

Título	Desenvolvimento de Ferramenta para Priorização de Obras na Distribuição.
--------	---

Registration N°: (Abstract)	178
-----------------------------	-----

Empresa o Entidad
FUSP - Fundação de Apoio à Universidade de São Paulo Copel - Companhia Paranaense de Energia

Autores del Trabajo		
Nombre	País	e-mail
Marcus Rodrigo Carvalho	Brasil	marcus@gmail.com
Cleverson Luiz da Silva Pinto	Brasil	cleverson@copel.com
Bruno Yukio Enomoto	Brasil	bruno.enomoto@gmail.com
Fabiano Arantes	Brasil	fabiano.arantes@yahoo.com.br
Carlos Cesar Barioni de Oliveira	Brasil	barioni@pea.usp.br

Palabras Clave
Plano de investimentos, Priorização de Obras, Método de Otimização, Programação em Dois Níveis

Este artigo apresenta os resultados do projeto de P&D “Desenvolvimento de Ferramenta para Priorização de Obras na Distribuição”, cujo objetivo foi o desenvolvimento de um novo modelo de seleção e priorização de obras de expansão e melhoria no sistema de distribuição (tensões de 13,8 kV e 34,5 kV) da Copel baseado em critérios econômico-financeiros. O modelo de priorização baseou-se na metodologia Payoff de cálculo de relação custo-benefício de obras, em um método de otimização em dois níveis e programação por metas. Foi desenvolvido um sistema computacional de aplicação do modelo, para utilização na empresa integrado aos sistemas corporativos.

O problema de priorização de obras tem, por definição, o objetivo de obter a máxima melhoria no fornecimento de energia, com menor investimento possível através da realização de um conjunto de obras. Esses objetivos são conflitantes entre si, isto é, é impossível melhorar um sem deterioração do segundo. Portanto desenvolveu-se um método multi-critério, sendo possível dar prioridades para cada indicador técnico. O modelo desenvolvido está associado a uma metodologia em dois níveis envolvendo dois agentes de decisão e de programação por metas, inéditas em aplicações nesta área de engenharia. O primeiro agente busca, restrito a um orçamento, fazer com que o de maior número de conjuntos/regionais atinjam uma meta pré-estabelecida. Enquanto que o segundo agente determina qual a melhor combinação de obras para que cada conjunto/regional atinja sua meta. A cada iteração do nível superior e inferior é utilizado um algoritmo de otimização linear inteiro (PLI) para encontrar a melhor solução. O software gera uma formulação padrão e o algoritmo de enumeração implícita implementado resolve o problema. O método de enumeração baseou-se no algoritmo de Balas.

Possibilidade de criar cenários com diferentes metas e orçamentos, seguindo diretrizes da empresa, e comparação entre eles. Torna-se possível justificar os investimentos de forma eficaz, consolidando a maximização do lucro à realidade regulatória, e trazendo maior segurança aos investidores e consumidores. O modelo desenvolvido garante a otimização dos recursos aplicados na melhoria dos sistemas, através de um algoritmo eficiente, robusto e com baixo tempo de execução.

INTRODUÇÃO

O aumento da demanda e o subsequente aumento nos fluxos de potência geram sobrecarga dos alimentadores e transformadores, diminuição do nível de tensão e o aumento das perdas na rede elétrica. Nesse cenário, possíveis ações podem ser tomadas através da execução de obras como a instalação de novos alimentadores, subestações ou transformadores em subestações existentes.

Com as novas regulamentações do setor elétrico brasileiro, em especial o Módulo 2 – Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição do PRODIST - Procedimentos de Distribuição, tornou-se obrigatório o envio para Agência Nacional de Energia Elétrica – Aneel o Plano de Obras do Sistema de Distribuição de Média Tensão através do PDD - Plano de Desenvolvimento da Distribuição. Portanto, na elaboração do plano de investimentos de expansão deve-se considerar os ganhos nos indicadores técnicos, de forma a se atender as metas e valores limites estabelecidos bem como analisar os custos necessários para melhorias adicionais, garantindo assim investimentos “prudentes” e o reconhecimento destes na parcela que vai pertencer à base de remuneração.

Essa mudança obrigou as concessionárias a observarem outros aspectos para a alocação e priorização de seus investimentos, além dos tradicionais. Fatores como recursos financeiros e os índices de continuidade passaram a ser decisivos sobre quando, onde e como se deve intervir no sistema de distribuição.

Para realizar o programa de obras, sob um montante de investimentos específico, foi desenvolvida uma metodologia matemática que permite a comparação entre as obras propostas e elencar as melhores delas para atender ao objetivo proposto, que são melhorias do sistema que garantam um nível mínimo de qualidade de serviço (continuidade e faixa de regulação de tensão), respeitando o limite orçamentário aprovado pela empresa.

O problema de priorização de obras apresenta, por definição, o objetivo de obter a máxima melhoria no fornecimento de energia, com menor investimento possível através da realização de um conjunto de obras. Esses objetivos são conflitantes entre si, isto é, é impossível melhorar um sem deterioração do segundo. Portanto desenvolveu-se um método multi-critério, sendo assim possível dar prioridades para cada indicador técnico. O modelo de priorização

desenvolvido está associado a uma metodologia em dois níveis envolvendo dois agentes de decisão e de programação por metas, inéditas em aplicações nesta área de engenharia. O primeiro agente - superior ou líder – busca, restrito a um orçamento, fazer com que o de maior número de conjuntos/regionais atinjam uma meta pré-estabelecida. Enquanto que o segundo agente - inferior ou seguidor – determina qual a melhor combinação de obras para que cada conjunto/regional atinja sua meta.

A cada iteração do nível superior e inferior é utilizado um algoritmo de otimização linear e inteiro (PLI) para encontrar a melhor solução. O software gera uma formulação padrão, que pode ser visualizada em um arquivo de log, e o algoritmo de enumeração implícita implementado resolve o problema. O método de enumeração baseou-se no algoritmo de Balas.

Dessa forma torna-se possível justificar os investimentos de forma eficaz, consolidando a maximização do lucro à realidade regulatória, e trazendo assim maior segurança aos investidores.

O modelo desenvolvido garante a otimização dos recursos aplicados na melhoria dos sistemas, através de um algoritmo eficiente e robusto, com baixo tempo de execução.

ESPECIFICAÇÃO DO CÁLCULO DE CUSTOS E BENEFÍCIOS DAS OBRAS

A partir da definição de alternativas viáveis de obras foi concebido um modelo baseado no método Payoff [4] de valoração econômica dos benefícios. Método do Payoff é o nome dado ao método de priorização de obras de Distribuição utilizado pela Copel – Companhia Paranaense de Energia. Foi idealizado em 1995 e é utilizado desde este ano, para suprir a necessidade da Engenharia da Distribuição, área de planejamento, para priorizar as obras que compõem o Programa de Obras da Distribuição. Este método não se aplica para selecionar alternativas de obras, mas serve para priorizar obras previamente escolhidas, que já representam as melhores alternativas para a solução de problemas no Sistema de Distribuição, do ponto de vista técnico e econômico.

Desta forma, a partir do custo das obras e o correspondente benefício econômico auferido (ambos globais ou anualizados), realiza-se o cálculo do Payoff. Tal indicador constitui-se em um poderoso referencial para comparação de obras visando a determinação das melhores alternativas possíveis de seleção, o que pode ser bastante relevante, seja num contexto de restrição orçamentária, ou opostamente,

em cenários de abundância de recursos para investimentos em obras de expansão/melhoria.

Como o custo de cada obra é conhecido, calculado através de parâmetros médios, o custo do benefício foi obtido através de um equacionamento específico para cada classe de obras, ou seja, as obras foram caracterizadas pela natureza do serviço e então as de mesma natureza foram agrupadas em módulos.

Portanto, o benefício econômico auferido pelas obras foi equacionado num contexto integrado, agregando-se as valorações de todos os indicadores melhorados. Na avaliação das valorações econômicas, incluiu-se desde o benefício efetivo, mensurável a partir da redução de alguns indicadores (como as perdas técnicas, por exemplo), a outras parcelas estimadas em decorrência da redução das multas regulatórias imputadas à concessionária (por exemplo, pelas transgressões dos critérios de queda de tensão e continuidade).

São avaliados para cada módulo o ganho em:

- Redução do indicador DEC;
- Redução do indicador FEC;
- Diminuição das Perdas;
- Melhoria do Nível de Tensão;
- Redução dos custos de Operação e Manutenção;
- Diminuição da Energia não Distribuída.

Assim, todas as obras são trazidas para o mesmo patamar e podem ser comparadas entre si.

MODELO DE PRIORIZAÇÃO

Metodologia

O modelo de priorização desenvolvido possui dois objetivos: o primeiro é a preocupação em otimizar o benefício global da empresa. O segundo é a preocupação em otimizar o benefício individual de cada conjunto/regional por indicador. Para tratar com estes dois objetivos, foi utilizada a programação multi-nível, mais especificamente, a programação em dois níveis, conhecida com BLPP – Bilevel Programming Problem. Aplicações desta classe de programação matemática são inéditas nesta área.

Os problemas de otimização em dois níveis se caracterizam pelo fato de que um subconjunto de suas variáveis devem resolver um problema de otimização parametrizado por outras variáveis, chamado problema de segundo nível. Esta estrutura é importante para a modelagem de diversas situações práticas, envolvendo hierarquias de decisão.

Uma das vantagens do uso desta classe de programação matemática é a necessidade de obter uma única função que represente adequadamente os

objetivos da alta direção e divisões subordinadas. No caso deste trabalho, o objetivo da alta direção da empresa é representado no nível superior por desejar colocar a maior quantidade de conjuntos dentro da meta, enquanto que o objetivo das divisões subordinadas, representada aqui pelos conjuntos, seria colocar o seu conjunto dentro da meta, não importando-se com os outros.

A cada iteração entre o nível superior e inferior é utilizado um algoritmo de otimização Programação Linear Inteira, sendo possível escolher dentre três objetivos: Minimizar o Investimento, Maximizar o Benefício ou Minimizar o Payoff.

Enumeração Implícita (Método de Balas)

A programação inteira binária surge com a necessidade de modelagem dos problemas através de variáveis de decisão, onde cada variável pode assumir o valor 0 ou 1, que aplicada ao problema de priorização corresponde a “realizar” ou “não realizar” a obra.

Para resolver o PLI foi utilizado o método de enumeração implícita Algoritmo Aditivo ou Método de Balas devido sua maior velocidade de processamento e simplicidade de programação. Este método será apresentado em detalhes no próximo capítulo.

A enumeração implícita consiste em um processo de resolução de problemas de otimização para variáveis de decisão que assumem valores 0 ou 1, conforme é apresentado nas equações:

$$\begin{aligned} \min Z &= \sum_{j=1}^n c_j x_j \\ \text{s.a.} \\ \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j + S_i &= b_i \quad i = 1, 2, \dots, m \\ x_j &= 0 \text{ ou } 1 \\ S_i &\in \mathbb{R}^+ \end{aligned} \quad (1)$$

A idéia básica é utilizar o método de busca em árvore, no qual devem ser enumeradas todas as 2^n possíveis soluções do problema, sendo que muitas soluções podem ser descartadas automaticamente, sem serem investigadas explicitamente. Um nó corresponde a uma possível solução binária para x , dois nós interligados possuem a mudança no valor de uma variável, conforme figura 1. Cada variável pode ter um de três estado: fixado em 1, fixado em 0 ou livre.

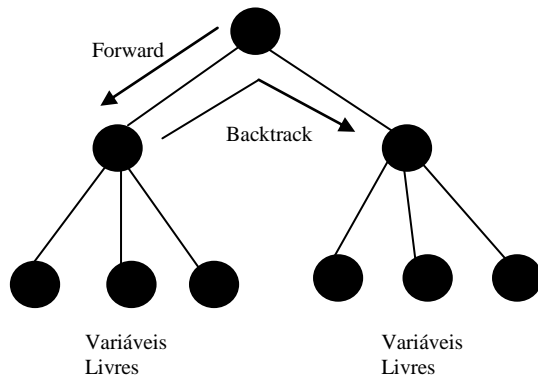


Figura 1 – Árvore de Busca – Search Tree.

Para aplicação deste algoritmo o problema deve obedecer a algumas restrições, sendo:

- Todas as restrições devem ser do tipo “ \leq ”;
- Todos os coeficientes (c_j) da função objetivo devem ser positivos. Caso $c_j \leq 0$, deve-se substituir a variável x_j por $x_j' = 1 - x_j$ na função objetivo e nas restrições;

Na execução do algoritmo inicialmente todas as variáveis decisão devem ter no valor 0. Se a solução correspondente não é viável, ou seja, algumas variáveis de folga S_i negativas, algumas variáveis devem ser passadas para o valor 1. A cada passo, uma variável deve ter seu valor alterado de 0 para 1, buscando tornar a solução viável, isto é, fazendo $S_i \geq 0$ para $\forall i$. Para colocar ou retirar uma variável na solução são efetuados alguns testes. Quando se identifica num nó da árvore de busca que não há solução viável ou que o valor da função objetivo é pior que a melhor solução já encontrada, realiza-se um procedimento de backtrack, ou seja, uma variável a qual foi atribuído o valor β_i tem seu valor fixado em $1 - \beta_i$. Algoritmo básico pode ser definido:

1. Fixar uma variável livre no valor 1;
2. Resolver o subproblema com as demais variáveis livres;
3. Fixar a mesma variável no valor 0 e repetir o processo para o subproblema com $x_j = 0$.

Os testes para seleção das variáveis são:

Teste 1: para cada variável livre x_i , se $a_{it} \geq 0$ para todo i correspondente a $S_i < 0$, então x_i não pode melhorar a inviabilidade do problema, e deve ser descartada;

Teste 2: para cada variável livre x_i , se

$c_i + z^t \geq \bar{Z}$ então x_i não pode levar a uma solução melhor e deve ser descartada;

Teste 3: para o conjunto N_i de variáveis livres não descartadas nos Testes 1 e 2, se para pelo menos uma das variáveis de folga $S_i < 0$ se verificar:

$$\sum_{i \in N_i} \min\{0, a_{ij}\} > S_i, \text{ então o conjunto não pode levar}$$

a uma solução viável, e todas as suas variáveis devem ser descartadas em conjunto;

Teste 4: se $N_i \neq \emptyset$ a nova variável x_k para ramificação será:

$$v_k = \max_{j \in N_i} v_j \quad (2)$$

Onde:

$$v_j = \sum_{i=1}^m \min\{0, S_i - a_{ij}\} \quad (3)$$

Programação em Dois Níveis e por Metas.

Os problemas de otimização em dois níveis se caracterizam por um subconjunto de variáveis que resolvem um problema de otimização parametrizado por outras variáveis, chamado problema de segundo nível. Esta estrutura é importante para a modelagem de diversas situações práticas, envolvendo hierarquias de decisão.

Uma situação comum nas empresas distribuidoras de energia elétrica é estar dentro dos limites de continuidade global da empresa, mas ter vários conjuntos que extrapolaram a meta.

Como o orçamento geralmente não é o suficiente para executar todas as obras de melhoria previstas, busca-se a melhor aplicação do orçamento para tirar a maior quantidade de conjuntos da transgressão relativa aos limites de continuidade exigidos.

O primeiro processo de otimização (nível inferior) seleciona as melhores obras para cada conjunto. Em seguida, é aplicado o segundo processo de otimização (nível superior), que seleciona os melhores conjuntos.

São formulados problemas de forma que o resultado seja o mínimo de obras que garantam a meta estipulada para o Conjunto/Região. As metas para os indicadores podem ser cadastradas por valores ou em porcentagem de redução (variação).

Sendo assim o problema nível inferior se encarrega de colocar os conjuntos e regionais nas metas. E o problema de nível superior seleciona os

melhores conjuntos para receber as obras, restrito ao orçamento disponível.

Para atender as metas, são feitas iterações de forma a selecionar o mínimo de obras que garantem a meta estipulada para o Conjunto/Região. Este procedimento é feito em dois níveis. O problema de Nível 1, pode ser minimizar o Investimento ou Maximizar o Benefício.

▪ Problema de Nível 1 (Escravo)

São feitas iterações para cada conjunto/região, obtendo como resposta as variáveis de decisão. Essas variáveis são as obras que deverão ou não ser feitas em cada conjunto/região. Abaixo, apresenta-se o equacionamento da função Nível 1:

$$\begin{aligned} & \text{FUNC - OBJ} \\ & \text{sujeito a condição} \\ & \sum_{j=1}^m \text{Melhoria} \cdot X_{ij} \geq \text{Meta} \\ & \text{onde:} \\ & m = \text{número de obras no conjunto / região } i \\ & X_{ij} = \text{var. de decisão} \\ & n = \text{numero total de conjuntos} \end{aligned} \quad (4)$$

Para garantir uma análise mais ampla é possível que o planejador opte pela função objetivo, ou seja, a função objetivo *FUNC-OBJ* acima pode assumir:

1. Minimizar o investimento total:

$$\text{MIN} \sum_{j=1}^m \text{InvTotal}(CJ_{ij}) \cdot X_{ij} \quad (5)$$

2. Maximizar o benefício:

$$\text{MAX} \sum_{j=1}^M \text{Beneficio}(CJ_{ij}) \quad (6)$$

3. Minimizar o PAYOFF:

$$\text{MIN} \sum_{j=1}^m \text{PAYOFF}(CJ_{ij}) \cdot X_{ij} \quad (7)$$

▪ Problema de Nível 2 (Mestre)

O objetivo do Nível 2 é colocar o maior número de conjuntos/regionais na meta, maximizando o benefício, sendo restrito ao orçamento disponível.

A função do Nível 2 é selecionar os conjuntos/regiões, cujas obras serão executadas. Se o mestre rejeitar algum conjunto/região, nenhuma obra deste conjunto/região será realizada.

O Problema de Nível 2, consiste em analisar o

benefício (financeiro) de cada região/conjunto, e selecionar todas as obras de cada conjunto de obras que maximizam o benefício e custe menos que ao orçamento disponibilizado para o projeto.

$$\begin{aligned} & \text{MAX} \sum_{j=1}^m \text{Beneficio}(CJ_j) \cdot X_j \\ & \text{sujeito a condição} \\ & \sum_{j=1}^m \text{Investimento}(CJ_j) \cdot X_j \leq \text{Orçamento} \\ & \text{onde:} \\ & m = \text{número de conjuntos} \\ & X_j = \text{var. de decisão} \end{aligned} \quad (8)$$

TESTES E RESULTADOS

Nesta seção, apresentam-se os dados e os resultados obtidos empregando o algoritmo de priorização de obras implementado em um caso teste, um Plano de Obras com 250 obras, apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Plano de Obras Caso Teste.

Descrição	Quantidade
Quantidade de Obras	250
Quantidade de Conjuntos	25
Conjuntos fora da meta DEC	25
Conjuntos fora da meta FEC	15
Custo realização de todas as Obras	R\$ 395.708.965,25
Investimento Disponível	R\$ 98.927.241,31

A sequência de prioridade dos indicadores definida para este Caso Teste foi: DEC, FEC, Perdas, Queda de Tensão, O&M, END. A função objetivo escolhida foi “Minimizar Investimentos” como pode ser observado na Figura 2.

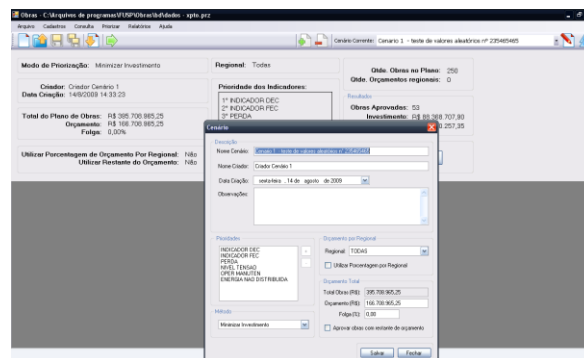


Figura 2 – Dados de Entrada Caso Teste.

Os resultados da simulação foram comparados

a uma metodologia de priorização tradicional. O modelo tradicional trata-se de uma hierarquização das obras pela relação custo benefício (Payoff) aprovando as obras em ordem crescente de Payoff enquanto o somatório dos investimentos for menor que o orçamento disponível.

Como podemos observar na Tabela 2 o método desenvolvido fez com que mais conjuntos atingissem a meta para os indicadores de qualidade DEC e FEC.

Tabela 2 – Resultados Indicadores DEC e FEC.

	Nº Conjuntos que Atingiram a Meta		Nº Obras Aprovadas
	DEC	FEC	
Algoritmo Desenvolvido	23	25	77
Método Tradicional	11	21	104

Os resultados para os demais indicadores podem ser observados na Tabela 3. Devido à opção do planejador de dar maior prioridade aos indicadores DEC e FEC os demais indicadores tiveram uma melhoria inferior ao método tradicional. Podemos destacar este resultado como sendo a grande contribuição do modelo desenvolvido, pois o planejador dispõe de uma ferramenta computacional eficiente capaz de seguir diretrizes de investimentos e realizar estudos específicos para análise do plano de obras.

Tabela 3 – Resultados Demais Indicadores.

	Melhoria (%)			
	Perdas	Tensão	O&M	END
Algoritmo Desenvolvido	31,32	0,32	11,20	1,75
Método Tradicional	40,33	4,37	27,50	2,38

CONCLUSÃO

O presente artigo mostrou um novo equacionamento e propôs uma nova abordagem no processo de priorização de obras dos sistemas de distribuição. Para tanto, além das análises efetuadas nos estudos de priorização já adotados pela Copel,

buscou-se complementar os modelos específicos com os seguintes aspectos:

- Análise de novos módulos de obras;
- Concepção de um novo modelo de priorização, baseado numa nova abordagem do algoritmo de otimização de Balas, programação em dois níveis e programação por metas;
- Possibilidade de criar cenários com diferentes funções objetivos, metas, plano de obras e orçamentos, seguindo diretrizes da empresa, com possibilidade de comparação entre eles.

Certamente, o conhecimento mais embasado destes novos aspectos, além das proposições metodológicas, garantirão resultados mais efetivos do plano de obras anual da Copel, possibilitando uma sensível melhoria da qualidade do serviço prestado aos consumidores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PINTO, Cleverson Luiz da Silva. "Otimização em dois níveis aplicada a priorização de obras do sistema de distribuição, voltada ao cumprimento dos índices de continuidade. Tese de doutorado - Escola Politécnica USP 2008.
- [2] GOUVEA, M. R. Bases Conceituais para o Planejamento Agragado de Investimentos. Tese de doutorado - EPUSP 1994
- [3] KAGAN, N. Planejamento de redes de distribuição secundária: Tese de mestrado EPUSP 1988
- [4] COPEL DISTRIBUIÇÃO, "Priorização de Obras de Distribuição - Método do Payoff" - Curitiba, revisão : 02/2002.
- [5] ELETROBRÁS - COMITÊ DE DISTRIBUIÇÃO. Planejamento de Sistemas de Distribuição. Rio de Janeiro, Campus, 1982. (Coleção Distribuição de Energia Elétrica, v.1)
- [6] GRUPELLI Jr, F. A. ; AZONI, E. G. Priorização de Obras usando Solução de Data Warehouse - XIV SENDI - Foz do Iguaçu, 2000
- [7] HARRISON, Thomas H., Intranet Data Warehouse , Editora Berkeley 1998
- [8] SWEDPOWER, Network Planning ,Stocolmo, 1999.
- [9] PENIN, C. A. S. Análise de índices de qualidade no planejamento agregado de investimentos em ambiente de incertezas. Tese de mestrado EPUSP 1999
- [10] Power Distribution Planning Willis, H Lee NY-1997