteve soluções iguais ou superiores (o que já era esperado pois a otimalidade foi atingida em todos os casos). Como exemplo, pode-se notar que à rede 1 com $FEC = 0.50$, o MRAP linear obteve custo de R\$ 11970,00, enquanto o MRAP obteve R\$ 17870,00. Trata-se de uma redução de 33,40% em custo.

É importante destacar que, diferente da abordagem heurística de Usberti et al. (2015), a abordagem aqui utilizada é exata e, assim, fornece apenas soluções não-dominadas ao problema de manutenção; naturalmente, tais soluções são as mais interessantes no processo de planejamento. Particularmente, a Figura 3(d) foi construída em 0,17 segundos, indicando a eficiência da abordagem. Usberti et al. (2015) usaram 2,35 segundos de processamento para compor o plano global de planejamento, utilizando o mesmo número de redes locais e número próximo de soluções por rede.

Pode-se notar que os pontos estão distribuídos uniformemente nas curvas da Figura 3, devido a utilização da Equação (29) para fornecer o parâmetro e_k ao modelo da Seção 3.1.3. O distanciamento do último ponto dessas curvas é decorrente da necessidade de aplicação de manutenção preventiva a praticamente todos os equipamentos da rede de distribuição para atingir o maior nível de confiabilidade da rede (FEC).

5. Considerações finais

As companhias de distribuição de energia elétrica precisam fornecer energia aos seus consumidores na melhor relação de custo e qualidade de serviço. Os índices de confiabilidade são indicadores do nível de qualidade do serviço prestado; otimizar a manutenção dos sistemas de distribuição de energia elétrica contribui para melhores índices de confiabilidade. Como custo e confiabilidade são critérios conflitantes, um conjunto de planos de manutenção pode ser elaborado para atender este “trade-off”.

Este trabalho desenvolveu uma metodologia para resolver o problema de alocação de recursos de manutenção em redes de distribuição utilizando programação linear inteira mista. As

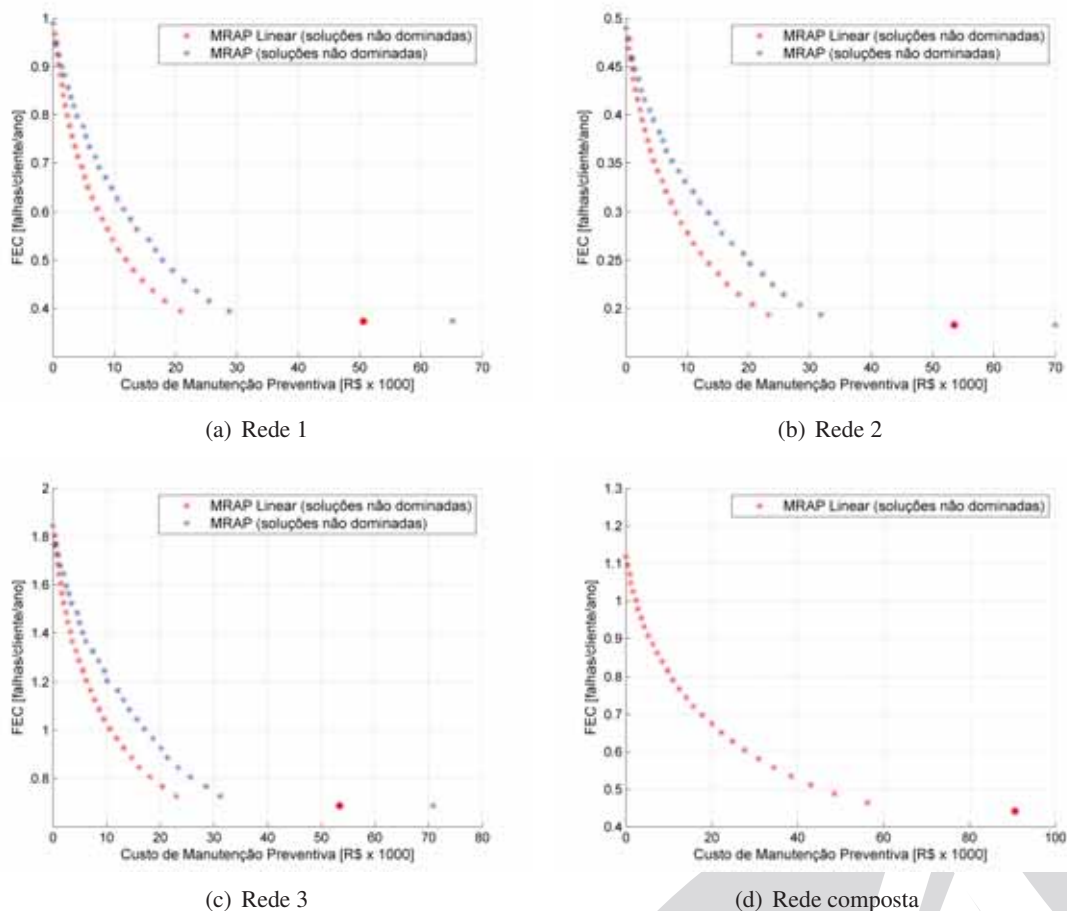


Figura 3: Planos de manutenção das redes de referência e plano global do grupo elétrico

principais características do problema são atendidas pelos dois modelos propostos. Essas características incluem os ciclos periódicos de planejamento, diferentes níveis de manutenção, soluções para atender o “trade-off” de custo e confiabilidade e a construção de planos de manutenção para o grupo elétrico como um todo. Restrições de disponibilidade de recursos e equipes de manutenção podem facilmente ser adicionadas à metodologia. Os resultados obtidos com a metodologia proposta foram superiores a resultados da literatura que tratam de redes de grande porte.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da CAPES e do CNPq. Os autores agradecem também aos colegas Eduardo Tadeu Bacalhau e Fábio Luiz Usberti pelas críticas e sugestões.

Referências

- Bacalhau, E. T., Usberti, F. L. & Lyra, C. (2013), A dynamic programming approach for optimal allocation of maintenance resources on power distribution networks, *in* ‘Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013 IEEE’.
- Billinton, R. & Billinton, J. E. (1989), ‘Distribution system reliability indices’, *IEEE Transactions on Power Delivery* **4**(1), 1670–1676.
- Brown, R. E. (2009), *Electric power distribution reliability*, CRC Press, New York.
- Brown, R. E. & Howe, B. (2000), *Optimal deployment of reliability investments*, E-Source Report PQ-6.

Reis, P. A. (2007), Otimização baseada em confiabilidade de planos de manutenção de sistemas de distribuição de energia elétrica, Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP - Brasil.

Sittithumwat, A., Soudi, F. & Tomsovic, K. (2004), 'Optimal allocation of distribution maintenance resources with limited information', *Electric Power Systems Research* **68**, 208–220.

Usberti, F. L., Lyra, C., Cavellucci, C. & González, J. F. V. (2015), 'Hierarchical multiple criteria optimization of maintenance activities on power distribution networks', *Annals of Operations Research* **224**(1), 171–192.

Williams, H. P. (1999), *Model building in mathematical programming*, 4 edn, John Wiley & Sons, Chichester - Inglaterra.

Wolsey, L. A. (1998), *Integer programming*, Wiley-Interscience.

