CLEVERSON LUIZ DA SILVA PINTO

OTIMIZAÇÃO EM DOIS NÍVEIS APLICADA A PRIORIZAÇÃO DE OBRAS
DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO, VOLTADA AO CUMPRIMENTO DOS
ÍNDICES DE CONTINUIDADE

SÃO PAULO

2008

CLEVERSON LUIZ DA SILVA PINTO

**OTIMIZAÇÃO EM DOIS NÍVEIS APLICADA A PRIORIZAÇÃO DE OBRAS
DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO, VOLTADA AO CUMPRIMENTO DOS
ÍNDICES DE CONTINUIDADE**

**Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Engenharia.**

São Paulo

2008

CLEVERSON LUIZ DA SILVA PINTO

**OTIMIZAÇÃO EM DOIS NÍVEIS APLICADA A PRIORIZAÇÃO DE OBRAS
DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO, VOLTADA AO CUMPRIMENTO DOS
ÍNDICES DE CONTINUIDADE**

**Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Engenharia.**

Área de Concentração:

Sistemas de Potência

**Orientador: Professor Doutor Carlos
César Barioni de Oliveira.**

São Paulo

2008

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de março de 2008.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

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 / C.L.S. Pinto. -- ed.rev. -- São Paulo, 2008.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1. Sistemas de distribuição de energia elétrica 2. Otimização em dois níveis 3. Priorização de obras (Otimização) I. Universida-de de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenha-ria de Energia e Automação Elétricas II. t.

DEDICATÓRIA

A Luciana, Gustavo e Nicolas.

AGRADECIMENTOS

Desejo expressar meus sinceros agradecimentos:

A Deus, por iluminar meu caminho nos momentos difíceis.

Ao professor Carlos César Barioni de Oliveira, orientador deste trabalho, pela orientação, apoio e horas de discussão.

Aos professores Yuan Jin Yun e Luis Carlos Matioli, do departamento de Matemática da UFPR, pelas discussões e sugestões, que contribuíram para a execução deste trabalho.

Aos colegas de trabalho da COPEL, que muito contribuíram com sua experiência profissional, em especial a Antonio Synarle de Serpa Soares, José Molinari Pinto, Fernando Antonio Grupelli Jr. e Marcos Anselmo Ribeiro.

Ao matemático Aramis, pela programação da interface em visual basic.

A COPEL- COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA, por permitir que fizesse este trabalho.

A ANEEL, que com seu programa de Pesquisa e Desenvolvimento, proporciona oportunidades para que funcionários de concessionárias possam executar projetos de pesquisa.

A minha família, por me apoiar e incentivar, em especial a minha esposa Luciana pelo carinho, compreensão e companheirismo e aos meus filhos Gustavo e Nicolas.

Nada no mundo pode substituir a persistência.

O talento não pode; nada mais comum que pessoas mal-sucedidas com talento.

A genialidade não pode; gênios não recompensados é quase um provérbio.

A educação não pode; o mundo está cheio de cultos desamparados.

Apenas a persistência e a determinação são onipotentes.

O lema 'segue adiante' sempre resolveu os problemas da raça humana.

Calvin Coolidge (1872-1933), político norte-americano.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é propor uma metodologia para a priorização de obras do sistema de distribuição de média tensão - até 36 kV - voltada ao cumprimento do índice de continuidade DEC e FEC imposto pela ANEEL, visando reduzir a quantidade de conjuntos que estão fora dos limites e que geram multas para a empresa frente ao órgão regulador e aos consumidores. Inicialmente, os diversos tipos de obras têm seu benefício calculado com o uso do Método do Payoff Simplificado, baseado no Método do Payoff COPEL, que consiste na extração somente da parcela relativa a interrupção, no DEC ou FEC, que determinada obra trará ao sistema. De posse deste benefício estimado, as obras foram analisadas de duas maneiras: geral e por conjunto. A análise Geral consiste em observar as obras propostas de maneira independente, preocupando-se com o benefício que elas trarão para a empresa como um todo. Na análise por conjunto, as obras são agrupadas por conjunto ANEEL, e o objetivo é a colocação da maior quantidade de conjuntos dentro dos limites de continuidade impostos pelo órgão regulador. A definição do objetivo apropriado é que irá orientar todo o processo de seleção das obras. Para isso são propostos modelos matemáticos, e para trabalhar com eles, foi utilizada como ferramenta a programação matemática. Foram realizadas simulações divididas em dois grupos: no primeiro, análise geral, a otimização é executada diretamente. Já no segundo, na análise por conjunto, é aplicada a programação multi-nível, mais especificamente, a programação em dois níveis ("Bilevel Programming Problem"), utilizando a programação inteira ou por metas ("goal programming"). Os resultados das simulações mostraram que o objetivo principal, que é tirar a maior quantidade de conjuntos da transgressão, foi atingido com menor orçamento com o uso da metodologia e dos modelos matemáticos empregados neste trabalho. A metodologia proposta pretende ser uma ferramenta adicional para as concessionárias de distribuição de energia elétrica que normalmente elaboram programas de obras específicos para redução de índices de continuidade ou quando pressionados pelo órgão regulador elaboram programas alternativos que compete pelo mesmo orçamento frente aos programas de obras tradicionais.

Palavras-chave: Sistemas de distribuição de energia elétrica. Priorização de obras.
Otimização em dois níveis.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to propose a methodology to prioritize planned works in the medium-voltage distribution system - up to 36 kV - aiming to adequate the DEC and FEC continuity index to the limits defined by the Brazilian regulatory agency (ANEEL) through the reduction of the number of sets out of target and consequently the reduction of monetary penalties to the utility imposed by the regulatory agency and consumers. At first every planned work has its benefit calculated by the Simplified Payoff Method which is based on COPEL Payoff Method and which consists in extracting just the interruption event from the DEC or FEC which a given work will bring to the system. Once you have got the estimated benefit, the planned works are analyzed in two different ways – general analysis and set analysis. General analysis consists in checking up proposed works independently, focusing on the benefit they will bring to the company as a whole. In the set analysis, works are grouped by “ANEEL sets” and the main aim is to gather the greatest number of sets into the continuity limits defined by the regulatory agency. The aims definition will lead the whole work selection process. To achieve that mathematical models are proposed and mathematical programming tools are used. Two groups of simulations were done – in the first one which is also called general analysis, optimization is executed directly. The second one called set analysis, is applied the bilevel programming using the integer programming or goal programming. The simulation results showed that the main aim which was to eliminate the greatest number of sets from the transgression was reached with a lower budget using the methodology and mathematical models. The proposed methodology intends to be an additional tool to the electricity distribution companies (utilities). These companies usually plan specific works to reduce the continuity index or when they are pressed by regulatory agencies, they plan alternative programs which compete by the same budget facing traditional work programs.

Key-words: Distribution Systems. Work Prioritisation. Bilevel Optimization.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
CI	Consumidor Interrompido
CIER	Comissão de Integração Energética Regional
CHI	Consumidor Hora Interrompido
COD	Centro de Operação da Distribuição
CODI	Comitê de Distribuição
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DIC	Duração de Interrupção por Unidade Consumidora
DMIC	Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
ELETROBRAS	Centrais Elétricas Brasileiras S.A.
END	Energia Não Distribuída
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FIC	Frequência de Interrupção por Unidade Consumidora
FM	Falha Momentânea ou Interrupção Momentânea (menor que três minutos)
IEP	Índice Econômico de Priorização
ISD	Interrupções no Sistema de Distribuição
ITP	Índice Técnico de Priorização
LINGO	Aplicativo matemático para resolução de problemas de otimização desenvolvido pela LINDO SYSTEMS INC
RA	Religador Automático
RCB	Relação Custo Benefício
REO	Registro de Ocorrências
SE	Subestação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 METODOLOGIA	4
1.4 ESTRUTURA DA TESE	6
2 CONFIABILIDADE APLICADA A DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA	8
2.1 QUALIDADE DA ENERGIA	8
2.2 CONTINUIDADE DO FORNECIMENTO	10
2.3 INDICADORES DE DESEMPENHO DE CONTINUIDADE PARA O SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO	11
2.3.1 INTERRUPÇÕES CONSIDERADAS	12
2.4 ASPECTOS ECONÔMICOS DA CONTINUIDADE	14
2.5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.5.1 MÉTODO DO ÍNDICE E PRIORIDADE (IEP E ITP) (26)	22
2.5.2 MÉTODO DA ELETROBRÁS (27)	24
2.5.3 O MÉTODO DO PAYOFF COPEL (2)	28
3 METODOLOGIA GERAL PARA O PLANEJAMENTO VOLTADO AOS ÍNDICES DE CONTINUIDADE	33
3.1 VISÃO GERAL	33
3.2 O LEVANTAMENTO DE DADOS DE CONFIABILIDADE.	40
3.2.1 O REGISTRO DA INTERRUPÇÃO	42
3.2.2 A ENTRADA DE DADOS DE INTERRUPÇÕES	43
3.3 A ANÁLISE DOS DADOS DE INTERRUPÇÃO	44
3.3.1 OBTENÇÃO DOS ÍNDICES DE MEDIÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA	44
3.4 FORMULAÇÃO DAS ALTERNATIVAS DE OBRAS	46
3.5 ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA E SELEÇÃO DAS ALTERNATIVAS DE OBRAS	47
3.5.1 A ANÁLISE TÉCNICA	47
3.5.2 A ANÁLISE ECONÔMICA	48
3.6 A PRIORIZAÇÃO DE OBRAS	53
3.7 A ADAPTAÇÃO DO MÉTODO DO PAYOFF COPEL	55
3.7.1 INTERLIGAÇÃO DE RAMAIS, TRONCOS DE ALIMENTADORES E LINHAS	57

3.7.2 IMPLANTAÇÃO DE TRONCO DE ALIMENTADORES OU LINHA COM MUDANÇA DE CONFIGURAÇÃO	61
3.7.3 REDE COMPACTA	63
3.7.4 COMPLEMENTAÇÃO DE FASE EM RAMAIS MONOFÁSICOS	65
3.7.5 SUBSTITUIÇÃO DE ISOLADOR PINO POR PILAR	65
3.7.6 INSTALAÇÃO DE CHAVES INTERRUPTORAS SOB CARGA	66
3.7.7 IMPLANTAÇÃO DE SUBESTAÇÕES 34,5KV/13,8KV	66
3.7.8 INSTALAÇÃO DE RELIGADORES AUTOMÁTICOS E PINÇAMENTOS	68
3.7.9 TRANSFERÊNCIA AUTOMÁTICA DE CARGA ENTRE SES 34/13	68

4 PRIORIZAÇÃO DE OBRAS – ANÁLISE GERAL 71

4.1 A MODELAGEM MATEMÁTICA 71

4.2 MODELOS MATEMÁTICOS APLICADOS 75

4.2.1 MODELO DA RELAÇÃO CUSTO-BENEFÍCIO (RCB) 75

4.2.2 MODELO DO PAYOFF COPEL 77

4.2.3 MODELO DO PAYOFF MULTA 78

4.2.4 MAXIMIZAÇÃO DO BENEFÍCIO 78

4.2.5 MODELO UTILIZANDO A PENALIDADE 79

4.2.6 MODELO UTILIZANDO O MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS 81

4.3 ANÁLISE CONSIDERANDO O CHI E O CI 84

4.3.1 MODELO MATEMÁTICO CONSIDERANDO A ANÁLISE SIMPLIFICADA 85

4.3.2 MODELO MATEMÁTICO CONSIDERANDO A ANÁLISE CONVENCIONAL 87

4.4 SIMULAÇÕES 88

4.4.1 APLICATIVO PARA SIMULAÇÕES 88

4.4.2 CASO EXEMPLO 89

4.5 SIMULAÇÕES PARA A ANÁLISE GERAL 90

4.5.1 SIMULAÇÕES UTILIZANDO O CHI 91

4.5.2 SIMULAÇÕES UTILIZANDO O CI 94

4.5.3 SIMULAÇÕES UTILIZANDO O CI E O CHI – ANÁLISE SIMPLIFICADA 97

4.5.4 SIMULAÇÕES UTILIZANDO O CI E O CHI – ANÁLISE CONVENCIONAL 98

4.6 CONCLUSÕES PRELIMINARES SOBRE A ANÁLISE GERAL 101

5 PRIORIZAÇÃO DE OBRAS UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO EM DOIS NÍVEIS E PROGRAMAÇÃO POR METAS 103

5.1 INTRODUÇÃO 103

5.2 RESTRIÇÕES PARA CONJUNTOS 105

5.3 A OTIMIZAÇÃO EM DOIS NÍVEIS 107

5.3.1	FORMULAÇÃO E DEFINIÇÕES	109
5.3.2	APLICAÇÃO DO PROBLEMA EM DOIS NÍVEIS	111
5.4	MODELAGEM MATEMÁTICA UTILIZANDO A OTIMIZAÇÃO EM DOIS NÍVEIS	113
5.4.1	MODELO UTILIZANDO O CHI	113
5.4.2	MODELO UTILIZANDO O CI	115
5.4.3	MODELO UTILIZANDO O CHI+CI – ANÁLISE SIMPLIFICADA	116
5.4.4	MODELO UTILIZANDO O CHI+CI – ANÁLISE CONVENCIONAL	117
5.5	SIMULAÇÕES COM A PROGRAMAÇÃO EM DOIS NÍVEIS	118
5.5.1	SIMULAÇÕES UTILIZANDO O CHI	119
5.5.2	SIMULAÇÕES UTILIZANDO O CI	123
5.5.3	SIMULAÇÕES UTILIZANDO O CHI E O CI – ANÁLISE SIMPLIFICADA	124
5.5.4	SIMULAÇÕES UTILIZANDO O CHI E O CI – ANÁLISE CONVENCIONAL	125
5.6	PROGRAMAÇÃO POR METAS (GOAL PROGRAMMING)	129
5.7	MODELAGEM MATEMÁTICA UTILIZANDO A PROGRAMAÇÃO POR METAS	131
5.7.1	MODELO UTILIZANDO O CHI	132
5.7.2	MODELAGEM MATEMÁTICA UTILIZANDO O CHI E O CI	135
5.8	SIMULAÇÕES UTILIZANDO A PROGRAMAÇÃO POR METAS	137
5.8.1	SIMULAÇÕES UTILIZANDO O CHI	137
5.8.2	SIMULAÇÕES UTILIZANDO O CHI E O CI	139
5.9	CONCLUSÕES PRELIMINARES PARA A ANÁLISE POR CONJUNTO.	141
6	CONCLUSÕES DO TRABALHO	145
6.1	ASPECTOS GERAIS	145
6.2	LIMITAÇÕES DA METODOLOGIA	148
6.3	CONTRIBUIÇÕES	148
6.4	SUGESTÕES PARA FUTUROS ESTUDOS	151
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	153
	BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA	160
	ANEXO A	161
	ANEXO B	166
	ANEXO C	170

ANEXO D

173

ANEXO E

175

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Tradicionalmente, as metodologias de priorização de obras do sistema de distribuição são direcionadas para o planejamento da expansão dos sistemas de energia elétrica, e têm seus esforços voltados para a execução de obras que atendam a vários critérios técnicos, tais como crescimento da carga, minimização de perdas, carregamento de alimentadores e transformadores, queda de tensão, energia não distribuída e outros.

Após a reestruturação do setor elétrico, iniciada no ano de 1996, com o começo do processo de privatização das empresas do setor e com a instituição de um órgão regulador (ANEEL), houve uma tendência maior ao controle dos índices de continuidade. Impostos pela resolução ANEEL 24/2000 (1) e pelo Contrato de Concessão, foram estabelecidos indicadores de continuidade individuais, coletivos (por conjunto de unidades consumidoras) e globais (para o total da concessionária) e definidos limites para cada um deles, sujeito a penalidade monetária pelo não cumprimento.

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. Estas intervenções na rede elétrica podem ser executadas através do aprimoramento da operação do sistema, reduzindo o tempo de restabelecimento, gerenciamento da manutenção ou através da elaboração de um plano de obras.

Focando no último caso, anualmente, a concessionária elabora um Plano de Obras para o sistema de distribuição, onde utiliza os critérios técnicos-econômicos tradicionais

do planejamento para análise das obras propostas, dos quais a melhoria da confiabilidade é um deles. Esta relação de obras não é voltada para a redução dos índices de confiabilidade, mas sim para atingir os vários objetivos do planejamento. Mesmo selecionando somente as obras que tenham por objetivo melhorar os índices de continuidade, ainda restaria o trabalho de priorizá-las, já que normalmente, os recursos financeiros disponibilizados pela empresa não são suficientes para executar todas.

Faz-se então necessário o desenvolvimento de uma metodologia matemática que permita a comparação entre as obras propostas para a melhoria dos índices de continuidade da rede, já analisadas e aprovadas do ponto de vista técnico-econômico. E a priorização das melhores delas para atender ao objetivo proposto, ou seja, cumprir com as metas impostas pelo órgão regulador, sempre restritas ao limite orçamentário aprovado pela empresa.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é elaborar uma metodologia para a priorização de obras do sistema de distribuição, voltada ao cumprimento dos índices de continuidade DEC e FEC impostos pela ANEEL, visando reduzir a quantidade de conjuntos que estão fora dos limites e que geram multas para a empresa frente ao órgão regulador e aos consumidores.

Os métodos atuais de priorização de obras, normalmente são voltados para os objetivos do planejamento tradicional e direcionados para a otimização global, ou seja, vêem a empresa como um todo, não se importando com os índices individuais de cada conjunto de consumidores. Além disso, raramente conseguem separar os efeitos dos dois índices de continuidade, o DEC e o FEC. Porém, o órgão regulador exige das concessionárias bom desempenho para o DEC e o FEC, não somente global, mas também por conjunto de consumidores ANEEL, que são agrupamento de

consumidores, subdivisão da área de concessão, sobre a qual se mede a qualidade do atendimento. Este conceito está melhor definido no capítulo 3.2. Surge então, a necessidade para as concessionárias de energia de dispor de uma metodologia de priorização de obras, que além de ser balizada pelos índices de continuidade DEC e FEC, seja também capaz de individualizá-los por conjunto, para que os investimentos sejam direcionados para aqueles sujeitos as maiores penalidades financeiras por estarem em transgressão com os limites a ele impostos.

Entra aqui o desafio desta tese, que é propor uma metodologia, de cunho prático e baseado nas práticas adotadas pelas concessionárias de distribuição, que permita executar a priorização de obras por conjunto, considerando os dois aspectos da interrupção, o DEC e o FEC e levando em conta parâmetros considerados importantes na escolha de obras, como o decréscimo das multas e o retorno financeiro. Este trabalho vem preencher uma lacuna existente nos métodos de priorização tradicionais.

Para cumprir com este objetivo, que é a elaboração de novos modelos matemáticos capazes de reproduzir as necessidades mencionadas, utiliza as técnicas matemáticas de programação em dois níveis e de programação por metas, inéditas em aplicações nesta área de engenharia.

A programação em dois níveis consegue captar e reproduzir os dois objetivos almejados pela empresa: priorizar as obras por conjunto e também sujeitá-las as regras da alta direção.

Os modelos propostos nesta tese de fato levam a resultados melhores que os métodos até então utilizados, e são um avanço na aplicação da matemática dentro da área. Os bons resultados desta metodologia frente aos modelos atualmente existentes são confirmados pelas simulações efetuadas no decorrer desta tese.

Enfim, metodologia proposta neste trabalho cumpre com o papel a que se propõem, que é ser uma ferramenta adicional para as concessionárias de distribuição de energia

elétrica que normalmente elaboram programas de obras específicos para redução de índices de continuidade ou quando pressionados pelo órgão regulador elaboram programas alternativos que competem pelo mesmo orçamento frente aos programas de obras tradicionais.

1.3 METODOLOGIA

A metodologia proposta para a priorização de obras no sistema de distribuição restringe-se a média tensão (até 36 kV). Parte da premissa que as obras que foram propostas já são as melhores alternativas estudadas e viáveis para a solução de determinado problema, tanto do ponto de vista técnico como econômico.

Inicialmente, os diversos tipos de obras têm seu benefício valorado através de dois itens em comum, o Consumidor Hora Interrompido (CHI) derivado do DEC, ou o Consumidor Interrompido (CI), derivado do FEC. Assim, todas as obras são trazidas para o mesmo patamar e podem ser comparadas entre elas. O cálculo deste benefício é feito com o uso do Método do Payoff Simplificado, baseado no Método do Payoff ¹ (2), que consiste na extração somente da parcela relativa a interrupção, em CI e/ou CHI, que determinada obra trará ao sistema, baseado no histórico de interrupções do ano anterior. É obtido através de um equacionamento específico para cada classe de obras, denominado módulos. De posse deste benefício estimado, as obras classificadas passam para a segunda etapa, e podem ser analisadas de duas maneiras: geral e por conjunto. Entra aqui a primeira contribuição desta tese, que é analisar as obras de dois pontos de vista diferenciado: global (análise geral) e local (análise por conjuntos), avaliando os efeitos do CHI, do CI, e dos dois juntos.

¹ N.A. – O método de priorização de obras adotado pela COPEL – Companhia Paranaense de Energia, internamente a empresa é denominado Método do Payoff e, doravante nesta tese, será denominado de Método do Payoff COPEL.

A análise geral consiste em observar as obras propostas de maneira independente, preocupando-se com o benefício que elas trarão para a empresa como um todo, sem dividi-las por conjuntos.

Na análise por conjunto, as obras são agrupadas por conjunto ANEEL e o objetivo é a colocação da maior quantidade de conjuntos dentro dos limites de continuidade impostos pelo órgão regulador. A determinação do benefício é por conjunto e são escolhidas as melhores obras para satisfazer este objetivo, não se importando com o resultado global.

Para trabalhar com estes modelos, será utilizado como ferramenta a programação matemática. Para a otimização de problemas na análise por conjunto, será utilizada a programação multi-nível, mais especificamente, a programação em dois níveis, conhecida com BLPP – Bilevel Programming Problem, sendo esta outra contribuição deste trabalho, já que 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 deve 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.

Outra grande contribuição deste trabalho é a elaboração de modelos matemáticos que reproduzam a sistemática da priorização de obras, tanto para o CHI, quanto para o CI e para ambos simultaneamente. Beneficiando-se dos modelos atualmente existentes e dos modelos elaborados no decorrer desta tese, o problema da priorização de obras será modelado matematicamente e simulado, utilizando a programação inteira em dois níveis e a programação por metas (“goal programming”), contemplando a análise geral e por conjuntos.

Para a simulação dos modelos mencionados, será utilizado o aplicativo comercial de

resolução de equações lineares e não lineares denominado LINGO, da LINDO SYSTEM INC. A simulação e resolução da otimização em dois níveis não é considerada trivial, mesmo para os casos mais simples, e por não haver o equacionamento pronto no LINGO, foi elaborado um aplicativo para resolução, utilizando a linguagem de programação visual basic.

A simulação contempla as duas formas de análise: geral e por conjunto, tendo o orçamento como principal restrição. Na análise geral, a função objetivo é escolhida e a otimização é executada diretamente. Já na análise por conjunto, as obras propostas são classificadas por conjunto e a otimização em dois níveis e a programação por metas são aplicadas. 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.

Terminado os dois níveis de otimização e ainda restando orçamento, mas não existindo mais conjuntos que possam ser colocados na meta, a verba excedente é dividida não mais entre os conjuntos, mas entre as obras restantes, observando os critérios de classificação geral.

Enfim, o resultado final é uma lista de obras restrita pelo orçamento proposto.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

A tese está dividida em 6 capítulos, onde se descreve todo o trabalho desenvolvido e os resultados obtidos, complementados por 3 anexos onde se encontram informações adicionais para melhor compreensão do trabalho, assim organizados:

- Capítulo 1 – Introdução ao tema, contextualização do problema, objetivos a serem

alcançados e resumo da metodologia proposta.

- Capítulo 2 – Apresentação de alguns conceitos de qualidade de energia, confiabilidade, continuidade e de interrupções, bem como uma revisão bibliográfica de alguns trabalhos nacionais e estrangeiros, pertinentes ao assunto.
- Capítulo 3 – Visão geral do processo de planejamento, voltado aos índices de continuidade. Inicia mostrando como é feito o registro da informação da interrupção pelo eletricitista até a obtenção da relação das obras escolhidas restritas pelo orçamento, passando pela análise técnico-econômica das alternativas propostas. Finaliza com a adaptação do equacionamento do benefício dos módulos do Método do Payoff COPEL (2) para a aplicação a metodologia de priorização de obras.
- Capítulo 4 – Neste capítulo, vários modelos matemáticos utilizados para classificação das obras são estudados. A Análise Geral é detalhada, sendo apresentado os modelos matemáticos, simulações e os resultados, em forma de gráficos. São realizadas várias simulações de priorização de obras avaliando diversos cenários, em um caso exemplo, que é parte do Programa de Obras 2005 da COPEL.
- Capítulo 5 – A priorização de obras voltada a conjuntos é apresentada e avaliada desde a modelagem matemática até a fase de simulação. Apresenta-se sob a forma de um problema de programação em dois níveis, que tem seus aspectos teóricos e matemáticos explanados. Utiliza os modelos propostos e efetua simulações, para a programação inteira e a programação por metas (“goal programming”). Termina com a exposição dos resultados e das conclusões preliminares.
- Capítulo 6 - Análise das principais conclusões deste trabalho e idéias originais apresentadas. Termina propondo sugestões para futuras linhas de investigação no tema tratado.

2 CONFIABILIDADE APLICADA A DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA

Neste capítulo será feita uma breve introdução ao assunto de confiabilidade aplicada ao sistema de distribuição. Inicialmente, serão explanados alguns conceitos de qualidade de energia, confiabilidade, continuidade e interrupção. A seguir, os aspectos econômicos da continuidade do fornecimento serão comentados. Por fim, será feita uma breve análise de algumas referências bibliográficas relevantes ao tema desenvolvido nesta tese.

2.1 QUALIDADE DA ENERGIA

A expressão “Qualidade da Energia Elétrica” tem sido amplamente utilizada no setor elétrico brasileiro, tanto por técnicos como por consumidores. Porém, ainda carece de uma definição de consenso, pois cada parte a emprega com um sentido diferente, dependendo do contexto. Em (3), o autor utilizou a seguinte definição: “Energia elétrica de boa qualidade é aquela que garante o funcionamento contínuo, seguro e adequado dos equipamentos elétricos e processos associados, sem afetar o meio-ambiente e o bem estar das pessoas”.

É utilizada para expressar, através de indicadores qualitativos e quantitativos, o padrão de serviço e de produto oferecido pelos diversos agentes do setor de energia elétrica aos consumidores. No setor de Distribuição, é proporcional ao performance das concessionárias. Para se estabelecer níveis adequados de qualidade de energia, é necessário verificar o quanto a sociedade está disposta a pagar por ela, pois a melhoria da qualidade implica em aumento de custos (4).

A qualidade do fornecimento da energia elétrica aos consumidores pode ser avaliada

através de três parâmetros fundamentais: atendimento ao consumidor, conformidade da tensão e continuidade do fornecimento (5).

- O atendimento ao consumidor abrange a relação comercial existente entre a concessionária e o consumidor. Considera a cortesia, o tempo de atendimento às solicitações de serviços, o grau de presteza e o respeito aos direitos do consumidor.
- A conformidade da tensão está diretamente relacionada a forma de onda. É avaliada por parâmetros como flutuações de tensão, distorções harmônicas, etc.
- A Continuidade do fornecimento é o grau de disponibilidade de energia elétrica para o consumidor. É o número e duração das interrupções e é o parâmetro que o consumidor tem maior sensibilidade. Causa grandes prejuízos monetários, tanto ao consumidor como para a concessionária, gerando grandes transtornos, afetando serviços essenciais e a cadeia produtiva. É o aspecto da qualidade de energia mais estudado na literatura, onde normalmente é chamada de confiabilidade.

Como o termo confiabilidade é amplo, nos estudos de sistemas de potência, pode-se subdividi-la em adequação (disponibilidade) e segurança do sistema (6). Adequação ou tolerância a falhas é a capacidade do sistema para satisfazer a demanda do consumidor em todo o instante, cumprindo as restrições da operação. Segurança é a capacidade do sistema para suportar o impacto das perturbações ou mudanças bruscas, tais como curtos-circuitos. A disponibilidade pode ser associada a condições estáticas e a segurança a condições dinâmicas, ou seja, depende do estado do sistema antes que ocorra a falha e da evolução do regime transitório. Geralmente, o termo confiabilidade refere-se a disponibilidade (6).

Porém, nem a qualidade do atendimento nem a conformidade da tensão são os focos desta tese. O objeto deste trabalho é analisar a continuidade do fornecimento, do ponto de vista das concessionárias de distribuição de energia elétrica. Atualmente é regulamentada pela Resolução ANEEL n° 24, de 27 de janeiro de 2000 (1).

2.2 CONTINUIDADE DO FORNECIMENTO

Dentro da estrutura do Sistema Elétrico de Potência, o sistema de Distribuição é a parcela que, a partir da Geração e Transmissão, entrega energia elétrica aos consumidores.

Os Sistemas de Distribuição são relativamente baratos em comparação com os sistemas de transmissão e geração e suas falhas tem efeito localizado (6). Por outro lado, a análise estatística mostra que a maioria das interrupções aos consumidores é devido a falhas no sistema de distribuição. No passado, receberam menos atenção nas modelagens para avaliação da confiabilidade do que sistemas de geração e transmissão. As principais razões estão nos altos custos envolvidos nestes últimos e as grandes proporções das conseqüências das falhas (6).

Os sistemas de distribuição têm seu desempenho relacionado a uma grande diversidade de fatores, tais como concepção, construção, qualidade dos materiais e equipamentos empregados, condições ambientais e eficiência da operação e da manutenção.

O seu desempenho, avaliado do ponto de vista da continuidade de energia, é medido através das interrupções, que são perdas de serviço para um ou mais consumidores e que são o resultado de uma ou mais saídas de componentes, dependendo da configuração do sistema (7).

Para fazer um diagnóstico das interrupções ocorridas, deve-se procurar identificar, para cada ocorrência, a circunstância ou o mecanismo que provocou o mau funcionamento do componente, a fim de definir os procedimentos que venham a minimizar sua reincidência. Da análise dessas ocorrências, as Empresas podem identificar o órgão de

sua estrutura que será acionado ou quais são as atividades a serem desenvolvidas para que o desempenho do sistema atinja o nível preestabelecido.

Também é muito importante o relacionamento das interrupções com a duração das mesmas, com o nível de tensão do componente que falhou ou foi deliberadamente colocado fora de serviço e com as condições climáticas no momento da interrupção. Isto facilitará a análise da situação do desempenho quanto à responsabilidade do componente no sistema e indicará as épocas do ano nas quais o clima contribuiu de forma acentuada na continuidade do serviço.

2.3 INDICADORES DE DESEMPENHO DE CONTINUIDADE PARA O SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

A medição da qualidade da energia elétrica depende da definição apropriada de indicadores que representem o desempenho dos serviços prestados pelas concessionárias. Estes indicadores, corretamente utilizados, permitem o controle e a monitoração do fornecimento de energia elétrica, a comparação de valores constatados ao longo de períodos determinados e, a partir de metas de qualidade definidas, a verificação dos resultados atingidos. Além de refletirem os níveis de qualidade, possibilitam a imposição de limites aceitáveis de interrupção de fornecimento. São ainda utilizados pelas concessionárias de energia elétrica como valores de referência para os processos de decisão nas etapas de planejamento, projeto, construção, operação e manutenção do sistema elétrico de distribuição. Além disso, através de ato normativo, o órgão regulador exige a medição de alguns índices de continuidade.

Os primeiros dispositivos de controle da continuidade de energia elétrica para as concessionárias de serviço público, foram inicialmente estabelecidos pela Portaria 046, de 17/04/78 (8), do antigo DNAEE (Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica). Nesta portaria foram definidos os índices coletivos denominados DEC –

Duração Equivalente de Interrupção por Consumidor – e FEC – Frequência Equivalente de Interrupção por Consumidor, porém, não previa penalidades para a concessionária que os violasse.

Com a evolução e a reestruturação do setor elétrico, estes índices passaram a ser incompatíveis com as novas exigências dos consumidores. Então, a ANEEL editou a Resolução nº 24, de 27 de janeiro de 2000. Entre outras novidades, manteve os indicadores de continuidade anteriores e criou novos indicadores individuais, estabelecendo padrões e metas para serem cumpridos pelas concessionárias, que estão sujeitas a penalidades e multas pelo não cumprimento. Introduziu novos critérios para a formação dos conjuntos de consumidores e estabeleceu que a apuração dos indicadores passaria a ser mensal, anual e trimestral. Também obrigou a informar o consumidor sobre os valores verificados e metas.

Os indicadores a serem analisados pelo órgão regulador foram estabelecidos através da Resolução 24/2000 (1) e do Contrato de Concessão (5), firmado individualmente com cada concessionária. São eles o DEC e o FEC (indicadores coletivos) e o DIC, FIC e DMIC (indicadores individuais). No anexo A estão definidos estes e alguns outros indicadores de confiabilidade encontrados na literatura, que podem ser calculados e utilizados para avaliar o desempenho passado ou esperado no futuro.

2.3.1 Interrupções Consideradas

Para a apuração dos índices de continuidade, devem ser consideradas todas as interrupções ocorridas em qualquer das partes do sistema elétrico, ou seja, na geração, transmissão, subtransmissão, interno a subestações ou na rede de distribuição, independente da sua natureza (programada, acidental, voluntária, etc.), admitidas apenas as seguintes exceções (1):

- interrupções com duração inferior a 3 minutos.
- interrupções de consumidores isolados, causados por falhas em suas instalações, desde que não afete outros consumidores;
- interrupções decorrentes de racionamento de energia elétrica, determinados de acordo com a lei.

Deve ter seu início considerado na data e horário da reclamação do consumidor ou da percepção/registro pela concessionária, o que ocorrer primeiro.

Apesar da interrupção com curta duração ser excluída do cálculo do DEC, serve como referencial de descontinuidade do sistema elétrico. É chamada de FM (falha momentânea ou interrupção momentânea) e é a interrupção com tempo de duração inferior a 3 (três) minutos, ocorridas no relé ou religador de saída do alimentador de distribuição ou de trecho (7).

A diminuição dos índices de continuidade pode ser obtida basicamente através de três tipos de ações:

- Através de obras

Aumento da disponibilidade do sistema com a realização de obras que aumentem a robustez do sistema. A priorização deste tipo de ação que é o objetivo desta tese.

- Através de manutenção

Com ações de manutenção corretiva e, principalmente, preventiva, é possível evitar que eventos, principalmente aqueles de ordem climática, causem danos a rede e conseqüente interrupção de energia (9).

- Através da Operação do Sistema:

O objetivo destas ações é a diminuição do tempo de restabelecimento da energia, após haver um evento na rede. Pode ser pelo aumento da quantidade de equipes, pela colocação de equipamentos de manobra em pontos estratégicos da rede, pelo uso de

localizadores de falta ou até mesmo pela adoção de novas tecnologias de ferramental ou de meios de comunicação (como o satelital). Todas estas ações permitem a localização do evento e resolução do problema em menor tempo (10,11).

2.4 ASPECTOS ECONÔMICOS DA CONTINUIDADE

A importância da análise da continuidade reside na sua utilidade para o controle e melhoria da qualidade dos sistemas. O custo para a empresa derivado das interrupções aumenta constantemente, tanto em suas componentes diretas como indiretas. São custos diretos (7):

- A energia não distribuída como consequência de uma falha no sistema.
- A infra-estrutura do pessoal de manutenção e conserto de avarias.
- Os custos legais por reclamação dos clientes que experimentaram incidências no sistema e requerem ressarcimento.
- Casos previstos pela legislação do Órgão Regulador, com penalizações no faturamento.

São custos indiretos:

- O prejuízo das interrupções para os consumidores.
- Um custo social, devido a interrupção de serviços públicos fundamentais (bombeiros, hospitais, etc.)
- O custo da imagem da companhia, inserida em um mercado competitivo.

A avaliação, em especial dos custos indiretos, não é uma tarefa fácil. O nível ótimo de confiabilidade a ser alcançado será função da composição dos custos anteriores. E em geral, os consumidores de energia elétrica estão acostumados com um alto grau de confiabilidade do sistema, que dão por garantido.

Além das considerações econômicas, a concessionária não garante a ausência de interrupções, por uma série de razões:

- Falhas aleatórias nos componentes do sistema.
- Níveis de demanda excessivos e inesperados.
- Defeitos na geração e transmissão.
- Impedimentos do tipo legal a respeito da instalação de novos equipamentos e operação dos existentes.
- Reservas hidráulicas ou de combustível insuficientes, etc.

Portanto, é esperado que as concessionárias de energia providenciem energia a um nível de continuidade e qualidade para o consumidor a um preço razoável, fazendo uso dos sistemas e equipamentos disponíveis. Conforme foi apontado na referência (12):

Não é nem possível nem desejável evitar falhas em todos os componentes ou combinações de falhas que resultem na interrupção do serviço. O nível de confiabilidade pode ser considerado apropriado quando o custo de evitar interrupções adicionais excede as conseqüências destas interrupções para os consumidores. Então, o nível apropriado de confiabilidade do ponto de vista do consumidor pode ser definido como aquele nível em que a soma do custo do suprimento de energia mais do custo de interrupção esteja no mínimo.

Isto pode ser ilustrado na figura 2.1. Observe que o aumento da confiabilidade do sistema e o investimento não são relacionados linearmente, e que o nível ótimo (ou apropriado) de confiabilidade corresponde ao custo ótimo, isto é, ao custo total mínimo.

Figura 2.1 – Custo x confiabilidade do sistema (12).

A referência (12) ainda apontou que o parâmetro mais importante talvez não seja o nível atual da confiabilidade, mas o custo incremental. Ou seja, qual é o aumento da confiabilidade por real investido? Onde deve ser alocado o próximo real no sistema para atingir o benefício máximo da confiabilidade?

Neste contexto que entra a proposta desta tese, que é propor ferramentas matemáticas que facilitem a análise de obras propostas para a melhoria da continuidade, otimizando a relação entre o custo e o benefício advindos de tais obras.

2.5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A continuidade do fornecimento da energia é o aspecto da qualidade mais imediato e evidente. Por conseguinte, é aquele que mais se tem estudado e escrito, geralmente chamando-o de confiabilidade da continuidade (6). A avaliação da confiabilidade da distribuição através de técnicas teve o primeiro artigo publicado em 1964 (13). Introduziu o conceito de frequência de falha e de duração média de falha e também associou condições climáticas (descargas atmosféricas) como parâmetro para o desligamento. Não faz muito tempo, continuidade era considerado o único aspecto

relevante da qualidade de serviço.

A medida que os países foram se desenvolvendo, alcançaram um nível de serviço cada vez mais aceitável e melhores para os clientes, principalmente em zonas urbanas e de grande consumo, e iniciou-se a preocupação com outros aspectos da qualidade. Em contrapartida, também aumentaram a quantidade de equipamentos instalados que injetam perturbações na rede (conversores, etc.) e que também são os mais sensíveis (susceptíveis) a essas mesmas perturbações ou outras já existentes na rede. Isto tudo, faz com que o aspecto de qualidade da onda adquira cada vez mais importância (3).

Com a desverticalização e a introdução da competição no setor, iniciada na década de 80, passa-se a exigir maior competência e decréscimo de custo das concessionárias. Com o orçamento reduzido, surge a necessidade de ter critérios para aceitar ou rejeitar projetos que melhor aloquem o orçamento visando o ganho máximo de confiabilidade. Passa a haver uma maior preocupação com a análise do custo econômico e surge a necessidade de técnicas de análise de custo/benefício para a comparação de obras, considerando os custos de interrupção do ponto de vista da concessionária, do consumidor ou de ambos (14, 15, 16, 17, 18, 19). Na procura da solução de mínimo custo, incluem os custos de interrupção como uma parcela na soma do investimento, juntamente com os custos de operação e manutenção.

Em seguida, surgem os algoritmos chamados de “inteligentes” ou “sistemas baseado em conhecimento”, que integram técnicas de avaliação de confiabilidade e de planejamento, identificando potenciais projetos, benefícios da confiabilidade e os lista classificados pela relação custo-benefício (20).

Analisando a confiabilidade sob a ótica do planejamento da expansão de redes de distribuição, Tomsovic (21) elabora um apanhado de artigos publicados nos últimos 40 anos e classifica-os em duas categorias:

- A primeira baseada em métodos de otimização, subdivididos em métodos de

programação matemática, tais como programação linear em geral e métodos de programação heurística.

- A segunda categoria baseada na expansão do sistema. Separa-os em planejamento de estágio único, ou estático, e planejamento de múltiplos estágios, ou dinâmico.

Sumaria os trabalhos estudados em uma tabela, transcritos na tabela 2.1. Apesar desta tabela mostrar que a coluna dedicada a confiabilidade tem vários trabalhos, o autor complementa dizendo que na maior parte deles, os custos da confiabilidade são completamente ignorados ou incorretamente quantificados. Quanto a restrição orçamentária, apesar de ser um problema enfrentado por todas as concessionárias, foi ignorada completamente em todos os trabalho analisados.

Voltando ao aspecto da escolha do método de priorização de obras, há na literatura outros métodos que, além dos fatores tradicionais – perdas, custo do capital, END – levam em conta fatores intangíveis na análise da obra ou ação tomada, tais como o impacto ambiental ou questões sociais e políticas. Cita-se os artigos (22, 23, 24), em que os autores propõe o uso do Método de Decisão com Multi Critérios (MCDM) para avaliação de cada alternativa de obra. Em (22), é aplicado o método de análise hierárquica AHP- Analytic Hierarchy Procces. A premissa básica é a resolução de um problema decompondo-o em diversas partes, interligadas por uma estrutura hierárquica. As alternativas a serem consideradas são avaliadas através de critérios e subcritérios numéricos, verbais ou gráficos. Os critérios são comparados aos pares através da determinação de pesos relativos pelos decisores.

Calcula-se um valor para cada fator considerado e multiplica-o por um peso. A decisão é baseada no valor total de cada alternativa, que é determinada pela soma de cada critério individual. Pela comparação do custo de cada alternativa com o orçamento disponível, é determinada uma lista de ações. Os outros dois artigos (23 e 24) propõem outros processos chamados de Value Based Budget (VBB), similares ao AHP.

Tabela 2.1 – Sumário dos trabalhos analisados em (21).

			Passado							Futuro						
Avaliações do Problema da Expansão	Métodos de otimização	N P U B	L O C S E	B I T C O N D	D E L T A V	P E R D A S	C O N F	M O B J	M E O G N G	M E O G G	O R Ç A M	S O C - A M B	R O T E A M	U P G R A D E	M E M O B J	
Estágio Único	Programação matemática	4			X											
		6			X	X										
		4						X								
		1		X	X											
		8	X													
		1			X			X	X							
		1		X	X	X										
	Heurística	1			X			X	X							
		2						X								
		1			X											
		1	X													
		1			X	X										
Múltiplos Estágios	Programação matemática	3							X							
		1	X						X							
		2						X		X						
		1			X	X				X						
		1			X			X	X	X						
	Heurística	1								X						
		1			X	X				X						
		1						X		X						
	Referência (21)	Fase 1		X	X	X					X	X		X		
		Fase 2		X	X	X					X	X		X	X	
Fase 3			X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	

Glossário:

NPUB	Número de publicações
LOCSE	Localização de Subestações
BITCOND	Múltiplas bitolas de condutores
DELTA V	Restrições devido a queda de tensão
PERDAS	Perdas no sistema de distribuição
CONF	Considerações de Confiabilidade
MOBJ	Multi objetivo
MEOGNG	Multiestágio, ótimo global não garantido
MEOGG	Multiestágio, ótimo global garantido
ORÇAM	Considerações orçamentárias
SOC-AMB	Impacto social e ambiental
ROTEAM	Roteamentos múltiplos com várias bitolas de condutores
UPGRADE	Possibilidade de upgrade
MEMOBJ	Multiestágio, multi objetivo

Este método pode incluir e medir fatores importantes qualitativos e quantitativos difíceis de mensurar, sejam eles tangíveis ou intangíveis. O sucesso ou não na aplicação destes métodos está na capacidade do engenheiro em atribuir o valor e o peso correto a cada fator, pois se por um lado pode levar ao alinhamento da área de planejamento com o objetivo estratégico da empresa, por outro lado pode levar o planejador a tomar uma decisão equivocada, onerando a empresa na opção pela obra.

Em (25), é aplicado o conceito de Planejamento Baseado em Confiabilidade (VBRP – Value Based Reliability Planning), cujos conceitos aplicados no planejamento da distribuição ponderam os requisitos para decisões baseado em confiabilidade durante a fase da escolha dos projetos. A análise VBPR é uma análise de investimentos que quantifica em termos econômicos as diferentes alternativas apresentadas para o aumento da confiabilidade, provendo ao planejador o benefício que cada projeto representa para a sociedade. Para atingir tal objetivo, uma análise sócio-econômica é necessária para avaliar a relação entre o aumento dos custos capitais necessários para um alto nível de confiabilidade e conseqüente declínio dos custos de interrupção.

No Brasil, a literatura apresenta três métodos de priorização de obras: o Método do Índice de Prioridade (IEP e ITP) (26) , o Método proposto pela Eletrobrás em 1982 (27,28) e o Método do Payoff COPEL (2).

O primeiro método seleciona alternativas de obras e prioriza as obras selecionadas indistintamente. Os dois últimos métodos priorizam as obras pré-selecionadas. Estão resumidamente explanados mais adiante neste trabalho.

Nos trabalhos relacionados até agora, o valor econômico predominante é o associado a END, ou seja, ao custo de não prover energia, fixada ou indexada a natureza do consumidor. E este valor é usado para avaliar a qualidade, ou seja, o quão boa é a solução técnica. Com ele, é possível associar diferentes custos e benefícios a diferentes alternativas de evolução da rede, pela avaliação da confiabilidade de cada componente (a probabilidade de falha), pela manutenção e pela expansão do sistema.

A justificativa para os investimentos depende muito do valor econômico da END – pois quando a avaliação da qualidade de serviço dá preferência ao aspecto econômico, justifica-se maiores custos de investimento.

Recentemente, os novos critérios regulatórios, têm alterado o objetivo do planejamento dos sistemas de potência. Estes critérios são baseados em índices individuais, mensurados para cada consumidor, e índices coletivos, avaliados por conjunto ou abrangendo toda a empresa. Com essa mudança de filosofia, foi dada ênfase as penalidades aplicadas pelo órgão regulador e a compensação monetária para cada consumidor, em regiões nas quais os padrões pré-definidos de frequência e duração da interrupção não foram cumpridos. Nos trabalhos (14, 29, 30, 31), esta preocupação já é aparente. Em (29), os autores apresentam uma proposta de planejamento onde é dada ênfase aos aspectos regulatórios baseado nos índices dos consumidores, além da END. Apresentam e comparam os resultados da otimização aplicada a dois objetivos: com o objetivo tradicional e com o objetivo focado nos novos critérios de regulação. Chegam a conclusão que se o planejamento for realizado com o objetivo de reduzir as penalidades (critério novo), levam a um aumento do investimento e a um decréscimo no valor das multas. Porém, isto não quer dizer que a confiabilidade aumente (END, DEC e FEC diminuam). Conforme o caso, pode até degradar a qualidade do serviço. Em (30) é utilizado uma metodologia baseada na Avaliação Quantitativa de Risco (QRA), para identificação e avaliação de medidas que visam mitigar o risco de falha a um mínimo custo.

Em (31), o trabalho é desenvolvido com informações obtidas diretamente do banco de dados de concessionárias de energia, utilizando o valor das penalidades e da END para consumidores e alimentadores e analisando as modificações na confiabilidade por alterações propostas na configuração da rede. Para compor os índices de confiabilidade, usa o processo analítico iterativo e valores típicos para analisar o benefício de obras futuras.

Enfim, segundo (21), apesar de todos os artigos e pesquisas feitas nesta área, estudos

sobre a aplicação econômica e a priorização das obras de distribuição ainda são necessários.

Agora, serão analisados mais detalhadamente os três métodos de priorização de obras encontrados na literatura brasileira.

2.5.1 MÉTODO DO ÍNDICE E PRIORIDADE (IEP E ITP) (26)

O autor estabelece uma metodologia para a priorização das obras através de classificação do mérito de cada uma, obtido a partir do cálculo do Índice Econômico de Priorização (IEP) e do Índice Técnico de Priorização (ITP), definidos a seguir:

- Índice Econômico de Priorização (IEP):

Esta metodologia, apesar de não abranger todos os benefícios e custos envolvidos, possibilita ordenar as obras segundo o conceito de velocidade relativa de retorno do investimento. Deve fundamentar-se na apuração mais abrangente possível da relação benefício/custo de cada obra relacionada, de um elenco de obras situadas em um mesmo nível de tensão do sistema elétrico.

Considera-se que o IEP está sendo calculado para o ano que a obra está sendo proposta, não sendo válida para comparação de índices com anos diferentes.

$$IEP = \frac{VPF + VGP + LIB}{VPI} \quad (2.1)$$

onde:

IEP = Índice econômico de prioridade.

VPF = Valor presente do faturamento adicional previsto, propiciado pela obra nos próximos 10 anos.

VGP = Valor presente do ganho de perdas nos próximos 10 anos.

LIB = Valor presente dos custos de capital da instalação adiada, devido à realização da obra que está sendo proposta.

VPI = Valor presente dos custos anuais do investimento no período de 10 anos.

- Índice Técnico de Priorização (ITP):

Indica o grau de alerta para as condições técnicas atuais do sistema elétrico na área de influência de cada obra, sinalizando possíveis condições de comprometimento quanto à qualidade do fornecimento aos consumidores e a integridade física e/ou segurança do sistema elétrico, caso a obra proposta não seja executada. Varia de 0 a 10, conforme tabela 2.2. O ITP pode ser apresentado sob o seguinte formato:

Tabela 2.2 – Tabela para cálculo do Indicador Técnico de Priorização (26).

Carregamento	0 a 10 ou LT
Tensão	0 a 10 ou LT
Confiabilidade	0 a 10 ou LT

LT- indica que o carregamento técnico foi atingido. As condições operativas se tornam intoleráveis, comprometendo a integridade física ou de segurança da carga e/ou do sistema elétrico, exigindo da empresa providências imediatas.

O indicador de confiabilidade é baseado nos índices técnicos de continuidade por conjunto (DEC e FEC). Para entrar na tabela 2.3 e obter o valor do indicador, o autor recomenda calcular o DEC médio anual dos últimos 3 anos da região da obra proposta.

Tabela 2.3 – Tabela para cálculo do indicador de confiabilidade (26).

Faixa do DEC (hora/ano)	Número de consumidores da localidade x 1000			
	1 a 5	5 a 15	15 a 50	> 50
< 5	0	0	0	0
5 a 10	0	0	0	0 a 1
10 a 15	0	0	0 a 1	1 a 2
15 a 20	0	0 a 1	1 a 2	2 a 4
20 a 25	0	1 a 2	2 a 3	4 a 7
25 a 30	0 a 1	2 a 3	3 a 5	7 a 10
30 a 35	1 a 1	3 a 4	5 a 7	LT
35 a 40	1 a 1	4 a 6	7 a 10	LT
40 a 45	1 a 2	6 a 8	LT	LT
45 a 50	2 a 3	8 a 10	LT	LT
50 a 55	3 a 4	LT	LT	LT
55 a 60	4 a 6	LT	LT	LT
60 a 65	6 a 8	LT	LT	LT
65 a 70	8 a 10	LT	LT	LT
> 70	LT	LT	LT	LT

Procedimento similar ao do cálculo do índice de confiabilidade deve ser repetido para obter os indicadores de carregamento e de tensão.

De posse dos valores calculados do IEP e ITP, que foram apresentados resumidamente neste trabalho, constroeu-se uma tabela que mostre os valores anuais técnicos calculados em termos de DEC e FEC, sendo a comparação econômica representada pela soma dos custos anuais de manutenção, dólares interrompidos, implantação e perdas.

2.5.2 MÉTODO DA ELETROBRÁS (27)

O método proposto pela Eletrobrás (27,28), para obras de reforma/melhoria e extensão, baseia-se no cálculo do índice de justificabilidade de cada obra. O cálculo do índice é feito através da atribuição de pesos a vários parâmetros considerados na análise, mostrados nas tabelas 2.4 e 2.5.

Tabela 2.4 – Fatores de ponderação para obras de reforma e melhoria² (27).

Ponderação		0	1	2	3	4	5
MR1	Valor total da obra dividido pelo número de CONSUMIDORES BENEFICIADOS (cr\$ por consumidor)	Mais de Cr\$...	Entre Cr\$.... e Cr\$	Entre Cr\$.... e Cr\$	Entre Cr\$.... e Cr\$	Entre Cr\$.... e Cr\$	Entre Cr\$.... e Cr\$
Ponderação		0	2	4	6	8	10
MR2	% de setores de transformador com queda de tensão superior a 7,5 % na área a ser reformada.	< 3%	3 a 8%	8 a 15 %	15 a 35%	35 a 40%	> 50%
Ponderação		0	3	6	10		
MR3	Condições mecânicas da rede na área a ser reformada	BOAS	REGULARES	RUINS	PÉSSIMAS		
Ponderação		0	2	3	5		
MR4	Condições estéticas da rede na área a ser reformada	BOAS	REGULARES	RUINS	PÉSSIMAS		
Ponderação		0	2	4	6	8	10
MR5	Duração equivalente de interrupção por consumidor - DEC	< 1,5	1,5 A 2,0	2,0 A 2,5	2,5 A 3,0	3,0 A 3,5	>3,5
Ponderação		0	1	2	3	4	5
MR6	Consumo médio mensal residencial - kWh na área a ser reformada	<3 0	30 a 50	50 a 100	100 a 150	150 a 200	> 200
Ponderação		0	1	2	3	4	5
MR7	Crescimento de mercado na cidade onde se executa a reforma (consumo residencial)	< 1%	1 a 3 %	3 a 5 %	5 a 7 %	7 a 9 %	> 9%

N.R. Limites de cruzeiro/consumidor definidos pela concessionária.

Tabela 2.5 - Fatores de ponderação para obras de extensão² (27).

Fatores de Ponderação para Obras de Extensão

Ponderação		0	1	2	3	4	5
ER1	Valor total da obra dividido pelo número de CONSUMIDORES BENEFICIADOS (cr\$ por consumidor)	Mais de Cr\$...	Entre Cr\$.... e Cr\$	Entre Cr\$.... e Cr\$	Entre Cr\$.... e Cr\$	Entre Cr\$.... e Cr\$	Entre Cr\$.... e Cr\$
Ponderação		0	1	2	3	4	5
ER2	Consumo médio mensal residencial previsto kWh	<3 0	30 a 50	50 a 100	100 a 150	150 a 200	> 200
Ponderação		0	1	2	3	4	5
ER3	Previsão de Crescimento de Mercado	< 1%	1 a 3 %	3 a 5 %	5 a 7 %	7 a 9 %	> 9%
Ponderação		0	2	4	6	8	10
ER4	Relação de consumidores previstos por poste	< 0,3	0,3 a 0,4	0,4 a 0,5	0,5 a 0,6	0,6 a 0,7	> 0,7
Ponderação		0	2	4	6	8	10
ER5	Índice de Rentabilidade	< 0,5	0,5 a 1,0	1,0 a 1,5	1,5 a 2,5	2,5 a 4,0	> 4,0

² As tabelas 2.4 e 2.5 provêm de um trabalho realizado em 1982 (27), onde a moeda corrente no Brasil era o cruzeiro (Cr\$).

Após a classificação dos itens investidos por tipo de serviço, realizado nas etapas anteriores do planejamento, torna-se necessário estabelecer uma escala de prioridades por item, para possibilitar o posterior processo de adequação do plano aos recursos existentes, pelo corte das obras menos prioritárias, quando a disponibilidade orçamentária não for suficiente para atendimento de todas as obras propostas.

Para cada critério relacionado na tabela, existem os critérios de utilização. Como exemplo, especificamente para os aspectos de condição mecânica, são explicados os critérios de utilização da tabela.

Condições mecânicas:

- Boas:
 - Posteação: padronizada e em perfeitas condições.
 - Transformadores: padronizados e em boas condições.
 - Condutor: padronizado e em boas condições.
 - Estrutura primária e secundária: padronizada e em boas condições.
 - Conjunto de iluminação pública (IP): padronizado e em boas condições.
- Regulares:
 - Posteação: não padronizado mas aproveitável; fora do prumo, fora do alinhamento.
 - Transformadores: conservação inadequada, porém aproveitável.
 - Condutor: bitola fora do padrão, mas aproveitável.
 - Estrutura primária e secundária: fora do padrão, mas aproveitável.
 - Conjunto de iluminação pública (IP): fora do padrão, mas aproveitável.
- Ruins:
 - Posteação: fletida ou com rachaduras à mostra; altura insuficiente.
 - Transformadores: fora de padrão; apresentam perigo quanto a segurança de operação e manobra dos equipamentos complementares.

- Condutor: fora do padrão e envelhecido (oxidado), necessidade de tração.
 - Estrutura primária e secundária: fixação inadequada, rachada ou queimada.
 - Conjunto de iluminação pública (IP): fora do padrão, enferrujado mas ainda em condições de fixar a luminária.
- Péssimas:
 - Posteação: poste de concreto não-padronizado e não aproveitável; armadura à mostra; fissuras ou fendas visíveis; altura insuficiente. Poste de madeira não-padronizado e não aproveitável; podre, fendas e fraturas no topo; altura insuficiente.
 - Transformadores: fora de padrão e não aproveitável.
 - Condutor: muito emendado, bitola fora do padrão e não aproveitável.
 - Estrutura primária e secundária: bitola fora do padrão e não aproveitável.
 - Conjunto de iluminação pública (IP): bitola fora do padrão e não aproveitável; sem condições de fixar a luminária.

Os índices de justificabilidade são calculados pelas seguintes equações:

$$Ijr = \frac{\sum_{i=1}^n MRi}{50} \quad (2.2)$$

$$Ije = \frac{\sum_{i=1}^n ERi}{35} \quad (2.3)$$

onde:

Ijr = índice de justificabilidade de obras de melhoria e reforma.

Ije = índice de justificabilidade de obras de extensão.

MRi = ponderação de cada um dos sete fatores envolvidos em obras de reforma e

melhoramento.

ER_i = ponderação de cada um dos cinco fatores envolvidos em obras de extensão.

Após a definição do índice de justificabilidade, ou grau de prioridade, as obras são classificadas em ordem de prioridade decrescente e, a seguir, se faz a compatibilização entre o recurso existente e as obras propostas pelo corte das menos prioritárias.

2.5.3 O MÉTODO DO PAYOFF COPEL (2)

O Método de Priorização de Obras de Distribuição utilizado pela COPEL – Companhia Paranaense de Energia, internamente a empresa é denominado Método do Payoff. Foi idealizado em 1995 e é utilizado desde este ano, para suprir a necessidade da Engenharia da Distribuição, área de planejamento, de ter uma metodologia de priorização de obras que levasse em conta a relação custo / benefício das 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. Assim sendo, o cálculo do payoff não deve ser utilizado na escolha da melhor alternativa para resolver um determinado problema, quando é indicado fazer uma análise técnico-econômica a longo prazo.

Partindo da premissa de “prestar um serviço adequado a um custo mínimo”, utiliza como ponto de partida a função custo global de serviço, amplamente utilizado no setor elétrico, que inclui todos os custos envolvidos, expressos em unidades monetárias:

$$\text{CUSTO GLOBAL} = \text{CUSTO CONCESSIONÁRIA} + \text{CUSTO CONSUMIDOR} \quad (2.4)$$

$$\text{CUSTO GLOBAL} = [\text{INV} + \text{CPER} + \text{COM} + \text{CPEN} + \text{LUC}] + [\text{CEND} + \text{CDT} + \text{CQE}] \quad (2.5)$$

onde:

Custo da Concessionária:

- INV : investimentos;
- CPER: custo das perdas;
- COM: custo de operação e manutenção;
- CPEN: penalidade resultante da violação do indicador de qualidade;
- LUC: é a variação negativa no lucro da concessionária por não fornecer tensão em níveis adequados.

Custo do Consumidor:

- CEND: custo da energia não distribuída;
- CDT: custo de desvios de tensão;
- CQE: custo de deficiências na qualidade da energia (harmônicas, flicker, afundamentos de tensão, etc.).

OBS.: A qualidade da energia é atualmente considerada apenas como restrição (limites máximos admissíveis).

Baseado na função de custo global, o investimento (custo) relativo à execução de uma determinada obra provoca variações, normalmente negativas, representando diminuição de custos, em uma ou mais parcelas do custo global. Então,

$$\text{INV} \Rightarrow [\Delta \text{CPER} + \Delta \text{COM} + \Delta \text{CPEN} + \Delta \text{LUC}] + [\Delta \text{CEND} + \Delta \text{CDT}] \quad (2.6)$$

Onde:

- ΔCPER representa a redução das perdas, após executada a obra;
- ΔCOM representa a redução dos custos de operação e manutenção, após executada a obra;

- ΔLUC representa a variação do lucro da concessionária por fornecer tensão em níveis inadequados. Por questões de simplificações e por ser um assunto polêmico, as variações de custo e de benefício desta parcela são dispensados;
- $\Delta CPEN$ representa a redução das penalidades aplicadas pelo órgão regulador por não haver ultrapassagem de valores padrões estabelecidos entre as partes, após executada a obra. Normalmente, não é considerado no cálculo do benefício;
- $\Delta CEND$ representa a redução de energia que deixou de ser fornecida devido a interrupções, após executada a obra;
- ΔCDT representa o ganho obtido com o fornecimento de energia com níveis de tensão adequados, após executada a obra;

Para priorizar e elencar as obras propostas, o Método do Payoff COPEL (2) utiliza uma análise simplificada, que consiste na simples divisão do custo da obra pelo benefício provável no primeiro ano. O resultado obtido, expresso em anos, representa, aproximadamente, o tempo necessário para pagar a obra.

$$PAYOFF = \frac{INV}{B} \quad [\text{anos}] \quad (2.7)$$

Onde:

INV – Investimento a ser feito na obra, englobando os custos totais de projeto e execução.

B – É o benefício decorrente da execução da obra. É a soma das variações do custo global, com exceção do investimento e dos ganhos com qualidade de energia, com o sinal trocado, representando a diminuição de custos.

$$B = - (\Delta CPER + \Delta COM + \Delta LUC + \Delta CPEN + \Delta CEND + \Delta CDT) \quad (2.8)$$

As diversas variações são normalmente funções crescentes no tempo, acompanhando o aumento normal das cargas. Assim sendo, as variações deveriam ser calculadas ano

a ano, durante um período de análise relativamente longo (de dez a vinte anos), e em seguida trazidas para valor presente usando uma taxa de atualização adequada. A divisão dos investimentos pelos respectivos valores presentes representa a relação custo/benefício da obra.

A simplificação utilizada neste processo, deve-se ao fato de existir uma relativa compensação entre o crescimento dos benefícios anuais e o processo de cálculo dos respectivos valores presentes. No caso limite dos benefícios aumentarem anualmente a um ritmo igual à taxa de atualização, os seus valores presentes seriam constantes e o cálculo simplificado conduziria a valores exatos (2).

As expressões a serem utilizadas nos cálculos representam variações de custos. A quantidade avaliada tem um custo antes e um custo depois de executada a obra. Portanto:

$\Delta\text{custo} = \text{variação de custo} =$

$$= \text{custo antes da execução da obra} - \text{custo após executada a obra} \quad (2.9)$$

e a expressão (2.9) toma a forma:

$$\Delta\text{custo} = \text{quantidade} \cdot \text{custo unitário} \quad (2.10)$$

Para o cálculo da relação custo/benefício, cada obra deve ser previamente classificada e enquadrada em um dos módulos listados na tabela 2.6. Há um equacionamento específico para o cálculo do benefício de cada parcela do custo global. Nesta tabela também estão relacionados os principais benefícios obtidos em cada parcela do custo global por módulo.

Tabela 2.6 - Parcelas a serem calculadas para obtenção do benefício da obra, em função do módulo (2).

MÓDULOS CLASSIFICAÇÃO DE OBRAS	PARCELAS DO CUSTO GLOBAL				
	Δ CPER	Δ COM	Δ CEND	Δ CDT	Δ LUC
1. Interligação de ramais, tronco de alimentadores e linhas			X		
2. Implantação de alimentadores ou linhas com mudança de configuração	X		X	X	X
3. Recondutoramento de alimentadores ou linhas	X		X	X	X
4. Rede compacta		X	X		
5. Complementação de fase em 19,92 kV	X		X		
6. Substituição de isolador de pino por tipo pilar		X	X		
7. Instalação de chaves interruptoras sob carga			X		
8. Implantação de subestações 34,5/13,8 kV	X		X	X	X
9. Instalação de bancos de reguladores de tensão			X	X	X
10. Complementação de fases em 13,8 kV	X		X	X	X
11. Instalação de religadores automáticos e pinçamentos		X	X		
12. Instalação de bancos de capacitores	X			X	X
13 Transferência Automática de carga entre SE 34/13 kV.		X	X		

Para finalizar o processo de priorização, as obras são elencadas em uma lista de ordenação crescente, iniciando com a obra de menor payoff.

Neste capítulo, foram mostrados alguns conceitos de interrupção e de continuidade, além de uma rápida revisão bibliográfica da literatura existente sobre este assunto. Foram revisados também alguns métodos de priorização de obras encontrados no Brasil, entre eles o Método do Payoff COPEL (2). No próximo capítulo, será mostrado o planejamento voltado para os índices de continuidade e a adaptação do equacionamento deste método para a priorização de obras.

3 METODOLOGIA GERAL PARA O PLANEJAMENTO VOLTADO AOS ÍNDICES DE CONTINUIDADE

Este capítulo mostra a visão geral do processo de planejamento, voltado aos índices de continuidade. Inicia com o levantamento dos índices de desempenho do sistema elétrico até a obtenção da relação das obras escolhidas restritas pelo orçamento, passando pela análise técnico-econômica das alternativas propostas. Em seguida, as etapas relevantes são detalhadas e comentadas. Finaliza com a adaptação do equacionamento do benefício dos módulos do Método do Payoff COPEL (2) para a aplicação a metodologia de priorização de obras.

3.1 VISÃO GERAL

O planejamento de redes de distribuição é voltado para a resolução do crescimento de carga, através da observação de critérios técnicos, notadamente carregamento, nível de tensão, perdas e END, raramente levando em conta a confiabilidade, ou continuidade (29).

Os novos critérios de regulação, baseados nos índices dos consumidores, com ênfase na compensação monetária, individual ou por conjunto, tem deslocado um pouco os objetivos originais do planejamento (29). Em consequência, as empresas estão se obrigando a alterar o método de planejar para, pelo menos, considerar o aspecto regulatório ou elaborar programas específicos para tratá-lo. O planejamento específico voltado aos índices de continuidade, difere do tradicional por não considerar outros critérios técnicos no momento da avaliação da obra.

A metodologia proposta neste trabalho prioriza as obras apresentadas para cumprir com a resolução 24/2000 da ANEEL (1), que refere-se a quantidade e duração de interrupções de fornecimento de energia elétrica, e tal como o método apresentado na

referência (28), exclui os seguintes tipos de obras, por entender-se que são de execução indispensável:

- Obras de reforço, aumento de capacidade;
- Obras para atender requisitos de segurança;
- Obras para ligação de novas cargas, requeridos por terceiros (ampliação), nomeadamente com participação financeira do consumidor,
- programas de cunho político-social;

Tais obras, pela sua obrigatoriedade de execução, devem ter dotação orçamentária própria ou receberem prioridade zero, tendo privilégio na distribuição do orçamento, e não devem competir pelo mesmo investimento que os demais tipos de obras.

Como este é um trabalho voltado para as concessionárias de energia, a estratégia da empresa também deve ser considerada (28), já que as diversas atividades desenvolvidas na companhia são planejadas em diferentes níveis, sendo as diretrizes, objetivos e metas definidas inicialmente para o conjunto da empresa e posteriormente repassada aos órgão subordinados. Desta forma garante-se que as ações exercidas a nível operacional expressem, sempre, as grandes linhas de atuação estabelecidas para o conjunto da empresa. A harmonia dos resultados com a política da empresa obtém-se através da fixação, pela diretoria, da estratégia a ser observada durante o período de vigência do programa e repassada aos órgãos subordinados. As prioridades de investimento são determinadas em função da estratégia escolhida, que pode variar ao longo do tempo.

O planejamento específico voltado aos índices de continuidade poderia, de um modo geral, seguir os seguintes passos (fig. 3.1):

Figura 3.1 – Visão Geral do Planejamento de sistemas de distribuição.

1. Levantamento de dados de confiabilidade

O objetivo final do levantamento de dados é fornecer os meios para a análise da qualidade dos serviços prestados pela concessionária e dos fatores que nela incidem, derivando, daí, critérios para melhorar os projetos, as características dos equipamentos utilizados e, conseqüentemente, a operação e a manutenção do sistema, com respeito a um nível preestabelecido de desempenho desejado.

A consecução desse objetivo é obtida em duas etapas distintas:

- A primeira fase é a obtenção dos dados necessários do sistema elétrico e seu tratamento.

Os dados são levantados levando em consideração os componentes, a configuração elétrica e todas as ocorrências do sistema, sejam saídas para serviço ou interrupções.

No caso específico do arquivo de interrupções, que são os dados mais relevantes para este trabalho, o objetivo é armazenar dados históricos das interrupções verificadas em cada equipamento de proteção e/ou manobra e, desta forma, fornecer subsídios para análise e programação de serviços, a partir do histórico de desempenho de cada trecho. Deve incluir também o número de consumidores e a potência instalada interrompida.

Além dos dados de interrupção, deve constar os dados do serviço, tais como data, horários, localização, componentes avariados, causa, etc.

- A segunda etapa é a obtenção dos índices de medição do desempenho do sistema, tais como DEC, FEC, DIC, FIC e outros. Tem como informações relacionadas as metas impostas pelo órgão regulador e penalidades que a empresa está sujeita no caso de não cumprimento. Geralmente são calculados em sistemas informatizados, devido a extensão do banco de dados. Cabe ressaltar aqui que os dados históricos obtidos são referentes ao ano anterior ao ano em análise. Estes dados é que servirão de base para o planejamento das ações a serem executadas no programa

de obras do ano seguinte.

2. Análise dos dados de continuidade.

De posse de um banco de dados com as informações de interrupção, é possível realizar as análises relativas ao desempenho do sistema de distribuição. No caso dos níveis de continuidade, geralmente é conduzida a partir dos índices DEC, FEC, DIC, FIC e DMIC verificados, em confronto com as metas de qualidade de serviço preestabelecidas para o mercado consumidor, podendo ser individuais ou coletivas, global ou por conjunto.

3. Formulação das alternativas.

Concluída as duas primeiras fases desta metodologia, torna-se necessário a elaboração de um plano de obras para corrigir as deficiências apontadas. Para isto, deve-se, em primeiro lugar, formular as alternativas viáveis. A formulação de alternativas consiste na escolha de ações que possam mitigar os índices de continuidade das redes com mau desempenho, apontado nas etapas anteriores.

As ações podem ser de manutenção preventiva (poda, inspeção, etc.), de manutenção corretiva (troca de isoladores, cruzetas, postes, etc.), dimensionamento de pessoal, contratação de empreiteiras ou ainda através da execução de obras, como instalação de religadores, chaves tripolares, construção de linhas expressas, subestações de distribuição e outras. Nesta tese, somente serão avaliadas e comparadas as ações classificadas como obras.

4. Processo de seleção das alternativas

Há dois níveis de priorização e seleção de obras que são relevantes para o planejamento da distribuição: primeiro, a seleção da melhor alternativa para cada área problema para solicitar dotação orçamentária em uma fase posterior, e depois de

conhecido o orçamento aprovado, a seleção de quais alternativas propostas serão executadas e quais não serão.

A primeira etapa do processo de decisão deve iniciar com uma análise técnico-econômica de longo prazo, resultando em um índice de valoração para cada obra proposta, normalmente R\$, e um ou vários índices operativos, como kVA, CHI ou DEC evitado ou qualquer outro, a critério da Empresa. Também o benefício a ser alcançado com a execução da obra deve ser levantado.

É também nesta etapa que se define quais são as obras dependentes, ou seja, obras cuja execução de uma exige a execução da outra, sendo que as duas devem ser analisadas como um bloco. Ou obras excludentes, que são as obras cuja execução de uma impede a execução da outra, seja pela inviabilidade técnica ou econômica.

Esta etapa deve definir dentre todas as opções de obras apresentadas, a melhor alternativa para o sistema ou conjunto.

5. Análise técnico-econômica das alternativas de obras

Após relacionada as obras sugeridas, deve-se avaliá-las tecnicamente para assegurar o atendimento às metas de continuidade e então, compará-las economicamente, selecionando a alternativa recomendável. As alternativas tecnicamente ou economicamente inviáveis devem ser eliminadas nesta fase.

A análise técnica visa a verificação deste atendimento, através da verificação da viabilidade técnica da construção da obra e da estimativa individual do benefício que esta ação pode trazer para o sistema, considerando as características físicas e necessidades locais. Normalmente é valorada em termos de carregamento, expansão do sistema, queda de tensão, reflexo nos índices de continuidade, etc. Com respeito aos índices de continuidade, pode ser feita através de simulação ou estimativa das novas condições operativas do sistema.

A análise econômica consiste na valoração monetária de todos os custos e investimentos associados as alternativas de obras ao longo do tempo, em um horizonte de longo prazo. Há vários métodos que avaliam a obra economicamente, tais como TIR, VPL, Payback, Payoff ou ainda outros critérios.

A metodologia de valoração da obra também varia de empresa para empresa sendo que, a critério da companhia, pode-se somar ao investimento de cada alternativa, os custos de operação, manutenção e de perdas (27, 28).

6. Definição de prioridade e seleção de obras

Esta é a segunda etapa do processo de decisão. Esta etapa inicia-se com as melhores alternativas de obras para cada região ou conjunto já definidas, após a análise técnico-econômica de longo prazo. Após a classificação dos itens valorados por R\$ e por DEC evitado, torna-se necessário estabelecer uma escala de prioridade, para possibilitar o posterior processo de adequação do plano de obras aos recursos existentes, pelo corte das obras menos prioritárias, quando a disponibilidade orçamentária não for suficiente para o atendimento de todas as obras propostas.

Um diferencial em relação a etapa anterior é que geralmente esta fase considera as obras do ponto de vista global, eliminando as características locais, e em um horizonte de curto prazo, como 1 ano, no caso do Método do Payoff COPEL (2).

Existem diversas maneiras de estabelecer a prioridade e seleção de obras, como foi visto na revisão da literatura. A maioria delas voltada para o processo do planejamento tradicional, como os métodos baseados na RCB – Relação Custo-Benefício (14), no Índice de Mérito (26), no Índice de Justificabilidade (27), ou no Payoff (2) de cada obra.

Após a definição do grau de importância, as obras são classificadas em ordem de prioridade e, a seguir, faz-se a compatibilização entre o recurso existente e as obras

propostas, pelo corte daquelas menos prioritárias.

7. Análise e aprovação do orçamento.

Aprovado o orçamento pela empresa, em seguida as obras selecionadas são detalhadas, principalmente as previstas para execução imediata. O detalhamento inclui a elaboração, para cada item, do projeto, cronograma, custos detalhado, previsão de materiais, contratação de empreiteiras, etc.

Explanado brevemente os passos da metodologia adotada, na sequência serão detalhados os aspectos que interessam para a elaboração desta tese, que é propor uma metodologia para a priorização de obras, baseado na adequação do índice de continuidade DEC e FEC à meta do órgão regulador. Tendo em vista a facilidade de acesso ao banco de dados dos índices de continuidade da COPEL – Companhia Paranaense de Energia Elétrica, esta metodologia, apesar de ser de aplicação ampla, não restrita a COPEL e válida para qualquer concessionária de distribuição, será direcionada aos sistemas e dados da referida empresa.

3.2 O LEVANTAMENTO DE DADOS DE CONFIABILIDADE.

Para atingir o objetivo desta tese, é importante o conhecimento de dois conceitos, definidos a seguir:

- Consumidor Interrompido (CI) e Consumidor Hora Interrompido (CHI). Os indicadores coletivos – DEC e FEC - podem ser calculados por alimentador, conjunto e até mesmo para toda a empresa. Como o objetivo deste sistema é um estudo de obras e ações nos alimentadores, comparando as ações entre si, é necessário um indicador que possa dar esta correspondência. Escolhe-se os parâmetros CHI – consumidor hora interrompido – e CI – consumidor interrompido.

A escolha deste indicador trás algumas vantagens:

- Pode ser comparado entre elementos diferentes, por ex.: desligamentos em alimentadores com desligamentos em blocos.
- É fácil de ser calculado, pois é composto de dois elementos: tempo de interrupção e quantidade de consumidores atingidos por tal interrupção.
- O CHI (eq. 3.1) pode ser obtido facilmente do DEC, pois é o numerador desta equação.
- O CI (eq. 3.2) pode ser obtido facilmente do FEC, pois é o numerador daquela equação.

$$CHI = \sum_{i=1}^n Ca(i).t(i) \quad (3.1)$$

$$CI = \sum_{i=1}^n Ca(i) \quad (3.2)$$

onde:

CHI – É o produto da quantidade de consumidores interrompidos pelo tempo de interrupção, em horas e minutos.

CI – É o número de consumidores interrompidos em uma interrupção.

Ca(i) - Número de unidades consumidoras interrompidas em um evento (i), no período de apuração;

t(i) - Duração de cada evento (i), no período de apuração;

i - Índice de eventos ocorridos no sistema que provocam interrupções em uma ou mais unidades consumidoras;

n - Número máximo de eventos no período considerado;

- Conjuntos de Consumidores: A partir do Contrato de Concessão, assinado pelas distribuidoras de energia, a ANEEL controla o desempenho delas através de

conjuntos de consumidores. Estes conjuntos são grandes áreas físicas, subdivisões da área de concessão que podem envolver municípios inteiros, sobre a qual se mede a qualidade do atendimento através de dois índices: o DEC e o FEC.

Com a Resolução 24/2000, a ANEEL estabeleceu um conjunto de determinações quanto à coleta dos dados e apuração dos indicadores visando a formação de uma base de dados confiável, cujos procedimentos homogêneos permitem um tratamento uniforme para todas as concessionárias brasileiras. Além disso, introduz um vínculo entre os indicadores de continuidade individuais e coletivos (32).

Para cada conjunto de consumidores foram estabelecidas metas de continuidade, cujo não cumprimento deixa a empresa sujeito a penalidades. A forma de cálculo da penalidade está descrita no anexo B.

3.2.1 O REGISTRO DA INTERRUPÇÃO

Para propiciar o estudo preditivo baseado em dados históricos, é necessário haver um banco de dados computacional disponível para o planejador, com histórico e dados confiáveis de alguns anos anteriores, dependendo dos critérios adotados por cada concessionária.

Segundo a Resolução ANEEL 24/2000 (1), a concessionária deve ter um banco de dados para registrar interrupções superiores a 3 minutos, que disponibilize as seguintes informações em meio ótico ou magnético:

- Número de unidades consumidoras do conjunto em cada mês de apuração;
- Código de identificação do conjunto;
- Fato gerador;
- Data, hora e centésimo de minuto do início e restabelecimento da interrupção;

- Número de unidades consumidoras atingidas em cada interrupção.

Para atender a atual resolução (e antes a antiga 46/78) (8), normalmente as concessionárias de energia possuem sistemas informatizados. A escolha do aplicativo e do banco de dados, se desenvolvido internamente ou adquirido um elaborado por outra empresa para fins comerciais, fica a critério de cada concessionária.

Porém, segundo a referência (32), sistemas como estes podem tornar-se gerenciadores de todo o atendimento de emergência da companhia, e também podem permitir:

- O registro e armazenamento de todos os dados referentes a ocorrências com interrupção no fornecimento de energia elétrica, verificadas no sistema de distribuição.
- A geração de relatórios contendo informações sobre interrupções, índices de continuidade, e outros para atender vários sistemas de gerência e solicitações de usuários internos e externos tais como ANEEL, ELETROBRAS, CIER, CODI, consumidores e outros;
- O subsídio a estudos para priorização na execução de serviços de inspeção e manutenção na rede de distribuição.
- O apoio aos projetos de planejamento, ampliação e de melhoria no sistema de distribuição.
- O gerenciamento das equipes e dos serviços executados no atendimento de emergência, a avaliação dos tempos médios de restabelecimento, bem como o registro e o armazenamento dos dados referentes a estes serviços.

3.2.2 A ENTRADA DE DADOS DE INTERRUPÇÕES

Para a coleta e registro das informações da interrupção, normalmente as empresas usam uma ficha, que é o documento fonte cujo objetivo é alimentar o arquivo com as

interrupções verificadas em cada trecho e/ou bloco sob o equipamento de proteção e/ou manobra e, desta forma, fornecer subsídios para análise e programação de serviços, a partir do histórico de desempenho.

Uma parte da informação da interrupção é fornecida pela equipe de campo que chega ao local do evento causador da interrupção, tal como o fato gerador e a hora do restabelecimento, que transmite tais informações ao COD – Centro de Operação da Distribuição. Usualmente, a troca de informação entre o eletricitista e o COD é feita oralmente, por telefone ou rádio VHF. Porém, recentemente, algumas concessionárias estão utilizando sistemas de transmissão de dados com este objetivo, tais como rádio VHF, rádio troncalizado, satélite ou telefonia celular (10). Este sistema aumenta a confiabilidade da informação que vem de campo e traz como benefício adicional, a atualização do banco de dados em tempo real, a redução de ruído no COD e conseqüente ganho de produtividade.

Algumas empresas de energia registram mais informações, transformando o documento da interrupção em fonte de coleta de informações, que serão utilizadas na formação de um banco de dados para o gerenciamento do atendimento de emergência e confiabilidade do sistema de distribuição.

3.3 A ANÁLISE DOS DADOS DE INTERRUPÇÃO

3.3.1 OBTENÇÃO DOS ÍNDICES DE MEDIÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA

A quantificação do desempenho do sistema de distribuição normalmente é feita através da avaliação dos índices de continuidade, que nada mais são do que as medidas de confiabilidade ponderadas em relação aos consumidores ou às potências instaladas, como visto no anexo A.

As informações históricas das interrupções registradas pelo COD e pelos eletricitistas são a fonte de dados principal que permitem o cálculo dos índices de desempenho do sistema de distribuição.

Estes índices são calculados por equações matemáticas, de acordo com a necessidade e com o objetivo que se quer medir, como por exemplo, índices para interrupções programadas. Deve-se ter em mente, que não apenas o índice analisado é importante, mas também a forma de calculá-lo. Ainda que as definições dos índices tenham uma aceitação internacional, a forma de cálculo pode diferir bastante. Uma das grandes diferenças é quais são as interrupções que podem ser excluídas do cômputo dos índices, como por exemplo, a exclusão no cálculo do DEC das interrupções programadas ou das interrupções não programadas advindas de eventos chamados de “força maior”. No caso do Brasil, a resolução 24/2000 permite a exclusão do cálculo do DEC e FEC apenas das interrupções que sejam de interesse ou provocadas por falha na unidade consumidora e não afete terceiros. De posse destes dados, é possível fazer a avaliação de cada obra, no que diz respeito aos benefícios, índices operativos e custos. Envolvem normalmente grande quantidade de dados históricos do sistema, especialmente quando refere-se as interrupções, sendo muitas vezes, justificável o uso de ferramentas específicas para a extração de dados de interesse (34). Estes dados normalmente estão em bases diferentes e fazem parte de diversos sistemas transacionais da empresa.

Como esta é uma metodologia voltada ao cumprimento dos aspectos legais de continuidade da empresa, é nesta etapa que são levantados os índices de continuidade e dados relativos a penalidades a qual a empresa está sujeita, considerando a divisão por conjuntos ANEEL. Este é um indicador importante para a decisão de onde e como investir na melhoria da qualidade da continuidade do serviço, bem como no cálculo do retorno financeiro das obras propostas.

É nesta etapa que os conjuntos que não atendem os critérios da legislação são

identificados e tem seus índices e parâmetros avaliados.

3.4 FORMULAÇÃO DAS ALTERNATIVAS DE OBRAS

A formulação de alternativas de obras consiste na definição dos diversos sistemas elétricos viáveis, que podem derivar ou não do sistema existente, atendendo as metas da qualidade do serviço – continuidade, queda de tensão e carregamento.

Também é nesta etapa que são obtidos os benefícios com a execução da obra, tais como as melhorias obtidas no CHI e CI, que impactam no DEC e FEC, respectivamente. Neste trabalho, o benefício previsto é calculado pelo Método do Payoff Simplificado, a ser explicado no item 3.7.

As atividades de manutenção corretiva e preventiva também influenciam nos índices de continuidade, sendo que em alguns casos, poderiam ser alternativas a obras, mas como o foco desta tese não é a manutenção, já parte-se do princípio que ela foi analisada antes da proposição de obras e foi considerada eficiente.

Cabe neste ponto esclarecer o que são serviços de manutenção e o que são obras. Segundo a referência (28), muitas vezes os dois apresentam características análogas e não existe uma distinção clara entre eles. Estes dois tipos de serviços podem ser separados, de acordo com as respectivas naturezas e, em parte, com as normas contábeis legais do setor elétrico, da forma seguinte:

- Manutenção: Não modifica a configuração da rede nem sua capacidade mantendo constante o ativo imobilizado. Apresenta duas naturezas:

- Corretiva: Troca de elementos deteriorados por outros iguais e equivalentes (cruzetas, isoladores, postes, etc.), sendo o montante do trabalho, a critério da

empresa, de pequeno porte.

- Preventiva: Serviços executados com a finalidade de permitir a cada elemento do sistema desempenhar satisfatoriamente a função para que foi previsto, sem deterioração precoce (reaperto de conexões, pinturas, etc.). Em alguns casos os trabalhos podem ser realizados fora do sistema elétrico (poda de árvore, por exemplo).

- Obras: Alterando normalmente o valor do ativo imobilizado, a configuração da rede ou a capacidade de alguns dos seus elementos, as obras podem ser enquadradas num dos seguintes grupos:

- Construção de novos trechos de rede (primária, secundária ou conjugada).
- Instalação de equipamentos adicionais em circuitos existentes (reguladores de tensão, seccionadores, chaves de manobra, transformadores de distribuição, etc.).
- Substituição de elementos, deteriorados ou não padronizados, por outros equivalentes ou de capacidade diferente, quando o custo envolvido alcança valores elevados, a critério de cada concessionária (troca de postes de madeira por postes de concreto numa linha ou numa certa área, por exemplo).

As características apontadas mostram que a distinção nem sempre é nítida, e em alguns casos apenas o porte permite classificar um serviço como manutenção ou obra. As normas contábeis em vigor nem sempre ajudam esta distinção.

3.5 ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA E SELEÇÃO DAS ALTERNATIVAS DE OBRAS

3.5.1 A ANÁLISE TÉCNICA

Já foi salientado que as alternativas formuladas deverão atender aos requisitos de qualidade de serviço. Esta análise visa a verificação das condições desse atendimento, e a detecção de possíveis modificações futuras, que possam resultar em novos investimentos. Nesta fase, as alternativas que não se mostrarem tecnicamente viáveis, são eliminadas.

A análise técnica consiste na simulação das condições operativas do sistema elétrico, previsto para cada alternativa. Como o objetivo desta tese é selecionar obras para a melhoria dos níveis de qualidade de serviço, não há preocupação com o atendimento as cargas futuras, que deve ser previsto pelo planejamento tradicional. Mas mesmo assim, as obras propostas devem cumprir com os requisitos de qualidade exigidos para a tensão e carregamento dos condutores e equipamentos, além da confiabilidade, evitando a degradação do sistema, pois alguns tipos de obras, tais como interligação de alimentadores, poderia ocasionar este dano ao sistema.

3.5.2 A ANÁLISE ECONÔMICA

Selecionadas tecnicamente as ações que podem beneficiar o sistema, é necessário calcular o custo de execução e o retorno do investimento de cada uma. Neste momento, aquelas que não se mostraram economicamente viáveis, legais e práticas, devem ser eliminadas.

Para o levantamento do custo da obra, uma das alternativas é a elaboração de um projeto detalhado, considerando-se para a determinação do valor do investimento todos os recursos materiais e humanos necessário a execução da obra, compreendendo (27):

- a) custos de materiais e equipamentos;
- b) compra e/ou desapropriação de terrenos ou aquisição de servidões;

- c) Mão de obra da Empresa (estudos, projeto, construção);
- d) Transporte da Empresa;
- e) Serviços contratados de terceiros;
- f) Taxa interna de administração;
- g) Demais despesas (taxa de juros, etc.);

A composição dos custos selecionados constitui o investimento bruto, do qual ainda pode ser deduzido o custo do material salvado.

Muitas vezes, o número de obras apresentado é grande e é inviável elaborar um projeto detalhado para cada ação proposta e assim obter seu custo exato correspondente, pois além de ter um alto dispêndio de mão de obra de projetistas e levar muito tempo, sabe-se que nem todas as proposições serão executadas. Por outro lado, é extremamente necessário saber o valor, pelo menos aproximado, da implementação de cada obra, não apenas para compor a proposta orçamentária do Plano de Obras para o ano seguinte, mas também para prever a aquisição dos materiais.

Então, a alternativa é a estimativa de um custo para cada obra, através de uma metodologia aprovada pela companhia. A maneira de elaborar esta estimativa varia de acordo com as regras internas de cada empresa. Na COPEL, é utilizada a metodologia chamada de Módulos Médios (35). Neste processo, o custo é extraído do histórico das obras já executadas. Consiste em agregar o custo financeiro de toda uma obra em uma unidade física, tal como km de rede, poste, transformadores e outros, incluindo os custos de materiais, mão de obra própria e de terceiros, frete, despesas administrativas, terrenos, etc. A seguir, usando esta unidade física como referência, extrapolar para a extensão total da obra. Por exemplo, para calcular o custo da construção de um novo alimentador 13,8 kV, com cabo 336, com 20 km de extensão, utiliza-se como unidade de referência o km de rede. Para obter o custo total do alimentador proposto, basta multiplicar o valor do km unitário relacionado no sistema Módulos Médios por 20, e obter o valor monetário em reais aproximado da obra. A tabela 3.1 mostra alguns dos módulos existentes. Apesar do valor não ser exato, este método de cálculo oferece a

aproximação necessária para a elaboração do orçamento anual e para a programação da compra de materiais para as obras futuras. Os valores são reajustados anualmente, baseado no histórico das obras executadas.

Tabela 3.1 - Exemplo de módulos médios, utilizados na elaboração do orçamento anual (35).

Descrição do Módulo	Custos (R\$)					Custo Total
	Material	Mão-de-Obra Terceiros	Frete	Mão-de-Obra Própria	Despesa Administrativa	
Ampliação de rede Urbana p/poste						
Melhoria de Rede Urbana p/US						
Ampliação de Rede Urbana em Ambiente Agressivo p/poste						
Melhoria de Rede Urbana em Ambiente Agressivo p/US						
Alimentador Novo 13,8kV - 120mm ² CU - Amb. Agressivo p/Km						
Alimentador Troca 13,8kV - p/120mm ² CU - Amb. Agressivo p/Km						
Alimentador Novo 13,8kV - 4/0AWG AL p/Km						
Alimentador Novo 13,8kV - 336,4MCM - AL p/Km						
Alimentador Troca 13,8kV - p/4/0AWG - AL p/Km						
Alimentador Troca 13,8kV - p/Rede Compacta - 336,4 MCM p/Km						

Para complementar a análise das alternativas de obras, resta a análise econômica, que verifica o valor e o retorno do investimento. Há diversas formas de comparação usadas para avaliar as alternativas (36, 37, 38) tais como VPL, TIR, Payback, RCB, custos nivelados, critérios de engenharia e medidas incrementais. Os mais comentados na literatura são brevemente descritos a seguir (36):

- VPL – Valor Presente Líquido - É uma ferramenta de comparação de custo que toma desembolsos em diferentes tempos e atualiza numa mesma base para orientar a tomada de decisões. Considera explicitamente o valor do dinheiro no tempo, por isso pode ser considerada uma técnica de orçamento sofisticada. O valor presente de seus fluxos de entrada de caixa é subtraído do investimento inicial, e o resultado é descontado a uma taxa de desconto que chamaremos de taxa mínima de atratividade ao investimento, que é a taxa mínima na qual o investidor estaria disposto a aplicar no projeto. Caso o valor do VPL a esta taxa seja maior que 0, o projeto é aceitável.

- TIR - É uma técnica de orçamento de capital sofisticada de grande aceitação, tendo em vista que seu resultado é um valor percentual inerente ao retorno do projeto. A TIR é a taxa de desconto que iguala a VPL de um projeto a 0 (iguala o valor presente dos fluxos de caixa ao investimento inicial).
- Payback – É o período de tempo requerido para retornar o investimento inicial. O período pode ser calculado em termos de valores atuais ou presentes. É o momento exato de tempo no qual a empresa retorna seu investimento inicial em um projeto, a partir dos fluxos de entrada de caixa. Sua popularidade provém da simplicidade do cálculo e de seu apelo intuitivo. De certa forma, está aliado a relações de certeza de retorno do investimento, visto que quanto menor o tempo de retorno do investimento, menor é o risco inerente ao insucesso do projeto.
- Custos nivelados: Custos nivelados ou valores nivelados são custos ou descontos constantes durante a vida útil de um projeto que tem o mesmo valor que o valor presente do projeto. É muito útil para comparar alternativas com diferentes ciclos de vida, tais como transformadores que tem 30 anos com a substituição de lâmpadas incandescentes que são substituídas a cada 6-10 anos.
- Relação custo-benefício (RCB): Geralmente é expressa em termos de valores. Se maior que um, há um benefício. RCB é um sistema métrico válido para comparar alternativas entre um projeto ou programa, mas aplicar este método para comparação de projetos pode levar a uma solução não ótima, principalmente no caso de restrições orçamentárias.
- Critérios de Engenharia: Outro método é priorizar projetos por critérios de engenharia. Estes critérios caem em duas categorias gerais: causa (sobrecarga) e efeito (o que acontece com o consumidor e com o sistema). O primeiro pode ser quantificado em termos de quantidade de sobrecarga normal ou emergência a ser reduzida ou a quantidade de capacidade de reserva provida. O segundo pode ser medido por duração do desligamento e índices de continuidade (DEC, FEC, DIC,

FIC, etc), energia não distribuída (END), ou outras medidas de confiabilidade. Isto pode ser estendido para o valor do serviço do consumidor ou custos de desligamento, os quais podem tornar-se um custo ou um benefício.

- Medidas incrementais: Uma extensão dos critérios de engenharia é priorizar projetos por unidades de custo, tais como a redução de sobrecarga por dólar investido ou o aumento do nível de confiabilidade por dólar investido. Ambos, critérios de engenharia e medidas incrementais tem algum apelo, porque são fáceis de implementar, e ambos podem incorporar custos no denominador de diferentes perspectivas. Contudo, levam em conta apenas o benefício dos critérios técnicos e podem, em muitos casos, selecionar projetos com valores zero ou negativos.
- Função “Utility”: Algumas concessionárias têm incorporado uma grande variedade de critérios para cada projeto e cada alternativa, atribuindo valores da concessionária para todos os diferentes atributos de cada projeto que reflete as preferências e valores da corporação (ou ao menos de sua diretoria). Estes podem incluir o impacto no fluxo de caixa, confiabilidade, política e assim por diante. Este critério é o mais compreensivo, o mais complexo e difícil de computar. Métodos que podem ser aplicados para estes tipos incluem análise de decisões, processo hierárquico analítico e análise combinada.

Após escolhida como a melhor alternativa e aprovada no aspecto técnico-econômico, esta obra passa a fazer parte do Plano de Obras e a ser uma obra candidata a execução, competindo por recursos.

Há uma grande confusão na literatura quando refere-se a priorização de alternativas de obras e priorização de obras, após escolhida a alternativa. Para o caso desta tese, foi definido que a escolha da melhor alternativa é um passo anterior a priorização da obra, para efeitos de alocação orçamentária.

Para a escolha da melhor alternativa, deve-se fazer uma análise financeira de longo

prazo, utilizando um dos índices econômicos descritos e definidos pela direção da Empresa e uma análise técnica, em que a obra escolhida represente a melhor alternativa de engenharia para resolver o problema local levantado.

Após superada esta etapa, onde teoricamente o programa apresentado já contempla as melhores obras para a empresa, analisadas do ponto de vista técnico-econômico, inicia a nova etapa, que é a priorização das obras sob o ponto de vista de adequá-las ao orçamento da empresa destinado a execução de obras naquele ano.

Alguns métodos, como o apresentado em (26), propõem-se a escolher as melhores alternativas de obras e ao mesmo tempo definir um índice que poderia ser utilizado na priorização das obras.

Porém, nesta tese será considerado que todas as obras propostas já representam as melhores alternativas para a solução dos problemas apresentados.

3.6 A PRIORIZAÇÃO DE OBRAS

A priorização de obras é uma operação clássica de otimização, com a advertência que algumas vezes os componentes são difíceis de avaliar. Possivelmente, a parte mais difícil é definir o objetivo apropriado. Pode seguir desde uma regra simples até complexos modelos de decisão. Os diferentes métodos devem servir como uma ferramenta de suporte a decisão, e não como uma receita. Concessionárias com sistemas que exibem uma grande quantidade de iteração entre projetos e interdependência terão um ganho maior se fizerem uma avaliação de projetos em classes diferentes. Concessionárias com poucos casos terão um ganho maior pela avaliação de projetos independentes (36).

A seguir são relacionadas algumas classes de métodos de priorização de obras

apresentados na referência (36):

- Decisão do Engenheiro Sênior: É o método mais comum e quando implementado por uma equipe experiente e com os devidos incentivos, esta pode ser a melhor aproximação. Neste caso, uma gama de alternativas para todos os projetos potenciais é submetida ao engenheiro, e ambos, experiência e julgamento são aplicados para decidir qual alternativa será escolhida. O valor e a capacidade da experiência e julgamento não devem ser desprezados, pois nem todos os aspectos da seleção e priorização podem ser capturados em um único mecanismo.
- Projetos Independentes: A alternativa de cada projeto que melhor cumpre com os critérios (menor VPL, maior TIR, maior RCB, etc) é selecionada e então cada uma é alocada em um ranking até que o orçamento esteja completamente esgotado. Método simples, mas frequentemente não leva a melhor gama de alternativas.
- Portfólio simples: A alternativa de cada projeto que melhor cumpre com os critérios é selecionada, com flexibilidade para decidir entre várias alternativas em cada projeto. Este método seleciona as alternativas e projetos simultaneamente. O método usado é “programação inteira 0-1”, e é direta, mas não necessariamente fácil.
- Portfólio interdependente: Este método requer informações sobre interações do projeto que normalmente o planejador não conhece. Usa o mesmo método matemático básico que o portfólio simples, mas requer mais esforço por parte dos planejadores para considerar interdependência, as vezes complexas, entre os projetos. Por exemplo, se uma alternativa de recondutoramento para uma área permite uma transferência de carga para resolver uma sobrecarga em uma área diferente que não é possível de outra maneira, então esta sinergia deve ser levada em conta.
- Programação Estocástica Dinâmica (SDP - Stochastic Dinamic Program): Leva em conta certas variáveis em vários pontos submetidos ao planejador da distribuição,

usualmente crescimento da carga e custo, mas também pode estender a análise para qualquer número de variáveis que o analista contemplar no modelo. SDP também considera a capacidade de informação destas variáveis. Por exemplo, se a carga cresce mais lentamente ou mais rapidamente do que a média planejada, então o plano ótimo para a carga atual deveria ser diferente. Colocando esta possibilidade ou valor “opção real”, SDP agrega um grau de sofisticação, elegância e realismo para o modelo matemático de gerenciamento do sistema de distribuição. Contudo, a complexidade matemática pode ser enorme (dependendo do grau de complexidade adotado), pois requerem estimativas probabilísticas do futuro, ao invés de estimativas médias e o número de planos de contingência e alternativas pode crescer. Apropriadamente aplicado, SDP pode dar uma visão adicional na flexibilidade estratégica e temporal para o investimento sob incertezas, mas como uma ferramenta de planejamento, necessita ser simples para implementação. SDP simultaneamente identifica qual alternativa para cada projeto pode ser priorizada e para qual circunstância.

A seguir, será apresentada uma nova proposta para a utilização do equacionamento do cálculo do benefício do Método do Payoff COPEL (2) com algumas simplificações, este sim destinado a calcular o benefício para priorizar obras para a adequação dos conjuntos aos índices da ANEEL. Nos próximos capítulos, será proposta uma nova metodologia para priorização desta classe de obras, baseado na otimização matemática.

3.7 A ADAPTAÇÃO DO MÉTODO DO PAYOFF COPEL

Para o cálculo do benefício das obras direcionado ao objetivo da tese, que é elaborar uma metodologia de obras direcionada ao cumprimento das metas impostas pelo órgão regulador, será proposta uma adaptação na metodologia do Método do Payoff COPEL (2). Consiste na extração do equacionamento somente da parcela referente a ΔEND e

utilização somente dos módulos da tabela 3.2 que têm influência na continuidade do sistema.

Com esta simplificação, é possível mensurar, em termos de CHI e de CI evitado, o benefício que a execução da obra proposta vai trazer ao sistema elétrico.

A tabela 3.2 está mostrando os módulos do Método do Payoff COPEL (2) que tem impacto no DEC (CHI) e no FEC (CI):

Tabela 3.2 – Obras que tem impacto nos indicadores DEC e FEC, em função dos módulos (2).

MÓDULOS PARA CLASSIFICAÇÃO DE OBRAS	DEC (CHI)	FEC (CI)
1. Interligação de ramais, tronco de alimentadores e linhas	X	Não
2. Implantação de alimentadores ou linhas com mudança de configuração	X	X
3. Recondutoramento de alimentadores ou linhas	Não	Não
4. Rede compacta	X	X
5. Complementação de fase em 19,92 kV	X	X
6. Substituição de isolador de pino por tipo pilar	X	X
7. Instalação de chaves interruptoras sob carga	X	Não
8. Implantação de subestações 34,5/13,8 kV	X	X
9. Instalação de bancos de reguladores de tensão	Não	Não
10. Complementação de fases em 13,8 kV	X	X
11. Instalação de religadores automáticos e pinçamentos	X	X
12. Instalação de bancos de capacitores	Não	Não
13. Transferência Automática de carga entre SE 34/13 kV.	X	X

Portanto, os módulos 3, 9 e 12 não serão analisados, pois as obras desta classe não tem impacto sobre o DEC e/ou FEC.

O Método do Payoff COPEL (2) é baseado em índices de ponderação, denominados K, para estimar o benefício de cada parcela do custo global para cada módulo de obras. Quando foi elaborado, não havia um banco de dados disponível para definir os valores dos benefícios alcançados com as obras. Inicialmente as equações e os valores dos índices K foram definidos empiricamente, baseado na experiência profissional e conhecimento de especialistas da área, todos de reconhecido mérito.

Após a utilização deste método, ano a ano, os planejadores da empresa reúnem-se para reavaliar o índice de ponderação K. Atualmente, após mais de 10 anos de utilização deste método de priorização de obras, já existem informações históricas suficientes para uma boa avaliação deste fator. Ainda assim, periodicamente, os índices são reavaliados e, quando necessário, alterados no Método do Payoff COPEL. No Método do Payoff Simplificado, utilizado nesta tese, será avaliada somente a parcela do custo global correspondente a END – Energia Não Distribuída. Por conseguinte, nas equações apresentadas restarão apenas os fatores K referentes a esta parcela. Um exemplo de como foi efetuado o processo de extração da parcela relativa a END do Método do Payoff COPEL está demonstrado no anexo C.

A seguir, está descrito este equacionamento para os diversos módulos do Método do Payoff COPEL (2), já simplificados, que serão usados no desenvolvimento desta tese.

3.7.1 Interligação de ramais, troncos de alimentadores e linhas

Considerar-se-á a interligação de dois circuitos. Cada circuito pode partir de subestações fontes distintas ou da mesma subestação.

- Para circuitos partindo da mesma subestação ou subestações diferentes.

Enumera-se, a partir da subestação, em ordem crescente, as chaves, religadores e os trechos compreendidos entre chaves do tronco de alimentador ou linha, conforme mostra a figura 3.2.

- Para interligação de ramais derivados de mesmo tronco de alimentadores ou linha.

A numeração deve iniciar a partir do ponto de derivação do ramal. Para cada trecho numerado, deverá ser conhecido o índice CHI.

A montante da interligação, as demandas dos trechos devem ser consideradas individualmente, a partir do trecho de interligação (inclusive). Deve-se considerar a somatória das demandas que podem ser atendidas em caso de contingência. Para o cálculo de CHI, utilizar:

$$\Delta CHI = \left[\left(\sum_{i=l+1}^n CHI_{Ai} \right) + \left(\sum_{i=l+1}^n CHI_{Bi} \right) \right] \cdot k_1 \quad (3.3)$$

Para as interrupções, não há benefícios com esta obra, portanto:

$$\Delta CI = 0 \quad (3.4)$$

Então,

n: número do trecho de maior índice que pode ser atendido pela interligação em contingência, no ramal, tronco de alimentador ou linha;

l: número do trecho a montante do trecho de menor índice que pode ser atendido pela interligação;

CHI_A : duração total das interrupções (próprias) ocorridas na chave j do circuito A, em consumidor.interrumpido.hora/ano;

k_1 : fator de correção devido à redução do tempo de interrupções (de duração maior

ou igual a 3 min) com a execução da obra - utilizar $k_1 = 0,35$;

CHI_B : duração total das interrupções (próprias) ocorridas na chave j do circuito B, em consumidor.hora.interrompido/ano;

Por exemplo, utilizando a figura 3.2, para um curto circuito no alimentador A que provoque interrupção no trecho DB1, temos que $l=3$ e $n=6$.

Para um curto-circuito no alimentador B que provoque interrupção no trecho DB1, $l=1$ e $n=5$.

Então, a equação (3.3), fica:

$$\Delta CHI = \left[\left(\sum_{i=4}^6 CHI_{Ai} \right) + \left(\sum_{i=2}^5 CHI_{Bi} \right) \right] . 0,35 \quad (3.5)$$

Figura 3.2 – Circuito exemplo a ser utilizado para os cálculos relativos a interligação de ramais, troncos de alimentadores e linhas.

3.7.2 Implantação de tronco de alimentadores ou linha com mudança de configuração

- Alimentadores com carregamento alto

Esta ação tem o objetivo de remanejar demanda de um alimentador que esteja com o carregamento alto, que tem como consequência mais desligamentos, ou esteja com os índices operativos fora dos níveis legais, tais como DEC e/ou FEC altos. Exemplos típicos estão na figura 3.3:

Figura 3.3 – Circuitos típicos para exemplificar ações tomadas devido ao alto carregamento de alimentadores.

O benefício é calculado através das equações 3.6 e 3.7:

$$\Delta CHI = CHI \cdot k_1 \quad k_1 = 0,5 \quad (3.6)$$

$$\Delta CI = CI \cdot k_2 \quad k_2 = 0,5 \quad (3.7)$$

- Separação de ramal com colocação de religador automático (RA)

Com esta ação, espera-se a redução das interrupções nos ramais e subramais do novo circuito, pela diminuição na queima de elos fusíveis, como mostrado na figura 3.4. A implantação do novo RA propicia uma melhor coordenação da proteção.

Figura 3.4 – Exemplo típico de separação de ramal para colocação de RA.

$$\Delta CHI = \left(\sum_{i=1}^n CHI \right) \cdot K_1 \quad k_1 = 0,7 \quad (3.8)$$

$$\Delta CI = CI \cdot k_2 \quad k_2 = 0,7 \quad (3.9)$$

n= número de chaves fusíveis dos subramais

- Alimentador para alívio de carga em outros alimentadores

No caso desta ação, o benefício CHI deve vir apenas dos blocos que serão beneficiados com a entrada do novo alimentador.

$$\Delta CHI = \left(\sum_{j=1}^n CHI \right) \cdot K_1 \quad k_1 = 0,35 \quad (3.10)$$

$$\Delta CI = \left(\sum_{j=1}^n CI \right) \cdot K_2 \quad k_2 = 0,35 \quad (3.11)$$

j = número de alimentadores beneficiados

Onde:

L_C : comprimento do trecho previsto em rede compacta, em km;

L_{T2} : comprimento total do tronco (excluir ramais), em km;

k_1 : fator de correção devido à redução do tempo de interrupções (de duração maior ou igual a 3 min) com a execução da obra - utilizar $k_1 = 0,7$;

Caso II:

Rede compacta a ser instalada no ramal , como se vê na figura 3.6:

Figura 3.6 - Rede compacta no ramal e religador automático na subestação.

A equação para o cálculo dos indicadores para obras de rede compacta no ramal é:

$$\Delta CHI = CHI \left[k_1 \cdot \left(\frac{L_C}{L_{T3}} \right)^{0,1} \right] \quad (3.14)$$

e

$$\Delta CI = CI \left[k_1 \cdot \left(\frac{L_C}{L_{T3}} \right)^{0,1} \right] \quad (3.15)$$

Onde:

L_C : comprimento do trecho previsto em rede compacta, em km;

L_{T3} : comprimento total do ramal, em km;

k_1 : fator de correção devido à redução do tempo de interrupções (de duração maior ou igual a 3 min) com a execução da obra - utilizar $k_1 = 0,7$;

3.7.4 Complementação de fase em ramais monofásicos

$$\Delta CHI = CHI \cdot k_1 \quad k_1 = 0,4 \quad (3.16)$$

$$\Delta CI = CI \cdot k_2 \quad k_2 = 0,7 \quad (3.17)$$

3.7.5 Substituição de isolador pino por pilar

A troca do isolador e a colocação de pára-raios tem como consequência o aumento da tensão suportável sob impulso (TSI) da estrutura, ficando esta menos susceptível a desligamentos temporários devido a descargas atmosféricas. No cálculo do CHI, devem ser considerados apenas os desligamentos creditados a descargas atmosféricas.

$$\Delta CHI = CHI.k_1 \quad (3.18)$$

$$\Delta CI = CI.k_2 \quad (3.19)$$

Nestas equações, aplicou-se os valores de k_1 e k_2 relacionados na tabela 3.3.

Tabela 3.3 –Valores de K_1 e K_2 a serem aplicados para o cálculo do benefício da substituição do isolador pino por pilar.

	K1	K2
Caso 1 – Troca de isoladores sem instalar pára-raios	0,5	0,3
Caso 2 – Troca de isoladores com pára-raios	0,7	0,5
Caso 3 – Troca de pára-raios (já tem isoladores)	0,2	0,2

3.7.6 Instalação de chaves interruptoras sob carga

- Alimentador com possibilidade de interligação

$$\Delta CHI = CHI.k_1 \quad k_1 = 0,5 \quad (3.20)$$

CHI do trecho a ser manobrado

$$\Delta CI = 0 \quad (3.21)$$

CI devido a manobras para o trecho a montante.

3.7.7 Implantação de subestações 34,5kv/13,8kv

Será considerado, de forma genérica, o diagrama da figura 3.7:

Figura 3.7 – Configuração de subestações de distribuição.

Todos os alimentadores interligados com a nova subestação devem ser numerados. Para cada alimentador, obter os parâmetros constantes da expressão 3. 22 para calcular ΔCHI :

$$\Delta CHI = \left(\sum_{i=1}^n CHI \right) . k_1 \quad k_1 = 0,7 \quad (3.22)$$

e para calcular o CI:

$$\Delta CI = \left(\sum_{i=1}^n CI \right) . k_2 \quad k_2 = 0,7 \quad (3.23)$$

onde:

i : é o alimentador interligado a subestação;

n : número total de alimentadores que serão interligados à nova subestação com remanejamento de cargas, total ou parcial;

k_1 : fator de correção devido à redução do tempo de interrupções (de duração maior ou igual a 3 min) com a execução da obra.

k_2 : fator de correção devido à redução da quantidade de interrupções.

3.7.8 Instalação de religadores automáticos e pinçamentos

- Substituição de elo fusível por religador automático quando o religador a montante do tronco está com a sua curva rápida de neutro bloqueada.

$$\Delta CHI = DPE.K \quad k = 0,7 \quad (3.24)$$

$$\Delta CI = 0 \quad (3.25)$$

O $K=0,7$ expressa que 70% dos desligamentos nos ramais são transitórios. Os outros 30% são permanentes. DPE é a duração própria do elo fusível analisado.

- Substituição de elo fusível por religador automático quando o religador a montante do tronco está com a sua curva rápida de neutro desbloqueada.

$$\Delta CHI = 0 \quad (3.26)$$

$$\Delta CI = 0 \quad (3.27)$$

Esta obra reduz a quantidade de FM (falha momentânea), que é a interrupção menor que três minutos, de $\Delta FM = (n^\circ FM).k$, onde $k = 0,5$ é o fator de correção devido a redução do número de FM com a execução da obra.

3.7.9 Transferência automática de carga entre SEs 34/13

A transferência automática de carga necessita da existência de duas linhas alimentando a subestação 34,5/13,8kV, uma que atende em configuração normal, outra que atende em contingência da primeira. Em cada uma destas linhas, na chegada à subestação, deve ser prevista a instalação de religadores, comandados por relés de transferência

automática ou automatizados.

Para que a transferência automática seja viável, é necessário que:

- que as duas linhas mencionadas possam atender a carga da subestação sem cortes de carga;
- que não seja preciso alterar ajustes de bancos de reguladores de tensão;
- que não seja necessário alterar ajustes de equipamentos de proteção.

Uma vez que a transferência automática foi estudada e considerada viável, o benefício é calculado, fazendo-se:

$$\Delta CHI = CHI \cdot k \qquad k = 1,0 \qquad (3.28)$$

$$\Delta CI = CI \cdot k \qquad k = 1,0 \qquad (3.29)$$

K – fator de correção devido a redução do tempo de interrupção.

OBS.:

- Considera que uma das fontes sempre vai ter energia. No caso do alimentador alternativo provier da mesma fonte (subestação) que o alimentador principal, descontar do benefício o tempo (CHI) que a barra da subestação está sem energia.
- Quando existir outras subestações a montante, o CHI deve ser somente o do trecho que tem religamento automático.
- Considerar somente os desligamentos acidentais

Vale a pena frisar que uma das grandes facilidades desta mensuração de benefício é que para incluir uma outra ação, tal como um equipamento novo ou uma nova função de automação, basta elaborar a equação representativa do benefício, composta por um k , e depois “calibrar” este K por observações históricas, normalmente obtidas em campo.

Neste capítulo foi visto desde o processo de obtenção de índices de continuidade, iniciando com o registro da interrupção pelo eletricitista até a apresentação de algumas classes de métodos relacionados a priorização de obras. Também foi visto a simplificação efetuada na formulação da estimativa do benefício do Método do Payoff COPEL (2), para adequá-la ao objetivo da tese, que é priorizar obras para atingir as metas por conjunto estipulado pelo órgão regulador. Nos próximos capítulos, será proposta uma nova metodologia para priorização desta classe de obras, baseado na técnica matemática da otimização em dois níveis e na programação por metas (“goal programming”).

4 PRIORIZAÇÃO DE OBRAS – ANÁLISE GERAL

Neste capítulo, inicialmente, será feita uma introdução a modelagem matemática e, em seguida, serão abordados alguns modelos que são comumente utilizados na priorização de obras. A priorização geral, que não envolve a divisão por conjuntos, será explorada neste capítulo, passando pelas fases de modelagem matemática e de simulação. Termina com a exposição dos resultados e das conclusões preliminares obtidas para a análise geral.

4.1 A MODELAGEM MATEMÁTICA

O uso da matemática para testar idéias e fazer previsões sobre o mundo real detém um longo recorde nas ciências físicas, a tal ponto que se tornou a linguagem base das físicas e suas aplicações em engenharia (39). O modelo matemático é, sem dúvida, a ferramenta mais versátil e barata que um engenheiro pode usar, uma vez que diferentes variações nas características e entradas de um sistema podem ser analisadas sem nada ser construído.

Um bom modelo leva a um melhor entendimento de uma determinada situação, mas nunca se pode esquecer que este deve ser robusto, não contendo situações fora dos limites da sua definição ou assentando em pressupostos que possam levar a resultados inconsistentes. Não é igual à realidade, mas suficientemente similar para que as conclusões obtidas possam ser estendidas à realidade. Deve ainda ser preditor, isto é, ser capaz de antecipar resultados que possam ser verificados posteriormente através de observações experimentais.

A modelagem nem sempre é um assunto fácil de abordar. São raros os textos de apoio que falem do assunto de forma sistemática, e nem poderia ser de outra forma, já que se aprende essencialmente na prática, não havendo regras bem determinadas (39).

Os passos do processo de modelagem ou de construção de modelos podem ser resumidos, de uma forma bastante geral, no fluxograma da figura 4.1:

Figura 4.1 – O processo de construção de modelos matemáticos (39).

A etapa inicial de definição do problema é uma das fases mais importantes do processo. Envolve:

- Objetivos;
- Variáveis de decisão ou controle;
- Níveis de detalhes.

A etapa seguinte é a fase de formulação ou construção de modelos de otimização. É quando são definidos os tipos de variáveis a serem utilizados. Também são definidas nesta fase a função objetivo, as restrições, os parâmetros e constantes necessários para o equacionamento do problema, bem como as hipóteses de representação, que irão orientar a escolha e a possível utilização de modelos já existentes e de técnicas de solução. Os métodos de otimização têm um papel fundamental na modelagem, uma vez que um modelo usualmente não é desenvolvido com um fim por si só, ou seja, o modelo é formulado de modo a determinar valores de parâmetros livres que produzam uma medida ótima.

Por outro lado, deve-se tomar o cuidado de não simplificar em demasia ou distorcer a formulação, apenas porque se pretende resolver o problema de otimização de forma mais simples.

Por fim, na fase de validação do modelo, cumpre comparar seu comportamento com a realidade e, se necessário, atuar sobre ele de forma a adequá-lo ao sistema real.

Nesta tese, alguns critérios de priorização de obras serão modelados e tratados matematicamente, tendo como objetivo a determinação das obras capazes de colocar a maior quantidade de conjuntos dentro do limite de continuidade DEC e FEC imposto pela ANEEL.

Os modelos apresentados adiante pretendem ser capazes de reproduzir a realidade (dentro de certas condições) e ao mesmo tempo serem preditivos, auxiliando o trabalho de análise das obras do planejador e permitindo a comparação dos resultados dos diversos métodos entre si.

Devemos ter em mente que nesta metodologia, sempre parte-se do princípio que o custo e o benefício de cada obra é conhecido, conforme foi explanado no item 2.6.3.

Dependendo da necessidade e dos critérios da empresa distribuidora, a priorização

pode ser executada analisando-se somente o DEC (transformado em CHI), somente o FEC (CI) ou ambos (CI e CHI).

Como ferramenta para a análise das obras propostas, será utilizada a técnica de otimização matemática, que tem a sua formulação geral definida da seguinte maneira (39):

$$\begin{aligned} \min F(x) \\ \text{sujeito a} \\ h_i(x) = 0 \quad i = 1, 2, 3, \dots, m_h \\ g_j \leq 0 \quad j = 1, 2, 3, \dots, n_g \\ x \in R^n \end{aligned} \quad (4.1)$$

Então a função matemática de otimização para a priorização de obras adquire a seguinte estrutura geral:

$$\text{MAX} \sum_{i=1}^{no} \text{Benefício}_i \cdot x_i \quad (4.2)$$

sujeito as restrições:

$$\sum_{i=1}^{no} C_i \cdot x_i \leq R \quad (4.3)$$

$$R \geq 0 \quad (4.4)$$

$$C_i \geq 0 \quad (4.5)$$

onde:

i é a obra em análise.

Benefício_i é a função objetivo da obra i que se deseja otimizar.

C_i é o valor do investimento na obra i .

no é o número de obras propostas.

x_i é a variável de decisão (1 faz a obra i / 0 não faz a obra i).

R é o orçamento disponível para realização das obras.

No equacionamento acima, a função objetivo Benefício pode ser substituída por qualquer um dos modelos matemáticos relacionados a seguir, dependendo do objetivo que se deseja alcançar. A única restrição existente é a restrição orçamentária.

A seguir, vários modelos encontrados na literatura são apresentados e tem seu aspecto teórico explicado, sempre se referenciando ao CHI. Se o mesmo raciocínio for aplicado ao CI, resultará nas equações priorizando as obras através do indicador FEC. A análise dos dois indicadores CHI e CI em conjunto é um pouco diferenciada e está explanada no item 4.3.

4.2 MODELOS MATEMÁTICOS APLICADOS

4.2.1 Modelo da Relação Custo-Benefício (RCB)

Uma técnica de priorização de obras usada no setor elétrico é a relação custo-benefício (RCB), geralmente expressa em valores (34). Esta métrica demonstra o quanto de benefício resulta para o custo unitário aplicado, ou seja, o quanto em reais é aplicado para obter uma melhoria na confiabilidade.

A relação custo-benefício da obra proposta pode ser dada imediatamente pela relação custo sobre o benefício evitado (equação 4.6):

$$RCB = \frac{\text{Valor da obra } R(\$)}{\text{benefício}} \quad (4.6)$$

Neste caso, o benefício pode ser:

- CHI evitado (Consumidor.Hora.Interrompido).
- CI evitado (Consumidor.Interrompido).

Traduzindo esta relação matematicamente e adaptando para a otimização:

$$RCB = \left(\sum_{i=1}^{no} \frac{C_i}{\Delta \text{benefício}_i} * x_i \right) \quad (4.7)$$

onde:

$\Delta \text{benefício}_i$ é a diferença do benefício obtido com a execução da obra i .

Por conseguinte, a equação utilizada para maximizar o CHI fica:

$$MIN \left(\sum_{i=1}^{no} \frac{C_i}{\Delta CHI_i} * x_i \right) \quad (4.8)$$

onde:

$\Delta CHI_i = CHI \text{ (antes de executada a obra } i) - CHI \text{ (depois de executada a obra } i)$.

Analogamente, todo este raciocínio poderia ser empregado para a análise do CI, resultando na equação 4.9, onde:

$$MIN \left(\sum_{i=1}^{no} \frac{C_i}{\Delta CI_i} * x_i \right) \quad (4.9)$$

4.2.2 Modelo do Payoff COPEL

Conforme foi explanado no item 2.5.3, este método observa as variações do custo global do serviço para a concessionária. Para priorizar as obras propostas, o Método do Payoff COPEL (2) utiliza uma análise simplificada, que consiste na simples divisão do custo da obra pelo benefício provável no primeiro ano. É uma alternativa de comparação de investimentos muito usada e consiste em avaliar o tempo que um determinado investimento levaria para que o retorno ficasse maior que o valor investido (40). O resultado obtido, expresso em anos, representa aproximadamente, o tempo necessário para amortizar o investimento na obra.

$$PAYOFF = \frac{INV}{B} \quad [\text{anos}] \quad (4.10)$$

Este método considera outros benefícios além do CHI, tais como perdas e nível de tensão. Mas vai ser mantido na íntegra como apresentado no capítulo 2.5.3, para efeitos de comparação com outros métodos, já que é utilizado por uma concessionária de energia elétrica. Os resultados serão fornecidos pelo aplicativo POBRAS utilizado pela COPEL.

Desta maneira, a função objetivo será:

$$MIN \left[\sum_{i=1}^{no} payoff_i * x_i \right] \quad (4.11)$$

onde $payoff_i$ é o tempo de retorno do investimento calculado pelo Método do Payoff COPEL (2) com a construção da obra i.

4.2.3 Modelo do Payoff Multa

Um outro modelo utilizado para a escolha de obras utilizada pela COPEL, e derivado do Payoff COPEL, é a utilização do cálculo do tempo de retorno do investimento com o não pagamento das penalidades devido a construção da obra. Neste caso, a equação é única e vale tanto para o CHI quanto para o CI. Para diferenciar do caso anterior, este é denominado de Payoff multa, e ficaria:

$$Payoff\ multa = \frac{Valor\ da\ obra(R\$)}{Multa\ evitada(R\$)} \quad (4.12)$$

A função objetivo permanece a mesma que aquela apresentada na equação 4.11, sendo substituída apenas a parcela relacionada ao payoff:

$$MIN[\sum_{i=1}^{no} payoff\ multa_i * x_i] \quad (4.13)$$

onde $payoff\ multa_i$ é o tempo de retorno do investimento em anos, com o não pagamento de penalidades devido ao DEC evitado com a construção da obra i . A variável x_i continua sendo a variável binária de decisão.

É utilizado como uma referência de amortização econômica da penalidade deixada de pagar ao órgão regulador relacionada ao investimento feito na obra. Esta metodologia é usada para saber em quantos anos o investimento será amortizado considerando o benefício como a economia financeira obtida devido ao não pagamento das multas ao órgão regulador.

4.2.4 Maximização do benefício

Neste modelo $\Delta\text{benefício}$ é, simplesmente, é a maximização do benefício em CHI ou em CI, obtido com a execução da obras.

$$MAX\left(\sum_{i=1}^{no} \Delta\text{benefício}_i * x_i\right) \quad (4.14)$$

4.2.5 Modelo utilizando a penalidade

Para utilizar a penalidade aplicada devido a transgressão dos índices, ela pode ser considerada de duas maneiras:

1 – Calculando o valor monetário evitado com a execução da obra como receita.

2 – Usando o valor da penalidade como um indicativo de onde aplicar a obra. Como a fórmula da penalidade (anexo B) é proporcional ao tempo de interrupção e a quantidade de consumidores, serve como referencial para identificar regiões carentes de melhoria. Ainda tem a vantagem de identificar os conjuntos chamados de reincidentes, que são penalizados pela aplicação do K2 ou k3 diferente de 1.

Como os valores das penalidades nem sempre são suficientes para, por si só, justificar o investimento, ela será utilizada como indicativo dos conjuntos mais carentes de confiabilidade.

É preciso esclarecer que atingir a meta estipulada para o DEC e para o FEC, não é garantia de que não haverá penalidades, pois a concessionária pode não cumprir com os limites exigidos para outros parâmetros da qualidade de energia, tais como nível de tensão, DIC e FIC.

Matematicamente, desde que as obras propostas sejam suficientes para tirar o conjunto da transgressão, a equação que relaciona as obras com as penalidades pode ser descrita como:

$$F(x_i) = MIN \left[K \cdot \sum_{j=1}^{nc} \varphi(j) * \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{noc} C_i * x_i}{\sum_{i=1}^{no} C_i} \right) \left(\frac{N^{\circ}cons.conj(j)}{N^{\circ}cons.empresa} \right) \right] \quad (4.15)$$

onde:

- j é o conjunto analisado.
- $K = \frac{k1 * k2 * k3}{8760}$. (faturamento anual copel)
- C_i é o valor do investimento em obra.
- noc é o número de obras do conjunto
- nc é o número de conjuntos
- DEC_v é o valor do DEC atual do conjunto j
- DEC_p é o valor do DEC previsto (meta) para o conjunto j
- x_i é a variável de decisão (1 faz a obra i / 0 não faz a obra i)
- $\varphi(A) = \max\{0, DEC_v(j) - DEC_p(j)\}$

Ou seja, $\left\{ \begin{array}{l} \text{é zero para valores menores que } 0 \\ \text{é } DEC_v(j) - DEC_p(j) \text{ para valores maiores que } 0 \end{array} \right\}$

Uma outra maneira mais simples de equacionar obras e penalidades, é calcular a redução da multa a ser paga devido a execução da obra e simplesmente, procurar minimizar a penalidade devida (eq. 4.16). Isto é alcançado com a maximização do $\Delta multa$, que é a redução da multa obtida com a execução da obra i .

$$MAX \left(\sum_{i=1}^{no} \Delta multa_i * x_i \right) \quad (4.16)$$

4.2.6 MODELO UTILIZANDO O MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS

Analisando este método do ponto de vista de priorização de obras, vislumbrou-se a possibilidade de utilizá-lo com este objetivo e neste item, será desenvolvido um modelo matemático baseado neste conceito, constituindo-se numa contribuição deste trabalho.

A idéia central do Método dos Mínimos Quadrados é encontrar uma função (pode ser uma reta), que melhor se ajuste ao conjunto de pontos dado, minimizando a diferença dos quadrados entre eles.

Sua utilização aplicada à priorização de obras consiste em fazer o inverso, ou seja, a partir da reta – neste caso a meta do conjunto – que é conhecida, selecionar os melhores pontos (obras), de modo que as distâncias entre a reta e esses pontos sejam minimizadas.

A aplicação ao problema levantado nesta tese pode ser melhor explicada com o auxílio da figura 4.2:

Figura 4.2- Aplicação do método dos mínimos quadrados a priorização de obras.

O quadrado verde indica o CHI antes da obra. O losango vermelho indica o CHI depois de executada a obra, sendo o ΔCHI (benefício, o CHI evitado com a execução da obra) a distância entre eles.

O método dos mínimos quadrados aplicado a este caso consiste em minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre o ΔCHI e a meta, obtidos com as diversas obras, diferenciando se estão sendo ou não executadas, fazendo a escolha do conjunto de obras que mais aproximam-se da meta.

Exemplificando, supondo que as cinco obras tivessem o mesmo valor de execução, e o orçamento fosse suficiente para a execução de apenas uma obra. A obra escolhida seria a obra 3, pois visualmente dá para perceber que é ela que tem a maior distância a partir da meta. É a que tem o maior ΔCHI , portanto a que traz o maior benefício. Enquanto que com uma obra esta é uma tarefa fácil de executar, o mesmo não ocorre quando são propostas centenas de obras, com custos diferenciados.

Se fosse extrapolar este exemplo para o ambiente de uma distribuidora, a meta poderia ser a global da empresa, e as obras seriam escolhidas por ordem de prioridade até que o orçamento estivesse esgotado ou que a meta fosse atingida. Com o aumento de obras, aumenta também a complexidade dos cálculos, sendo necessário ferramentas matemáticas e computacionais específicas.

A função proposta para traduzir matematicamente este raciocínio está na equação (4.17), que é a função objetivo proposta para ser substituída como “Benefício” na equação da análise geral (eq. 4.2), que torna-se:

$$MIN \left[\sum_{i=1}^{no} \left(\frac{\Delta CHI_i \cdot x_i}{CHI_M} \right) - \alpha \right]^2 \quad (4.17)$$

sujeito as restrições:

$$\sum_{i=1}^{no} C_i \cdot x_i \leq R \quad (4.18)$$

$$R \geq 0 \quad (4.19)$$

$$C_i \geq 0 \quad (4.20)$$

C_i é o valor do investimento na obra i .

no é o número de obras propostas.

x_i é a variável de decisão (1 faz a obra / 0 não faz a obra obra i).

ΔCHI_i é o benefício em CHI alcançado com a execução da obra i .

CHI_M é o CHI meta a ser atingido.

α é o fator de relaxamento ou de flexibilização da meta. Se igual a 1, representa 100% da meta.

R é o orçamento disponível para realização das obras.

Este modelo ainda trás uma facilidade adicional, através do α . É o fator de relaxamento ou flexibilização da meta, que representa o percentual da meta a ser atingido. Com ele, pode-se flexibilizar a simulação de cenários diferentes da meta em 100 %. Por exemplo, sabendo-se que os dados históricos que estão sendo utilizados são de um ano que teve muitos eventos climáticos desfavoráveis, mas que não se repetem com frequência para os anos seguintes, poderíamos considerar a meta a ser atingida como 90% da meta original. Neste novo cenário, α assumiria o valor de 1,1. O valor de α poderia ser trabalhado para avaliar cenários otimistas ou pessimistas.

O CHI meta da equação 4.17 poderia ser considerado o CHI meta da empresa ou de cada conjunto em que o alimentador que recebe a obra está situado. Mas como este modelo não considera a divisão por conjuntos, o benefício da obra sempre é considerado positivo para efeitos da otimização matemática, mesmo que o conjunto já esteja na meta. Para facilitar os estudos posteriores, nas simulações deste trabalho, foi utilizado o CHI_M de cada conjunto individualmente.

Este mesmo raciocínio aplicado ao CHI é válido para o CI, resultando na equação:

$$MIN \left[\sum_{i=1}^{no} \left(\frac{\Delta CI_i \cdot x_i}{CI_M} \right) - \alpha \right]^2 \quad (4.21)$$

onde CI_M é o CI meta e ΔCI_i é o benefício em CI alcançado com a execução da obra i . Está sujeita as mesmas restrições das equações (4.18), (4.19) e (4.20).

4.3 ANÁLISE CONSIDERANDO O CHI E O CI

A consideração conjunta dos indicadores DEC (CHI) e FEC (CI) traz uma dificuldade adicional, que é a determinação de um parâmetro comum para a priorização das obras, pois enquanto o CHI é avaliado em tempo, o CI é avaliado em quantidade. Imediatamente, surge a pergunta, qual seria o parâmetro mais relevante a considerar, ou então, por qual obra optar se uma delas traz benefícios em CHI e a outra em CI?

A dificuldade começa porque nem todos os modelos matemáticos vistos anteriormente e utilizados na análise do CHI ou CI em separado podem ser aplicados para os dois ao mesmo tempo. A maneira de viabilizar uma análise conjunta seria encontrando um parâmetro que eles tivessem em comum. Um desses fatores é a penalidade financeira aplicada pela transgressão dos limites legais e a opção que surge é a análise através da economia financeira obtida com a realização da obra. Então, os métodos aplicáveis são apenas aqueles métodos baseados na penalidade, ou seja, através da minimização delas e no retorno financeiro (payoff).

Serão realizadas duas análises para os indicadores CHI+CI:

- A primeira será uma análise simplificada, onde a penalidade a ser considerada é a soma das penalidades devido a transgressão do DEC e do FEC. Em um primeiro momento, poderia ser questionado porque considerar a soma delas, já que a resolução (1) diz que, no caso de haver a transgressão dos dois indicadores para o mesmo conjunto, apenas a maior multa será paga. Porém, observa-se que, se através da execução de obras ou de outro tipo de ação de melhoria qualquer, for extinta a transgressão em apenas um dos indicadores, permanece a penalização pela transgressão do outro. Portanto, é razoável considerar a soma das duas como uma “multa potencial”.
- A segunda análise será a convencional, onde serão analisadas as penalidades devido a transgressão do DEC e do FEC em separado, mais próximo do que prevê a resolução 24/2000 (1).

Estes dois conceitos estão exemplificados no Anexo D.

4.3.1 MODELO MATEMÁTICO CONSIDERANDO A ANÁLISE SIMPLIFICADA

Como foi visto anteriormente, cada um dos métodos pode ser aplicado ao CHI ou ao CI separadamente. Porém, no caso simplificado, em que há a soma dos fatores do CI e do CHI, nem todos servem para elaborar uma análise conjunta, pois não bastaria fazer uma soma aritmética, seria necessário estabelecer uma relação entre eles. Na tabela 4.1, estão relacionados os métodos e a respectiva aplicabilidade à análise de cada indicador.

Tabela 4.1 – Aplicabilidade de cada método relacionado com o indicador DEC e FEC.

	DEC (CHI)	FEC (CI)	DEC + FEC (CHI + CI) convencional	DEC + FEC (CHI + CI) simplificado
MINIMOS QUADRADOS	X	X		
RCB	X	X		
PAYOFF	X	X	X	X
PAYOFF MULTA	X	X	X	X
PENALIDADE	X	X	X	X
BENEFÍCIO	X	X		

As equações matemáticas que representam o benefício do DEC e FEC conjuntos para a análise simplificada, também devem ser substituídas como função objetivo na equação geral (eq. 4.1), sujeitas as mesmas restrições. São elas:

$$MIN[\sum_{i=1}^{no} payoff_i * x_i] \quad (4.22)$$

$$MIN[\sum_{i=1}^{no} payoff multa_i * x_i] \quad (4.23)$$

$$MAX\left(\sum_{i=1}^{no} \Delta multa_i * x_i\right) \quad (4.24)$$

Vale a pena ressaltar novamente que estes índices utilizam a soma das multas devido ao DEC e ao FEC.

4.3.2 MODELO MATEMÁTICO CONSIDERANDO A ANÁLISE CONVENCIONAL

Este modelo considera a soma do CI e do CHI separadamente, ou seja, a obra é escolhida baseada no benefício do maior deles. Mas o benefício da obra reflete em ambos, e a penalidade evitada total vai ser a soma da penalidade evitada devido ao CHI (DEC) e ao CI (FEC). Os métodos matemáticos utilizados como benefício são os mesmos métodos que foram simulados no item 4.5.3.

A função objetivo para cada um dos métodos fica:

- Método do Payoff Multa (Penalidade evitada devido ao CI e ao CHI)

$$MIN \left[\sum_{i=1}^{no} (payoff\ multaCHI_i * x_i + payoff\ multaCI_i * y_i) \right] \quad (4.25)$$

$$\sum_{i=1}^{no} C_i . (x_i + y_i) \leq R \quad (4.26)$$

$$x_i + y_i \leq 1 \quad (4.27)$$

$$R \geq 0 \quad (4.28)$$

onde x_i é a variável de decisão (1faz a obra/0 não faz a obra) da obra i devido ao CHI e y_i é a variável de decisão (1faz a obra/0 não faz a obra) y_i da obra i devido ao CI.

- Método utilizando as Penalidades

$$MAX \left[\sum_{i=1}^{no} ((\Delta multa\ devido\ ao\ CHI)_i * x_i + (\Delta multa\ devido\ ao\ CI)_i * y_i) \right] \quad (4.29)$$

$$\sum_{i=1}^{no} C_i . (x_i + y_i) \leq R \quad (4.30)$$

$$x_i + y_i \leq 1 \quad (4.31)$$

$$R \geq 0 \quad (4.32)$$

A seguir, os modelos apresentados anteriormente serão submetidos a simulação.

4.4 SIMULAÇÕES

Nesta tese, as obras propostas para a melhoria do sistema de distribuição serão analisadas basicamente de duas formas:

- 1) **Análise Geral:** Neste grupo, todas as obras propostas são analisadas e priorizadas indistintamente ao conjunto a que pertencem. Este é o caso de priorizar as obras em toda a empresa almejando o ótimo global, como, por exemplo, reduzir o DEC ou o FEC da empresa. Despreza as necessidades locais. Neste capítulo serão analisadas as simulações deste grupo.
- 2) **Análise por conjunto:** Neste outro grupo, inicialmente é executada uma análise por conjunto, selecionando as melhores obras para colocar cada conjunto na meta. Conjuntos que estão dentro da meta ou não a forem atingir com as obras propostas têm menor prioridade de escolha, restando apenas as obras dos conjuntos capazes de atingir a meta. Visa maximizar a quantidade de conjuntos colocados no limite desejado, não importando-se com o índice de toda a empresa. Esta modalidade de análise será tratada no próximo capítulo.

4.4.1 APLICATIVO PARA SIMULAÇÕES

Como aplicativo de otimização, foi utilizado o LINGO, que é uma ferramenta matemática

desenvolvida pela LINDO SYSTEMS INC. para a resolução de problemas de otimização inteira linear e não linear (41, 42, 43).

Para facilitar a manipulação e o acesso ao banco de dados do caso exemplo que será trabalhado adiante, já que vários cenários serão simulados, foi elaborado um algoritmo computacional que foi implementado no ambiente Windows, utilizando como linguagem de programação o Visual Basic, cujo fluxograma está no anexo E.

Para deixar este aplicativo mais versátil e para que facilite o trabalho do planejador, ele terá algumas opções para a geração de cenários, tais como:

- Escolha do índice de continuidade que se quer trabalhar: DEC (CHI), FEC (CI) ou DEC+FEC (CHI+CI).
- A avaliação orçamentária é executada no passo de 10%, sendo que cada valor de orçamento é simulado 10 vezes. A variação do orçamento é de $\pm 1\%$.
- Para avaliar a Análise Geral, há a opção de escolher qualquer uma das equações apresentadas no item 4.2 como função objetivo.

Terminada a apresentação do aplicativo para simulação, vai ser apresentado o caso exemplo.

4.4.2 CASO EXEMPLO

Como exemplo, será utilizado parte do Programa de Obras da COPEL, Companhia Paranaense de Energia, do ano de 2005, cujos dados gerais estão resumidos na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Dados gerais utilizados no caso exemplo.

Quantidade de obras	124
Benefício total	
CHI	2.109.137
CI	1.504.194
Quantidade total de conjuntos que podem ser beneficiados com obras	32
Conjuntos que podem ser colocados na meta	
CHI	21
CI	9
CHI+CI	7
Conjuntos que não podem ser colocados na meta	
CHI	11
CI	23
CHI+CI	25
Investimento total (R\$)	49.616.657,00
Multa que pode ser evitada (R\$)	
CHI	512.228,00
CI	353.288,00
CHI+CI (soma)	872.516,00

Para este exemplo, o orçamento foi variado de 0 até o investimento total de R\$ 49.616.657,00 (100%), em passos de 10%. A variação permitida para o orçamento foi de +ou – 1%.

4.5 SIMULAÇÕES PARA A ANÁLISE GERAL

Neste grupo, pela facilidade de simulação e para efeitos de comparação, será efetuada a simulação dos modelos apresentados anteriormente, aplicados ao CHI, CI e CHI+CI.

Os resultados estão apresentados e comparados em forma de gráficos adiante.

4.5.1 SIMULAÇÕES UTILIZANDO O CHI

Inicialmente, serão simulados os casos relativos ao CHI. As equações e restrições utilizadas nas simulações serão mostradas a seguir:

- Para o método dos Mínimos Quadrados, baseado na equação 4.17, temos a nova equação:

$$MIN \left[\sum_{i=1}^{124} \left(\frac{\Delta CHI_i \cdot x_i}{CHI_M} \right) - 1 \right]^2 \quad (4.33)$$

sujeito as restrições:

$$\sum_{i=1}^{124} C_i \cdot x_i \leq R \quad (4.34)$$

$$R \geq 0 \quad (4.35)$$

$$C_i \geq 0 \quad (4.36)$$

Apenas lembrando que o orçamento (R) será de R\$ 49.616.657,00 (100%), em passos de 10%. A variação permitida para o orçamento foi de +ou – 1%.

Para cada uma das simulações, a função objetivo é substituída pelas seguintes equações:

- Modelo da Relação Custo Benefício

$$MIN \left(\sum_{i=1}^{124} \frac{C_i}{\Delta CHI_i} * x_i \right) \quad (4.37)$$

- Modelo do Payoff

$$MIN[\sum_{i=1}^{124} payoff_i * x_i] \quad (4.38)$$

- Modelo do Payoff Multa

$$MIN[\sum_{i=1}^{124} payoffmulta_i * x_i] \quad (4.39)$$

- Modelo utilizando a maximização do Benefício.

$$MAX\left(\sum_{i=1}^{124} \Delta CHI_i * x_i\right) \quad (4.40)$$

- Modelo utilizando as Penalidades

$$MAX\left(\sum_{i=1}^{124} \Delta multa\ devido\ ao\ CHI_i * x_i\right) \quad (4.41)$$

Os gráficos resultantes das simulações estão nas figuras 4.3, 4.4 e 4.5 e terão a seguinte abreviação para as legendas:

- RCB - Modelo da Relação Custo Benefício.
- MQ - Modelo dos Mínimos Quadrados.
- MAX CHI - Modelo utilizando a maximização do Benefício.
- PAYOFF - Modelo do Payoff.
- MIN PEN - Modelo utilizando as Penalidades.
- PAYOFF MULTA – Modelo do Payoff aplicada a multa.

Figura 4.3 – Resultado das simulações análise geral – Benefício em CHI.

Figura 4.4 – Resultado das simulações análise geral – Conjuntos colocados na meta CHI.

Figura 4.5 – Resultado das simulações análise geral – Multa evitada devido ao CHI.

4.5.2 SIMULAÇÕES UTILIZANDO O CI

Neste tópico, os casos serão simulados considerando o CI. Da mesma maneira que para as simulações do CHI, as simulações para o CI são baseadas na equação 4.2, e sujeitas a mesma restrição orçamentária.

A função objetivo para o método dos mínimos quadrados fica:

$$MIN \left[\sum_{i=1}^{124} \left(\frac{\Delta CI_i \cdot x_i}{CI_M} - 1 \right)^2 \right] \quad (4.42)$$

sujeito as restrições:

$$\sum_{i=1}^{124} C_i \cdot x_i \leq R \quad (4.43)$$

$$R \geq 0 \quad (4.44)$$

$$C_i \geq 0 \quad (4.45)$$

Para cada uma das simulações, a função objetivo é substituída pelas seguintes equações:

- Modelo da Relação Custo Benefício

$$MIN \left(\sum_{i=1}^{124} \frac{C_i}{\Delta CI_i} * x_i \right) \quad (4.46)$$

- Modelo do Payoff (Custo Global)

$$MIN \left[\sum_{i=1}^{124} payoff_i * x_i \right] \quad (4.47)$$

- Modelo do Payoff (Penalidade evitada)

$$MIN \left[\sum_{i=1}^{124} payoff multa_i * x_i \right] \quad (4.48)$$

- Modelo utilizando a maximização do Benefício.

$$MAX \left(\sum_{i=1}^{124} \Delta CI_i * x_i \right) \quad (4.49)$$

Modelo utilizando as Penalidades

$$MAX \left(\sum_{i=1}^{124} \Delta multa devido ao CI_i * x_i \right) \quad (4.50)$$

Os gráficos resultantes das simulações estão nas figuras 4.6, 4.7 e 4.8:

Figura 4.6 – Resultado das simulações análise geral – Benefício em CI.

Figura 4.7 – Resultado das simulações análise geral – Conjuntos colocados na meta CI.

Figura 4.8 – Resultado das simulações análise geral – Multa evitada devido ao CI.

4.5.3 SIMULAÇÕES UTILIZANDO O CI E O CHI – ANÁLISE SIMPLIFICADA

Neste tópico, os casos serão simulados considerando a soma do CI e do CHI, utilizando a análise simplificada, que é a soma da multa devido a transgressão do DEC e do FEC. Como foi explanado anteriormente, nem todos os modelos servem para simular este caso. Serão considerados apenas os seguintes casos:

- Modelo do Payoff
- Modelo do Payoff Multa
- Modelo utilizando as Penalidades

Todos o modelos estão sujeitos as mesmas restrições impostas as simulações do CHI ou CI somente.

A função objetivo para cada um dos modelos fica:

- Modelo do Payoff (Penalidade evitada devido ao CI e ao CHI)

$$MIN[\sum_{i=1}^{124} payoff_i * x_i] \quad (4.51)$$

sujeito as restrições:

$$\sum_{i=1}^{124} C_i . x_i \leq R \quad (4.52)$$

$$R \geq 0 \quad (4.53)$$

- Modelo do Payoff Multa (Penalidade evitada devido ao CI e ao CHI)

$$MIN[\sum_{i=1}^{124} payoff multa_i * x_i] \quad (4.54)$$

- Modelo utilizando as Penalidades

$$MAX\left(\sum_{i=1}^{124} (\Delta multa devido ao CI + CHI)_i * x_i\right) \quad (4.55)$$

Os gráficos resultantes estão nas figuras 4.9 e 4.10.

4.5.4 SIMULAÇÕES UTILIZANDO O CI E O CHI – ANÁLISE CONVENCIONAL

Neste tópico, os casos serão simulados considerando a soma do CI e do CHI separadamente, ou seja, a obra é escolhida considerando o benefício do maior deles. Mas o benefício da obra reflete em ambos, e a penalidade evitada total vai ser a soma da penalidade evitada devido ao CHI (DEC) e ao CI (FEC). Os métodos matemáticos

utilizados na simulação serão os mesmos que foram simulados no item 4.5.3.

A função objetivo para cada um dos métodos fica:

- Modelo do Payoff Multa (Penalidade evitada devido ao CI e ao CHI)

$$MIN \left[\sum_{i=1}^{124} (payoff\ multaCHI_i * x_i + payoff\ multaCI_i * y_i) \right] \quad (4.56)$$

$$\sum_{i=1}^{124} C_i . (x_i + y_i) \leq R \quad (4.57)$$

$$x_i + y_i \leq 1 \quad (4.58)$$

$$R \geq 0 \quad (4.59)$$

onde x_i é a variável de decisão (1faz a obra/0 não faz a obra) da obra i devido ao CHI e y_i é a variável de decisão (1faz a obra/0 não faz a obra) devido ao CI.

- Modelo utilizando as Penalidades

$$MAX \left[\sum_{i=1}^{124} ((\Delta multa\ devido\ ao\ CHI)_i * x_i + (\Delta multa\ devido\ ao\ CI)_i * y_i) \right] \quad (4.60)$$

$$\sum_{i=1}^{124} C_i . (x_i + y_i) \leq R \quad (4.61)$$

$$x_i + y_i \leq 1 \quad (4.62)$$

$$R \geq 0 \quad (4.63)$$

O método do Payoff também poderia ser aplicado para esta classe de priorização de obras, mas os dados que estamos utilizando neste trabalho já vem calculados do aplicativo POBRAS da COPEL, que não diferencia entre benefício devido ao CI ou CHI. Portanto, a equação e o resultado seriam os mesmos que os obtidos no item 4.5.3 e

não serão repetidos aqui.

A seguir, está a legenda aplicada aos gráficos 4.9 e 4.10, resultante das simulações:

- PAYOFF - Modelo do Payoff
- MIN PEN - Modelo utilizando as penalidades, análise simplificada.
- PAYOFF MULTA – Modelo do Payoff COPEL aplicada a multa, análise simplificada.
- MIN PEN conv - Modelo utilizando as penalidades, análise convencional.
- PAYOFF MULTA conv – Modelo do Payoff COPEL aplicada a multa, análise convencional.

Figura 4.9 – Resultado das simulações análise geral – Conjuntos colocados na meta CHI + CI.

Figura 4.10 – Resultado das simulações análise geral – Multa evitada CHI + CI .

4.6 CONCLUSÕES PRELIMINARES SOBRE A ANÁLISE GERAL

- A análise Geral não leva em conta a composição das obras dentro dos conjuntos ANEEL. Uma analogia é considerar esta classe de priorização como se fosse realizada por um órgão central da empresa.
- Para a Análise Geral, o modelo baseado no Método dos Mínimos Quadrados, desenvolvido nesta tese, comportou-se bem para os parâmetros CI e CHI, e mostrou-se com potencial para justificar desenvolvimentos futuros. Merece ser melhor estudado e aprimorado, inclusive para poder ser utilizado na análise do CI+CHI.
- O modelo do Payoff geral (não o payoff da multa) apresenta um desempenho pior que os demais modelos. Este comportamento já era esperado, pois ele considera outras variáveis na priorização das obras tais como perdas, queda de tensão e

carregamento, além da interrupção, através da Energia Não Distribuída.

- De uma maneira geral, todos os modelos testados para avaliar o CI e o CHI separadamente tiveram um comportamento semelhante, exceção é o modelo do Payoff. Portanto, em uma análise como esta, qualquer um deles poderia ser utilizado e seus resultados serem julgados representativos.
- Para a avaliação do CI e CHI juntos, foram considerados dois tipos de priorização, a convencional e a simplificada. As duas deram resultados semelhantes e poderiam ser utilizadas para representar bem esta classe de priorização. Porém, a análise simplificada teria a vantagem de envolver um volume menor de dados e de ter equações matemáticas menos complexas.

5 PRIORIZAÇÃO DE OBRAS UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO EM DOIS NÍVEIS E PROGRAMAÇÃO POR METAS

Neste capítulo, será apresentada a metodologia proposta para a priorização de obras voltada para o decréscimo dos índices de interrupção respeitando os conjuntos ANEEL. Serão apresentados e analisados vários modelos matemáticos que podem ser utilizados com este objetivo. A priorização voltada a conjuntos será avaliada desde a modelagem matemática até a fase de simulação. Utiliza a otimização em dois níveis e a programação por metas (“goal programming”). Termina com a exposição dos resultados e das conclusões preliminares.

5.1 INTRODUÇÃO

Diferente do que foi visto no capítulo anterior, uma situação comum em empresas distribuidoras de energia elétrica, é ela 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, então surge a pergunta: onde melhor aplicar o orçamento para tirar a maior quantidade de conjuntos da transgressão relativa aos limites de continuidade exigidos?

Esta situação pode ser representada pelo exemplo da figura 5.1, onde a linha pontilhada representa o benefício realizado (em CHI) e a linha azul é a meta.

Figura 5.1 - Método dos Mínimos Quadrados aplicado a priorização de obras, considerando os conjuntos.

Neste caso, temos três conjuntos: A (obras 1, 2 e 3), B (obras 4 e 5) e C (obras 6 e 7), dos quais os conjuntos A e C estão acima da meta permitida. Supondo que todas as obras tivessem o mesmo valor, então teríamos o seguinte:

- As obras 4 e 5 não seriam executadas, pois o conjunto B está na meta.
- O conjunto A tem três obras, dos quais duas seriam suficientes para colocá-lo na meta. Então, como o benefício das obras 2 e 3 são maiores, estas teriam prioridade sobre a obra 1.
- O conjunto C tem 2 obras, sendo que com a obra 7, já o colocaria na meta, sendo desnecessária a execução da obra 6.
- Se o orçamento desse apenas para uma obra, a obra 7 seria a escolhida, pois colocaria o conjunto C na meta.
- Se o orçamento desse para mais duas obras, as seguintes seriam as obras 3 e 2, respectivamente, colocando o conjunto A na meta.
- Caso ainda houvesse verba disponível e interesse da empresa, poderiam ser executadas as outras obras independente do conjunto a que pertencem, já que estão todos na meta, priorizando a de maior benefício.
- Listando as obras por prioridade, 7, 3 e 2 já seriam suficientes para colocar todos os conjuntos transgressores na meta.
- A execução das obras seria limitada pela restrição orçamentária.

No exemplo, foi maximizada a quantidade de conjuntos dentro da meta.

Então, tivemos como lição deste exemplo:

- Obras propostas em conjuntos que estão abaixo da meta não tem prioridade na execução.
- Obras que colocam conjuntos na meta são priorizadas, até atingirem a meta, independentes do valor.

Quando se pensa em termos de priorizar por conjunto, há necessidade de verificar se o conjunto atingiu ou não a meta, e isso é obtido com a inclusão de uma outra equação como restrição.

5.2 RESTRIÇÕES PARA CONJUNTOS

Para resolver a questão da priorização por conjuntos, é necessária uma restrição que trabalhe o conjunto individualmente, já que a financeira é uma restrição global.

Como é inviável determinar um montante financeiro para ser aplicado em cada conjunto, a restrição que determina quando se deve parar ou se ainda vale a pena continuar investindo naquele conjunto pode ser feita utilizando a meta individual de cada um, através da penalidade ou do equivalente em CHI. Ambos devem levar a um resultado semelhante. A interpretação de cada um é que difere. Referenciando-se a equação do custo global (equação 2.5), se a penalidade for utilizada como restrição, o custo estará sendo analisado pelo lado da empresa, e o benefício (multa evitada) cessa quando a meta é alcançada. Porém, quando o CHI é utilizado, o ganho estará sendo analisado do ponto de vista do consumidor (custo social da interrupção), e o ganho com a execução da obra continua beneficiando os consumidores, mesmo após a meta ser

atingida. Porém para efeitos desta tese, quando for possível, será considerada a restrição ligada ao CHI.

Traduzindo matematicamente, a restrição ligada ao CHI ficaria (eq. 5.1):

$$\left[\left(\frac{CHI_{Antes\ j} - \sum_{i=1}^{noc} CHI_{obra\ ij} * x_{ij}}{CHI_{M\ j}} \right) - 1 \right] \leq 0 \quad 1 \leq j \leq nc \quad (5.1)$$

onde:

- *j é o conjunto em análise.*
- *nc é o número de conjuntos.*
- *i é a obra em análise.*
- *noc é o número de obras i do conjunto j.*
- *x_{ij} é a variável de decisão (1 faz a obra i / 0 não faz a obra i) no conjunto j.*
- *CHI_{M j} é o CHI previsto ou seja, a meta para o conjunto j.*
- *CHI_{Antes j} é o CHI realizado no ano anterior (CHI antes da obra) no conjunto j.*
- *CHI_{obra ij} é o benefício em CHI obtido com a execução da obra i no conjunto j.*

A equação 5.1 seria utilizada como restrição para os modelos apresentados anteriormente, permitindo saber se o conjunto entra ou não na meta.

Se for aplicada ao Cl, a equação ficaria da seguinte maneira:

$$\left[\left(\frac{CI_{Antes\ j} - \sum_{i=1}^{noc} CI_{obra\ ij} * x_{ij}}{CI_{M\ j}} \right) - 1 \right] \leq 0 \quad 1 \leq j \leq nc \quad (5.2)$$

onde:

- CI_{Mj} é o CI previsto ou seja, a meta para o conjunto j .
- CI_{Antesj} é o CI realizado no ano anterior (CHI antes da obra) do conjunto j
- CI_{obraj} é o benefício em CI obtido com a execução da obra i no conjunto j

Quando se trabalha com a maximização da quantidade de conjuntos a serem colocados na meta, aparecem dois objetivos: o primeiro é a preocupação em otimizar o benefício global da empresa, e o outro é a preocupação em otimizar o benefício individual de cada conjunto. Para tratar com estes dois objetivos, será apresentada uma outra ferramenta, a otimização em dois níveis, cujos aspectos teóricos estão expostos a seguir.

5.3 A OTIMIZAÇÃO EM DOIS NÍVEIS

O problema de programação em dois níveis, que aparece como uma das áreas mais importantes da otimização global, é um problema de otimização hierárquica que apresenta propriedades específicas, algumas relacionadas com seu elevado grau de não convexidade e não diferenciabilidade. Estas características fazem com que a sua resolução seja particularmente difícil, mas também um desafio consideravelmente interessante (44). Além disso, são inúmeros os problemas de aplicação prática que, por sua estrutura hierárquica, podem ser formulados como problemas de programação em dois níveis, como é o caso da priorização de obras para o sistema de distribuição (45).

A programação em dois níveis, conhecido com BLPP – Bilevel Programming Problem, é um problema de otimização com uma estrutura hierárquica onde um subconjunto de variáveis é restrito a ser uma solução de um problema de otimização parametrizado pelas variáveis restantes. A formulação original, dada por J. Bracken e J. Mac Gill (54), data de 1973, sendo que os primeiros a utilizar a designação "bilevel /multilevel " foram W.Candler e R. Norton (55), em 1977. A partir dos anos oitenta, a teoria de programação em dois níveis começou a receber maior atenção, e muitos autores

passaram a estudar mais intensamente e disseminar tais problemas para a comunidade de programação matemática, principalmente devido a teoria de jogos de Stackelberg (56).

A estrutura singular do problema de dois níveis, ou ainda de forma mais geral, do problema multi-nível, proporciona uma maior facilidade na formulação de diversos problemas que envolvem processos de decisão hierárquica. Dentre as inúmeras aplicações da programação multinível ou de dois níveis, podemos citar:

- Problemas de rede de transporte (57),
- Problemas de administração e gestão (58),
- Aplicações no Setor Agrícola (59),
- Engenharia - Problemas de design ótimo (60),
- Modelos Econômicos (61).

No setor elétrico, este modelo foi utilizado para o problema de determinar a estratégia ótima de oferta para um agente gerador em ambiente competitivo de mercado (44), onde serve para modelar a dualidade, uma vez que cada agente deseja maximizar o lucro individual e o operador do sistema (ou do mercado) realiza um despacho econômico com o objetivo de minimizar o custo total do sistema. Também foi utilizado para modelar a demanda do consumidor frente a ações da concessionária (46).

O problema de dois níveis está associado a um modelo envolvendo dois agentes de decisão. O primeiro agente - superior ou líder - decide recorrendo ao primeiro conjunto de variáveis (x), enquanto que o segundo agente - inferior ou seguidor controla o segundo conjunto de variáveis (y). O superior toma uma decisão segundo seu objetivo. Dada esta decisão, o inferior reage de acordo com o objetivo que lhe está associado. Um decisor de alto nível é capaz de influenciar as decisões tomadas em níveis mais baixos, sem ter o controle completo das ações (47, 48, 49).

A decisão do agente superior pode influenciar tanto nas possibilidades de escolha do inferior quanto no seu critério de escolha. Esta reação do agente inferior faz com que o

agente superior repense a sua estratégia, tomando novas decisões. As decisões são tomadas “de cima” para “baixo” ao longo da cadeia hierárquica, no entanto, decisões de níveis inferiores afetam as decisões de nível superior.

5.3.1 FORMULAÇÃO E DEFINIÇÕES

O problema de dois níveis (BLPP) pode ser definido como (44) :

$$\begin{aligned} \min_{x,y} \quad & F(x, y) \\ \text{sujeito a} \quad & G(x, y) \leq 0 \end{aligned} \tag{5.3}$$

onde y , para cada valor de x , é a solução do problema de nível inferior:

$$\begin{aligned} \min_y \quad & f(x, y) \\ \text{sujeito a} \quad & g(x, y) \leq 0 \end{aligned} \tag{5.4}$$

$$(x, y) \in X \times Y$$

com

$$x \in \Re^{n_1} \quad x = (x_1, x_2, \dots, x_{n_1})^T \in X \subseteq \Re^{n_1}$$

$$y \in \Re^{n_2} \quad y = (y_1, y_2, \dots, y_{n_2})^T \in Y \subseteq \Re^{n_2}$$

$$n = n_1 + n_2$$

$$F, f : \Re^{n_1+n_2} \rightarrow \Re$$

$$G : \Re^{n_1+n_2} \rightarrow \Re^{n_u}$$

$$g : \Re^{n_1+n_2} \rightarrow \Re^{n_l}$$

Descrevendo de outra maneira (47, 48):

$$\begin{aligned}
 & \min_{x \in X, y} F(x, y) \\
 & \text{sujeito a } G(x, y) \leq 0 \\
 & \min_y f(x, y) \\
 & \text{sujeito a } g(x, y) \leq 0
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

$x \in \mathfrak{R}^{n_1}$ e $y \in \mathfrak{R}^{n_2}$. As variáveis deste problema são divididas em duas classes, denominadas variáveis de nível superior $x \in \mathfrak{R}^{n_1}$ e as variáveis de nível inferior $y \in \mathfrak{R}^{n_2}$. Similarmente, as funções $F : \mathfrak{R}^{n_1} \times \mathfrak{R}^{n_2} \rightarrow \mathfrak{R}$ e $f : \mathfrak{R}^{n_1} \times \mathfrak{R}^{n_2} \rightarrow \mathfrak{R}$ são chamadas funções objetivos de nível superior e inferior, respectivamente, enquanto que o vetor de funções $G : \mathfrak{R}^{n_1} \times \mathfrak{R}^{n_2} \rightarrow \mathfrak{R}^{m_1}$ e $g : \mathfrak{R}^{n_1} \times \mathfrak{R}^{n_2} \rightarrow \mathfrak{R}^{m_2}$ são chamados de restrições de nível superior e inferior, respectivamente. F, f, G, g são funções contínuas, diferenciáveis duas vezes.

Para expor o problema matematicamente, supõe-se que o decisor de alto nível (líder) tenha o controle do vetor $x \in X \subseteq \mathfrak{R}^{n_1}$ e que as sub-unidades, coletivamente chamadas de seguidores, tem controle sobre o vetor $y \in Y \subseteq \mathfrak{R}^{n_2}$. O líder dá o primeiro passo e seleciona um x numa tentativa de minimizar $F(x, y)$ sujeito, as vezes, a algumas restrições adicionais. Os seguidores observam a ação do líder e reagem selecionando um y que minimize sua função objetivo $f(x, y)$, sujeita a um conjunto de restrições nas variáveis y para um valor particular de x escolhido. Dependendo das características de F, f, G, g há diferentes versões de BLPP. O caso mais simples é quando todas as restrições são lineares.

Assim, terminada a exposição teórica sobre a programação em dois níveis, volta-se novamente ao problema da aplicação desta programação a priorização de obras do sistema de distribuição.

5.3.2 APLICAÇÃO DO PROBLEMA EM DOIS NÍVEIS

Nesta seção serão descritas a elaboração do equacionamento e a aplicação da otimização em dois níveis apresentado na seção anterior, direcionadas para a priorização de obras do sistema de distribuição voltada para conjuntos.

Segundo (48), uma das vantagens do uso desta classe de programação matemática, é quando se deseja obter uma única função que represente adequadamente os objetivos de ambos, 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.

Apesar da aplicação da programação em dois níveis ser recente, há vários exemplos encontrados na literatura, dos quais será descrito algumas delas encontradas na referência (49), acompanhadas de um breve esclarecimento, na tabela 5.1:

Tabela 5.1 – Aplicações da programação em dois níveis (49).

Planejamento Econômico em nível regional ou nacional.	
LIDER: Governo <ul style="list-style-type: none"> • Controla a variação de políticas, p.ex.: taxas de juros, quotas de importação. • Maximiza empregos, minimiza a utilização de recursos 	SEGUIDOR: Indústria a ser regulada <ul style="list-style-type: none"> • Maximiza a entrada líquida, sujeita a restrições econômicas e governamentais.
Alocação de recursos em uma empresa descentralizada.	
LIDER: Central supridora de recursos <ul style="list-style-type: none"> • Aloca produtos para os fabricantes. • Maximiza lucro da firma como um todo. 	SEGUIDOR: Fabricas manufaturadoras em diferentes locais. <ul style="list-style-type: none"> • Determina a própria produção (quantidade, produtos). • Maximiza performance da fábrica.
Design da rede de um sistema de transporte.	
LIDER: Planejador Central <ul style="list-style-type: none"> • Controla custos de investimento p.ex. quais links melhorar. • Influencia a preferência do usuário para minimizar o custo total. 	SEGUIDOR: Usuário individual. <ul style="list-style-type: none"> • A sua seleção de rota determina o fluxo do tráfego e portanto os custos operacionais. • Procura minimizar os custos da sua própria rota.

A modelagem da programação em dois níveis, voltada a priorização de obras poderia ser estruturada da seguinte forma (tabela 5.2), relacionando os objetivos desejáveis:

Tabela 5.2 – Estrutura da Programação em dois níveis aplicada a priorização de obras.

LIDER	SEGUIDOR
Órgão Sede: <ul style="list-style-type: none"> • Controla o montante de investimento que se quer investir. • Preocupa-se com o benefício global. • Prioriza conjuntos que entram na meta. 	Planejadores regionais (conjuntos) <ul style="list-style-type: none"> • Propõe e selecionam obras por conjunto (determinação do custo e benefício de cada obra por conjunto). • Procura maximizar o performance de cada conjunto. • Procura minimizar o investimento no conjunto. • Procura minimizar a penalidade a ser paga.

Porém, quando trabalhamos por conjunto, surge uma nova necessidade, a de minimizar

o investimento em cada conjunto. Para isto, é preciso incluir também o fator financeiro na função objetivo de nível inferior.

5.4 MODELAGEM MATEMÁTICA UTILIZANDO A OTIMIZAÇÃO EM DOIS NÍVEIS

5.4.1 MODELO UTILIZANDO O CHI

A formulação em dois níveis permite que se considere a colocação de pesos para definir o grau de importância entre as variáveis associadas a função objetivo. Porém, para as simulações efetuadas neste trabalho, P_{1j} e P_{2j} assumem o valor unitário para todos os conjuntos.

Matematicamente, o problema aplicado ao CHI pode ser equacionado da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 & \max \sum_{j=1}^{nc} N_j \\
 & \text{sujeito a} \\
 & \sum_{j=1}^{nc} IC_j \cdot N_j \leq R + \varepsilon \\
 & IC_j = \sum_{i=1}^{noc} C_{ij} \cdot x_{ij} \qquad \qquad \qquad 1 \leq j \leq nc \qquad \qquad \qquad (5.6)
 \end{aligned}$$

$$\max \left[P_{1j} \cdot \sum_{i=1}^{noc} Benefício_{ij} \cdot x_{ij} - P_{2j} \cdot \sum_{i=1}^{noc} C_{ij} \cdot x_{ij} \right] \qquad 1 \leq j \leq nc$$

sujeito a

$$\left[\left(\frac{CHI_{Antes\ j} - \sum_{i=1}^{noc} CHI_{obra\ ij} * x_{ij}}{CHI_{M\ j}} \right) - 1 \leq 0 \right]$$

onde:

i é a obra em análise.

j é o conjunto em análise.

Benefício_{ij} é o benefício do nível inferior (seguidor) da obra i no conjunto j .

R é o orçamento disponível para realização das obras.

ε é a variação permitida para o orçamento.

nc é o número de conjuntos.

N_j é a variável de decisão por conjunto j (1 seleciona o conjunto / 0 não seleciona o conjunto).

IC é o investimento total no conjunto j para que atinja a meta.

noc é o número de obras propostas para cada conjunto j .

C_{ij} é o valor do investimento na obra i no conjunto j .

x_{ij} é a variável inteira de decisão da obra i (1 faz a obra / 0 não faz a obra) no conjunto j .

CHI_{Mj} é o CHI previsto ou seja, a meta para o conjunto j .

CHI_{Antesj} é o CHI realizado no ano anterior (CHI antes da obra) no conjunto j .

CHI_{obraij} é o benefício em CHI obtido com a execução da obra i no conjunto j .

P_{1j} é o peso (grau de importância) associada a variável Benefício para o conjunto j .

P_{2j} é o peso (grau de importância) associada a variável Custo para o conjunto j .

Este problema de programação em dois níveis é um problema de programação inteira com características lineares e convexas.

A rigor, a exemplo da formulação matemática utilizada para explicar o equacionamento da análise geral, as duas funções objetivos, de nível superior e inferior, poderiam ser substituídas por qualquer um dos modelos matemáticos apresentados no capítulo anterior, montando diferentes combinações entre eles. Teria que tomar muito cuidado na elaboração das equações, pois muitos poderiam não levar ao resultado almejado.

Mas neste trabalho, para exemplificar esta classe de otimização, será considerado como função objetivo de nível superior, a maximização da quantidade de conjuntos a

serem colocados na meta, sujeitos a restrição orçamentária. Esta função objetivo é justificada quando a empresa pretende tirar a maior quantidade de conjuntos da transgressão, não importando a influência daquele conjunto.

Para o nível inferior, para facilitar a aplicabilidade conforme está na tabela 4.1, será considerado como função objetivo de nível inferior os seguintes modelos matemáticos:

- Delta Multa
- Payoff da Multa
- Payoff COPEL

Para ilustrar a aplicação dos modelos matemáticos apresentados anteriormente aplicados para a otimização em dois níveis, serão simulados vários cenários no caso exemplo da seção 4.4.2, que é um caso real, parte do Plano de Obras de 2005 da COPEL.

5.4.2 MODELO UTILIZANDO O CI

O modelo utilizando o CI, é similar ao que está apresentado na equação 5.6, apenas que o CHI está substituído pelo CI. Então, o modelo aplicado ao CI, tendo o modelo da penalidade no nível inferior ficaria:

$$\begin{aligned}
& \max \sum_{j=1}^{nc} N_j \\
& \text{sujeito a} \\
& \sum_{j=1}^{nc} IC_j \cdot N_j \leq R + \varepsilon \\
& IC_j = \sum_{i=1}^{noc} C_{ij} \cdot x_{ij} \quad 1 \leq j \leq nc \quad (5.7) \\
& \max \left[P_{1j} \cdot \sum_{i=1}^{noc} \Delta multa_{ij} \cdot x_{ij} - P_{2j} \cdot \sum_{i=1}^{noc} C_{ij} \cdot x_{ij} \right] \quad 1 \leq j \leq nc \\
& \text{sujeito a} \\
& \left[\left(\frac{CI_{Antes\ j} - \sum_{i=1}^{noc} CI_{obra\ ij} \cdot x_{ij}}{CI_{M\ j}} \right) - 1 \leq 0 \right]
\end{aligned}$$

onde:

$\Delta multa_{ij}$ é a redução da multa obtida com a obra i no conjunto j.

CI é o consumidor interrompido. Hora

P_{1j} e P_{2j} são os pesos que definem o grau de importância de cada parcela da função objetivo para o conjunto j. São considerados unitários nas simulações.

x_{ij} é a variável de decisão da obra i (1 faz a obra / 0 não faz a obra) no conjunto j.

5.4.3 MODELO UTILIZANDO O CHI+CI – ANÁLISE SIMPLIFICADA

Este modelo, representa o análise simplificada do CHI+CI, que é a soma aritmética da multas devido a transgressão do DEC e do FEC. A função objetivo de nível inferior utiliza o modelo da penalidade.

$$\begin{aligned}
& \max \sum_{j=1}^{nc} N_j \\
& \text{sujeito a} \\
& \sum_{j=1}^{nc} IC_j \cdot N_j \leq R + \varepsilon \\
& IC_j = \sum_{i=1}^{noc} C_{ij} \cdot x_{ij} \quad 1 \leq j \leq nc \\
& \max \left(P_{1j} \cdot \sum_{i=1}^{noc} (\Delta multa \text{ devido ao } CI + CHI)_i * x_{ij} - P_{2j} \cdot \sum_{i=1}^{noc} C_{ij} * x_{ij} \right) \quad 1 \leq j \leq nc \quad (5.8) \\
& \text{sujeito a} \\
& \left[\left(\frac{CHI_{Antes\ j} - \sum_{i=1}^{noc} CHI_{obra\ ij} * x_{ij}}{CHI_{M\ j}} \right) - 1 \leq 0 \right] \\
& \left[\left(\frac{CI_{Antes\ j} - \sum_{i=1}^{noc} CI_{obra\ ij} * x_{ij}}{CI_{M\ j}} \right) - 1 \leq 0 \right]
\end{aligned}$$

5.4.4 MODELO UTILIZANDO O CHI+CI – ANÁLISE CONVENCIONAL

Este modelo considera a soma do CI e do CHI separadamente, ou seja, a obra é escolhida baseada no benefício do maior deles. Mas o benefício da obra reflete em ambos, e a penalidade evitada total vai ser a soma da penalidade evitada devido ao CHI (DEC) e ao CI (FEC).

$$\begin{aligned}
& \max \sum_{j=1}^{nc} N_j \\
& \text{sujeito a} \\
& \sum_{j=1}^{nc} IC_j \cdot N_j \leq R + \varepsilon \\
& IC_j = \sum_{i=1}^{noc} (C_{ij} \cdot x_{ij} + C_{ij} \cdot y_{ij}) \quad 1 \leq j \leq nc \quad (5.9)
\end{aligned}$$

$$\max \left[\sum_{i=1}^{noc} \left((P_{1j} \cdot \Delta \text{multa devido ao } CHI_{ij} - P_{2j} \cdot C_{ij}) * x_{ij} + (P_{3j} \cdot \Delta \text{multa devido ao } CI_{ij} - P_{4j} \cdot C_{ij}) * y_{ij} \right) \right] \quad 1 \leq j \leq nc$$

sujeito a

$$x_i + y_i \leq 1$$

$$\left[\left(\frac{CHI_{Antes\ j} - \sum_{i=1}^{noc} (CHI_{obra\ ij} * x_{ij} + CHI_{obra\ ij} * y_{ij})}{CHI_{M\ j}} \right) - 1 \leq 0 \right]$$

$$\left[\left(\frac{CI_{Antes\ j} - \sum_{i=1}^{noc} (CI_{obra\ ij} * y_{ij} + CI_{obra\ ij} * y_{ij})}{CI_{M\ j}} \right) - 1 \leq 0 \right]$$

Onde:

x_{ij} é a variável de decisão da obra i (1 faz a obra / 0 não faz a obra) no conjunto j devido ao CHI.

y_{ij} é a variável de decisão da obra i (1 faz a obra / 0 não faz a obra) no conjunto j devido ao CI.

A seguir, os modelos matemáticos apresentados utilizando a otimização em dois níveis serão simulados.

5.5 SIMULAÇÕES COM A PROGRAMAÇÃO EM DOIS NÍVEIS

Neste grupo, as funções objetivos selecionadas para simulação serão aplicadas para o CI, CHI e CI+CHI, este último analisado nas formas simplificada e convencional.

No nível superior, a função objetivo será a maximização da quantidade de conjuntos a serem colocados na meta.

No nível inferior, a função objetivo será:

- Método utilizando as Penalidades
- Método do Payoff Multa
- Método do Payoff COPEL

Serão avaliados os seguintes parâmetros:

- Quantidade de conjuntos colocados na meta.
- Multa evitada.

Nestas simulações, os pesos P_{1j} , P_{2j} , P_{3j} e P_{4j} assumem o valor unitário. Os resultados estão apresentados e comparados em forma de gráficos adiante.

5.5.1 SIMULAÇÕES UTILIZANDO O CHI

A formulação geral da programação matemática em dois níveis referenciada ao CHI está na equação 5.6. Particularizando para a simulação, tem-se a equação 5.10, onde:

$\Delta multa_{ij}$ é a redução da multa obtida com a obra i no conjunto j .

ε é a variação permitida para o orçamento. Foi utilizado + ou – 1%.

R é o orçamento total, que é de R\$ 49.616.657,00 (ver tabela 4.2). Para esta simulação, será variado em passos de 10%, até o valor final.

noc (quantidade de obras por conjunto) é variável de conjunto para conjunto. Mas para efeitos computacionais, o aplicativo faz uma varredura em todas as obras propostas, no total de 124, selecionando apenas aquelas referentes ao conjunto em análise. Portanto,

nas equações adiante, será considerado $noc = 124$.

$$\begin{aligned}
 & \max \sum_{j=1}^{32} N_j \\
 & \text{sujeito a} \\
 & \sum_{j=1}^{32} IC_j \cdot N_j \leq R + \varepsilon \\
 & IC_j = \sum_{i=1}^{124} C_{ij} \cdot x_{ij} \quad 1 \leq j \leq 32 \quad (5.10) \\
 & \max \left[\sum_{i=1}^{124} \Delta multa_{ij} \cdot x_{ij} - \sum_{i=1}^{124} C_{ij} \cdot x_{ij} \right] \quad 1 \leq j \leq 32 \\
 & \text{sujeito a} \\
 & \left[\left(\frac{CHI_{Antes\ j} - \sum_{i=1}^{124} CHI_{obra\ ij} * x_{ij}}{CHI_{M\ j}} \right) - 1 \leq 0 \right]
 \end{aligned}$$

Para o segundo exemplo a ser simulado, a função objetivo de nível superior continua a ser a maximização dos conjuntos a serem colocados na meta, mas a função objetivo de nível inferior passa a ser o payoff aplicado as multas evitadas. Teríamos então o equacionamento matemático para o segundo exemplo, onde $Payoffmulta_{ij}$ é o tempo de retorno do investimento em anos, com o não pagamento de penalidades devido ao DEC evitado com a construção da obra i no conjunto j.

No terceiro exemplo, a função objetivo de nível inferior é o payoff COPEL. Salientamos que o restante do orçamento que não é utilizado para levar os conjuntos que podem ser colocados na meta, são distribuídos seguindo o Método Geral apresentado no capítulo anterior, somente entre os conjuntos que não entraram na meta. Poderia-se continuar trabalhando puramente por conjuntos, e na seqüência seriam priorizadas as obras dos conjuntos que ficassem mais próximos da meta. Mas nestas simulações, optou-se por

distribuir este orçamento restante utilizando o método geral, ou seja, utilizando uma função que prioriza as melhores obras sem considerar os conjuntos onde elas estão propostas, desde que não entraram na meta e segundo o critério estabelecido. Para os exemplos apresentados neste trabalho, o critério escolhido para ser utilizado nesta etapa foi o da minimização da penalidade.

Os resultados das três simulações utilizando a programação em dois níveis são apresentados nas figuras 5.2 e 5.3, onde também são comparadas com o resultado da Análise Geral. Neste caso, para representar os modelos estudados na Análise Geral, foi escolhido o modelo do Payoff Multa, que é aquele que mais rapidamente faz os conjuntos atingirem a meta.

Pode-se observar que as simulações utilizando o modelo da penalidade, do payoff multa ou do payoff COPEL para a otimização em dois níveis tiveram os mesmos resultados. Este resultado similar é devido a natureza do problema e a quantidade relativamente pequena de obras que estão sendo simuladas por conjunto individualmente, já que as metas são iguais. Como a equação de otimização de nível superior é a mesma, levou a otimização em dois níveis aos mesmos resultados, não importa qual dos três modelos está sendo empregado.

Verificado que o comportamento dos três modelos para a programação em dois níveis é o mesmo, doravante neste trabalho, vai ser utilizado o modelo de minimização da penalidade como representante dos modelos empregados. Os resultados e conclusões obtidos por e para ele podem ser estendidos aos modelos payoff multa e payoff COPEL.

Verifica-se também, através do gráfico 5.2, que a otimização em dois níveis foi mais eficiente em colocar todos os conjuntos na meta CHI do que a Análise Geral. Mostraram que o orçamento e a quantidade de obras necessárias para fazer com que os conjuntos cumpram com a meta é menor que para o caso geral, direcionando melhor os investimentos em obras a serem executadas.

Figura 5.2 – Resultado das simulações análise por conjunto – Conjuntos colocados na meta devido ao CHI.

Figura 5.3 – Resultado das simulações análise por conjunto – Multa evitada devido ao CHI.

5.5.2 SIMULAÇÕES UTILIZANDO O CI

Para análise do CI, a equação em dois níveis utilizada é a mesma (eq. 5.10). Somente que onde está o CHI, substitui-se por CI.

Similar ao que ocorreu para o CHI, as simulações dos três modelos, minimização da penalidade, payoff multa e payoff copel deram os mesmos resultados. Então, novamente, será analisado somente o modelo da minimização das penalidades, e suas conclusões podem ser extrapoladas para outros modelos.

Observa-se também neste caso, que a quantidade de obras e o orçamento necessários para colocar os conjuntos na meta são menores que no caso da análise geral. Os quadros comparativos com o resultado das simulações estão nas figuras 5.4 e 5.5.

Figura 5.4 – Resultado das simulações análise por conjunto comparado com análise geral – Conjuntos colocados na meta CI

Figura 5.5 – Resultado das simulações análise por conjunto comparado com análise geral – Multa evitada devido ao CI.

5.5.3 SIMULAÇÕES UTILIZANDO O CHI E O CI – ANÁLISE SIMPLIFICADA

A exemplo do que foi realizado para a Análise Geral, os casos serão simulados considerando a soma do CI e do CHI, e serão efetuadas análises e simulações para dois modelos:

- 1) Utilizando a análise simplificada, que é a soma aritmética das multas devido a transgressão do CHI (DEC) e do CI (FEC).
- 2) Utilizando a análise convencional, que considera a soma do CI e do CHI separadamente, ou seja, a obra é escolhida considerando o melhor benefício obtido, seja ele o DEC ou o FEC. Mas o benefício da obra reflete em ambos, e a penalidade evitada total vai ser a soma da penalidade evitada devido ao DEC e ao FEC.

O modelo matemático a ser simulado continua sendo o da minimização da penalidade.

Para a análise simplificada, a equação matemática está descrita na equação 5.11, sendo que $\Delta multa\ devido\ ao\ CI + CHI$ é a soma aritmética dos valores financeiros a serem pagos devido a penalidades regulatórias para o FEC e o DEC. O resultado das simulações está nas figuras 5.6 e 5.7, comparado com a análise convencional.

$$\begin{aligned}
 & \max \sum_{j=1}^{32} N_j \\
 & \text{sujeito a} \\
 & \sum_{j=1}^{32} IC_j \cdot N_j \leq R + \varepsilon \\
 & IC_j = \sum_{i=1}^{124} C_{ij} \cdot x_{ij} \qquad 1 \leq j \leq 32 \qquad (5.11)
 \end{aligned}$$

$$\max \left(\sum_{i=1}^{124} (\Delta multa\ devido\ ao\ CI + CHI)_i * x_{ij} - \sum_{i=1}^{124} C_{ij} * x_{ij} \right) \qquad 1 \leq j \leq 32$$

sujeito a

$$\begin{aligned}
 & \left[\left(\frac{CHI_{Antes\ j} - \sum_{i=1}^{124} CHI_{obra\ ij} * x_{ij}}{CHI_{M\ j}} \right) - 1 \leq 0 \right] \\
 & \left[\left(\frac{CI_{Antes\ j} - \sum_{i=1}^{124} CI_{obra\ ij} * x_{ij}}{CI_{M\ j}} \right) - 1 \leq 0 \right]
 \end{aligned}$$

5.5.4 SIMULAÇÕES UTILIZANDO O CHI E O CI – ANÁLISE CONVENCIONAL

Neste caso, os exemplos são simulados considerando a soma do CHI e do CI separadamente. Este equacionamento matemático visa aproximar mais o modelo da

maneira como a resolução 24/2000 foi escrita, referente a penalidade. Os conjuntos são considerados dentro dos limites do órgão regulador quando o DEC e o FEC estiverem em conformidade.

O orçamento que não é utilizado para levar os conjunto para a meta, são distribuídos segundo o Método Geral apresentado no capítulo 4, que não leva em conta a composição dos conjuntos.

Então, para a análise geral, o equacionamento fica:

$$\begin{aligned}
 & \max \sum_{j=1}^{32} N_j \\
 & \text{sujeito a} \\
 & \sum_{j=1}^{32} IC_j \cdot N_j \leq R + \varepsilon \\
 & IC_j = \sum_{i=1}^{124} (C_{ij} \cdot x_{ij} + C_{ij} \cdot y_{ij}) \quad 1 \leq j \leq 32 \quad (5.12)
 \end{aligned}$$

$$\max \left[\sum_{i=1}^{124} ((\Delta multa \text{ devido ao } CHI_{ij} - C_{ij}) * x_{ij} + (\Delta multa \text{ devido ao } CI_{ij} - C_{ij}) * y_{ij}) \right] \quad 1 \leq j \leq 32$$

sujeito a

$$x_i + y_i \leq 1$$

$$\left[\left(\frac{CHI_{Antes\ j} - \sum_{i=1}^{124} (CHI_{obra\ ij} * x_{ij} + CHI_{obra\ ij} * y_{ij})}{CHI_{M\ j}} \right) - 1 \leq 0 \right]$$

$$\left[\left(\frac{CI_{Antes\ j} - \sum_{i=1}^{124} (CI_{obra\ ij} * y_{ij} + CI_{obra\ ij} * y_{ij})}{CI_{M\ j}} \right) - 1 \leq 0 \right]$$

Os resultados da simulação estão nas figuras 5.6 e 5.7.

Figura 5.6 – Conjuntos colocados na meta CHI+CI - Comparação análise por conjunto simplificada e convencional.

Figura 5.7 – Multa evitada devido ao CHI+CI - Comparação análise por conjunto simplificada e convencional.

Como pode ser observado, o resultado da simulação utilizando a análise simplificada e convencional deram os mesmos resultados. A explicação pode ser creditada a quantidade relativamente pequena de obras por conjunto, pois o conjunto do caso exemplo com o maior número tem 11 obras propostas. Esta conclusão pode ser estendida a realidade das concessionárias, pois raramente um conjunto terá muitas opções técnicas viáveis de obras para solução dos problemas de qualidade de energia. Deve-se considerar que a quantidade de obras para cada conjunto está relacionada as características do mesmo, tais como quantidade de consumidores, localização e extensão da rede. Conjuntos maiores tenderão a ter uma quantidade maior de obras, ocorrendo o inverso para conjuntos menores.

Também foi verificado, que tanto na análise do CHI, do CI e do CHI+CI simplificado e convencional, os resultados utilizando a programação em dois níveis direcionaram melhor os investimentos, colocando os conjuntos mais rapidamente na meta. Estes resultados já confirmam a superioridade dos modelos em dois níveis proposto nesta tese.

Muitas vezes, a priorização de obras para a distribuição envolve a consideração de múltiplos e conflitantes objetivos. Achar a solução entre elas não é tarefa fácil, pois alguns destes objetivos podem ser complementares, enquanto outros podem ser conflitantes. Porém, desde que não seja possível alcançar a todas as metas (“goals”), é desejável uma boa relação entre elas. Nestes casos, surge como opção o uso da programação por metas (“goal programming”), que é uma ferramenta para alocar recursos em situações de decisão que envolvem múltiplos objetivos. A programação por metas permite que o decisor especifique uma meta para cada objetivo. A solução do problema consiste em minimizar o desvio total em relação a meta estipulada.

5.6 PROGRAMAÇÃO POR METAS (GOAL PROGRAMMING)

A principal característica que distingue a programação por metas é que uma ou mais metas são incorporadas diretamente na função objetivo, via variáveis de desvio (50). As metas podem ou não ser atingidas completamente e para permitir esta flexibilidade são utilizadas variáveis de desvio d^+ e d^- , indicando o quanto o objetivo foi atingido ultrapassando a meta e quanto faltou para que essa meta fosse atingida, respectivamente. Procura uma forma de atingir todas as metas o mais próximo possível sendo, portanto, o objetivo minimizar a soma dos desvios para todas as metas.

A função objetivo de um problema de “goal programming” é composta por todas ou parte das variáveis de desvio da meta e seu objetivo geral é minimizar a soma destes desvios para as metas consideradas.

A equação geral pode ser escrita da seguinte forma (50, 51):

$$\min \quad z = \sum_{i=1}^G (d_i^+ + d_i^-) \quad (5.13)$$

onde G representa o número total de metas do problema.

Esta formulação da função objetivo pode causar problemas se as variáveis de desvios da meta estiverem em unidades muito diferentes (50, 52). Neste caso pode-se minimizar a soma dos pesos dos desvios para todas as metas, podendo-se reescrever a função objetivo como segue:

$$\min \quad z = \sum_{i=1}^G (w_i^+ d_i^+ + w_i^- d_i^-) \quad (5.14)$$

onde w_i^+ e w_i^- são os pesos correspondentes aos desvios d_i^+ e d_i^- respectivamente.

Os pesos podem ser cardinais ou ordinais. Os pesos cardinais utilizam valores para identificar a importância de cada meta. Os pesos ordinais definem uma ordem de preferência entre as metas.

- Os pesos cardinais podem ser determinados através da utilização de pesos relativos, que além de expressar a importância relativa de cada meta fazem com que todos os desvios sejam adimensionais. A nova expressão da função objetivo é:

$$\min z = \sum_{i=1}^G \left(\frac{w_i^+ d_i^+ + w_i^- d_i^-}{g_i} \right) \quad (5.15)$$

onde g_i é o valor da meta i e w_i a importância (penalidade) dada a cada desvio, que expressam a importância em porcentagem para cada uma das metas.

Quando pesos são atribuídos para cada variável de desvio da meta tem-se uma solução. Se esta não for eficiente os pesos são mudados e uma nova solução é calculada. Estas iterações continuam até que uma solução eficiente seja obtida. Talvez aí resida a maior fraqueza deste método que é a escolha adequada dos pesos para cada meta, de forma que ele realmente represente a importância que é dada à meta (50, 52).

- Os pesos ordinais são utilizados quando há necessidade de estabelecer prioridades para as metas, que muitas vezes não podem ser atingidas simultaneamente devido a limites de recursos. Deste modo nenhuma meta será satisfeita antes que a meta de prioridade principal seja atingida. As metas são ordenadas em ordem decrescente, da maior prioridade para a menor. Os recursos disponíveis são utilizados primeiramente para satisfazer a meta de maior prioridade e os recursos restantes são utilizados para as outras metas. Implica na resolução de vários problemas, onde em cada um, um único desvio é minimizado. Assumindo que a meta 1 tem prioridade superior a todas as outras,

a meta 2, segunda prioridade e assim por diante, tem-se como função objetivo do primeiro problema (51):

$$\begin{aligned}
 & \min \{P_1(d_1^+) + P_2(d_2^-) + P_3(d_3^+ + d_3^-)\} \\
 & \text{Sujeito a :} \\
 & (c^1x - d_1^+) - t_1 \leq 0 \\
 & t_2 - (c^2x - d_2^-) \leq 0 \\
 & c^3x - d_3^+ + d_3^- - t_3 = 0 \\
 & x \in S \\
 & \text{All } d's \geq 0
 \end{aligned} \tag{5.16}$$

onde P_j é o fator de prioridade. Ao ser resolvido o primeiro problema tem-se o valor ótimo referente à primeira meta. Este valor é utilizado como restrição de igualdade (sem desvios) no segundo problema e então serão minimizados os desvios referentes à meta de segunda maior prioridade. Este procedimento continua até que os desvios referentes a todas as metas sejam minimizados. A idéia de fixar pesos ordinais como coeficientes da função objetivo se estende a situações nas quais algumas metas são mais importantes que outras. Os pesos ordinais são utilizados geralmente quando existe dificuldade na determinação de pesos relativos.

Terminada a breve apresentação da Programação por Metas, a seguir esta ferramenta será aplicada a problemática da priorização de obras.

5.7 MODELAGEM MATEMÁTICA UTILIZANDO A PROGRAMAÇÃO POR METAS

A programação por metas é direcionada a sistemas de otimização multi-objetivo, e não aplica-se diretamente aos modelos da análise geral, estudados no capítulo 4, que tem somente um objetivo, mas pode ser aplicada a otimização em dois níveis, que tem metas a serem cumpridas. Seguindo a estrutura anterior, serão efetuadas simulações

que depois serão comparadas com a programação inteira.

5.7.1 MODELO UTILIZANDO O CHI

O modelo matemático da programação por metas assume a seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 & \text{MIN} \sum_{j=1}^{nc} (dN_j^- + dIC_j^+) \\
 & \text{sujeito a :} \\
 & \sum_{j=1}^{nc} (N_j + dN_j^- - dN_j^+) = nc \\
 & \sum_{j=1}^{nc} IC_j \cdot N_j - dIC_j^+ + dIC_j^- = R \\
 & IC_j = \sum_{i=1}^{noc} Custoobras_{ij} \cdot x_{ij} \quad 1 \leq j \leq nc \quad (5.17) \\
 \\
 & \text{MIN} \sum_{i=1}^{noc} (F_{1j} \cdot dmulta_{ij}^- + F_{2j} \cdot dCHI_{ij}^- + F_{3j} \cdot dCustoobras_{ij}^+) \quad 1 \leq j \leq nc \\
 & \text{sujeito a :} \\
 & \sum_{i=1}^{noc} DeltaMulta_{ij} \cdot x_{ij} - dmulta_{ij}^+ + dmulta_{ij}^- = multaaantes_j \\
 & \sum_{i=1}^{noc} CHI_{ij} \cdot x_{ij} + dCHI_{ij}^- - dCHI_{ij}^+ = CHIantes_j - CHImeta_j \\
 & \sum_{i=1}^{noc} Custoobras_{ij} \cdot x_{ij} - dcustoobras_{ij}^+ + dcustoobras_{ij}^- = Invconj_j
 \end{aligned}$$

Onde:

i é a obra em análise.

j é o conjunto em análise.

noc é o número de obras propostas para cada conjunto.

nc é o número de conjuntos.

x_{ij} é a variável de decisão da obra *i* (1 faz a obra / 0 não faz a obra) no conjunto *j*.

$Custoobras_{ij}$ é o valor do investimento na obra i no conjunto j .

CHI_{ij} é o benefício em CHI obtido com a execução da obra i no conjunto j .

$CHImeta_j$ é o CHI previsto ou seja, a meta para o conjunto j .

$CHIantes_j$ é o CHI realizado no ano anterior (CHI antes da obra) do conjunto j .

$DeltaMulta_{ij}$ é a multa evitada com a execução da obra i no conjunto j .

$Multaantes_j$ é o valor monetário em multas devido a transgressão do conjunto em relação a meta.

IC_{ij} é o investimento total em obras i no conjunto j para que atinja a meta.

N_j é a variável de decisão por conjunto j (1 seleciona o conjunto / 0 não seleciona o conjunto).

$Invconj_j$ é o investimento total em obras proposto para o conjunto j , ou seja, $\sum_i^{no} custoobras_{ij}$.

$dN_j^+, dN_j^-, dIC_j^+, dIC_j^-$ são os desvios em relação a meta para o nível superior.

$dmulta_{ij}^+, dmulta_{ij}^-, dCHI_{ij}^+, dCHI_{ij}^-, dcustoobras_{ij}^+, dcustoobras_{ij}^-$ são desvios em relação a meta para o nível inferior.

F_{1j}, F_{2j}, F_{3j} são os fatores de normalização para cada parcela da função objetivo para cada conjunto j .

Como regra geral, se a restrição meta for da forma maior e igual, somente d^- deve ser minimizado porque a preocupação é com o desvio inferior à meta, desvios superiores à meta serão aceitos. Se a restrição for da forma menor e igual, minimizam-se os desvios d^+ , desta forma serão aceitos apenas desvios inferiores à meta e os desvios superiores à meta serão minimizados. Se a restrição meta for uma igualdade, ambos os desvios devem ser minimizados para que a meta seja exatamente atingida.

Observa-se que no equacionamento de nível inferior da função objetivo, estão sendo utilizados diferentes métricas, pois enquanto $dmulta_{ij}^-$ e $dcustoobras_{ij}^-$ são medidos em R\$, $dCHI_{ij}^-$ é medido em consumidor.hora.interrompido. Para evitar uma distorção nos desvios em função das grandezas dos mesmos, faz-se necessário a introdução de coeficientes de ponderação (pesos), representado na equação 5.17 por F_{1j}, F_{2j} e F_{3j} , através de técnicas de normalização (52). Neste trabalho, utiliza-se uma técnica de normalização proposta na equação 5.18, com um vetor normalizado da função objetivo da seguinte forma:

$$f_b(x) = \frac{f_b(x) - \min f_b(x)}{\max f_b(x) - \min f_b(x)}, x \in X \quad (5.18)$$

Os valores de todas as funções normalizadas são limitados pelo intervalo [0,1].

Para o caso desta tese, como trabalha-se com deltas, como o delta multa, o valor $\min f_b(x)$ é igual a zero e então a equação 5.18 pode ser escrita como $f_b(x) = F_{nb}(x) \cdot f_b(x)$, onde $F_{nb}(x)$ assume os seguintes valores para cada variável, a ser calculado para cada conjunto j:

$$F_{1j} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n Deltamulta_{ij}} \quad (5.19)$$

$$F_{1j} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n DeltaCHI_{ij}} \quad (5.20)$$

$$F_{1j} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n Custoobras_{ij}} \quad (5.21)$$

Calculados estes valores, eles são transportados para a equação de programação por metas e assumem valores numéricos nas simulações a serem executadas. Como para o nível superior os fatores de normalização tem pouca influência no resultado final, foram desconsiderados nas simulações.

A análise para o CI é similar, apenas substituindo as parcelas relativas aos itens CHI na eq. 5.17 por CI e a multa considerada é a multa relativa ao CI. Devido a esta similaridade, a equação da programação por metas representativa do CI não será exibida.

5.7.2 MODELAGEM MATEMÁTICA UTILIZANDO O CHI E O CI

Da mesma maneira que foi realizado anteriormente, a programação por metas será modelada para a análise simplificada e convencional. Devido aos mesmos motivos expostos no modelo que utilizou o CHI, as variáveis de desvio que compõem a função objetivo serão transformadas, baseadas nos valores máximos e mínimos do conjunto a que pertencem, representados pelos fatores de normalização $F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6$ e F_7 .

A representação da análise simplificada está na equação matemática 5.22.

$$\begin{aligned}
 & \text{MIN} \sum_{j=1}^{nc} (dN_j^- + dIC_j^+) \\
 & \text{sujeito a :} \\
 & \sum_{j=1}^{nc} (N_j - dN_j^+ + dN_j^-) = nc \\
 & \sum_{j=1}^{nc} IC_j \cdot N_j - dIC_j^+ + dIC_j^- = R \\
 & IC_j = \sum_{i=1}^{noc} (\text{Custoobras}_{ij} \cdot x_{ij}) \quad 1 \leq j \leq nc \quad (5.22) \\
 & \text{MIN} \sum_{i=1}^{noc} (F_7 \cdot d\text{multa}_{ij}^- + F_2 \cdot d\text{CHI}_{ij}^- + F_5 \cdot d\text{CI}_{ij}^- + F_3 \cdot d\text{Custoobras}_{ij}^+) \quad 1 \leq j \leq nc \\
 & \text{sujeito a :} \\
 & \sum_{i=1}^{noc} \text{DeltaMult}_{ij} \cdot x_{ij} - d\text{multa}_{ij}^+ + d\text{multa}_{ij}^- = \text{multaantes}_j \\
 & \sum_{i=1}^{noc} \text{CHI}_{ij} \cdot x_{ij} + d\text{CHI}_{ij}^- - d\text{CHI}_{ij}^+ = \text{CHlantes}_j - \text{CHImeta}_j \\
 & \sum_{i=1}^{noc} \text{CI}_{ij} \cdot x_{ij} + d\text{CI}_{ij}^- - d\text{CI}_{ij}^+ = \text{Clantes}_j - \text{CImeta}_j \\
 & \sum_{i=1}^{noc} \text{Custoobras}_{ij} \cdot x_{ij} + d\text{custoobras}_{ij}^- - d\text{custoobras}_{ij}^+ = \text{Invconj}_j
 \end{aligned}$$

A representação da análise convencional está na equação matemática 5.23:

$$\text{MIN} \sum_{j=1}^{nc} (dN_j^- + dIC_j^+)$$

sujeito a :

$$\sum_{j=1}^{nc} (N_j - dN_j^+ + dN_j^-) = nc$$

$$\sum_{j=1}^{nc} IC_j \cdot N_j - dIC_j^+ + dIC_j^- = R \quad (5.23)$$

$$IC_j = \sum_{i=1}^{noc} (\text{Custoobras}_{ij} \cdot x_{ij} + \text{Custoobras}_{ij} \cdot y_{ij}) \quad 1 \leq j \leq nc$$

$$\text{MIN} \sum_{i=1}^{noc} (F_{1j} \cdot d\text{multaCHI}_{ij}^- + F_{4j} \cdot d\text{multaCI}_{ij}^- + F_{2j} \cdot d\text{CHI}_{ij}^- + F_{5j} \cdot d\text{CI}_{ij}^- + F_{3j} \cdot d\text{CustoobrasCHI}_{ij}^+ + F_{6j} \cdot d\text{CustoobrasCI}_{ij}^+) \quad 1 \leq j \leq nc$$

sujeito a :

$$x_i + y_i \leq 1$$

$$\sum_{i=1}^{noc} \text{DeltaMultaCHI}_{ij} \cdot x_{ij} - d\text{multaCHI}_{ij}^+ + d\text{multaCHI}_{ij}^- = \text{multaantesCHI}_j$$

$$\sum_{i=1}^{noc} \text{DeltaMultaCI}_{ij} \cdot y_{ij} - d\text{multaCI}_{ij}^+ + d\text{multaCI}_{ij}^- = \text{multaantesCI}_j$$

$$\sum_{i=1}^{noc} \text{CHI}_{ij} \cdot x_{ij} - d\text{CHI}_{ij}^+ + d\text{CHI}_{ij}^- = \text{CHlantes}_j - \text{CHImeta}_j$$

$$\sum_{i=1}^{noc} \text{CI}_{ij} \cdot x_{ij} - d\text{CI}_{ij}^+ + d\text{CI}_{ij}^- = \text{Clantes}_j - \text{Clmeta}_j$$

$$\sum_{i=1}^{noc} \text{CustoobrasCHI}_{ij} \cdot x_{ij} - d\text{custoobrasCHI}_{ij}^+ + d\text{custoobrasCHI}_{ij}^- = \text{InvconjCHI}_j$$

$$\sum_{i=1}^{noc} \text{CustoobrasCI}_{ij} \cdot y_{ij} - d\text{custoobrasCI}_{ij}^+ + d\text{custoobrasCI}_{ij}^- = \text{InvconjCI}_j$$

onde:

x_{ij} é a variável de decisão da obra i (1 faz a obra / 0 não faz a obra) no conjunto j devido ao CHI.

y_{ij} é a variável de decisão da obra i (1 faz a obra / 0 não faz a obra) no conjunto j devido ao CI.

Após apresentados os modelos matemáticos representativos da programação por metas, os mesmos serão submetidos a simulação.

5.8 SIMULAÇÕES UTILIZANDO A PROGRAMAÇÃO POR METAS

5.8.1 SIMULAÇÕES UTILIZANDO O CHI

Nas seções anteriores, o problema de programação inteira em dois níveis foi resolvido no nível inferior várias vezes, otimizando o objetivo de cada conjunto individualmente. Agora, o mesmo problema será resolvido da mesma maneira, através da programação por metas.

Para exemplificar a utilização deste método de programação matemática, ele será aplicado ao problema de priorização de obras proposto, relacionada a otimização do CHI, conforme equação 5.24, sendo que os fatores F_{1j} , F_{2j} e F_{3j} são aplicados com seus respectivos valores numéricos, calculados da maneira anteriormente apresentada.

$$\begin{aligned}
 & \text{MIN} \sum_{j=1}^{32} (dN_j^- + dIC_j^+) \\
 & \text{sujeito a :} \\
 & \sum_{j=1}^{32} (N_j + dN_j^- - dN_j^+) = nc \\
 & \sum_{j=1}^{32} IC_j \cdot N_j - dIC_j^+ + dIC_j^- = R \\
 & IC_j = \sum_{i=1}^{124} \text{Custoobras}_{ij} \cdot x_{ij} \quad 1 \leq j \leq 32 \quad (5.24)
 \end{aligned}$$

$$\text{MIN} \sum_{i=1}^{124} (F_{1j} \cdot d\text{multa}_{ij}^- + F_{2j} \cdot d\text{CHI}_{ij}^- + F_{3j} \cdot d\text{Custoobras}_{ij}^+) \quad 1 \leq j \leq 32$$

sujeito a :

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i=1}^{124} \text{DeltaMulta}_{ij} \cdot x_{ij} - d\text{multa}_{ij}^+ + d\text{multa}_{ij}^- = \text{multaantes}_j \\
 & \sum_{i=1}^{124} \text{CHI}_{ij} \cdot x_{ij} + d\text{CHI}_{ij}^- - d\text{CHI}_{ij}^+ = \text{CHIantes}_j - \text{CHImeta}_j \\
 & \sum_{i=1}^{124} \text{Custoobras}_{ij} \cdot x_{ij} - d\text{custoobras}_{ij}^+ + d\text{custoobras}_{ij}^- = \text{Invconj}_j
 \end{aligned}$$

Da mesma maneira que para o modelo linear inteiro, será considerado o índice $noc = 124$. A justificativa vem de que, apesar deste índice avaliar somente as obras do conjunto em análise, para efeitos computacionais ele faz uma varredura nas 124 obras.

A análise para o CI é similar, apenas substituindo as parcelas relativas aos itens CHI na eq. 5.17 por CI, calculando os fatores F_{nj} e considerando a multa relativa ao CI. Como o histórico das simulações anteriores mostrou que as conclusões obtidas para o CHI podem ser extrapoladas ao CI, apenas serão executadas as simulações utilizando o CHI.

Para poder comparar com a programação em dois níveis inteira será simulado o caso da equação 5.17. O resultado está nos gráficos 5.8 e 5.9, com a seguinte legenda:

- Dois níveis – Resultado a programação inteira simulada na seção 5.5.
- GP – Programação por metas (“Goal Programming”) utilizando os fatores $F_{nj} = 1$.
- GP normalizado - Programação por metas (“Goal Programming”) utilizando os fatores F_{nj} calculado para cada conjunto.

Figura 5.8 – Comparação Programação por Metas (GP) e Dois Níveis. Resultado das simulações análise por conjunto – Conjuntos colocados na meta CHI.

Figura 5.9 – Comparação Programação por Metas (GP) e Dois Níveis. Resultado das simulações análise por conjunto – Multa evitada devido ao CHI.

5.8.2 SIMULAÇÕES UTILIZANDO O CHI E O CI

Da mesma maneira que foi realizado anteriormente para o item 5.4.3, a programação por metas será analisada comparando a análise simplificada e convencional e a utilização dos fatores de normalização.

A simulação da equação 5.22 para a análise simplificada, utilizando os fatores de normalização calculado ou unitário, será efetuada adiante, considerando o número de conjuntos $n_c=32$ e o número de obras $n_o=124$. Da mesma forma, a equação 5.23 é simulada para a análise convencional.

Os resultados da análise do CHI+CI simplificado e convencional estão nas figuras 5.10 e 5.11.

Figura 5.10 – Comparação da utilização dos fatores de normalização para a Programação por Metas (GP) – Conjuntos colocados na meta CHI+CI simplificado e convencional.

Figura 5.11 – Comparação da utilização dos fatores de normalização para a Programação por Metas (GP) – Multa evitada CHI+CI simplificado e convencional.

5.9 CONCLUSÕES PRELIMINARES PARA A ANÁLISE POR CONJUNTO.

- A análise por conjuntos considera a composição das obras classificadas por conjuntos ANEEL. Seleciona os conjuntos que não atingiram a meta, e prioriza as obras por conjunto, até que atinjam a meta estipulada. A restrição é escolhida e pode ser por FEC (CI), DEC (CHI) ou DEC e FEC (CHI e CI), e é analisado de duas maneiras: simplificado e convencional.
- Para trabalhar com este tipo de priorização, foi utilizada a otimização em dois níveis, que é indicada para tratar com funções onde aparecem dois objetivos: o primeiro é a preocupação em otimizar o benefício global da empresa, e o outro é a preocupação em otimizar o benefício individual de cada conjunto.
- As simulações com a programação em dois níveis para o DEC (CHI), foram realizadas utilizando 3 dos modelos matemáticos expostos no capítulo 4 e aplicados para a priorização geral, que foram o modelo da penalidade, do payoff multa ou do payoff COPEL. Verificado que o comportamento dos três modelos para a programação em dois níveis foi o mesmo, neste trabalho foi utilizado o modelo de minimização da penalidade como representante dos modelos empregados. Os resultados e conclusões obtidos por e para ele podem ser estendidos aos modelos payoff multa e payoff COPEL.
- O resultado semelhante obtido para os diversos modelos na programação em dois níveis, deve-se a quantidade de obras do exemplo. No nível inferior estão sendo simulados as obras de cada conjunto individualmente, como elas normalmente não são muitas, o resultado obtido foi o mesmo, independente do modelo empregado.
- Como era previsto, a metodologia que utiliza a programação em dois níveis foi mais eficaz, escolhendo primeiro as obras que levam os conjuntos a serem colocados na

meta com menos obras e com menor orçamento. Esta conclusão é válida para a análise do CHI, do CI e do CHI+CI.

- Na figura 5.14, percebe-se que com 30% do valor orçamentário, o exemplo que utiliza a otimização em dois níveis já colocou todos os conjuntos na meta. No caso geral, o pior caso que é o de minimizar a penalidade (MIN PEN) chega a levar 80% do orçamento para colocar os mesmos conjuntos dentro das restrições solicitada pelo órgão regulador.

Figura 5.14 – Comparação dos modelos – Conjuntos colocados na meta CHI.

- As mesmas conclusões obtidas para o DEC (CHI), podem ser extrapoladas para o FEC (CI).
- As simulações considerando a soma do DEC e FEC conjuntos (CHI+CI) foram executadas para duas análises: simplificada e convencional. Na análise simplificada, a multa devido a transgressão do CHI (DEC) e do CI (FEC) é somada e considerada uma multa única, enquanto na análise convencional, elas são consideradas separadamente.

- As simulações dos casos utilizando a análise simplificada e convencional deram os mesmos resultados. Neste caso, a explicação pode ser creditada a quantidade relativamente pequena de obras por conjunto, pois o conjunto com o maior número de obras tem 11 delas propostas. Esta conclusão pode ser estendida a realidade das concessionárias, pois raramente um conjunto terá muitas opções técnicas viáveis de obras para solução dos problemas de qualidade de energia.
- Como a priorização de obras para a distribuição envolve a consideração de múltiplos objetivos, foi analisado o uso da programação por metas (“goal programming”), que também foi modelada e simulada para o CHI, CI e CHI+CI, utilizando a análise simplificada e convencional.
- Os resultados obtidos para esta classe de simulação foram, em geral, muito próximos aos obtidos para a programação inteira em dois níveis. A similaridade dos resultados deve ser creditada não apenas a pequena quantidade de obras por conjunto, mas também a natureza do problema e ao fato de que as metas utilizadas foram iguais a função objetivo.
- Na programação por metas, para diminuir a distorção nos desvios em função das diferentes métricas e grandezas dos mesmos, foram introduzidos fatores de ponderação (pesos). Os resultados das simulações que consideraram estes fatores mostraram-se bastante similares ao das simulações sem considerar tais fatores. Porém, não foram experimentadas outras classes de fatores de normalização, que poderiam alterar o resultado.
- Uma das dificuldades encontradas na programação por metas foi o estabelecimento de metas apropriadas, quando elas não são claras, como é o caso do investimento em obras em cada conjunto. Esta classe de programação é muito sensível a este parâmetro e os resultados podem diferir bastante em função da meta estipulada pelo pesquisador.

- Enfim, os bons resultados obtidos com a modelagem matemática em dois níveis, mostraram que esta metodologia direcionou melhor o investimento para cumprir com as metas de continuidade impostas a cada conjunto.

6 CONCLUSÕES DO TRABALHO

6.1 ASPECTOS GERAIS

Neste trabalho, foram analisados diversos aspectos da priorização de obras para o sistema de distribuição, destacando o aspecto da continuidade do fornecimento de energia elétrica, passível de penalizações pelo órgão regulador no caso de não cumprimento das metas estipuladas por este. A metodologia empregada visou reduzir a quantidade de conjuntos que estão fora dos limites e que geram multas para a empresa frente ao órgão regulador e aos consumidores.

Inicialmente, os diversos tipos de obras tiveram seu benefício valorado através de dois itens em comum, o Consumidor Hora Interrompido (CHI) derivado do DEC, ou o Consumidor Interrompido (CI), derivado do FEC. O cálculo deste benefício foi feito com o uso do Método do Payoff Simplificado, derivado do Método do Payoff COPEL (2), que consistiu na extração, somente da parcela relativa a interrupção, em CI e/ou CHI, que determinada obra traria ao sistema. Importante é considerar que o método partiu da premissa que as obras que foram propostas e escolhidas eram as melhores alternativas estudadas e viáveis para a solução de determinado problema, tanto do ponto de vista técnico como econômico.

Abordando sempre o aspecto da continuidade da energia, foram trabalhados 6 modelos matemáticos representativos dos principais objetivos a serem alcançados. Foram eles:

- Modelo da Relação Custo Benefício
- Modelo do Payoff Tradicional
- Modelo do Payoff das Multas
- Modelo utilizando a maximização do Benefício

- Modelo utilizando as Penalidades
- Método utilizando o método dos Mínimos Quadrados

Todos os modelos matemáticos utilizados neste trabalho portaram-se de forma coerente, pois os resultados mostraram que não houveram descontinuidade nas equações.

De posse deste benefício estimado, as obras classificadas foram analisadas e simuladas considerando somente o DEC (CHI), somente o FEC (CI) ou ambos (CHI+CI), de duas maneiras: geral ou por conjunto.

A análise Geral não leva em conta a composição das obras dentro dos conjuntos ANEEL. Uma analogia é considerar esta classe de priorização como se fosse realizada por um órgão central da empresa. De uma maneira geral, todos os modelos testados, tiveram um comportamento semelhante, exceção é o modelo do Payoff, que apresenta um desempenho inferior aos demais modelos, pois ele considera outras variáveis na priorização das obras tais como perdas, queda de tensão e carregamento, além da interrupção, através da Energia Não Distribuída. Portanto, em uma análise como esta, qualquer um dos outros modelos matemáticos poderia ser utilizado e seus resultados serem julgados representativos de toda esta classe de obras.

A análise por conjuntos considerou a composição das obras classificadas por conjuntos ANEEL. Seleciona os conjuntos que não atingiram a meta, e prioriza as obras por conjunto, até que atinjam a meta estipulada. Aqui, foi utilizada a otimização em dois níveis, conhecida com BLPP – Bilevel Programming Problem. É um problema de otimização com uma estrutura hierárquica onde um subconjunto de variáveis é restrito a ser uma solução de um problema de otimização parametrizado pelas variáveis restantes. É indicada para tratar com funções onde aparecem dois objetivos: o primeiro é a preocupação em otimizar o benefício global da empresa, e outro é a preocupação em otimizar o benefício individual de cada conjunto. Os resultados das simulações mostraram que esta classe de otimização escolhe primeiro as obras que levam os

conjuntos a serem colocados na meta mais rapidamente (menos obras) e com menor orçamento.

Adicionalmente, para as simulações considerando a soma do DEC e FEC conjuntos (CHI+CI) foram feitas duas análises diferenciadas: simplificada e convencional. Na análise simplificada, a multa devido a transgressão do CHI (DEC) e do CI (FEC) é somada e considerada uma multa única, enquanto na análise convencional, elas são consideradas separadamente.

Como a priorização de obras para a distribuição envolve a consideração de múltiplos e conflitantes objetivos, também foi analisado e simulado o caso exemplo utilizando a programação por metas (“goal programming”).

Os resultados das simulações para a programação inteira e para a programação por metas foram bastante próximos, tanto para a análise simplificada como para análise convencional. A explicação pode ser creditada a quantidade relativamente pequena de obras por conjunto, a natureza do problema e ao fato de que as metas utilizadas foram iguais a função objetivo. Conclusão que pode ser estendida a realidade das concessionárias, pois raramente um conjunto terá muitas opções técnicas viáveis de obras para solução dos problemas de qualidade de energia.

Também foram utilizados fatores de ponderação. Estes fatores objetivam diminuir a distorção nos desvios em função das diferentes métricas e grandezas dos mesmos.

Portanto, os resultados das simulações mostraram que o objetivo principal da metodologia, que era tirar a maior quantidade de conjuntos da transgressão, foi atingido mais rapidamente e com menor orçamento com o uso da metodologia e dos modelos matemáticos empregados neste trabalho.

Enfim, a metodologia proposta cumpriu com o seu objetivo, que é servir como uma ferramenta adicional para as concessionárias de distribuição de energia elétrica

elaborarem programas de obras específicos para redução de índices de continuidade ou quando pressionados pelo órgão regulador, elaborarem programas alternativos que competem pelo mesmo orçamento frente aos programas de obras tradicionais.

6.2 LIMITAÇÕES DA METODOLOGIA

- A metodologia desenvolvida para efetuar as simulações considera apenas obras independentes, ou seja, não considera o vínculo entre obras.
- Não considera obras excludentes, ou seja, obras que deixariam de ser necessárias com a construção de uma outra obra. Por exemplo, ao construir um novo alimentador, que reduziria as interrupções do conjunto, a obra de reisolamento de outro alimentador deixaria de ser necessária.
- Também não considera a alteração do benefício com a execução de outras obras. A execução de uma obra pode aumentar ou diminuir o benefício de outra obra.
- Apresentam as obras em blocos, segundo o orçamento que está sendo analisado, não relacionando as obras em ordem decrescente de prioridade.

6.3 CONTRIBUIÇÕES

As principais contribuições deste trabalho são:

- A apresentação e o desenvolvimento de uma metodologia para a priorização de obras do sistema de distribuição voltada aos índices de continuidade controlados pelo órgão regulador, visando suprir uma lacuna na área de planejamento de

obras da Distribuição.

- A utilização da ferramenta matemática otimização neste campo, já que normalmente é necessário o trabalho com uma grande quantidade de dados e de obras propostas.
- A aplicação de modelos matemáticos representativos dos diversos objetivos de priorização de obras, que são eles:
 - Método dos Mínimos Quadrados
 - Método da Relação Custo Benefício
 - Método do Payoff (retorno financeiro)
 - Método utilizando a maximização do benefício
 - Método utilizando as penalidades
- Dentre os modelos citados, destaca-se a elaboração do modelo baseado no Método dos Mínimos Quadrados, que é uma maneira nova e diferenciada para a representar a problemática da priorização de obras.
- A abordagem do problema de priorização de obras de dois ângulos diferentes: global e por conjunto. Permite que o planejador observe dois aspectos diferentes na escolha das obras, ambos importantes e passíveis de multa.
- Destaca-se também como inédito, a utilização da Otimização em Dois Níveis para a priorização de obras na Distribuição. Esta classe de otimização, apesar de já utilizada no setor de energia elétrica, ainda não tinha aplicações na área de planejamento.
- A modelagem matemática do problema da priorização de obras utilizando a otimização em dois níveis, envolvendo tanto o índice DEC (CHI) quanto o FEC (CI).

- A otimização em dois níveis permitiu a representação do problema de priorização de obras contemplando os objetivos do órgão sede da empresa (nível superior) e dos planejadores regionais (conjuntos) em uma só equação.
- A utilização da Programação por Metas (“goal programming”), utilizada como ferramenta para a resolução da equação em dois níveis.
- A versatilidade e simplicidade da utilização do Método do Payoff Simplificado para a obtenção do benefício das obras. Novas obras que forem viabilizadas tecnologicamente e economicamente poderão ser incluídas facilmente neste método. Além disso, a alteração do peso do parâmetro K das equações, que pode ser corrigido a cada ano, baseado no histórico das obras anteriores.
- A elaboração de um aplicativo matemático simples, que viabilizou a aplicação da otimização em dois níveis, utilizando o LINGO, um programa comercial. Devido a dificuldade de resolução, normalmente a programação em dois níveis requer algoritmos específicos, não raro baseado em inteligência artificial e normalmente envolvendo programação e operações complexas, requisitando alto tempo de processamento computacional.
- E enfim, a modelagem matemática e o método de análise proposto neste trabalho, não se limita ao caso de priorização de obras estudado. Poderia ser aplicado na resolução de problemas de outras áreas da engenharia elétrica e mesmo de empresas de outros setores.

6.4 SUGESTÕES PARA FUTUROS ESTUDOS

- Inserção nos modelos matemáticos de parcelas relativas aos benefícios advindos da execução dos serviços na operação e na manutenção do sistema elétrico.
- Desenvolvimento de novos modelos matemáticos que reproduzam outras ações para diminuição dos índices de continuidade, além de obras, tais como o custo e o benefício advindo de ações da manutenção corretiva, preventiva e da operação do sistema.
- Quanto a programação matemática em dois níveis, poderia ser trabalhada para permitir a inserção de outros objetivos desejáveis pela organização, como por exemplo, o órgão sede (nível superior) poderia:
 - Estabelecer objetivos e metas para o DEC e/ou FEC global da empresa.
 - Utilizar outras parcelas do custo global, com vistas a cumprir com as metas da organização.
 - Estabelecer prioridades entre os conjuntos, beneficiando conjuntos que tenham transgredido a meta por vários anos ou conjuntos localizados em áreas urbanas, etc.
 - Estabelecer regras para repartir o investimento, como por exemplo, investir pelo menos x reais em cada conjunto, ou então, executar pelo menos uma obra em cada conjunto. Poderia também repartir o investimento por órgãos da empresa (unidades regionais).
 - Beneficiar obras que atuassem mais sobre o DEC que sobre o FEC, ou vice-versa.
 - Definir o percentual de meta que o conjunto devesse cumprir, como por exemplo, 90% da meta da ANEEL, gerando cenários diferentes para comparação.
- Para os conjuntos (nível inferior), além do benefício em DEC, FEC e/ou multa

evitada, poderia ser considerado e analisado outros benefícios que constam na equação do custo global do serviço, tais como queda de tensão, perdas, etc. Poderiam ser determinados em um outro nível ou serem comparados financeiramente em um mesmo nível, sujeito ou não a restrições regulatórias.

- A utilização de ferramentas de inteligência artificial e/ou regras heurísticas para a resolução da problemática. A lógica fuzzy também poderia ser empregada, favorecendo a geração e avaliação de cenários.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

- (1) AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Estabelece as disposições relativas a continuidade da distribuição de energia elétrica às unidades consumidoras. Resolução nº 24, 27 de janeiro de 2000. **Diário Oficial da União**, Brasília - DF, nº 20-E, seção 1, pág. 23, janeiro 2000.
- (2) COPEL DISTRIBUIÇÃO. **Priorização de Obras de Distribuição - Método do Payoff** – Curitiba: COPEL, 2002. Revisão : 02/2002.
- (3) BRONZEADO, H.S.; RAMOS, A.J.P.; OLIVEIRA, J.C. et al. Uma proposta de termos e definições associados à qualidade de Energia Elétrica. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA, 2.,1997, São Lourenço. **Anais...** São Lourenço, SBQEE,1997.
- (4) BELISÁRIO, C.D.A., BAHIENSE,D.A., OLIVEIRA, G.M. Continuidade nos Serviços de Distribuição de Energia Elétrica. **Conjuntura & Planejamento**, Salvador, n.105, p. 36-40, fev. 2003. Disponível em <[http:// www.sei.ba.gov.br/conjuntura/index_conj_c&p.php](http://www.sei.ba.gov.br/conjuntura/index_conj_c&p.php)>. Acesso em 04/2004.
- (5) **CONTRATO DE CONCESSÃO N° 46/99**, assinado entre a União e a COPEL, Brasília, 24/06/1999.
- (6) BILLINTON, R.; ALLAN, R.N.; SALVADERI, L. Power-system Reliability in Perspective. In: **Applied Reliability Assessment in Electric Power Systems**. New York IEEE. 1991. p. 1-6.
- (7) ELETROBRÁS. Comitê de Distribuição. **Desempenho de Sistemas de Distribuição**. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1982. 174 p. (Coleção Distribuição de Energia Elétrica, v. 3)
- (8) DEPARTAMENTO NACIONAL DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DNAEE. Estabelece as disposições relativas à continuidade de serviço a serem observadas pelos concessionários de serviço público de eletricidade no fornecimento de energia elétrica a seus consumidores. Portaria nº 046, de 26/04/78. **Diário Oficial da União**, Brasília – DF, seção 1, p. 5850 , abril , 1978.

(9) DONIAK, J.A.; MASSUDA SOBRINHO, M.; PEREIRA, E.G.; KLIMKOWSKI, M, SCIAMMARELLA, S.F.; BASSIER, M.; SUCKOW, C.J.; VIVEKANANDA, R. Desenvolvimento de Metodologia de Manutenção Baseada em Confiabilidade para Redes de Distribuição Urbanas da ENERSUL, In: CITENEL, 2., Salvador, 2003. **Anais...** Brasília: ANEEL, 2003. Páginas 32-36.

(10) PINTO, C.L.S.; SILVA, U. G.; MACEDO, J.R.; PORTELLA, P.E; RATHUNDE, P.H. Computação Móvel para Operação da Rede de Distribuição de Energia Elétrica. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE PLANEJAMENTO E QUALIDADE EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2001, Puerto Iguazu, Argentina. **Anais...** Puerto Iguazu, 2001.

(11) COSTA, A . L.; VARRICHIO, C.; VAZ, A. L.; MORAES, N. Sistema de Localização de Viaturas em Apoio à Operação da Distribuição. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 17., 2006, Belo Horizonte. **Anais...**Belo Horizonte: SENDI, 2006. 1CD-ROM.

(12) - TURAN GÖNEN. **Electric Power Distribution System Engineering**. 1st edition. New York: McGraw-Hill, 1986. 752 p. Cap. 11, p. 577-647.

(13) GAVER, D.P.; MONTMEAT,F.E.; PATTON,A .D. Power System Reliability I – Measures of Reliability and Methods of Calculation. **IEEE Transactions on Power Apparatus Systems**, v. 83, p. 727-737, July 1964.

(14) BROWN, R. E.; MARSHALL, M. Budget Constrained Planning to Optimize Power System Reliability. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 15, n. 2, p. 887-892, May 2000.

(15) UDO, V.; AGARWAL, S.K.; VOJDANI, A ; HARLACHER, M.I. Balancing Cost and Reliability: A Quantitative Study at Atlantic Electric. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 12, n. 3, p. 1103-1111, Aug. 1997.

(16) KJOLE, G.; ROLFSENG, L.; DAHL, E. The Economic Aspect of Reliability in Distribution System Planning. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 5, n. 2, p. 1153-1157, April 1990.

(17) GOEL, L., BILLINTON, R. Determination of Reliability Worth for Distribution system Planning. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 9, n. 3, p. 1577-1583, July 1994.

(18) EUA-ARPON, B.; YOKOHAMA, A.; AUDOMVONGSEREE, K. Reliability Worth Evaluation for Distribution System Planning and Operation using Improved Actual Performance Data. **IEEE/PES Transmission and Distribution Conference**, v. 1, p. 74-79, Oct. 2002.

(19) CHOWDHURY, A.A.; KOVAL, D.O. Current Practices and Customer Value-Based Distribution System Reliability Planning. **IEEE Trans. On Ind. Applications**, v. 40, n. 5, p. 1174-1182, Sept./Oct. 2004.

(20) BROWN R.E.; HANSON, A.P.; WILLIS, H.L.; LUEDTKE, F.A.; BORN, M.F. Assessing the Reliability of Distribution Systems. **IEEE Computer Applications in Power Systems**, p. 44-49, Jan. 2001. Disponível em < http://www.itee.uq.edu.au/~elec4000/material/RCM_ds.pdf >. Acesso em 06/2004.

(21) VAZIRI, M.; TOMSOVIC, K.; GÖNEN, T. Distribution Expansion Problem Revisited: PART 1 Categorical Analysis and Future Directions. In: LASTED International Conference on Power and energy Systems (PES 2000), 4., 2000, Marbella, Spain. **Proceedings...** Disponível em <<http://tomsovic.eecs.wsu.edu/Vitae/Publications.html>>. Acesso em 06/2004.

(22) FIGUEIREDO, F.M; JARDINI, J.A. Aplicação de Técnica de Análise Considerando Múltiplos Critérios Como Ferramenta de Auxílio à Tomada de Decisão. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 14., 2000, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: SENDI, 2000. 1 CD-ROM.

(23) SHEEHAN, M.; WILLIAMS, S.; BRACE, C.; SULLIVAN, M. Optimal Allocation of Resources to Distribution Investments Using the Analytic Hierarchy Process to Balance the Impacts of Investments on Safety, Customer Interruptions, Levelized Annual Revenue Requirement, Contribution to Margin and Other Considerations. **Power Engineering Society Summer Meeting**, v. 3, p. 1311-1316, Seattle, July, 2000.

(24) ESPIE, P.; AULT, G.W.; BURT, G.M.; MCDONALD. Multiple Criteria Decision Making Techniques Applied to Electricity Distribution System Planning. **IEEE Proc-Gener. Transm. Distrib.**, v. 150, n. 5, p. 527-535, Sept. 2003.

(25) VAN HART, M. A; GAUNT, C. T.; CARTER-BROWN, C. Introducing reliability Based Distribution Network Planning in South Africa. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, 18., 2005, Turin. **Proceedings...**

Turin: CIRED, 2005. Session 5. 1 CD-ROM.

(26) CIPOLI, J.A . **Engenharia de Distribuição**. Rio de Janeiro: Quality Mark, 1993. 340 p.

(27) – ELETROBRÁS. Comitê de Distribuição. **Planejamento de Sistemas de Distribuição**. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1982. 241 p. (Coleção Distribuição de Energia Elétrica, v.1)

(28) CODI. Comitê de Distribuição. **Critérios para Definição de Prioridades de Obras – Recomendações**. Rio de Janeiro: Comitê de Distribuição, 1987. (Relatório SCEI.22.02).

(29) JORGE, L.A.; MIRA, F. ;QUARESMA, E.; FERREIRA, L.A.F.M.; CARVALHO, P.M.S.; GRAVE, S.N.C.; SILVA, F.F.C.; BARRUNCHO, L.M.F.; Optimal Distribution Planning: Meeting New Regulation Criteria for Reliability; In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, 17., May, 2003, Barcelona. **Proceedings...** Barcelona: CIRED, 2005. Session 5. 1 CD-ROM.

(30) KRUITHOF, M.; HODEMAEKERS, J.; VAN DIJK, R.; Quantitative Risk Assessment: a Key to Cost-Effective SAIFI and SAIDI Reduction. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION , 18. , 2005, Turin. **Proceedings...** – Turin: CIRED, 2005. Session 5. 2 CD-ROM.

(31) VICENTINI, O.H.S.; OLIVEIRA, H.R.P.M.; OLING, R. MARTINEZ, M.L.B.; SARAN, M.A.; BACHEGA, R.J.; VIOLIN, A.; LEFORT, C. Distribution Reliability Analysis Program. In: Bulk Power System Dynamics and Control, 6. 2004, Cortina d'Ampezzo, Italy. **Proceedings...** Italy: s.e., 2004. p. 274-277. Disponível em < <http://www2.polito.it/eventi/irep2004/>>. Acesso em 01/2005.

(32) TANURE, J.E.; CARVALHO, E. B. Regulação por Comparação de Desempenho para o Estabelecimento de Metas de Continuidade do Fornecimento. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 14., 2000, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: COPEL, 2000. 1 CD-ROM.

(33) COPEL DISTRIBUIÇÃO **Manual de Instrução Técnica: Interrupção no Sistema de Distribuição – Apresentação do Sistema ISD**. Curitiba: COPEL, 2005. (MIT 03.03.01).

(34) GRUPELLI JR., F. A; AZONNI, E. G. Priorização de Obras Usando Solução de Data Warehouse. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 14., 2000, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: SENDI, 2000. 1 CD-ROM.

(35) COPEL. **Módulos Médios**. Curitiba: COPEL - Companhia Paranaense de Energia, 2000. Apresentação em powerpoint.

(36) KNAPP,K.E.; MARTIN,J.; PRICE,S. GORDON,F.M. **Costing Methodology for Electric System Planning**. [S.l. s.e.], Nov., 2000.

(37) PORTELA, J.C.; PINTO,J.M.; PEREIRA,J.C. Automação de Subestações através de Substituição de Religadores – Técnicas de Decisão. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 15., 2002, Salvador. **Anais...** Salvador: SENDI, 2002.1 CD-ROM.

(38) BALA, MONDE; Capital Budgeting in Electricity Distribution Industry in Eskom Moving Into regional Distributors. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, 18., 2005, Turin. **Proceedings...** Turin: CIRED, 2005. Session 5.

(39) GOLDBARG, M.C.;LUNA, H.P.L. **Otimização Combinatória e Programação Linear: Modelos e Algoritmos**. 2º ed. Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2005. 518 p.

(40) CAMARGO, I. **Engenharia Econômica: Aplicações ao Setor Elétrico**. Brasília: FINATEC, 1998. 160 p.

(41) SOUZA,M.J.F., MARTINS, A .X., et all. **Pesquisa Operacional Aplicada a Mineração**. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, s.d. 86 p. Notas de Aula de Pesquisa Operacional Aplicada a Mineração. Disponível em <http://www.decom.ufop.br/prof/marcone/Disciplinas/Pesquisa%20Operacional%20I/LINGO_ListaExercicios.pdf>. Acesso 06/2005.

(42) GOMES Jr, A .C. ; SOUZA, M.J.F. **LINGO – Parte 1: Manual de Referência**. UFOP, Ouro Preto, 2004. 17 p. Disponível em <<http://www.decom.ufop.br/prof/marcone/>

Disciplinas/OtimizacaoCombinatoria/ManualdeSoftwaresdeOtimizacao.pdf>. Acesso 06/2005.

(43) SCHRAGE, L. **Optimization Modeling with LINGO**. 6ª edição. Illinois: Lindo Systems Inc, 2006. 603 p. Disponível em <<http://lindo.com/downloads/index.html>>. Acesso em 08/2006.

(44) FERNANDES, D.C.R. **Estratégia Ótima de Oferta de Energia em Mercados Competitivos**. 2005. 95 p. Tese (Doutorado) – COPEE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

(45) PINTO, C.L.S.; OLIVEIRA, C.B.; YUAN, J.Y.; MATIOLI, L.C. Least Square Method and Bilevel Programming Applied to Prioritization Works on Distribution System. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, 19., 2007, Wien. **Proceedings...** Wien: CIRED, 2007. Session 5. 1 CD-ROM.

(46) NELSON, S.K. **Inclusion of Value Concepts in Evaluation of Demand-Side Management in Electric Utility Planning**. 1992. 340 p. Tese (Doutorado) - Case Western Reserve University, Cleveland, 1992. Disponível em <http://www.ohiolink.edu/etd/view.cgi?acc_num=case1056481172>. Acesso 01/2004.

(47) COLSON, B.; MARCOTTE, P.; SAVARD, G. Bilevel Programming: A survey. **A Quarterly Journal of Operations Research**, v. 3, p. 87-105, 2005.

(48) BARD, J., **Practical Bilevel Optimization - Algorithms and Applications**. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1998. 475 p. (Nonconvex Optimization and Its Applications, v. 30).

(49) Fricke, C. **An Introduction to Bilevel Programming**. Melbourne: Department of Mathematic and Statistic of University of Melbourne, 2003. Apresentação. Disponível em <<http://www.or.ms.unimelb.edu.au/handouts/Bilevel.pdf>>. Acesso 11/2005.

(50) Oliveira, F. **Aplicação de Goal Programming em um Problema Florestal**. 2000. 117 p. Dissertação (Mestrado) – Métodos Numéricos em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

(51) STEUER, RALPH E. **Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation and Application**. New York: John Wiley & Sons, 1986.

(52) Tamiz, M.; Jones, D.; Romero,C. Goal Programming for Decision Making: An Overview of the Current State-of-the-Art. **European Journal of Operational Research**, v. 111, p. 569-581, 1998

(53) BARBOSA, A.S.; CARVALHO, P.L.; LOPES, P.H.S. Procedimentos Para Aplicação de Penalidades por Violação dos Padrões dos Indicadores de Continuidade DEC e FEC; In: Seminário Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica, 6., 2005, Belém, Pará. **Anais...** Pará, SBQEE, 2005.

BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA

(54) BRACKEN,J.; MCGILL,X. Mathematical Programs with optimization problems in the constraints. **Operations Research**, v. 21, p. 37-44, 1973.

(55) CANDLER,W.; NORTON,R. **Multilevel Programming**. Technical Report 20. World Bank Development Research Center, Washington D.C., 1977.

(56) STACKELBERG VON,H. **The theory of market theory**. Oxford: Oxford University Press, 1952.

(57) LABBÉ,M.; MARCOTTE,P.; SAVARD,G. A bilevel model of taxation and its application to optimal highway pricing. **Management Science**, v, 44, p. 1608-1622, 1999.

(58) BARD,J. Coordination of a Multidivisional Organization Through Two Levels of Management. **OMEGA**, v.11, p. 457-468, 1983.

(59) CANDLER, W.; FORTUNY-AMAT.; MCCARL,B. The potential role of multilevel programming in agricultural economics. **American Journal of Agricultural Economics**, v.63, p. 521-531, 1981.

(60) KOCVARA,M.; OUTRATA,J. A Nondifferentiable Approach to the Solution of Optimum Design Problems with Variational Inequalities. In: KALL, P. **System Modelling and Optimization: Proceedings of the 15th Ifip Conference**. Berlin: Springer-Verlag, 1992. Lecture Notes in Control and Information Sciences 180, p. 364-373.

(61) CASSIDY,R.; KIRBY,M.; RAIKE, W. Efficient Distribution of Resources Through Three Levels of Government. **Management Science**, v.17, p. 462-473, 1971.

ANEXO A

1 INDICADORES DA CONTINUIDADE DE SERVIÇO PARA AS TENSÕES DE DISTRIBUIÇÃO

1.1 INDICADORES DE CONTINUIDADE COLETIVOS

A resolução ANEEL 024/2000, no seu artigo 1º e 2º, estabelece que o concessionário de serviço público de eletricidade deve apurar, quando fornecer energia elétrica a seus consumidores, os seguintes índices relativos à continuidade de serviço:

I – DEC - Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora. É o intervalo de tempo que, em média, no período de observação, em cada unidade consumidora do conjunto considerado ocorreu descontinuidade da distribuição de energia elétrica. É expressa em horas e centésimos de hora e calculada utilizando a equação:

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^n Ca(i).I(i)}{C_s}$$

II – FEC - Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora. É o número de interrupções ocorridas, em média, no período de observação, em cada unidade consumidora do conjunto considerado. É expressa em número de interrupções e centésimos do número de interrupções, utilizando a seguinte fórmula:

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^n Ca(i)}{C_s}$$

Onde :

- Ca_i = Número de unidades consumidoras interrompidas em um evento (i), no período de apuração;
- $t(i)$ = Duração de cada evento (i), no período de apuração;
- i = Índice de eventos ocorridos no sistema que provocam interrupções em uma ou mais unidades consumidoras;
- n = Número máximo de eventos no período considerado; e
- C_s = Número total de unidades consumidoras, do conjunto considerado, no final do período de apuração.

1.2 INDICADORES DE CONTINUIDADE INDIVIDUAIS

No Art. 12, a Resolução ANEEL 24/2000 define os seguintes índices de continuidade individuais:

I – DIC - Duração de Interrupção por Unidade Consumidora, que exprime o intervalo de tempo que cada consumidor, individualmente considerado, ficou privado do fornecimento de energia elétrica, no período de observação, considerando-se as interrupções maiores ou iguais a três minutos, expresso em horas e centésimos de hora.

$$DIC = \sum_{i=1}^n t(i)$$

II – FIC - Frequência de Interrupção por Unidade Consumidora, que exprime o número de interrupções que cada consumidor, individualmente considerado, sofreu no período de observação, considerando-se as interrupções maiores ou iguais a três minutos. É expressa em números de interrupção.

$$FIC = n$$

III - DMIC - Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora. Utiliza a seguinte fórmula:

$$DMIC = t(i) \max$$

Nestes casos:

- i = Índice de interrupções da unidade consumidora, no período de apuração, variando de 1 a n ;
- n = Número de interrupções da unidade consumidora considerada, no período de apuração;
- $t(i)$ = Tempo de duração da interrupção (i) da unidade consumidora considerada, no período de apuração;
- $t(i) \max$ = Valor correspondente ao tempo da máxima duração de interrupção i , no período de apuração, verificada na unidade consumidora considerada, expresso em horas e centésimos de horas.

1.3 OUTROS INDICADORES DE CONTINUIDADE ENCONTRADOS NA LITERATURA

Os índices de confiabilidade podem ser calculados para avaliar a confiabilidade pretérita (desempenho passado) ou a confiabilidade preditiva (esperada no futuro) do sistema.

Além dos índices operativos apresentados, encontramos na literatura outros índices de confiabilidade utilizados :

I - Duração Média por Consumidor: é o período de tempo que, em média, cada consumidor atingido ficou privado do fornecimento de energia elétrica.

$$d = \frac{\sum_{i=1}^n Ca(i).t(i)}{\sum_{i=1}^n Ca(i)}$$

II – Duração Equivalente por Potência Instalada: É o período de tempo que, em média, cada potência instalada atingida ficou desenergizada, no período considerado:

$$D_K = \frac{\sum_{i=1}^n P(i).t(i)}{P_{total}}$$

III – Duração Média por Potência Instalada: É o período de tempo que, em média, cada potência instalada atingida ficou desenergizada, no período considerado:

$$d_K = \frac{\sum_{i=1}^n P(i).t(i)}{\sum_{i=1}^n P(i)}$$

IV – Frequência Equivalente por potência instalada: É o número de interrupções que, em média, cada potência instalada do sistema sofreu, no período considerado.

$$f_K = \frac{\sum_{i=1}^n P(i)}{P_{total}}$$

V – Confiabilidade por consumidor

$$C = \frac{C_s.t - \sum_{i=1}^n Ca(i).t(i)}{C_s.T} = 1 - \frac{D}{T}$$

VI – Confiabilidade por Potência

$$C_k = \frac{P_{total} \cdot T - \sum_{i=1}^n P(i) \cdot t(i)}{P_{total} \cdot T} = 1 - \frac{D_k}{T}$$

Onde :

- Ca_i = Número de unidades consumidoras interrompidas em um evento (i), no período de apuração;
- $t(i)$ = Duração de cada evento (i), no período de apuração;
- i = Índice de eventos ocorridos no sistema que provocam interrupções em uma ou mais unidades consumidoras;
- n = Número máximo de eventos no período considerado; e
- C_s = Número total de unidades consumidoras, do conjunto considerado, no final do período de apuração.
- $P(i)$ = Potência instalada na interrupção (i), expressa em kVA ou MVA.
- P_{total} = Potência total instalada no sistema em kVA ou MVA.
- t = Período considerado.

ANEXO B

PENALIDADE POR VIOLAÇÃO DAS METAS DE CONTINUIDADE

A Resolução ANEEL 24/2000 estabelece os seguintes critérios para o cálculo das penalidades relativas a duração da interrupção:

- **Para indicadores coletivos (53):**

$$P = \sum_{i=1}^n \left(\frac{IND_v(i)}{IND_p(i)} - 1 \right) * DEC_p(i) * \left(\frac{N^{\circ}cons.conj(i)}{N^{\circ}cons.empresa} \right) * \frac{Fat.empresa}{8.760} * k1 * k2 * k3$$

Onde:

- P - valor da penalidade em reais;
- a) termo que considera a gravidade da infração; $\left(\frac{IND_v(i)}{IND_p(i)} - 1 \right)$
- b) termo que considera a abrangência da infração; $\left(\frac{N^{\circ}cons.conj(i)}{N^{\circ}cons.empresa} \right)$
- $IND_v(i)$ – valor do indicador - DEC ou FEC- do conjunto (i) verificado no período de observação;
 - $IND_p(i)$ – valor do indicador padrão correspondente do conjunto (i) no período de observação;
 - $DEC_p(i)$ - DEC padrão do conjunto (i) no período;
 - $N^{\circ}cons.conj(i)$ - número médio de unidades consumidoras do conjunto (i) no período;
 - $N^{\circ}cons.empresa$ – número médio de unidades consumidoras da Empresa no período;

- *Fat. Empresa* - faturamento líquido anual da empresa;
- n – total de conjuntos da empresa que transgrediu o indicador de continuidade DEC ou FEC;
- k_1 - coeficiente de majoração, que varia de 5 a 50, e cujo valor foi fixado em “5” no presente ano, poderá ser alternado pela fiscalização da ANEEL, a qualquer tempo.
- k_2 – coeficiente de reincidência de violação do indicador do conjunto (conforme art. 16, da Resolução Normativa nº 063/2004, $k_2 = 1$ ou 1,5);
- k_3 – coeficiente de existência de sanção anterior nos últimos quatro anos (conforme art. 15, da Resolução Normativa nº 063/2004; considerada a aplicação do adicional de 2% para cada sanção);
- 8.760 – número de horas do ano.

Obs.: Para todos os conjuntos que transgrediram o indicador padrão DEC e/ou FEC da empresa foram calculadas as penalidades, sendo que, para efeito de multa à empresa, foi considerado apenas o indicador com maior desvio em relação à meta.

- **Para indicadores individuais**

Violação de padrão do indicador de continuidade individual é calculada em relação ao período de apuração (mensal, trimestral ou anual). O valor de compensação ao consumidor deve ser creditado na fatura de energia elétrica no mês subsequente à apuração.

São utilizadas as seguintes expressões:

Para o DIC:

$$Valor = \left(\frac{DIC_v}{DIC_p} - 1 \right) \cdot DIC_p * \frac{CM}{730} * kei$$

Para o FIC

$$Valor = \left(\frac{FIC_v}{FIC_p} - 1 \right) \cdot DIC_p * \frac{CM}{730} * kei$$

Para o DMIC:

$$Valor = \left(\frac{DMIC_v}{DMIC_p} - 1 \right) \cdot DMIC_p * \frac{CM}{730} * kei$$

Onde:

- DIC_v = Duração de Interrupção por Unidade Consumidora verificada no período considerado, expresso em horas e centésimos de hora;
- DIC_p = Padrão de continuidade estabelecido no período considerado para o indicador de Duração de Interrupção por Unidade Consumidora, expresso em horas e centésimos de hora;
- $DMIC_v$ = Duração Máxima de Interrupção Contínua, verificada no período considerado, expresso em horas e centésimos de hora;
- $DMIC_p$ = Padrão de continuidade estabelecido no período considerado para o indicador de Duração Máxima de Interrupção Contínua, expresso em horas;
- FIC_v = Frequência de Interrupção por Unidade Consumidora verificada no período considerado, expresso em número de interrupções;
- FIC_p = Padrão de continuidade estabelecido no período considerado para o indicador de Frequência de Interrupção por Unidade Consumidora, expresso em

número de interrupções;

- CM = Média aritmética dos valores líquidos das faturas de energia elétrica ou dos encargos de uso dos sistemas de distribuição correspondentes aos meses do período de apuração do indicador;
- 730 = Número médio de horas no mês; e
- kei = Coeficiente de majoração, que variará de 10 a 50, para consumidor cativo, e cujo valor, fixado em 10 (dez), poderá ser alterado pela ANEEL a cada revisão periódica das tarifas.

ANEXO C

Exemplo da redução da equação do Payoff COPEL para o Payoff Simplificado.

MÓDULO 2 - IMPLANTAÇÃO DE TRONCO DE ALIMENTADORES OU LINHAS COM MUDANÇA DE CONFIGURAÇÃO

Objetivo: Implantação de alimentador ou linha com o intuito de remanejar demanda de um alimentador ou linha que esteja fora dos níveis legais de qualidade de serviço (níveis de tensão, DEC e FEC) e/ou com carregamento alto.

A figura C.1 mostra dois diagramas típicos deste tipo de obra, apresentados de forma simplificada:

Figura C.1 – Diagramas simplificados para o módulo 2 do Payoff COPEL.

Nestes casos, ΔC_{END} é calculada através da equação:

$$\Delta C_{END} = (D_1 + D_2) \cdot [FM \cdot t \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 + DPE_1 \cdot k_1] \cdot FC \cdot k_{CE} \cdot k_m \cdot C_i \quad [US\$/ano]$$

onde:

- $D_1 + D_2$: demanda total: demanda máxima do alimentador ou linha, em kW;
- FM : número de falhas de curta duração (menor que 3min) no religador automático, em ocorrências/ano (FM total);
- t : tempo médio de recuperação das cargas após a ocorrência de uma FM - utilizar $t = 0,5h$;
- K_1 : fator de correção devido à redução do tempo de interrupções (de duração maior ou igual a 3 min) com a execução da obra - utilizar $k1 = 0,5$ ou, se já houver possibilidade de remanejamento de carga do alimentador ou da linha a ser interligada com outras existentes, utilizar $k1 = 0,35$;
- K_2 : fator de correção devido à redução do número de FM's com a execução da obra - utilizar $k2 = 0,5$;
- K_3 : fração de demanda que demora o tempo médio t para ser recuperada após a ocorrência de uma FM - utilizar $k3 = 0,1$;
- K_4 : fator de correção devido às ocorrências de várias FM em intervalos menores que 30 minutos - utilizar $k4 = 0,7$;
- DPE_1 : duração das interrupções (maiores ou iguais a 3 min) do religador da subestação (próprias), em horas/ano;
- FC : fator de carga do circuito, obtido do relatório R49 do sistema GEDIS (na falta deste, utilizar $FC = 0,5$);
- K_{CE} : fator de correção em função de consumidores especiais que serão beneficiados com a obra (vide Anexo I);
- K_m : fator de correção para considerar o efeito da manutenção preventiva (vide Anexo II);
- C_i : custo unitário da energia não distribuída - utilizar $C_i = \text{US\$ } 2.12/\text{kWh.ano.}$

Na abordagem do tempo, são consideradas as interrupções:

- com duração inferior a 3 minutos, chamadas de FM (Falha Momentânea);
- com duração maior ou igual a 3 minutos, avaliadas através dos índices DPE - Duração Própria do Equipamento.

Como para este trabalho interessa somente o benefício da obra sobre a parcela correspondente ao DEC e ao FEC, serão suprimidas da equação as parcelas referentes a Falha Momentânea (FM). Da mesma maneira, os índices relativos a consumidores especiais (K_{CE}) e manutenção preventiva (K_m) serão desconsiderados, assumindo o valor unitário. Então resta a equação:

$$\Delta C_{END} = (D_1 + D_2) \cdot [DPE_1 \cdot k_1] \cdot FC \cdot C_i$$

Tirando o fator custo da equação:

$$\Delta END = (D_1 + D_2) \cdot FC \cdot DPE_1 \cdot k_1$$

Notamos que a END é proporcional ao fator K1, que foi definido como a redução do tempo de interrupções (de duração maior ou igual a 3 min) com a execução da obra, que neste caso foi estimado em 50%, devido a consideração da carga uniformemente distribuída, taxa de falhas constante (n° de falhas/km) e possibilidade de seccionamento na metade do alimentador. Então, é razoável supor que tanto o DEC (CHI) quanto o FEC (CI) também terão o mesmo comportamento, sendo proporcionais ao k1, e por consequência, com a redução estimada em 50%.

Portanto:

$$\Delta CHI = CHI \cdot k_1 \quad k_1 = 0,5$$

$$\Delta CI = CI \cdot k_2 \quad k_2 = 0,5$$

ANEXO D

Exemplo de aplicação para os métodos simplificado e convencional.

Para esclarecer as diferenças entre o método simplificado e convencional, será analisado o exemplo a seguir, composto por três obras cujos dados estão expostos na tabela D.1. O orçamento disponibilizado é de R\$ 20.000,00, suficiente para a execução de apenas duas obras. Será aplicada a análise geral, porém o conceito pode ser extrapolado para análise por conjunto.

Tabela D.1: Dados para o exemplo comparativo da análise simplificada e convencional.

1	2	3	4	5
Obra	Inv_total (R\$)	Delta_multa_CHI	Delta_multa_CI	Delta_multa_CHI_CI
1	10,000.00	10,000	0	10,000
2	10,000.00	5,000	5,000	10,000
3	10,000.00	0	9,000	9,000

- **Análise Simplificada**

No exemplo que utiliza a análise simplificada, é utilizado os dados das colunas 1, 2 e 5 da tabela D.1.

A Função Objetivo ficaria:

$$\text{MIN} \left(\sum_{i=1}^3 (\Delta \text{multa devido ao CI} + \text{CHI})_i * x_i \right)$$

$$\sum_{i=1}^3 C_i . x_i \leq 20.000$$

onde x_i é a variável de decisão da obra i (1 faz a obra / 0 não faz a obra).

O resultado seria a escolha das obras 1 e 2, pois são aquelas que tem o maior benefício na soma do CHI e CI.

- **Análise Convencional**

No exemplo que utiliza a análise convencional, os dados utilizados estão nas colunas 1, 2, 3 e 4 da tabela D.1.

A função objetivo ficaria:

$$\min \left[\sum_{i=1}^3 ((\Delta \text{multa devido ao CHI})_i * x_i + (\Delta \text{multa devido ao CI})_i * y_i) \right]$$

$$\sum_{i=1}^3 C_i * (x_i + y_i) \leq 20.000$$

$$x_i + y_i \leq 1$$

sendo:

x_i é a variável de decisão da obra i (1 faz a obra / 0 não faz a obra), devido ao CHI.

y_i é a variável de decisão da obra i (1 faz a obra / 0 não faz a obra), devido ao CI.

As obras escolhidas seriam as obras 1 e 3, sendo que a obra 1 seria selecionada pelo benefício em CHI e a obra 3 pelo benefício em CI.

ANEXO E

Fluxograma do aplicativo desenvolvido em visual basic.