



UNIVERSIDADE SALVADOR – UNIFACS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MESTRADO EM REGULAÇÃO DA INDÚSTRIA DE ENERGIA

JOSINALDO FERNANDES DA SILVA

**FERRAMENTA PARA ANÁLISE DOS IMPACTOS TÉCNICOS E
ECONÔMICOS POR RESTRIÇÕES ORÇAMENTÁRIAS EM PLANOS
DE INVESTIMENTOS DE SISTEMAS DE ALTA TENSÃO**

Salvador
2006

JOSINALDO FERNANDES DA SILVA

**FERRAMENTA PARA ANÁLISE DOS IMPACTOS TÉCNICOS E
ECONÔMICOS POR RESTRIÇÕES ORÇAMENTÁRIAS EM PLANOS
DE INVESTIMENTOS DE SISTEMAS DE ALTA TENSÃO**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado em
Regulação da Indústria de Energia, Universidade
Salvador – UNIFACS, como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Kleber Freire da Silva

Salvador
2006

Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da Universidade
Salvador - UNIFACS

Silva, Josinaldo Fernandes da

Ferramenta para análise dos impactos técnicos e econômicos por restrições orçamentárias em planos de investimentos de sistemas de alta tensão. / Josinaldo Fernandes da Silva. – Salvador, 2006.

88 p. : il.

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Regulação da Indústria de Energia, Universidade Salvador – UNIFACS, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre.

Orientador Prof. Dr. Kleber Freire da Silva.

1. Energia elétrica – Transmissão. 2. Energia elétrica – Aspecto econômico. I. Silva, Kleber Freire da, orient. II. Universidade Salvador – UNIFACS. III. Título.

CDD: 621

TERMO DE APROVAÇÃO

JOSINALDO FERNANDES DA SILVA

FERRAMENTA PARA ANÁLISE DOS IMPACTOS TÉCNICOS E ECONÔMICOS POR RESTRIÇÕES ORÇAMENTÁRIAS EM PLANOS DE INVESTIMENTOS DE SISTEMAS DE ALTA TENSÃO

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Regulação da Indústria de Energia, Universidade Salvador - UNIFACS, pela seguinte banca examinadora:

Kleber Freire da Silva – Orientador _____
Doutor em Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo (USP)
Universidade Salvador - UNIFACS

Irênio de Jesus Silva Junior _____
Doutor em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

Augusto Cesar Cavalcanti Oliveira _____
Doutor em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Salvador, 11 de agosto de 2006.

À minha esposa, Alexsandra, pela compreensão e também dedicação a minha pessoa e aos nossos filhos Mateus e Daniel.

À minha mãe, Germínia, exemplo de firmeza e amor divino.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Kleber Freire da Silva, meu orientador, por sua dedicação, apoio e simplicidade, fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Dr. Auden Uehara e ao Dr. Nelson Kagan e toda equipe da Daimon e Enerq - USP pelas valiosas contribuições na etapa de desenvolvimento do P&D.

A todos os professores do mestrado e aos colegas mestrandos que contribuíram significativamente na formação e na ampliação dos meus conhecimentos.

Aos meus queridos amigos, Auden Uehara, Jarbas Vilar, Bruno Lobo, Gerivaldo, Maria Helena e também a todos os outros amigos e amigas da Celpe, que prefiro não citar os nomes para que não ocorra algum esquecimento, pelo vosso apoio carinhoso em muitos momentos difíceis.

Um agradecimento especial ao meu irmão Josildo pelo carinho e incentivo em todas as etapas da minha vida e a meus filhos Mateus (3 anos) e Daniel (8 meses), que mesmo no acordar com choro nas madrugadas, não atrapalhou o desenvolver e sim valorizou mais ainda esse trabalho.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

A Deus, por tudo, sem exceção.

RESUMO

Esta dissertação, ora delineada, tem como objetivo geral apresentar uma metodologia para avaliar os impactos decorrentes de cortes orçamentários em plano de investimento que ocorrem nas concessionárias de energia elétrica relacionadas com as linhas de transmissão e subestações. Na verdade, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) tem editado medidas e resoluções que respaldam na busca pela melhoria da qualidade de atendimento e esta meta deve ser perseguida pelas distribuidoras e transmissoras. Deste modo, é fundamental uma avaliação para se determinar os impactos, em termos de melhoria de desempenho, bem como o valor econômico, que determinada obra de expansão, ou ação de melhoria, proporciona ao sistema. Assim, neste trabalho, foi desenvolvido um módulo computacional, através de uma pesquisa e desenvolvimento - P&D em conjunto com a Universidade São Paulo (USP), para viabilizar o problema de corte de obras no segmento de distribuição de alta tensão, motivado por restrições orçamentárias. Através deste programa é possível, a partir de um conjunto de obras candidatas, efetuar a avaliação do respectivo desempenho operacional do sistema, decorrente da inserção de obras levando em consideração modelos adequados de fluxo de potência e confiabilidade de redes de alta tensão com sua valoração econômica e posterior priorização, utilizando-se técnicas apropriadas de otimização baseadas em algoritmos de otimização, respeitando-se a disponibilidade orçamentária. Este trabalho subsidiará bastante as orientações do planejador, tornando-se essencial na melhor tomada de decisão para a diretoria das empresas de energia, buscando-se minimizar o impacto técnico e econômico correspondente ao plano de investimento com restrições.

Palavras chave: Transmissão de energia elétrica; plano de investimentos; impactos técnico-econômicos; restrições orçamentárias; otimização.

ABSTRACT

The foremost objective of this dissertation is to present a methodology to evaluate the impacts of an investment project postponement in an electricity utility company's investment budget for transmission lines and substations expansion. In fact, the Brazilian Electricity Regulatory Agency (ANEEL) has edited normative resolutions that create new electric-power quality obligations to distribution and transmission agents. Thus an evaluation is fundamental to determine those impacts, considering performance improvement as well as economic valuation, of a specific project postponement in the electric system. Therefore, a computer program was developed in association with Universidade de São Paulo (USP), as a Research and Development (R&D) project, to make possible the postponement of projects due to budget restrictions. This computer program allows to evaluate how the electric system behaves when a project of a determined expansion plan can not be run because of budget restrictions, using models of electric-power flow and reliability of high voltage networks, considering the economic valuation and later priority, applying appropriate techniques of prioritization based on an optimum algorithm, but respecting the availabilities. This dissertation will guide the one who plans new investment projects, becoming essential to the board of directors to take a decision, trying to minimize the technical and economic impact of a reduction in an investment plan.

Keywords: Electric energy transmission; investment plan; technical and economic impact; budget restrictions; prioritization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura organizacional do Departamento de Planejamento da Expansão (EPI)	25
Figura 2 – Sistema AT	37
Figura 3 – Rede genérica	38
Figura 4 – Modelo de linha	51
Figura 5 – Modelos de transformadores	52
Figura 6 – Modelo de transformadores de três enrolamentos	52
Figura 7 - Função Custo de Imperfeição de Tensão	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Mínimos caminhos para o nó 5	38
Tabela 2 - Exemplo de aplicação do método de otimização para cortes orçamentários	73
Tabela 3 - Resultado do problema de otimização	74
Tabela 4 - Exemplo de aplicação do método de otimização para cortes orçamentários	79
Tabela 5 - Resultado do problema de otimização	80
Tabela 6 - Exemplo de aplicação do método de otimização para cortes orçamentários	80
Tabela 7 - Resultado do problema de otimização	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BERQT	Benefício Econômico com Redução da Queda de Tensão
BERP	Benefício Econômico com Redução das Perdas Técnicas
BREND	Benefício Econômico com Redução da Energia não Distribuída
BTREND	Benefício Técnico com a Redução da Energia não Distribuída
BTRP	Benefício Técnico com redução das Perdas
BTRQT	Benefício Técnico com Redução da Queda de Tensão
CELPE	Companhia Energética de Pernambuco
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
EICD	Unidade de Controle de Obras da Distribuição
EIEP	Unidade de Estudos Especiais de Planejamento
EIPD	Unidade de Planejamento da Distribuição
EIPI	Unidade de Planejamento e Acompanhamento do Investimento
EIPT	Unidade de Planejamento da Transmissão
ELETROBRÁS	Centrais Elétricas Brasileiras
END	Energia Não Distribuída
ENERQ/USP	Centro de Estudos em Regulação e Qualidade de Energia da Universidade de São Paulo
EPI	Departamento de Planejamento de Investimento
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
GCPS	Grupo Coordenador do Planejamento do Sistema Elétrico
GEOREDE	Sistema de Gestão da Rede de Distribuição
INTERPLAN	Planejamento Integrado de Redes
OACA	Obras Associadas a Compromissos Assumidos
ON	Obras Necessárias

OM	Obras de Melhorias
ORC	Obras Relacionadas à Confiabilidade
TRII	Taxa de Rentabilidade Inicial do Investimento
UNIFACS	Universidade Salvador
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	16
CAPÍTULO 2 - DESCRIÇÃO DO PROBLEMA ANALISADO	19
2.1 INTRODUÇÃO	19
2.2 NATUREZA DAS OBRAS PROPOSTAS	20
2.2.1 Obras Necessárias (ON)	20
2.2.2 Obras Associadas a Compromissos Assumidos (OACA)	21
2.2.3 Obras de Melhoria (OM)	21
2.2.4 Obras Relacionadas à Confiabilidade (ORC)	22
2.3 CRITÉRIOS PARA PRIORIZAÇÃO DAS OBRAS	23
2.4 CRITÉRIOS PARA CORTES DE OBRAS	24
2.4.1 A Área de Planejamento de Investimentos da Celpe: Estrutura Organizacional	24
2.4.2 Efetivação de Cortes	26
CAPÍTULO 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE CORTE DE OBRAS NO SISTEMA ELÉTRICO	34
4.1 INTRODUÇÃO	34
4.2 CONFIABILIDADE DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO	36
4.2.1 Considerações Gerais	36
4.2.2 Cortes mínimos de segunda ordem	39
4.2.3 Cortes Mínimos de Terceira Ordem	40
4.2.4 Outras Considerações	41
4.2.5 Avaliação do Impacto Sobre os Indicadores de Continuidade	42

4.3	MODELO DE FLUXO DE POTÊNCIA – MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON	43
4.3.1	Considerações Gerais	43
4.3.2	Formulação Básica do Problema	44
4.3.3	Aplicação aos Sistemas de Alta Tensão	50
4.3.4	Produtos	53
	CAPÍTULO 5 - IMPACTO TÉCNICO-ECONÔMICO NA POSTEGAÇÃO OU NÃO DE OBRAS NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO AT	54
5.1	INTRODUÇÃO	54
5.2	BENEFÍCIO TÉCNICO DAS OBRAS	55
5.2.1	Introdução	55
5.2.2	Benefício Técnico com redução das Perdas (BTRP)	56
5.2.3	Benefício Técnico com a redução da Energia não Distribuída (BTREND)	57
5.2.4	Benefício Técnico com Redução da Queda de Tensão (BTRQT)	57
5.3	BENEFÍCIO ECONÔMICO DAS OBRAS	58
5.3.1	Benefício Econômico com redução das Perdas Técnicas (BERP)	59
5.3.2	Benefício Econômico com a redução da Energia Não Distribuída - BREND	60
5.3.3	Benefício Econômico com a redução da Queda de Tensão - BERQT	61
5.4	TAXA DE RENTABILIDADE INICIAL DO INVESTIMENTO (TRII)	63
5.5	ESTABELECIMENTO DE ÍNDICE DE MÉRITO PARA ESCOLHA OTIMIZADA DE CORTES ORÇAMENTÁRIOS NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO AT	64
5.5.1	Índice de Mérito para Avaliação do Corte de Obras	65
5.5.2	Descrição de um Processo de Otimização	66

5.5.2.1	Formulação Matemática	67
5.5.3	Classificação dos problemas de Otimização	68
5.5.3.1	Contínuos ou Discretos	68
5.5.3.2	Restritivos ou Não-Restritivos	68
5.5.3.3	Global ou Local	69
5.5.3.4	Estocásticos ou Determinísticos	69
5.5.4	Algoritmos de Otimização	69
5.5.5	Alguns Métodos de Otimização	70
5.5.6	O Problema da Otimização de Cortes de Obras	72
5.6	ESTABELECIMENTO DE ÍNDICE DE MÉRITO PARA ESCOLHA OTIMIZADA DE CORTES ORÇAMENTÁRIOS LEVANDO EM CONSIDERAÇÃO PARÂMETROS QUANTITATIVOS	75
5.6.1	Considerações Iniciais	75
5.6.2	Obras de Natureza Específica	75
5.6.3	Índice de Mérito para Tratamento de Obras de Natureza Específica	76
5.6.4	Otimização do Procedimento de Corte de Obras Levando em Consideração Reforços Tradicionais e Ações de Natureza Específica	77
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÃO E COMENTÁRIOS FINAIS		82
REFERÊNCIAS		85

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

O segmento em alta tensão 69kV, se diferencia de forma bastante acentuada dos de média e baixa tensão, seja na topologia (circuitos em geral bem maiores, freqüentemente formando malhas devido a maior exigência de confiabilidade), nas características da carga (normalmente pontos de demanda bem maior, constituídos por subestações de distribuição AT/MT, consumidores atendidos em AT, além de pontos distintos de suprimento) e na quantidade de linhas e pontos de carga suprida, em geral, bem menor.

Dado a magnitude das cargas envolvidas, bem como da importância operativa em relação ao sistema como um todo, é imperativa a alta confiabilidade requerida neste segmento. Desta forma, o serviço de distribuição em alta tensão deve ser provido com eficiência econômica, além de atender às restrições de segurança do sistema.

Sob a ótica do cliente, a conscientização dos consumidores com relação a seus direitos, bem como a maior exigência de qualidade do serviço por eles requeridos, impõe um grande desafio às áreas de planejamento e orçamento das concessionárias, para fazer frente a este contexto.

Atualmente, o órgão regulador brasileiro, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), tem editado medidas e resoluções que proporcionam a melhoria da qualidade de atendimento, alvo que deve ser constantemente perseguido pelas distribuidoras. Entre estas, destacam-se as Resoluções 505 (BRASIL, 2001), relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente; e a de nº 24, (BRASIL, 2000), relativa à continuidade da distribuição de

energia elétrica em relação às unidades consumidoras. Estas resoluções têm caráter substitutivo de portarias anteriores do Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE) antigo órgão regulamentador.

Estas Resoluções estabelecem determinados critérios ou índices de méritos que se constituem em referências para eventuais punições ou multas que recaem sobre a concessionária, configurando um conjunto de obrigações regulatórias a serem respeitadas pelas empresas e que devem ser avaliadas na atividade de planejamento da expansão/operação/manutenção do sistema.

Desta forma, é fundamental que se possa avaliar, de modo efetivo, qual o impacto, em termos econômicos e de melhoria de desempenho que determinada obra de expansão, ou ação de melhoria, proporciona ao sistema.

A questão chave que surge neste contexto é a seguinte: dada uma proposta orçamentária aprovada, quais são os impactos técnicos e econômicos, na operação do sistema de distribuição de energia elétrica, provocados por uma restrição ou corte orçamentário?

Este trabalho desenvolvido é essencial para aprimorar a atual sistemática de qualquer concessionária de energia, pois busca a solução através de pré-definições de critérios estabelecidos pela área de planejamento e investimento utilizando-se de uma ferramenta computacional desenvolvida para este fim, em que pode-se determinar criteriosamente, quais obras aprovadas, do plano inicial, representando a real necessidade da empresa, mas que, por restrições orçamentárias, necessitam sofrer corte por razões como, por exemplo, adequação a um determinado teto orçamentário anual. Este plano revisado pode, posteriormente, ser novamente reduzido, motivado por outras restrições orçamentárias, mas garantirá as melhores opções ou os menores impactos escolhidos em um grupo de obras existente.

Dentro deste contexto, esta dissertação apresenta uma metodologia, especificamente desenvolvida para tratamento de cortes de obras, motivada por cenários de restrição orçamentária, e que busca mensurar e subsidiar o poder

decisório (diretoria) na escolha das obras inadiáveis, podendo refletir negativamente no sistema em relação ao seu carregamento, nível de tensão, Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC), nas quantidades de perdas de energia, enfim, a degradação do sistema proveniente da escolha ou não de uma determinada obra.

CAPÍTULO 2 - DESCRIÇÃO DO PROBLEMA ANALISADO

2.1 INTRODUÇÃO

Atualmente, as concessionárias de energia não dispõem de ferramenta adequada para analisar e avaliar que projetos deveriam ser elegíveis, segundo critérios técnicos e de benefício/custo, principalmente, na etapa de avaliação dos cortes de investimentos de expansão da rede, após a definição do plano da Empresa.

Em geral, este trabalho é feito com base na experiência de alguns profissionais, sem metodologia ou instrumental adequados, de modo aleatório, isto é, uma vez feito o orçamento, as alterações/cortes, quase sempre se dão sem consenso entre os tomadores de decisão envolvidos, por meio de critérios convencionais, políticos, empíricos, ou outros quaisquer.

As empresas carecem de um instrumental efetivo, que avalie objetivamente o impacto técnico/econômico previsto para o sistema, em virtude destas remoções. As decisões quase sempre são efetivadas sem consenso entre as áreas envolvidas, o que ilustra a conveniência de se especificar uma metodologia (e instrumental computacional) que dê respostas claras a questões fundamentais relativas às implicações no sistema em ambientes de restrições orçamentárias.

A adoção de metodologia e de aplicativos adequados proporcionaria a análise criteriosa de obras potencialmente indicadas para o corte, bem como o fator

gerador de cada obra/ação, além dos critérios para seleção/priorização das mesmas, no caso de existirem alternativas distintas para se atingir um mesmo objetivo. É o caso da construção de um novo circuito ou a reforma de um circuito existente.

2.2 NATUREZA DAS OBRAS PROPOSTAS

Na elaboração do plano de obras do segmento de distribuição em alta tensão podem ser propostas desde os tradicionais reforços de rede (obras de expansão), ações relativas à operação e/ou manutenção do sistema, ou obras com outra finalidade específica.

Em linhas gerais podem ser definidos os seguintes tipos de obras: obras necessárias; obras de melhoria; obras para ampliar a confiabilidade; obras relativas aos compromissos assumidos. Segue, portanto, uma breve explanação de cada um destes tipos de obras.

2.2.1 Obras Necessárias (ON)

As obras necessárias são aquelas propostas em decorrência da transgressão de algum critério técnico pré-estabelecido. Os critérios mais utilizados são:

- a) Carregamento de transformadores de subestações.
- b) Carregamento de circuitos de alta tensão.
- c) Queda de tensão máxima nos circuitos de alta tensão.
- d) Perda máxima de energia e demanda verificada nos circuitos de alta tensão (este critério, eventualmente, pode ser facultativo).

Dado a importância desta categoria de obras, certamente devem ter um peso bastante significativo em ambientes de restrições orçamentárias, constituindo as últimas a serem cortadas, uma vez que estão intrinsecamente associadas a garantia do atendimento seguro e adequado do sistema.

2.2.2 Obras Associadas a Compromissos Assumidos (OACA)

Estas obras relacionam-se a contratos específicos, celebrados junto aos clientes e implicando em novas ligações. Por exemplo, a construção de uma usina para fornecimento de energia a uma nova empresa instalada na área de concessão da distribuidora pode ser enquadrada numa obra deste tipo.

Embora não sejam obras estritamente essenciais (ou seja, a não priorização deste reforço não implica necessariamente na transgressão de critérios técnicos), certamente devem apresentar um peso bastante significativo num contexto de restrição orçamentária (obra que só deve ser cortada em situações muito específicas), uma vez que é motivada por cláusulas contratuais assumidas junto aos clientes.

2.2.3 Obras de Melhoria (OM)

Correspondem a obras não necessariamente essenciais (ou seja, propostas para sanar transgressões de critérios técnicos), mas que, ou auferem um benefício econômico interessante, ou propiciam um desempenho operacional mais adequado.

Enquadram-se nesta categoria de obras:

- a) Reforma de rede (substituição de equipamentos e/ou componentes do sistema que já estejam com suas respectivas vidas úteis vencidas ou que apresentem algum defeito que prejudique o desempenho

operacional).

- b) Deslocamento de linhas de alta tensão.
- c) Instalação de chaves de manobras.
- d) Instalação de bancos de capacitores.
- e) Instalação de disjuntores.

2.2.4 Obras Relacionadas à Confiabilidade (ORC)

Correspondem às obras que permitem solucionar eventuais transgressões de critérios de confiabilidade, ou que ampliem a flexibilidade operativa do sistema (melhorando, portanto, os indicadores correspondentes).

Enquadram-se nesta categoria de obras:

- a) Duplicação de circuitos.
- b) Instalação de religadores.
- c) Instalação de pára-raios.

De acordo com Silveira, Kagan e Antunes (2004a), uma ação inserida neste contexto é a adoção dos critérios clássicos de contingência como, por exemplo, o critério (N-1), em que o sistema deve suportar a ausência de um de seus elementos, como por exemplo: trecho de circuito, transformadores de subestação, entre outros.

Especificamente no segmento de alta tensão, onde é salutar o desempenho do sistema com alta confiabilidade além dos atuais dispositivos legais que disciplinam a atuação das concessionárias no que concerne à continuidade operativa, decorre também que, a importância destas obras tende a ser significativa e a eventual eliminação deve ser efetuada de modo bastante criterioso. Sobre esse aspecto, é interessante observar a Resolução nº 024, a qual prevê a aplicação de

multas e ressarcimentos aos clientes, em caso de transgressões de critérios pré-definidos.

2.3 CRITÉRIOS PARA PRIORIZAÇÃO DAS OBRAS

Conforme abordado nas seções anteriores, para cada caso específico há um conjunto de obras potenciais que podem ser escolhidas. Desta forma, há que se considerar alguns critérios básicos que orientam o processo de especificação do plano de obras de uma concessionária de energia elétrica.

Há um aspecto fundamental relacionado à disponibilidade orçamentária que, não raro, é restritiva. Logo, um primeiro critério utilizado por uma empresa de energia elétrica, relaciona-se ao custo da obra, tendendo-se a priorizar aquela de menor custo. Todavia, este critério normalmente se configura eficaz no caso das obras de menor porte (instalação de bancos de capacitores, substituição de isoladores, deslocamento de linhas, entre outras).

No caso das obras consideradas como necessárias à concessionária, geralmente, utiliza-se um critério mais apurado em que, efetivamente, procede-se uma análise técnico-econômica das obras. Sob esta ótica, está implícita a possibilidade de se escolher uma obra mais cara, porém mais rentável ou que apresente um tempo de retorno menor. Parte-se da premissa de que as potenciais obras candidatas, enquadram-se no conceito de investimentos prudentes, ou seja, os custos correspondentes são alocados de modo justo ao consumidor final. - As concessionárias de energia utilizam alguns índices de mérito no processo de priorização de obras, como por exemplo: Taxa de Rentabilidade Inicial do Investimento (TRII) que será abordado na seção 5.4.

Conforme Arango e outros autores (2004), a taxa de rentabilidade de um investimento, mensura um valor percentual relativo ao retorno financeiro de uma obra. Em geral, ela é qualificada como atrativa, desde que sua taxa interna de retorno supere um valor pré-definido onde constitui uma relação de benefício/custo,

indicando um incremento de benefício econômico anual propiciado pela melhoria dos indicadores de desempenho.

Os parâmetros utilizados na determinação de valor das obras e que compõem os índices de méritos mencionados são, entre outros:

- a) Perdas técnicas.
- b) Energia não distribuída.
- c) Ampliação de mercado.
- d) Melhoria do perfil de tensão.

A priorização das obras normalmente compatibiliza a disponibilidade orçamentária anual (eventualmente restritiva) com os índices de mérito anteriormente referidos, os quais podem indicar obras de maior vulto, desde que o benefício auferido seja mais atraente.

2.4 CRITÉRIOS PARA CORTES DE OBRAS

2.4.1 A Área de Planejamento de Investimentos da Celpe: Estrutura Organizacional

A elaboração do plano de obras do sistema de distribuição para a empresa do estudo de caso dessa dissertação, que é a Companhia Energética de Pernambuco (Celpe), é efetuada pelo Departamento de Planejamento de Investimentos (EPI). Este departamento conta com a estrutura organizacional (que será ilustrado na Figura 1)-, cujo funcionamento será fundamental para o processo de priorização dos investimentos, etc.

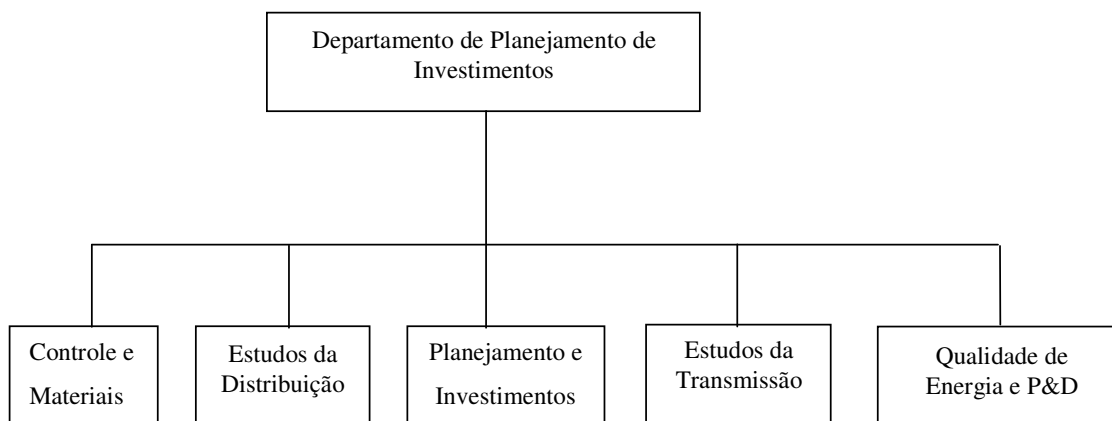


Figura 1 - Estrutura organizacional do Departamento de Planejamento da Expansão (EPI)

No contexto ora em análise, as áreas mais efetivamente envolvidas com o processo de estabelecimento de planos de obras são as de estudo de distribuição (EIPD), estudo da transmissão (EIPT) e de planejamento e investimentos (EIPI).

- a) Área de Estudos da Distribuição (EIPD):** responsável por avaliações do sistema de distribuição da Empresa, desde o nível de tensão em 13.8 kV até a baixa tensão em 380/220 V. Basicamente, os estudos desenvolvidos nesta área abrangem os alimentadores de média tensão, os reforços, ações de operação e manutenção, bem como os circuitos de baixa tensão. Ressalta-se que as subestações de AT/MT não estão contempladas nas atribuições desta área de desenvolvimento.
- b) Área de Estudos da Transmissão (EIPT):** corresponde às avaliações do sistema de distribuição em alta tensão, desde as subestações AT/MT até os circuitos de alta tensão (69.0 kV na área de sua concessão). Esta área efetua estudos relativos à rede de subtransmissão.
- c) Área de Planejamento e Investimentos (EIPI):** responsável pela elaboração do plano de obras no sistema de distribuição global da Empresa. Esta área utiliza os dados e informações efetuadas pelas

áreas de estudos da transmissão e da distribuição na definição do plano de obras, e eventualmente efetua os cortes de obras a partir de tetos orçamentários pré-estabelecidos, ou decisões da área financeira. Ou seja, em ambientes de restrições orçamentárias, esta área é incumbida de avaliar as melhores alternativas para o estabelecimento de um plano de obras/ações final.

d) Área de Controle de Materiais (EICD): responsável pela supervisão e controle do fluxo de materiais e componentes, eventualmente comprados, a serem utilizados pela Empresa nas demais áreas.

e) Área de Qualidade de Energia e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento: desenvolve estudos nas áreas correlatas.

2.4.2 Efetivação de Cortes

O plano de obras inicial, normalmente contempla um determinado período de planejamento (em geral 5 ou 10 anos) e é elaborado com o intuito de solucionar as transgressões de critérios verificadas, a melhoria do sistema e compromissos assumidos, entre outros. Ou seja, constitui-se num plano ideal.

Subseqüentemente, podem ocorrer cortes no plano original motivado por restrições orçamentárias. Todavia, estes procedimentos não são efetuados numa etapa única, podendo ocorrer diversos cortes até se determinar um plano final.

Os primeiros cortes são efetuados pelas áreas de estudos da transmissão (EIPT) e da distribuição (EIPD), partindo-se de tetos orçamentários anuais em suas respectivas áreas. O plano resultante, eventualmente, inclui um volume de obras bem menor que o original, motivado pelas restrições.

A partir daí novos cortes de obras podem ser sugeridos, por 3 (três) instâncias superiores da Empresa, a saber: a Diretoria de Ativos; a *Holding* Neoenergia, ou a própria presidência da Empresa, que, nestas ocasiões, normalmente estabelece um determinado montante que deve ser economizado, ou

seja, implicando em descartes de reforços/ações, presentes no plano de obras. Nesta etapa, a área de planejamento de investimentos (EIPi) se encarrega de efetivar o cancelamento de algumas obras.

Em geral, a sistemática de corte das obras segue uma hierarquia de prioridades relativas a natureza da obra. Esta hierarquia está organizada em ordem decrescente de prioridade:

- a) Obras necessárias.
- b) Obras relativas a compromissos assumidos.
- c) Obras de melhoria.
- d) Obras de confiabilidade.

CAPÍTULO 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Pode-se mencionar que o final da década de 1950, foi a época do pioneirismo, quando se iniciaram os estudos para resolver o problema de planejamento da expansão de redes de energia elétrica, introduzindo-se técnicas de programação matemática para minimizar os custos de operação e investimentos. O objetivo era procurar minimizar o custo de investimento no setor elétrico, conforme afirmam Massé e Gibrat (1957).

Na verdade, só houve um desencadeamento das publicações relativas ao planejamento e investimento, a partir do início da década de 70, cujo objetivo era focado na solução do problema de planejamento da transmissão em geral, e a obtenção do plano de expansão satisfatório.

Iniciou-se a utilização - para resolver o problema de planejamento a um estágio - da Programação Linear, com objetivo de se atingir o plano ótimo para o ano em questão, (GARVER, 1970) onde procurou-se, minimizar apenas o custo de investimento na expansão da transmissão do sistema.

Dusonchet e El-Abiad (1972) propõem um método baseado em programação dinâmica, mas com algoritmo de busca probabilístico para otimizar o processo de definição do plano de expansão. Foi importante por seu pioneirismo em procurar considerar a experiência do planejador, como forma de diminuir o número de alternativas a serem consideradas.

De acordo com a característica natural do problema da expansão, que consiste em construir ou não construir, foi estudado em Lee, Hocks e Hnyilicza

(1974) um método para definição do plano de expansão de mínimo custo, direcionado em programação do tipo *Branch & Bound*, que considerava a variável construir linha = **1** e não construir = **0**. Vale salientar, que na programação dinâmica, a utilização fica inviabilizada para sistemas reais maiores, pois a quantidade de alternativas a serem analisadas é igual a 2^N , onde **N** é o número de reforços candidatos a serem propostos.

Manzoni, Paris e Valtorta (1979), resolveram formar um elenco de programas computacionais aplicados ao planejamento da transmissão, facilitando o uso do planejador. Desejava-se integrar todas as ferramentas necessárias ao planejador em um único ambiente computacional.

No mesmo campo, com pretensão de se obter melhor desempenho no planejamento, surge uma metodologia para quantificação da capacidade de atendimento da carga de sistemas de geração-transmissão, (PEREIRA; PINTO, 1985), onde se baseia em programação linear, para considerar o índice de capacidade de atendimento de carga no processo de síntese de redes de transmissão. Também sugere uma outra metodologia para considerar um índice de mínimo corte de carga. O “*ranking*” de alternativas é formado através da análise de sensibilidades sobre o fluxo de potência.

Monticelli e outros autores (1982) analisam o critério de mínimo esforço, o qual define a distribuição de fluxo em um sistema. É formado um *ranking* de alternativas, considerando-se uma relação de custo/benefício, onde maior benefício se refere ao maior alívio de sobrecarga que estas alternativas teriam sobre o sistema.

Surge um modelo para resolver o problema de definição do plano de investimento com mínimo custo, baseado também em programação linear, que segundo Villasana, Garver e Salon (1985, p.350), “o maior ganho reside na proposta de definição dos reforços, que é feita através da estimação dos fluxos em uma rede “artificial”, utilizando-se um modelo de fluxos em redes.”

A análise de Santos Júnior e outros autores (1989), relaciona o problema de síntese de redes de transmissão, visando buscar a minimização dos custos de expansão. São apresentados vários modelos não-lineares inteiros mistos, cuja solução acarretaria um alto custo computacional, até chegar a um modelo linear por partes, o qual é resolvido por um algoritmo baseado em fluxos em redes.

A partir da década de 80, no Brasil, em especial, os investimentos no setor elétrico começaram a ficar escasso. Houve então, a necessidade de se realizar ajustes e remanejamentos dos planos de expansão. Nessa área, Morozowski Filho e outros autores (1990), desenvolveram um modelo computacional para realizar este remanejamento no plano de expansão, propondo a postergação por um estágio de obras que apresentam o menor índice custo/benefício, onde o custo é relacionado por este adiamento, e benefício é consequência da economia alcançada com este adiamento.

O planejamento multi-estágios é objeto de estudo em Binato e Oliveira (1994), o qual utilizando programação linear e análise de sensibilidades, tentando-se determinar os reforços que apresentem os menores impactos sobre o sistema, para cada estágio até o ano desejado.

Em Oliveira, Costa e Binato (1995) é estudado o problema de planejamento em um estágio através da programação inteira, relacionando-se heurísticas matemáticas, de maneira a reduzir o esforço computacional, permitindo a utilização desta metodologia para sistemas elétricos de grande porte, de modo a evitar a explosão combinatorial.

Em seguida, Oliveira (1996) estudou o surgimento de ambientes computacionais de planejamento que integrem várias ferramentas utilizadas pelo planejador, com uma boa interface gráfica, passando a ser um objetivo perseguido por vários pesquisadores.

Um fator que deve ser considerado no planejamento da expansão é a incerteza inerente a determinados fatores relativos ao sistema, como o crescimento da demanda (CIGRE, 1995). Devido a isto, o planejamento determinístico é

abandonado, trabalhando-se então com um modelo probabilístico (análise de cenários).

O método de otimização, também, têm sido utilizados para solução deste problema visto em Rudinick e outros autores (1996). Isto resultou na definição de um plano de expansão da transmissão economicamente adaptado a um setor elétrico desregulamentado.

Depois que Vega e Sarmiento (1996), realizaram estudos através de imagens obtidas de satélites, consegue-se descartar antecipadamente determinados locais inviáveis para a construção de linhas de transmissão - importante fator, quando se considera a questão de restrições relacionadas ao meio ambiente. O que se verifica, ao longo do tempo, é a busca de um programa computacional que consiga unir a experiência do especialista, com as simulações. Com isso, pode-se definir com eficiência e rapidez, as alternativas viáveis de expansão, bem como reduzir o esforço de busca da solução de mínimo custo, a qual pode ser obtida por um programa com seus procedimentos. Propõe-se um sistema especialista cooperativo, onde exista o melhor aproveitamento do agente especialista através das intervenções no processo de planejamento, e indiretamente através de suas heurísticas adicionadas no sistema.

A definição a respeito do planejamento é estratégico de acordo com Vega e Sarmiento (1996) é um ato de sabedoria, como a capacidade de prever conseqüências, de ações atuais, deixando de investir em curto prazo em benefícios a longo prazo.

Planejamento, mais do que um exercício de futurologia é, sobretudo, uma forma de quantificar objetivos para perseguir metas. Desta forma, o planejamento deve ser um processo contínuo de tomada de decisões, onde os planos periodicamente são revistos e conforme as circunstâncias vão evoluindo, não obrigatoriamente, de acordo com o calendário pré-estabelecido.

Nos sistemas elétricos, os valores envolvidos são da ordem de milhões de dólares, podendo-se conseguir economias ou prejuízos vultuosos no projeto, dependendo exclusivamente de como foi realizado o planejamento.

Consolidado por Morozowski Filho (1995), o horizonte de planejamento é função direta do grau de confiança das avaliações necessárias para a execução de um estudo de planejamento. Define-se os seguintes horizontes de planejamento de acordo com (BRASIL, 1987), o qual propõe:

- a) Estabelecimento de cenários: 30 anos.
- b) Planejamento em longo prazo: 20 anos.
- c) Planejamento em médio prazo: 10 anos.
- d) Planejamento em curto prazo: 5 anos.

Os estudos para determinar a situação de cenários focalizam a definição das principais diretrizes de desenvolvimento do sistema; avaliar a necessidade ou conveniência de novas tecnologias para a transmissão de grandes blocos de energia a longa distância; e também subsidiar a identificação dos potenciais e aproveitamentos energéticos mais convenientes para a expansão do sistema como um todo.

No período de 1995 a 1999, as atividades do GCPS - Grupo Coordenador do Planejamento dos Sistemas Elétricos, foram condicionadas em ampla medida pelas transformações institucionais ocorridas no setor de energia elétrica. As mudanças do quadro regulador setorial nesse período foram notáveis, caracterizando a transição de um modelo centralizado e coordenado pelo Estado para um modelo mais aberto e competitivo. O processo de reformas obrigou o GCPS a mudar o enfoque dos estudos de planejamento de curto prazo, tendo em conta o papel predominante reservado ao capital privado na futura expansão do setor. Em consonância com essa perspectiva, os planos decenais assumiram, a partir de 1995, um caráter indicativo e não determinativo, como anteriormente. Segundo o conceito de planejamento indicativo, os planos decenais deveriam basicamente orientar a expansão do setor, levando em conta a possibilidade de novos agentes proporem investimentos alternativos à seqüência indicada de obras. De todo modo, na verdade, a expansão do sistema elétrico brasileiro entre 1995 e 1999 ainda dependeu basicamente dos investimentos estatais, embora

vários projetos importantes tenham sido retomados ou concluídos em parceria com a iniciativa privada. (BRASIL, 2002).

A política nacional de energia elétrica começa com o planejamento, como observa-se em Brasil (2002), sendo assim, imperioso o funcionamento regular do Conselho Nacional de Política Energética, como órgão formulador da política nacional de energia elétrica, que deve ser submetida ao exame do Congresso Nacional. Por sua vez, necessita-se que seja definida por lei, a responsabilidade pelo planejamento da expansão da oferta de energia elétrica, bem como os mecanismos que o viabilizem na área do ministério de Minas e Energia, com o envolvimento direto da Eletrobrás, detentora de pessoal capacitado e meio materiais para esse fim. Além do planejamento, a Eletrobrás poderá cumprir importantes funções de auxílio ao ministério na coordenação do setor.

A palavra-chave para reconstrução é planejamento. A própria crise que se desenrola indica a falácia do mercado como capaz de restaurar o equilíbrio da economia, para não falar do equilíbrio social com pleno emprego.

No setor energético, é fundamental reconstituir a inteligência especializada na área, reativar as consultorias que fizeram no Brasil o maior parque hidrelétrico do mundo. Não é difícil, basta vencer o medo da mudança e confiar na capacidade de somar os potenciais de todos envolvidos (LESSA, 2001).

Neste contexto, esta dissertação propõe uma alternativa para tomada de decisão de investimentos prioritários em se tratando de ambientes de restrições orçamentárias com uma metodologia voltada em critérios pré-definidos para escolha das principais obras que podem influir de modo significativo no desempenho do sistema elétrico visto que existe uma série de obrigações regulatórias e contratuais assumidas que devem ser respeitadas, onde a análise técnico-econômica deve contemplar tanto aspectos de operação segura, atendendo critérios técnicos, como fornecimento com adequado nível de tensão, confiabilidade e sinal sem distorções.

CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE CORTE DE OBRAS NO SISTEMA ELÉTRICO

4.1 INTRODUÇÃO

Objetivando a necessidade de efetuar corte de obras no segmento de distribuição de alta tensão em virtude de eventuais restrições orçamentárias, há um processo prévio de avaliação que leva em conta os impactos técnicos (melhoria operativa) e econômicos (benefícios ou economicidade auferida) que o plano inicial em apreço impõe ao sistema. Para isso, que a dissertação objetiva o desenvolvimento e aplicação em estudo de caso, desta metodologia.

Desta forma, os seguintes modelos devem também ser contemplados pela metodologia de avaliação de cortes de obras no sistema de distribuição de alta tensão:

- a) Modelo de avaliação de desempenho operacional: este modelo permite que se avalie a melhoria operativa que o plano de obras pode proporcionar identificando-se a situação inicial do sistema (com a identificação das partes carentes de reforços) e a nova condição propiciada pela inserção das obras. No contexto em análise, esta avaliação pode ser obtida a partir da utilização de modelos adequados de fluxo de potência e de confiabilidade de sistemas de alta tensão que permitem determinar, para as configurações de rede atual (original) e posterior ao plano, o correspondente desempenho operativo em termos dos principais parâmetros como carregamento de trechos e

equipamentos, nível de tensão nas barras, índices de conformidade, entre outros.

- b) Critérios para avaliação do valor econômico: dado o sistema de AT, nas condições atual e posterior à proposição ao plano de expansão, o modelo deve viabilizar o correspondente valor das obras, determinando-se um benefício econômico vinculado ao benefício técnico auferido pelo plano em análise. A mensuração econômica desta melhoria constitui parte fundamental na determinação de um índice de mérito adequado que oriente o corte de obras.
- c) Índice de mérito para avaliação das obras: com base no benefício econômico do conjunto de obras constituinte do plano de expansão considerado e no custo correspondente, pode-se especificar um índice de mérito que se preste à priorização das obras, elencando-as em ordem decrescente de prioridade, além de viabilizar uma avaliação correspondente do plano de obras global considerado, bem como os planos ajustados devido aos cortes eventuais.
- d) Priorização/Corte de obras: o índice de mérito determinado permite elencar as obras em ordem decrescente de prioridade. O passo seguinte, dado uma condição orçamentária específica, é efetuar os cortes correspondentes. O índice de mérito utilizado, os modelos de avaliação de desempenho operacional e de valoração econômica contemplados permitem aferir o impacto técnico-econômico que este descarte de obras impõe ao sistema.

Nas próximas seções, será detalhado cada um destes modelos que integram a metodologia concebida neste trabalho para subsidiar o procedimento de corte de obras no segmento de distribuição de alta tensão, motivado por restrições orçamentárias.

4.2 CONFIABILIDADE DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO

4.2.1 Considerações Gerais

Nesta seção, é apresentada a metodologia para determinação de índices de confiabilidade das barras dos sistemas de alta tensão, fundamentada na determinação dos cortes mínimos de uma rede genérica (termo usado para indicar que o corte no plano de investimento não comprometerá o desempenho do sistema elétrico por um determinado tempo), os quais se resumem em analisar a possível falha de componentes desta rede e determinar quais as falhas ou combinações de falhas que podem vir a causar a interrupção dos caminhos entre fonte(s) – carga(s). Nesta análise de confiabilidade, geralmente é suficiente considerar as situações de falta simples ou de 1ª ordem (aquela falta ocorrida em equipamentos que interrompem um só caminho entre fonte e carga, relacionado a um determinado nó do circuito) ou falta dupla ou de 2ª ordem (aquela falta ocorrida em equipamentos que interrompem dois caminhos relacionados a um determinado nó do circuito), porém este algoritmo considera até a possibilidade de análise de interrupções de 3ª ordem.

Este modelo foi selecionado pelos seguintes motivos:

- 1) Possui como dados básicos para estudo de confiabilidade a topologia do sistema, que pode incluir linhas e equipamentos, permitindo arranjos radiais ou em malha, avaliando os cortes mínimos e índices em qualquer ponto do sistema em análise.
- 2) Permite a consideração de (múltiplos) componentes uni e bidirecionais, entre dois nós quaisquer e múltiplos nós de suprimento, o que é fundamental para a representação correta de diferentes arranjos de sistemas AT.
- 3) Para o algoritmo implementado são basicamente fornecidos os

seguintes dados: topologia do sistema, incluindo os dados de nós e dados de ligações, e os dados de confiabilidade de cada componente (taxas de falha e tempos de restabelecimento, separando-se as interrupções programadas e acidentais). A metodologia básica parte da topologia existente e determina, para cada nó especificado, os caminhos mínimos provenientes das fontes e os correspondentes cortes mínimos (componente ou conjunto de componentes que, quando falham, interrompem o fornecimento de energia no nó especificado).

Na Figura 2, apresenta-se um exemplo de sistema compreendendo duas subestações e uma linha de subtransmissão (circuito duplo). A título de ilustração, os componentes de cortes mínimos de primeira e segunda ordem para o nó B5 serão:

1ª ordem: T1, D9 e B5;

2ª ordem: LT1 e LT2, B1 e B2, D5 e D6, LT1 e D5, LT2 e D6.

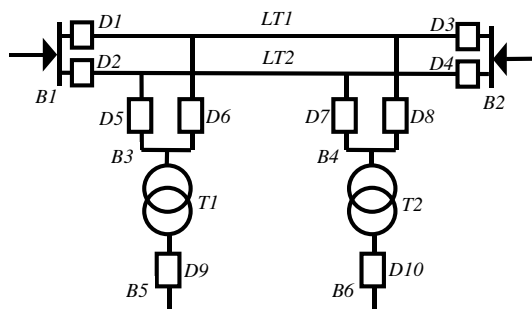


Figura 2 – Sistema AT

A partir dos cortes mínimos e dados de confiabilidade de cada componente, torna-se bastante simples o cálculo da taxa anual de falha e tempo médio por falha, bem como o tempo anual de interrupção de cada nó.

Para a rede genérica da Figura 3, é possível obter o conjunto dos cortes mínimos na forma binária, o que consiste em preencher a Tabela 1 para cortes mínimos referentes ao **nó 5**.

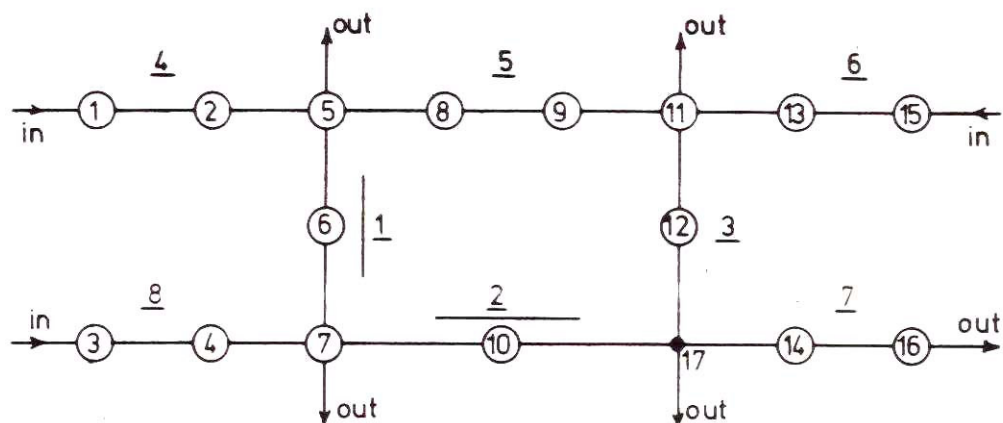


Figura 3 – Rede genérica

Tabela 1 – Mínimos caminhos para o nó 5

Caminho	Componente																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Caminho1	1	1			1												
Caminho2					1		1	1		1			1		1		
Caminho3			1	1	1	1	1	1	1	1	1						

Nota: Tabela formulada a partir de resultados obtidos em estudos do P&D com a USP - ENERQ sobre Modelo para avaliação do impacto sobre os indicadores de continuidade de serviço e o impacto de possíveis efeitos de cortes em obras na expansão do sistema de alta tensão da Celpe.

De acordo com Guaraldo e outros autores (2005), na teoria envolvida, a máxima ordem dos cortes mínimos é igual ao número de caminhos mínimos. Para se deduzir os cortes mínimos de primeira ordem, o algoritmo procura colunas nas quais todo elemento é unitário, ou seja, o componente tem que existir em todos os caminhos mínimos do sistema. Observando-se a Tabela1, verifica-se a existência de um único corte mínimo de primeira ordem, constituído pelo componente número 5 da rede. Em seguida, os valores unitários dos componentes que constituam caminhos mínimos de primeira ordem são substituídos por zeros, o que é necessário para a obtenção dos cortes mínimos de ordens superiores.

Os cortes mínimos de segunda ordem são deduzidos através da combinação de dois componentes (união de dois componentes ou colunas da matriz de caminhos, na forma binária). Os cortes mínimos de segunda ordem são aqueles em que o conjunto união de duas colunas resulta em vetor onde todos elementos sejam unitários. Para a rede exemplo, observando-se a Tabela 1, resultam as combinações: 1-8, 1-9, 1-11, 2-8, 2-9, 2-11.

Os cortes mínimos de terceira ordem são obtidos utilizando-se o mesmo raciocínio, ou seja, deve-se fazer a combinação de três componentes por vez, de forma a resultar um vetor, onde todos os elementos sejam iguais à unidade.

Uma vez deduzidos os mínimos conjuntos de corte para um nó de saída fixo, os índices de confiabilidade podem ser calculados. Na formulação utilizada neste trabalho, todos os Mínimos Conjuntos de Cortes de segunda ou terceira ordem são reduzidos para um corte equivalente de primeira ordem. Estes cortes equivalentes são combinados com os cortes reais de primeira ordem, obtendo-se os índices de confiabilidade para o nó de saída especificado.

As equações básicas necessárias para avaliar a taxa de falha equivalente e a duração da falha equivalente para a redução dos cortes de segunda e terceira ordens para um corte equivalente de primeira ordem, são apresentadas a seguir.

A seguinte notação será utilizada:

λ_i	:	taxa de falha do componente i, em falhas por ano.
r_i	:	tempo médio de reparo do componente i, em horas.
γ_i	:	$(\lambda_i r_i)$ - média anual de tempo fora de operação do componente i.
λ_i^m	:	taxa de falha devido à manutenção programada do componente i.
r_i^m	:	tempo médio de reparo para manutenção programada do componente i.
γ_i^m	:	$(\lambda_i^m r_i^m)$ - média anual de tempo fora de operação do componente i devido a manutenção programada.

4.2.2 Cortes mínimos de segunda ordem

Considerando-se, genericamente, dois componentes, 1 e 2, obtém-se:

(i) Redução do conjunto de corte de 2ª ordem para 1ª ordem, devido a defeitos:

$$\lambda_e = \lambda_2 \gamma_1 + \lambda_1 \gamma_2 \quad (4.1)$$

$$r_e = r_1 r_2 / (r_1 + r_2) \quad (4.2)$$

ano.

λ_e : taxa de falha equivalente do componente i, em falhas por ano.

r_e : tempo equivalente de reparo do componente i, em horas.

v_{ij} : percentual do tempo médio de reparo da manutenção programada dos componentes de 1ª e 2ª ordem em relação ao tempo total de manutenção.

(ii) Redução de 2ª ordem para 1ª ordem devido a manutenções:

$$\lambda_e'' = \lambda_2 \gamma_1'' + \lambda_1 \gamma_2'' \quad (4.3)$$

$$r_e = (\gamma_1'' \gamma_2 v_{12} + \gamma_2'' \gamma_1 v_{21}) / \lambda_e'' \quad (4.4)$$

$$v_{ij} = r_i'' / (r_i'' + r_j) \quad (4.5)$$

4.2.3 Cortes Mínimos de Terceira Ordem

Considerando-se, genericamente, três componentes, 1, 2 e 3, obtém-se:

(i) Redução do conjunto de corte de 3ª ordem para 1ª ordem devido a defeito

$$\lambda_e = \gamma_1 \gamma_2 \lambda_3 + \gamma_2 \gamma_3 \lambda_1 + \gamma_3 \gamma_2 \lambda_1 \quad (4.6)$$

$$r_e = r_1 r_2 r_3 / (r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_3 r_1) \quad (4.7)$$

(ii) Redução de 3ª ordem para 1ª ordem devido a manutenções:

$$\lambda_e'' = A_{123} + A_{231} + A_{312} \quad (4.8)$$

$$r_e = (A_{123} \omega_{123} + A_{231} \omega_{231} + A_{312} \omega_{312}) / \lambda_e'' \quad (4.9)$$

Sendo:

$$A_{ijk} \cong \gamma_i'' (\gamma_j \lambda_k v_{ij} + \gamma_k \lambda_j v_{ik}) \quad (4.10)$$

$$\omega_{ijk} \cong r_i'' r_j r_k / (r_i'' r_j + r_j r_k + r_k r_i'') \quad (4.11)$$

4.2.4 Outras Considerações

Se existirem m mínimos conjuntos de corte de primeira ordem incluindo os equivalentes, os índices de confiabilidade do nó de saída considerado, resultam da soma dos índices do nó i (nó considerado) desde 1 até m , e podem ser escritos como se segue:

(i) Devido a defeitos

$$\lambda_0 = \sum_i \lambda_i, \text{ e } r_0 = \sum_i \lambda_i r_i / \lambda_0 \quad (4.12)$$

(ii) Devido a manutenções

$$\lambda''_0 = \sum_i \lambda''_i, \text{ e } r''_0 = \sum_i \lambda''_i r''_i / \lambda''_0 \quad (4.13)$$

Finalmente, todos os índices do nó de saída podem ser avaliados, como segue:

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda''_0 = \text{ taxa média de defeitos} \quad (4.14)$$

$$U = \lambda_0 r_0 + \lambda''_0 r''_0 = \text{ tempo médio anual fora de funcionamento} \quad (4.15)$$

$$r = U / \lambda = \text{ duração média dos defeitos} \quad (4.16)$$

λ_0 : total das taxas de falhas de todos os componentes i , no ano.

r_0 : tempo médio de reparo em relação a todos componentes i , em h

λ''_0 : total das taxas de falhas das manutenções programadas de todos componentes i , no ano.

r''_0 : tempo médio de reparo para manutenções programadas em relação a todos componentes i , em horas.

4.2.5 Avaliação do Impacto Sobre os Indicadores de Continuidade

Utilizando-se a metodologia descrita nas seções precedentes é possível avaliar o impacto da proposição de obras no segmento AT em termos técnicos, bem como do eventual descarte destas ações, conforme procedimento proposto nesta dissertação.

Logo, dado um conjunto de obras proposto, a partir da configuração do sistema será possível mensurar o impacto sobre os indicadores de continuidade e correspondente benefício econômico obtido por meio deste conjunto de obras. A cada obra específica é possível associar um índice de mérito individual permitindo ordená-las convenientemente. Uma eventual situação de restrição orçamentária poderá ser simulada de modo bastante prático, sendo descartadas aquelas que apresentarem o índice de mérito menos atrativo. Tal índice poderá ser determinado por meio da avaliação, por exemplo, da Energia Não Distribuída (END), referentes àquele consumidor ligado à rede de alta tensão. Tais valores são quantificados monetariamente em relação ao custo da obra.

Exemplificando: seja um custo de energia associado a um determinado valor de END calculada a partir da realização de uma obra de expansão na rede AT. A determinação do índice de mérito para tal obra se fará diante de uma análise comparativa entre o custo total da obra versus o custo final resultante da diminuição da END. É a partir deste valor de índice de mérito que será possível tomar decisões, apoiadas em uma base metodológica concisa, a respeito da efetivação do corte de uma determinada obra ou conjunto de obra.

4.3 MODELO DE FLUXO DE POTÊNCIA – MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON

4.3.1 Considerações Gerais

Os estudos de fluxo de potência são efetuados para verificar o comportamento do sistema em regime permanente, avaliando o estado do sistema elétrico em um determinado instante do tempo, denominado ponto de operação. Os estudos de fluxo de potência visam determinar níveis de tensão nos barramentos do sistema e fluxos de potência nas linhas de transmissão e transformadores.

Por se tratar de uma solução em regime permanente a modelagem do sistema é estática em que o problema de fluxo de potência é modelado por um conjunto de equações e inequações algébricas. Essas equações e inequações são não lineares pelo fato da geração e cargas serem, em parte, modeladas como fontes de potência constantes ou por funções das tensões nodais. Esse tipo de representação é utilizado em situações, nas quais as variações com o tempo são suficientemente lentas para que se possa ignorar os efeitos. Os componentes de um sistema de energia elétrica podem ser classificados em dois grupos: os que estão ligados entre um nó qualquer e o nó-terra, como é o de geradores, cargas, reatores e capacitores e os que estão ligados entre dois nós quaisquer da rede, como é o caso de linhas de transmissão, transformadores e defasadores. Os geradores e cargas são considerados como a parte externa do sistema, e são modelados através de injeções de potência nos nós da rede. A parte interna do sistema é constituída pelos demais componentes, ou seja, linhas de transmissão, transformadores, reatores etc.

Conforme salienta Stott, Alsac e Monticelli (1987), as equações básicas do fluxo de potência são obtidas impondo-se a conservação das potências ativa e reativa em cada nó da rede, isto é, a potência injetada deve ser igual a soma das potências que fluem pelos componentes internos que têm este nó como um de seus terminais. Isto equivale a se impor a *Primeira Lei de Kirchhoff*. A *Segunda Lei de*

Kirchhoff é utilizada para expressar os fluxos de potências nos componentes internos como funções das tensões (estados) de seus nós terminais.

O estudo de fluxo de potência tem aplicação direta no planejamento da expansão, no planejamento da operação e no controle em tempo-real do sistema elétrico de potência. Nessas aplicações se faz necessária a obtenção de soluções de regime permanente da rede para se avaliar o desempenho da mesma com relação a níveis de tensões, fluxos nas linhas, etc, tanto para a configuração normal quanto para casos de contingências. O cálculo do fluxo da potência é também necessário como elemento auxiliar em estudos de curto-circuito, estabilidade, otimização, confiabilidade etc.

4.3.2 Formulação Básica do Problema

A formulação do problema de fluxo de potência envolve aspectos de modelagem da rede de transmissão ou distribuição, das cargas e geração e considera ações sobre certas características operativas do sistema. O resultado dessa combinação resulta em conjunto de equações e inequações algébricas não-lineares.

A rede elétrica é, para efeito de estudos de fluxo de potência, geralmente considerada como sendo constituída por elementos trifásicos equilibrados (linhas, transformadores etc). O mesmo acontece com as cargas e a geração. Conseqüentemente, a rede pode ser analisada usando-se uma representação monofásica com os parâmetros de seqüência positiva. Em algumas aplicações específicas é importante a utilização de uma modelagem trifásica da rede elétrica permitindo a representação de elementos desequilibrados. Um exemplo importante é o caso de redes de distribuição de energia elétrica.

Definidas as cargas e gerações em cada barra, \mathbf{Y} , o problema de fluxo de potencia estaria, em principio perfeitamente definido. Isto não acontece, pois as perdas não são conhecidas antes da solução do fluxo de potência. A soma da geração em todas as barras do sistema deve ser igual à carga total do sistema mais

as perdas. Como estas não são conhecidas, é necessário prever uma folga na geração de maneira a acomodar as perdas. Isto é obtido deixando não especificada a geração ativa e reativa em pelo menos uma das barras do sistema, chamada de barra de balanço (*swing*) ou folga (*slack*).

A solução clássica do problema acima consiste na introdução do conceito de barra flutuante, isto é, uma barra onde se deixa “em aberto” os valores da potência ativa e reativa injetadas na rede e especifica-se a tensão (em módulo e ângulo de fase). Nos casos práticos, o balanço de potencia reativa é realizado de forma distribuída pela introdução das chamadas barras de tensão controlada.

Em termos matemáticos, a solução apresentada equivale a retirar uma das equações do conjunto de equações:

$$P_i + jQ_i = \hat{V}_i \hat{I}_i^* = V_i \sum_{j=1}^n Y_{ij}^* \hat{V}_j^* \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.1)$$

Em que, $P_i = P_{iG} - P_{iD}$ corresponde a potência ativa líquida (geração menos carga) injetada na barra i , e $Q_i = Q_{iG} - Q_{iD}$ a potência reativa líquida injetada na barra i .

Nesse novo sistema de equações ($n - 1$) o balanço de potencia não precisa ser atendido. A diferença será suprida pelas potências ativas e reativas da barra flutuante. Para compensar a diminuição de uma equação, deve-se fixar o valor de uma das incógnitas. Por razões de ordem prática, a tensão (módulo e ângulo de fase) escolhida é da barra flutuante. Feito isso, as demais tensões nodais das barras podem ser calculadas.

Conhecendo-se todas as tensões (em módulo e ângulo de fase) das barras, podemos calcular as injeções de potência ativa e reativa na barra flutuante usando a equação (2.1) com i igual ao número da barra flutuante.

Como já dito anteriormente, a tensão (em módulo e ângulo de fase) da barra flutuante deve ser especificada, isto é, fornecida como um dado para o problema de fluxo de potência. Por essa razão e pelo fato das perdas totais serem

alocadas à mesma, a barra flutuante deve ser uma barra, na qual está conectada um gerador, capaz de fornecer potência à rede e regular a tensão da barra flutuante passando a exercer o papel de referência angular do sistema. É possível, porém, nem sempre necessário, utilizar-se mais de uma barra flutuante na formulação do problema de fluxo de potência.

Além da barra flutuante, é usual introduzir-se um outro tipo especial de barra no estudo de fluxo de potência na qual o módulo da tensão é especificado. Esse tipo ' de barra tem por finalidade representar a ação de equipamentos com capacidade de regulação de tensão (geradores, compensadores síncronos e estáticos, LTCs etc). Esse tipo de barra recebe a denominação de barra de tensão controlada. As barras de tensão controladas têm um papel importante na determinação do perfil de tensão do sistema e influenciam de forma significativa as características de convergência dos métodos de solução do fluxo de potência.

A cada barra i do sistema estão associadas quatro variáveis: P_i , Q_i , V_i e θ_i . P_i e Q_i são, respectivamente, as componentes ativa e reativa da potência líquida (geração menos carga) injetada na barra. V_i e θ_i são, respectivamente, o módulo e ângulo de fase da tensão na barra. As quatro variáveis associadas a cada barra da rede estão relacionadas com as demais variáveis do modelo, através da equação complexa (2.1), a qual define um conjunto de $2n$ (n é o número de barras do sistema) equações em variáveis reais. Como existem $4n$ variáveis reais, para o problema de fluxo de potência, são classificados de acordo com o Quadro 1

Tipo	Nome	Variáveis especificadas	Variáveis Calculadas	Características
Flutuante	$V\theta$	V_i e θ_i	P_i e Q_i	Usada para balanço de potência e referência angular
Tensão Controlada	PV	P_i e V_i	θ_i e Q_i	Barras de geração ou nas quais há dispositivo de controle de tensão
Carga	PQ	P_i e Q_i	V_i e θ_i	Demais barras

Quadro 1 – Classificação de fluxo de potência

As equações algébricas não-lineares do modelo de fluxo de potência podem ser resolvidas por um número muito grande de métodos, sendo que os mais eficientes são: o desacoplado rápido e o método de *Newton-Raphson* que, conforme Monticelli (1983) é através dele que se consegue obter o cálculo de fluxo de potência em redes em malha.

Na formulação básica do problema de fluxo de potência, a cada barra da rede são associadas 4 variáveis, que são:

E_k - Magnitude de tensão nodal (barra k)

δ_k - Ângulo de fase a tensão nodal

P_k - Geração líquida (geração menos carga) de potência ativa

Q_k - Geração líquida (geração menos carga) de potência reativa

Sendo que duas variáveis entram no problema como dados e duas como incógnitas. Dependendo de quais destas variáveis entram como dados e como incógnitas no problema, define-se 3 tipos de barra:

a) Swing (ou de referência), quando são conhecidos o módulo e fase da tensão na barra.

b) PV (tensão controlada ou de geração), quando são conhecidas as potências ativas e módulos da tensão na barra.

c) PQ (ou de carga), quando são conhecidas as potências ativas e as reativas na barra.

Sendo:

$\dot{e}_n = e_n \angle \delta_n$ - a tensão nodal, em pu, de uma barra "n" genérica

da rede;

$\bar{y}_{nk} = y_{nk} \angle \theta_{nk}$ - o elemento da linha "n" coluna "k" da matriz de

admitâncias nodais da rede;

$p_n + j q_n$ - a potência complexa, em **pu**, injetada na barra "**n**".

O equacionamento da rede será dado pela expressão a seguir, que relaciona a potência injetada na barra n com as tensões e elementos da matriz de admitâncias nodais:

$$p_n - j q_n = e_n^* \sum_{k=1, ntotal} \bar{y}_{nk} \dot{e}_k = \sum_{k=1, ntotal} e_n e_k y_{nk} \underline{\delta_k + \theta_{nk} - \delta_n}$$

ou ainda:

$$p_n = \sum_{k=1, ntotal} e_n e_k y_{nk} \cos(\delta_k + \theta_{nk} - \delta_n) \quad (4.17)$$

e

$$\begin{aligned} q_n &= - \sum_{k=1, ntotal} e_n e_k y_{nk} \operatorname{sen}(\delta_k + \theta_{nk} - \delta_n) \\ q_n &= \sum_{k=1, ntotal} e_n e_k y_{nk} \operatorname{sen}(-\delta_k - \theta_{nk} + \delta_n) \end{aligned} \quad (4.18)$$

Assim, para uma rede que disponha de:

- 1) 1 barra swing, dados **e** e **δ** , com incógnitas **p** e **q**;
- 2) **n_v** barras PV, de tensão controlada, dados **e** e **p**, com incógnitas **δ** e **q**;
- 3) **n_c** barras PQ, de carga, dados **p** e **q**; com incógnitas **e** e **δ** ;

A partir dos dados acima, ter-se-á **n_v + n_c** incógnitas, referentes ao ângulo **δ** e **n_c** equações referentes ao módulo da tensão, **e**. Assim, assumindo-se que as barras de tensão controlada variam desde **n₁** até **n_v** e que as de carga variam desde **m₁** até **m_c** resultará, para a potência ativa, o sistema de equações:

$$\begin{aligned} p_{n1} &= \sum_{k=1, N} e_{n1} e_k y_{1k} \cos(\delta_k + \theta_{1k} - \delta_{n1}) \\ p_{n2} &= \sum_{k=1, N} e_{n2} e_k y_{1k} \cos(\delta_k + \theta_{1k} - \delta_{n2}) \\ &\dots\dots\dots \\ p_{nv} &= \sum_{k=1, N} e_{nv} e_k y_{1k} \cos(\delta_k + \theta_{1k} - \delta_{nv}) \\ p_{m1} &= \sum_{k=1, N} e_{m1} e_k y_{1k} \cos(\delta_k + \theta_{1k} - \delta_{m1}) \\ &\dots\dots\dots \\ p_{mc} &= \sum_{k=1, N} e_{mc} e_k y_{1k} \cos(\delta_k + \theta_{1k} - \delta_{mc}) \end{aligned} \quad (4.19)$$

E, para a potência reativa, será:

$$q_{m1} = - \sum_{k=1, N} e_{m1} e_k y_{1k} \sin(\delta_k + \theta_{1k} - \delta_{m1})$$

$$q_{mc} = - \sum_{k=1, N} e_{mc} e_k y_{1k} \sin(\delta_k + \theta_{1k} - \delta_{mc})$$
(4.20)

Nessas condições, as variações das potências injetadas na rede em função das variações das tensões, em módulo e fase, são representadas pelo sistema de equações:

$$\begin{bmatrix} \Delta p \\ \Delta q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta e \end{bmatrix}$$
(4.21)

Onde os termos da matriz jacobiana, relacionam as variações de potência com as variações de ângulo e módulo da tensão, conforme apresentado na equação 4.22.

$$J_1 = \frac{\partial p}{\partial \delta} \quad J_2 = \frac{\partial p}{\partial e} \quad J_3 = \frac{\partial q}{\partial \delta} \quad J_4 = \frac{\partial q}{\partial e}$$
(4.22)

O método de *Newton-Raphson* consiste num processo iterativo, que pode ser resolvido por meio dos seguintes passos:

- a) **Passo 1** – são atribuídos valores de tensão (módulo e fase) para as barras onde não são conhecidos tais valores, ou seja, para as barras de carga e para a fase das barras de tensão controlada (em geral assumem-se valores de 1 pu para os módulos e 0 graus para as fases das tensões).
- b) **Passo 2** – são calculadas as potências injetadas nas barras de carga (P e Q) e nas barras de tensão controlada (P) com os valores de tensões da iteração. Se as potências calculadas são aproximadamente iguais as potências especificadas nestas barras, dentro de uma certa tolerância, o processo convergiu e o processamento passa para o passo 5.
- c) **Passo 3** – Calcula-se a matriz Jacobiana, para aquela condição de valores de tensão.

- d) **Passo 4** – Triangulariza-se a matriz Jacobiana, tendo-se em vista a resolução do sistema de equações 4.21. Como resultado são obtidas as variações de ângulo $\Delta\delta$ para as barras PQ e PV e de módulo Δe para as barras PQ. Assim, são obtidos os novos valores de tensão (módulo e fase) nas barras PQ e PV:

$$\begin{aligned}\delta^{k+1} &= \delta^k + \Delta\delta \\ e^{k+1} &= e^k + \Delta e\end{aligned}$$

E retorna-se para o passo 2.

- e) **Passo 5** – Após a convergência do processo iterativo, tendo-se as tensões em todas as barras, podem ser calculadas as potências injetadas na barra swing (potências ativa e reativa) e nas barras de tensão controlada (potência reativa), bem como os fluxos de potência e as perdas em todas as ligações da rede.

4.3.3 Aplicação aos Sistemas de Alta Tensão

A aplicação do método de *Newton-Raphson* a redes de subtransmissão (AT) é direta. O método pode ser utilizado tanto em redes em malhas quanto em redes radiais, como são os casos dos sistemas de subtransmissão, nas quais encontram-se diferentes configurações.

As redes de subtransmissão recebem energia de estações de suprimento, e distribuem esta para os consumidores em tensão de subtransmissão e para as subestações de distribuição que, por sua vez, suprem os sistemas de distribuição primária em média tensão.

Para o tratamento deste tipo de redes pelo método de *Newton-Raphson*, devem ser disponibilizadas informações e modelados os seguintes componentes:

- a) Linhas de Transmissão.
- b) Barras de Suprimento.

- c) Unidades de Geração.
- d) Transformadores de 2 enrolamentos.
- e) Transformadores de 3 enrolamentos.

As linhas de transmissão são modeladas pelos seus circuitos PI-Nominal, conforme Figura 3. O sistema deve permitir o fornecimento das impedâncias em termos de valores em **pu** ou através do tipo de cabo e comprimento (o que permite o posterior cálculo em **pu**).

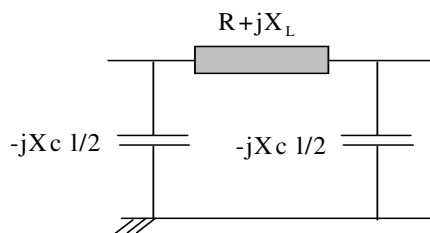


Figura 4 – Modelo de linha

Onde:

$-jX_c$ – Reatância capacitiva equivalente da linha

As barras de suprimento podem ser modeladas, para o fluxo de potência, como barras swing, quando são conhecidos os valores de módulo e fase da tensão ou como barras de tensão controlada, quando são conhecidos os valores da potência injetada e do módulo da tensão.

As unidades de geração, para o fluxo de potência podem ser modeladas como barras com controle de tensão (PV) ou como barras de carga (PQ), conforme o tipo de estudo a ser efetuado.

Os transformadores são modelados através do circuito pi-equivalente. Quando o transformador encontra-se em seu **tap** nominal, este é simplesmente representado pela sua impedância de seqüência positiva, em **pu**, na base do sistema, conforme Figura 5 item **a**. No caso do transformador estar fora do **tap** nominal, o circuito equivalente é o apresentado na Figura 5 item **b**,

onde α = Relação dos enrolamentos primário e secundário.

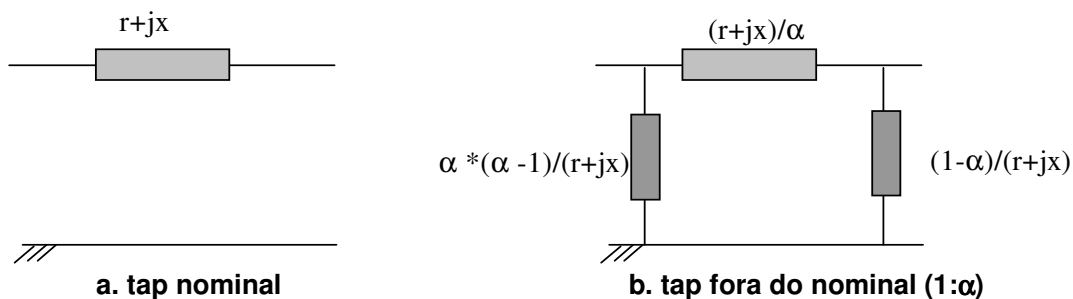


Figura 5 – Modelos de transformadores

Os transformadores de 3 enrolamentos são modelados através de seus circuitos em estrela, conforme mostrado na Figura 6, onde **p**, **s** e **t** representam, respectivamente, os terminais do primário, secundário e terciário.

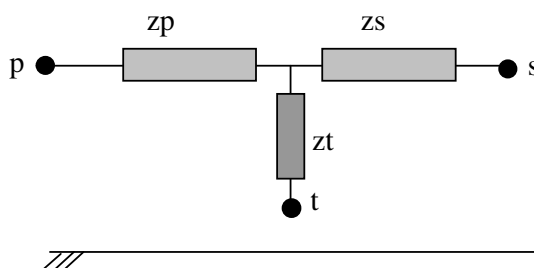


Figura 6 – Modelo de transformadores de três enrolamentos

Onde:

Z_p = Impedância equivalente do enrolamento primário

Z_s = Impedância equivalente do enrolamento secundário

Z_t = Impedância equivalente do enrolamento terciário

4.3.4 Produtos

A avaliação de desempenho operacional dos circuitos AT, calcada no método de fluxo de potência conduzido conforme passos descritos, nos itens anteriores, permite obter os seguintes resultados:

- a) Nível de tensão em todas as barras do circuito: Módulo da tensão (**pu**) e ângulo de fase.
- b) Carregamento de todos os trechos: Potência passante (**p + jq**) no respectivo trecho (em **pu**) e relação entre corrente no patamar e corrente admissível (%).
- c) Carregamento total: Potência total passante (**p + jq**) nos pontos de suprimento dos circuitos.
- d) Perdas em todos os trechos (**pu**).
- e) Perda total do circuito (**pu**).

CAPÍTULO 5 - IMPACTO TÉCNICO-ECONÔMICO NA POSTEGAÇÃO OU NÃO DE OBRAS NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO AT

5.1 INTRODUÇÃO

A eleição de obras no sistema de distribuição de alta tensão é motivada, basicamente, pela transgressão de critérios técnicos verificados em partes da rede (ou seja, pela inviabilidade de atender de modo conveniente e em segurança a atual demanda) ou pela busca de um incremento efetivo da qualidade de atendimento.

A identificação das áreas carentes de reforços ou nas quais caibam ações de melhoria pode ser viabilizada pela utilização de modelos adequados de confiabilidade e fluxo de potência em redes de alta tensão que simulam adequadamente a condição operativa do sistema em relação ao carregamento atual. O capítulo 2 constitui num modelo de avaliação de desempenho operacional utilizado no presente projeto referente ao segmento de alta tensão.

A aprovação de obras no sistema AT impõe uma alteração do respectivo desempenho operativo, auferindo, com isso, uma economicidade intrínseca que pode ser avaliada pelos seguintes parâmetros:

- a) Os benefícios técnicos vinculados à melhoria operativa do sistema viabilizada pela proposição da obra em análise. Vários indicadores técnicos podem ser melhorados conforme a obra priorizada, entre eles, as perdas técnicas de energia e demanda, o perfil de tensão do sistema,

a energia não distribuída, os parâmetros de continuidade (DEC, FEC, DIC, FIC, por exemplo), entre outros.

- b) Os benefícios econômicos que consistem na valoração dos benefícios técnicos verificados no sistema, traduzindo a economicidade auferida pela melhoria do desempenho operacional.

Combinando-se os benefícios econômicos com o custo correspondente, é possível a utilização de índices de méritos que se prestam convenientemente à priorização das obras e aplicando o corte mínimo por restrições orçamentárias consegue-se uma redefinição do plano de expansão reavaliado. Nas seções seguintes são avaliados os procedimentos utilizados para determinação dos benefícios técnicos e dos benefícios econômicos vinculados à proposição de obras no segmento de distribuição de alta tensão.

5.2 BENEFÍCIO TÉCNICO DAS OBRAS

5.2.1 Introdução

Basicamente, são avaliados 3 (três) indicadores técnicos sobre os quais estimam-se os correspondentes benefícios técnicos:

- 1) Perdas técnicas (energia e demanda).
- 2) Conformidade (nível de tensão nas barras do sistema).
- 3) Energia não distribuída.

Os critérios e procedimentos para avaliação do benefício técnico das obras relativas a estes parâmetros são abordados nas seções seguintes.

5.2.2 Benefício Técnico com redução das Perdas (BTRP)

O modelo utilizado segundo Antunes, Kagan e Silveira (2004a), consideram o carregamento do sistema definido em 4 (quatro) patamares com duração conhecida que caracterizam a curva de carga típica do sistema.

Desta forma, dadas as perdas técnicas de demanda verificadas com a atual configuração do sistema, e o novo valor resultante após a alocação da obra em análise o correspondente benefício técnico é dado por:

$$BTRP_{Dem} = \Delta Perda_{máx} \quad (5.1)$$

Onde:

$BTRP_{Dem}$ – Benefício técnico de redução das perdas de demanda (MW) referente à parte do sistema (conjunto de circuitos AT) afetados pela obra.

$\Delta Perda_{Max}$ – Variação de redução da perda máxima verificada considerando-se as configurações do sistema com e sem a obra (em cada condição, contempla-se a maior perda verificada nos 4 patamares).

Analogamente, o benefício técnico de redução das perdas de energia pode ser avaliado pela seguinte expressão:

$$BTRP_{En} = 365 \cdot \sum_{i=1}^4 \Delta Perda_i \cdot t_i \quad (5.2)$$

Onde:

$\Delta Perda_i$ – Variação da perda de demanda (kW) relativa ao patamar i.

t_i – Duração do patamar correspondente (manhã, tarde, noite ou madrugada) relativo à curva de carga diária associada.

365 – Número de dias do ano.

5.2.3 Benefício Técnico com a redução da Energia não Distribuída (BTREND)

Basicamente, o benefício técnico das obras relativas à Energia não Distribuída (END) combina duas parcelas: uma referente à redução efetiva da END viabilizada pela inserção da obra em análise; e a outra vinculada à capacidade adicional de atendimento introduzida pela obra, permitindo diminuir a Demanda Reprimida (DR) atualmente verificada no sistema.

Desta forma, pode-se avaliar o benefício técnico da obra em análise, a partir da seguinte expressão:

$$BTREND_{MWh} = \sum (\Delta DEC_{a\ lim} \cdot DM_{a\ lim}) + DR_{a\ lim} \quad (5.3)$$

Onde:

$BTREND_{MWh}$: Benefício técnico de Redução de Energia Não Distribuída em 1 ano (MWh).

$\Delta DEC_{a\ lim}$: Variação (antes e depois da obra) do DEC anual do conjunto de circuitos de alta tensão (parte do sistema) afetado pela obra.

$DM_{a\ lim}$: Potência média do conjunto de circuitos AT afetado pela obra. (MW)

$DR_{a\ lim}$: Demanda Reprimida do conjunto de circuitos AT afetado pela obra. (MWh)

5.2.4 Benefício Técnico com Redução da Queda de Tensão (BTRQT)

O modelo de avaliação do benefício técnico da queda de tensão (e posterior valoração econômica) baseia-se na estimativa da correspondente energia atendida com nível de tensão de fornecimento inadequada.

O modelo de fluxo de potência adotado (descrito na seção 4.3) permite identificar qual o nível de tensão em cada barra do sistema AT de modo que aquelas com valor abaixo do permitido (ou em faixas que já imponham um prejuízo à Empresa) podem ser identificadas, bem como a correspondente energia (pois é conhecida a duração dos 4 patamares de carga considerados).

Desta forma, pode-se avaliar o benefício da redução de queda de tensão a partir da expressão:

$$BTRQT_{MWh} = 365 \cdot \sum_{i=1}^4 DM_i \cdot \Delta t_i \quad (5.4)$$

Onde:

$BTRQT_{MWh}$: Benefício Técnico com a redução de Queda de Tensão (MWh).

DM_i : Variação do carregamento (antes e depois da obra em análise, dado em MW) relativo ao patamar i (assumido como constante em cada patamar; observe que este termo é uma fração da demanda do período) do conjunto de circuitos AT afetados pela obra, atendida com nível de tensão avaliado como imperfeito.

Δt_i : Duração do patamar correspondente (manhã, tarde, noite ou madrugada), relativo à curva de carga diária, associada ao número de dias do ano.

5.3 BENEFÍCIO ECONÔMICO DAS OBRAS

A partir da melhoria do sistema de distribuição de alta tensão, proporcionada pela proposição das obras em termos do desempenho operacional, procede-se a correspondente valoração econômica do benefício técnico verificado.

Para tanto, devem ser considerados um conjunto de dados de entrada, basicamente constituídos por custos unitários relativos aos parâmetros operacionais, bem como algumas considerações e premissas adicionais.

Os critérios e procedimentos para avaliação do benefício econômico das obras são analisados nas seções seguintes.

5.3.1 Benefício Econômico com redução das Perdas Técnicas (BERP)

De acordo com Silveira, Kagan e Antunes (2004b), basicamente, o valor econômico das perdas combina as duas parcelas relativas ao correspondente benefício técnico: uma associada às perdas de demanda e a outra às perdas de energia.

O valor das perdas de demanda associa-se a economia de não ter de expandir o sistema AT para sustentar um incremento de carregamento na ponta do sistema. Desta forma, o parâmetro básico de análise é o custo marginal de expansão pelo qual se valora o correspondente benefício técnico.

Por outro lado, as perdas de energia são valoradas pelo valor da respectiva tarifa de compra, correspondendo ao prejuízo efetivo do montante de energia não comercializado.

Desta forma, a partir do benefício técnico auferido pelas obras no tocante à redução das perdas, pode-se valorá-lo economicamente, considerando-se o primeiro ano de análise, da seguinte forma:

$$BERP_{1^o\text{ ano}} = (BERP_{Dem} \cdot C_{m\text{ arg}}) + (BERP_{En} \cdot VEP) \quad (5.5)$$

Onde:

BERP 1ºano: Benefício econômico com redução em perdas técnicas no primeiro ano (R\$).

C_{margin}: Custo marginal de expansão dos circuitos de alta tensão (R\$/kW.ano).

VEP: Valoração da energia de perdas aproximada pela tarifa média de compra da Empresa (R\$/MWh).

$BERP_{Dem}$: Benefício técnico da obra relativo à redução das perdas de demanda (MW);

$BERP_{En}$: Benefício técnico da obra relativo à redução das perdas de energia (MWh).

5.3.2 Benefício Econômico com a redução da Energia Não Distribuída - BREND

A partir do benefício técnico da END, conforme cita Antunes e outros (2004), a energia não distribuída - determinada conforme procedimento descrito na seção 5.2.3 - pode-se valorá-la economicamente, considerando-se o primeiro ano de análise da seguinte forma:

$$BREND_{1^o\ ano} = BREND_{MWh} \cdot VEND \quad (5.6)$$

Onde:

$BREND_{1^o\ ano}$: Benefício econômico de energia não distribuída para o primeiro ano de análise (R\$);

$BREND_{MWh}$: Benefício técnico vinculado à redução da energia não distribuída (MWh);

$VEND$: Valoração econômica da energia não distribuída (R\$/kWh).

O termo $VEND$, parâmetro básico que representa o valor econômico da END, constitui-se num dado de difícil estabelecimento dado a dificuldade de se mensurar o prejuízo efetivo auferido pelos consumidores em virtude da interrupção do fornecimento de energia.

Segundo Silveira, Kagan e Antunes (2004c), análises mais conservadoras poderiam considerar, de modo mais simples, o valor da tarifa de venda de energia,

correspondendo ao prejuízo direto auferido pela concessionária, em relação à perda de faturamento.

Análises mais realistas, porém, sugerem a adoção de valores bem mais elevados que espelham o custo social da interrupção da energia, que incluem desde o prejuízo vinculado ao processo produtivo de uma Empresa relativo à interrupção de energia, ao abalo da imagem da concessionária. Neste contexto, o valor da VEND poderia ser um múltiplo da tarifa da Empresa, ou seja:

$$VEND = \kappa \cdot TMV \quad (5.7)$$

Onde, TMV representa o valor médio da tarifa de venda da Empresa (R\$/MWh) e κ é da ordem de 20 ou 30. A constante k e o fator que quantifica o prejuízo e estar sintonizado com a estrutura econômica prevalecente à região onde é aplicada (sendo que, pode-se encontrar muitas discrepâncias numa mesma área de concessão).

5.3.3 Benefício Econômico com a redução da Queda de Tensão - BERQT

A partir do benefício técnico auferido pela obra em análise, em termos da melhoria do perfil de tensão dos circuitos AT afetados pela obra em análise, pode-se valorá-lo economicamente, considerando-se o primeiro ano de estudo, da seguinte forma:

$$BERQT_{1o\ ano} = BERQT_{MWh} \cdot VQDT + BMREG_{dV} \quad (5.8)$$

Onde:

BERQT_{1o ano}: Benefício econômico (R\$) em queda de tensão para o primeiro ano

BERQT MWh: Benefício técnico (MWh) em queda de tensão para o primeiro ano determinado conforme exposto na seção 5.2.4

VERQT: Valoração econômica da queda de tensão (R\$/kWh)

BMREGdV: Benefício econômico referente à anulação/redução das multas.

A avaliação do termo VERQT, relativo ao valor econômico da queda de tensão pode ser realizada por meio de uma função que correlacione o nível de tensão de fornecimento com valores arbitrários de custo (R\$/kWh).

A cada instante, é possível calcular o custo da imperfeição da tensão através do produto da energia que está sendo fornecida em nível de tensão avaliado como imperfeito por um índice de custo, que é dado pela função imperfeição de tensão (R\$/kWh relativo a uma determinada tensão). Estabelecido um determinado período de tempo, como os períodos dos dias considerados na curva de carga típica, é possível valorar a imperfeição de tensão, através do somatório destes produtos.

A função imperfeição apresenta 3 (três) diferentes faixas de comportamento: a mais alta em que o custo da imperfeição é zero, uma vez que representa a operação em níveis de tensão adequados, a mais baixa que está associada a níveis de tensão tão baixos que a penalização é igual àquela do não fornecimento (custo da energia não distribuída) e, finalmente, a faixa de transição em que a associação do nível de tensão ao custo de imperfeição é estabelecida através de uma função do tipo: $y = ax^b + c$. A Figura 7 ilustra uma função desta forma.

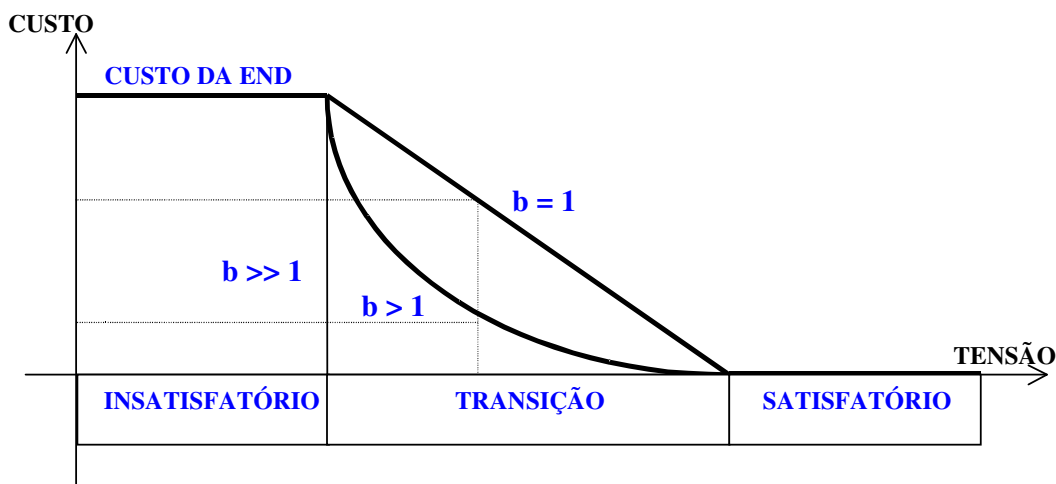


Figura 7 - Função Custo de Imperfeição de Tensão

5.4 TAXA DE RENTABILIDADE INICIAL DO INVESTIMENTO (TRII)

Uma vez determinados os benefícios técnicos auferidos pelas obras e correspondente ao valor econômico, podem-se utilizar índices de méritos adequados para avaliação do conjunto de obras passível de priorização no sistema de alta tensão.

Um dos índices de mérito mais utilizados em análises desta natureza é a Taxa de Rentabilidade Inicial do Investimento (TRII) que combina o benefício econômico auferido pelas obras com o custo correspondente. A formulação correspondente é:

$$TRII = \frac{BT\ 1^{\circ}\ \text{ano}}{CA} \quad (5.9)$$

Onde:

BT1oano: Benefício econômico total auferido pelas obras no primeiro ano de estudo.

$$BT1oano = BEP\ 1^{\circ}\ \text{ano} + BEND\ 1^{\circ}\ \text{ano} + BDQT\ 1o\ \text{ano} \quad (5.10)$$

BERP 1ºano: Benefício econômico com a redução em perdas técnicas no primeiro ano (R\$);

BREND 1.º ano: Benefício econômico com a redução de energia não distribuída para o primeiro ano de análise (R\$);

BERQT 1o ano: Benefício econômico (R\$) com a redução em queda de tensão para o 1º ano.

CA: Custo anualizado, ou seja, investimentos após a data zero (R\$).

O custo anualizado (CA) pode ser obtido a partir da seguinte expressão:

$$CA = I \cdot FRC \quad (5.11)$$

$$FRC = \frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (5.12)$$

Onde:

I: Investimento total associado a obra em análise

FRC: Fator de recuperação do capital

i. Taxa juros

n=Número de parcelas.

5.5 ESTABELECIMENTO DE ÍNDICE DE MÉRITO PARA ESCOLHA OTIMIZADA DE CORTES ORÇAMENTÁRIOS NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO AT

A concepção metodológica abordada na seção 5.2 estabelece os mecanismos necessários para se avaliar a melhoria intrínseca associada a um conjunto de obras em termos do desempenho operativo do sistema.

Basicamente, há um benefício técnico associado a um conjunto de obras, que pode ser valorado economicamente, determinando-se assim, um benefício econômico que reflete a economicidade auferida ao sistema pela melhoria dos indicadores técnicos. Combinando-se o benefício econômico com o custo da obra (por exemplo, em bases anuais) pode-se determinar índices de méritos adequados, entre eles a TRII contemplada na seção 5.4, e que se constitui num indicador adequado nos processos de priorização ou de corte de obras.

O problema fundamental abordado, porém, refere-se a uma situação inversa. Dado que já se tem definido um plano de obras preliminar, portanto,

constituído por um conjunto de obras potenciais, passíveis de serem alocadas no sistema, almeja-se aferir o impacto resultante do corte de obras no sistema o que, em geral, é motivado por restrições orçamentárias.

O procedimento básico proposto neste trabalho é abordado nas subseções seguintes.

5.5.1 Índice de Mérito para Avaliação do Corte de Obras

Na condição exposta na seção 5.5.1, onde já se dispõe de um plano de obras inicial para o sistema de distribuição AT, porém sujeito a cortes motivados por restrições orçamentárias, o índice de mérito correspondente apresenta uma concepção peculiar.

O módulo de avaliação de desempenho operacional considerado neste trabalho, constituído por um modelo adequado de fluxo de potência e um modelo de confiabilidade dos sistemas de alta tensão, permite identificar as áreas carentes de reforços ou nas quais caibam ações de melhoria. Portanto, viabiliza-se a estimativa do benefício técnico do conjunto de obras, conforme descrito na seção 5.2 e o respectivo benefício econômico a partir das valorações correspondentes.

Porém, na condição exposta, por já se dispor do plano de obras inicial, o parâmetro primordial de análise não se associa ao benefício econômico de priorizar a obra, e sim, ao prejuízo econômico e a penalidade regulatória caso deixe de executá-la.

Basicamente, o prejuízo econômico no primeiro ano de análise (em que o conjunto de obras é proposto), PT1ºano, é dado por:

$$PT1^{\circ}ano = - BT1^{\circ}ano \quad (5.13)$$

Portanto, um índice de mérito adequado passa a ser:

$$IMCAT = \frac{PT 1^{\circ}ano}{CA} \quad (5.14)$$

Onde:

IMCAT: Índice de mérito para o corte de obras no sistema de distribuição

AT;

CA: Custo anualizado, ou seja, investimentos após a data zero (R\$).

Desta forma, dado um conjunto de obras potencial, este parâmetro pode ser utilizado no processo de escolha otimizada de cortes orçamentários.

Porém, para resolução do problema de otimização adjacente que consiste, dado um volume orçamentário, na escolha de quais obras eliminar, deve-se lançar mão de técnicas de pesquisa operacional.

Na seção seguinte, discute-se sucintamente, alguns dos principais métodos desta técnica de otimização, em particular, aquela utilizada neste trabalho.

5.5.2 Descrição de um Processo de Otimização

Os métodos de otimização são, hoje, uma importante ferramenta utilizada nas tomadas de decisões e análises de sistemas elétricos de energia. Para usar tal ferramenta devemos primeiramente identificar o objetivo a que se destina, ou seja, uma quantidade medida do desempenho do sistema em estudo. Esse objetivo pode ser, por exemplo, minimizar as perdas elétricas de um sistema. O objetivo depende de certas características do sistema, que podemos chamá-las de variáveis. Portanto, os métodos de otimização destinam-se a encontrar os valores das variáveis que otimizem esse objetivo. Frequentemente essas variáveis são restritivas, ou limitadas, de alguma forma.

O primeiro passo do processo de otimização, talvez o mais importante, depois que identificamos o objetivo, as variáveis e os limites de um dado problema consiste na modelagem apropriada do sistema.

Uma vez tendo sido o modelo de um sistema formulado, um algoritmo de otimização pode ser usado para encontrar sua solução. Na verdade, não há um algoritmo de otimização universal. O que existe, entretanto, são inúmeros algoritmos de otimização destinados, particularmente, a cada tipo de problema. Cabe ao usuário a responsabilidade da escolha de um algoritmo que seja apropriado para aplicação de um determinado problema. Essa escolha é bastante importante uma vez que ela pode determinar se o problema é resolvido rapidamente ou lentamente, ou mesmo, se a solução será encontrada.

Após a aplicação de algoritmo de otimização ao modelo, devemos analisar se o algoritmo obteve sucesso na tarefa de encontrar a solução. Em muitos casos, há uma expressão matemática elegante conhecida como condições de otimalidade que checam se o conjunto de variáveis é a solução do problema. Se as condições de otimalidade não são satisfeitas, elas podem nos fornecer informações importantes de como as soluções podem ser melhoradas. Finalmente, o modelo pode ser melhorado aplicando-se técnicas de análise de sensibilidade, que revelam a sensibilidade da solução para mudanças no modelo e nos dados do sistema.

5.5.2.1 Formulação Matemática

Matematicamente analisando, a otimização consiste na minimização ou maximização de uma função objetivo sujeita a restrições nas suas variáveis.

O problema de otimização pode ser escrito na seguinte forma

$$\text{Min}_{x \in \mathbb{R}^n} f(x)$$

$$\text{Sujeito a } c_i(x) = 0, \quad i \in \varepsilon$$

$$c_i(x) > 0, \quad i \in \tau$$

Em que, \mathbf{x} é o vetor de variáveis, \mathbf{f} é a função objetivo que é função de \mathbf{x} a qual queremos maximizar, \mathbf{c} é o vetor de restrições que as variáveis \mathbf{x} devem satisfazer e ε e τ são conjuntos de índices.

5.5.3 Classificação dos problemas de Otimização

5.5.3.1 Contínuos ou Discretos

O termo genérico otimização discreta refere-se a problemas em que cuja solução os valores variáveis devem ser inteiros. Problemas desse tipo, conhecidos como problemas de programação inteira, devem ser tratados usando as ferramentas de otimização discreta. Os problemas de otimização contínua são problemas que envolvem apenas funções contínuas.

Conforme Cook e outros autores (1997), existem modelos que contém variáveis que variam de forma contínua e outras que só assumem valores inteiros, esses tipos de problemas são conhecidos como programação inteira mista.

Este assunto de problemas de otimização discreta é amplamente abordado por Wolsey (1998) e também por Nemhauser e Wolsey (1988).

5.5.3.2 Restritivos ou Não-Restritivos

Os problemas de otimização podem ser classificados de acordo com a natureza da função objetivo e dos seus limites (linear, não-linear, convexo), com número das variáveis (grande ou pequeno), com a suavidade da função (diferenciável ou não-diferenciável). Todavia, a distinção mais importante está entre problemas que tem restrições nas variáveis e naqueles que não tem.

Se a função objetivo e todas as variáveis são lineares, diz-se que o problema é relacionado à programação linear, caso contrário, se alguma restrição e/ou a função objetivo for não-linear, o problema é considerado como um problema de programação não-linear.

5.5.3.3 Global ou Local

Considerando-se um problema de minimização, uma solução global corresponde ao menor de todos os mínimos, entretanto, mesmo que a solução global seja necessária, ela, usualmente, é difícil de identificar e muito mais difícil de localizar. Problemas de programação linear pertencem à categoria de programação convexa, cuja solução é também uma solução global.

5.5.3.4 Estocásticos ou Determinísticos

Em alguns problemas de otimização, o modelo não pode ser completamente especificado porque ele depende de quantidades desconhecidas no instante da formulação. Todavia, pode-se prever ou estimar as quantidades desconhecidas com um certo grau de certeza. Os algoritmos de otimização estocástica usam essa quantificação da incerteza para produzir soluções que otimizem o desempenho esperado do modelo.

Os problemas de otimização determinísticos são problemas cujo modelo é completamente determinado. Muitos problemas de otimização estocásticos, por sua vez, são resolvidos usando-se um ou mais subproblemas determinísticos.

Para obter mais informações sobre programação estocástica recomendamos consultar Birge e Louveaux (1997) e Kall e Wallace (1997).

5.5.4 Algoritmos de Otimização

Os algoritmos de otimização são iterativos. Eles começam com uma condição inicial para as variáveis do problema de otimização e geram uma seqüência de estimativas melhoradas até alcançar a solução. Todos bons algoritmos devem possuir as seguintes propriedades:

- a) Robustez - Eles devem ser capazes de resolver uma variedade de

problema de sua classe, para qualquer escolha razoável das variáveis iniciais.

- b) Eficiência - Eles não devem requerer um tempo de processamento elevado.
- c) Precisão - Eles devem obter a solução como uma boa precisão.

5.5.5 Alguns Métodos de Otimização

Os problemas básicos de planejamento, segundo Antunes, Kagan e Silveira (2004c), como aqueles voltados à otimização da expansão do sistema quanto à localização e dimensionamento da capacidade instalada das subestações, definição de novos alimentadores primários ou trechos a construir, etc, podem e devem ser tratados através de técnicas de otimização que empregam, basicamente, recursos de pesquisa operacional como Programação Linear, Programação Inteira, Programação Linear Inteira Mista, Programação Dinâmica, Programação Não-Linear, entre outras.

Para usar as técnicas de otimização devemos, primeiramente, identificar o objetivo (função objetiva) a que se destina, ou seja, uma quantidade medida do desempenho do sistema em estudo, por exemplo, definir quais as obras que serão cortadas.

O objetivo depende de certas expectativas do sistema, que podemos chamá-las de variáveis. Portanto, os métodos de otimização destinam-se a encontrar os valores das variáveis que otimizam esse objetivo. Normalmente essas variáveis são restritivas, ou limitadas, de alguma forma.

Tais técnicas envolvem uma função objetivo que se deseja otimizar (maximizar ou minimizar) sujeita à determinadas condições pré-estabelecidas que são as restrições que o problema apresenta.

Para a programação linear tem-se a seguinte formulação básica:

Maximizar:

$$Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (5.15)$$

Sujeita às restrições:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq d_i \quad (5.16)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$x_j \geq 0$$

Onde: Z é a função objetivo que se deseja otimizar (maximizar ou minimizar).

x_j são as quantidades ótimas que se deseja determinar.

c_j são os custos unitários dos produtos x_j

d_i são os recursos disponíveis para a produção dos x_j

a_{ij} são as quantidades necessárias à realização de cada produto x_j

Na programação linear, as variáveis são contínuas e utiliza-se o Método Simplex para a sua resolução.

Na programação inteira, as variáveis x_j só podem ser inteiras, sendo resolvida através de algoritmos como o *Branch & Bound*, de *Gomery* (algoritmo de corte), de Balas, ou de enumeração implícita. A principal aplicação da programação inteira no planejamento consiste na utilização de variáveis inteiras de decisão tipo **0** ou **1**, para representar situações qualitativas como, por exemplo, instalar ou não um equipamento num determinado ano.

Já na programação inteira mista, admitem-se tanto variáveis inteiras, como contínuas, e sua solução é obtida através da combinação dos métodos anteriores, encontrando numa primeira fase a solução contínua e em seguida a solução inteira.

Através da combinação destes métodos, também experimentada por Kagan e outros autores (2004a), no todo ou em parte, procura-se formular uma função objetivo que pode ser, por exemplo, a minimização do custo global da rede

sujeita a restrições como fluxo máximo permitido em cada trecho de alimentador, o que equivale a pesquisar uma rede que tenha o menor custo de operação, respeitadas as limitações de capacidade dos condutores.

5.5.6 O Problema da Otimização de Cortes de Obras

O problema de otimização de cortes de obras consiste em: dado um plano inicial de expansão passível de priorização, compatibilizá-lo com a disponibilidade orçamentária considerada, implicando na necessidade de cortes de obras, caso os recursos financeiros disponíveis não sejam suficientes para atender as necessidades efetivas de expansão e/ou melhoria do sistema.

Busca-se minimizar o impacto técnico e econômico correspondente, o que pode ser avaliado com base no índice de mérito IMCAT definido na seção 5.5.1. Porém, para viabilizar um procedimento eficaz de otimização de cortes de obras, pode-se utilizar a técnica de programação linear inteira, adequada ao objetivo básico desejado, uma vez que o problema consiste em priorizar ou não uma obra (ou conjunto de obras) a partir de uma determinada condição orçamentária. Pode-se, portanto, formular o problema em análise da seguinte forma:

Dado:

$$\Delta C = O_p - O_r \quad (5.17)$$

Minimizar:

$$Z = \sum_{j=1}^n \left[\frac{\text{PT 1º ano}}{CA} \right]_j x_j \quad (5.18)$$

Sujeita às restrições:

$$\sum_{j=1}^n CA_j x_j \geq \Delta C_j \quad (5.19)$$

Onde:

- Op – Orçamento previsto
- Or – Orçamento real
- ΔC – Variação orçamentária
- j – Índice de obra
- n – Total de obras consideradas inicialmente
- CA - Custo anualizado, ou seja, investimentos após a data zero (R\$)
- x_j - São as quantidades ótimas que se deseja determinar

Portanto, a formulação definida busca determinar a solução que minimiza a relação IMCAT (prejuízo / custo), identificando as obras a serem eliminadas. Para tanto, o volume de investimentos associados às obras descartadas deve ser superior a variação de orçamento (restrição orçamentária), de modo a garantir que a solução encontrada respeite o limite orçamentário considerado.

O exemplo a seguir ilustra uma aplicação do problema de otimização de cortes orçamentários conforme explicado anteriormente. Dado o seguinte conjunto de obras inicial passível de priorização ilustrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Exemplo de aplicação do método de otimização para cortes orçamentários

Índice da obra	PT1ºano (pu)	CA (pu)	PT1ºano / CA
1	1	10	0,1
2	5	5	1
3	10	20	0,5
4	2	10	0,2
5	6	8	0,75

Nota: Tabela formulada a partir de resultados obtidos em estudos do P&D com a USP - ENERQ sobre Desenvolvimento de Índice de Mérito para a Escolha Otimizada de Cortes Orçamentários Levando em Consideração Parâmetros de Impacto Econômico.

Considerando-se ainda os seguintes dados:

$$Op = 50$$

$$Or = 20$$

Logo:

$$\Delta C = 30$$

Portanto, o problema de otimização de cortes orçamentários é formulado da seguinte forma:

Minimizar:

$$0,1 \cdot x_1 + 1,0 \cdot x_2 + 0,5 \cdot x_3 + 0,2 \cdot x_4 + 0,75 \cdot x_5 \quad (5.20)$$

Sujeito a:

$$10 \cdot x_1 + 5 \cdot x_2 + 20 \cdot x_3 + 10 \cdot x_4 + 8 \cdot x_5 \geq 30 \quad (5.21)$$

Utilizando a técnica de enumeração implícita para resolução do correspondente problema de programação linear, segue o resultado ilustrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultado do problema de otimização

Índice da obra	Priorização (1 = Sim; 0 = Não)
1	0
2	1
3	0
4	1
5	1

Nota: Tabela formulada a partir de resultados obtidos em estudos do P&D com a USP – ENERQ sobre Desenvolvimento de Índice de Mérito para a Escolha Otimizada de Cortes Orçamentários Levando em Consideração Parâmetros de Impacto Econômico.

Portanto, foram descartadas as obras 1 e 3 e priorizadas as obras 2, 4 e 5, solução que minimiza a relação (prejuízo/custo) e respeita o volume orçamentário disponível.

5.6 ESTABELECIMENTO DE ÍNDICE DE MÉRITO PARA ESCOLHA OTIMIZADA DE CORTES ORÇAMENTÁRIOS LEVANDO EM CONSIDERAÇÃO PARÂMETROS QUANTITATIVOS

5.6.1 Considerações Iniciais

Na seção 5.5 definiu-se um índice de mérito específico, com muita similaridade a TRII, porém, inserido num contexto peculiar, relativo a atividade de corte de obras em ambientes de restrição orçamentária. Este índice, expresso pela equação (5.14) baseia-se no prejuízo econômico de se eliminar um conjunto de obras do sistema, relacionando-se à perda do benefício econômico correspondente.

5.6.2 Obras de Natureza Específica

O índice de mérito IMCAT definido anteriormente constitui-se num parâmetro adequado para o tratamento do problema básico de otimização de um plano de obras sujeito à restrição orçamentária, quando já se dispõe de um plano inicial de expansão e, por motivações de restrição orçamentária, necessita-se proceder ao corte de obras.

Porém, conforme comentado anteriormente, este índice pode não ser suficientemente representativo em relação à análise de algumas obras peculiares que cumprem funções específicas. Entre estas obras pode-se citar:

- a) **Obras Associadas a Compromissos Assumidos:** Estas obras relacionam-se a contratos específicos, celebrados junto aos clientes e implicando em novas ligações. Por exemplo, a construção de uma usina para fornecimento de energia a uma nova empresa instalada na área de concessão da distribuidora pode-se enquadrar numa obra deste tipo. Embora não sejam obras estritamente essenciais (ou seja, a não priorização deste reforço não necessariamente implica na transgressão de critérios técnicos), certamente devem apresentar um peso bastante significativo num contexto de restrição orçamentária (obra que só deve

ser cortada em situações muito específicas), uma vez que é motivada por cláusulas contratuais assumidas junto aos clientes.

- b) **Obras Relacionadas à Universalização:** Estas obras podem mobilizar um volume de investimentos bastante expressivo de modo a viabilizar o acesso à energia elétrica às regiões da concessionária ainda desassistidas, porém, em muitas ocasiões não apresentam um retorno financeiro atraente que as justifiquem em análises tradicionais. Todavia, constituem-se em obras obrigatórias respaldadas por cláusulas contratuais.
- c) **Obras Relacionadas à Eletrificação Rural:** Obras de natureza muitas vezes semelhantes àquelas propostas em relação à universalização, porém específicas às áreas rurais da concessionária. Em muitos casos não apresentam um retorno financeiro que as justifiquem, mas podem ser obrigatórias por motivações contratuais.

5.6.3 Índice de Mérito para Tratamento de Obras de Natureza Específica

As obras contempladas na seção anterior requerem um tratamento específico, pois dificilmente serão convenientemente avaliadas por meio de indicadores clássicos como a TRII, ou pelo indicador IMCAT expresso pela equação (5.14).

Em muitas ocasiões as obras relativas à universalização, eletrificação rural ou de compromissos assumidos junto aos clientes apresentam uma ordem de prioridade superior às tradicionais, uma vez que há obrigações contratuais que as respaldam.

Neste contexto, há um grau razoável de subjetividade que deve orientar a sistemática de corte/priorização de obras quando o plano de expansão inicial contiver, tanto obras de natureza tradicional (expansão ou reforço), quanto de natureza específica.

Optou-se por manter a concepção do índice de mérito associado às obras fundamentado na relação (prejuízo/custo) vinculado ao descarte correspondente, porém complementado pela ponderação de um fator de ajuste que introduz um grau subjetivo que expressa a prioridade na correspondente execução, esta concepção teve seu experimento em Kagan e outros autores (2004 a)

Dado que parte das obras de natureza específica, como as de universalização e de eletrificação rural tendem a apresentar uma relação (prejuízo/custo) bastante baixa (portanto, com possibilidades de eliminação mais provável, em casos de análises tradicionais), o fator de ajuste correspondente pode ter, eventualmente, um valor bastante elevado de modo a torná-las mais competitivas.

Desta forma, pode-se associar às obras o seguinte índice de mérito:

$$\text{IMCAT}' = \frac{\text{PT 1}^{\circ} \text{ ano}}{\text{CA}} \cdot \text{fa} \quad (5.20)$$

Onde:

IMCAT – Índice de mérito ajustado relativo ao corte de obras em redes AT

fa – fator de ajuste do índice de mérito das obras

PT1ºano -- Prejuízo econômico no primeiro ano de análise.

CA -- Custo anualizado, ou seja, investimentos após a data zero (R\$)

5.6.4 Otimização do Procedimento de Corte de Obras Levando em Consideração Reforços Tradicionais e Ações de Natureza Específica

O objetivo primordial do procedimento de corte de obras é o de minorar o impacto técnico-econômico no sistema, compatibilizando a solução encontrada com a disponibilidade orçamentária.

Basicamente, utiliza-se a mesma concepção avaliada para as obras tradicionais, com os devidos ajustes necessários, dado a peculiaridade do problema

tratado que compete obras tradicionais de reforço ou melhoria, com obras de natureza específica. A técnica contemplada é a de programação linear inteira, que sugere a seguinte formulação.

Dado:

$$\Delta C = O_p - O_r \quad (5.21)$$

Minimizar:

$$Z = \sum_{j=1}^n \left[\frac{|PT \ 1^o \ ano|}{CA} \cdot fa \right]_j x_j \quad (5.22)$$

Sujeita às restrições:

$$\sum_{j=1}^n CA_j x_j \geq \Delta C_j \quad (5.23)$$

Onde:

- Op – Orçamento previsto
- Or – Orçamento real
- ΔC – Variação orçamentária
- j – Índice de obra
- n – Total de obras consideradas inicialmente
- x_j – São as quantidades ótimas que se deseja determinar

O exemplo a seguir ilustra uma aplicação do problema de otimização de cortes orçamentários conforme explicado anteriormente.

Dado o seguinte conjunto de obras inicial passível de priorização ilustrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Exemplo de aplicação do método de otimização para cortes orçamentários

Índice da obra	PT1ºano (pu)	CA (pu)	Fa – Fator de Ponderação	(PT1ºano / CA) . Fa
1	1	10	1	0,1
2	5	5	1	1
3	10	20	1	0,5
4	2	10	1	0,2
5	6	8	1	0,75
6 (*)	0,2	20	1	0,01
7 (*)	0,1	25	1	0,004

Nota: (*) Obras necessárias para viabilizar a universalização do atendimento.

Tabela formulada a partir de resultados obtidos em estudos do P&D com a USP - ENERQ sobre Desenvolvimento de Índice de Mérito para a Escolha Otimizada de Cortes Orçamentários Levando em Consideração Parâmetros Quantitativos.

Nota-se, portanto, que se atribuiu o mesmo peso a todas as obras (fator de ajuste = 1), o que equivale a desconsiderar uma prioridade prévia das obras de natureza específica sobre as demais.

Considerando-se ainda os seguintes dados:

$$Op = 50$$

$$Or = 20$$

Logo:

$$\Delta C = 30$$

Portanto, o problema de otimização de cortes orçamentários é formulado da seguinte forma:

Minimizar:

$$0,1 \cdot x_1 + 1,0 \cdot x_2 + 0,5 \cdot x_3 + 0,2 \cdot x_4 + 0,75 \cdot x_5 + 0,01 \cdot x_6 + 0,004 \cdot x_7$$

Sujeito:

$$10 \cdot x_1 + 5 \cdot x_2 + 20 \cdot x_3 + 10 \cdot x_4 + 8 \cdot x_5 + 20 \cdot x_6 + 25 \cdot x_7 \geq 30$$

x_j _ São as obras que se deseja determinar

Utilizando a técnica de enumeração implícita para resolução do correspondente problema de programação linear segue o resultado ilustrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultado do problema de otimização

Índice da obra	Priorização (1 = Sim; 0 = Não)
1	1
2	1
3	1
4	1
5	1
6	0
7	0

Nota: Tabela formulada a partir de resultados obtidos em estudos do P&D com a USP - ENERQ sobre Desenvolvimento de Índice de Mérito para a Escolha Otimizada de Cortes Orçamentários Levando em Consideração Parâmetros quantitativos.

Portanto, foram descartadas as obras 6 e 7 e priorizadas as demais - soluções que minimiza a relação (prejuízo / custo), e respeita o volume orçamentário disponível. As obras descartadas foram as de eletrificação rural, precisamente, aquelas que apresentam um prejuízo reduzido (face à pequena melhoria proporcionada ao sistema) a um custo elevado (em determinadas condições, é necessária uma obra de vulto para atendimento de uma carga de pequena magnitude). Admitindo-se agora que o conjunto de obras inicial apresente os seguintes fatores de ponderação, conforme ilustrado na Tabela 6.

Tabela 6 - Exemplo de aplicação do método de otimização para cortes orçamentários

Índice da obra	PT1ºano (pu)	CA (pu)	Fa – Fator de Ponderação	(PT1ºano / CA) . Fa
1	1	10	1	0,1
2	5	5	1	1
3	10	20	1	0,5
4	2	10	1	0,2
5	6	8	1	0,75
6 (*)	0,2	20	200	2,0
7 (*)	0,1	25	625	2,5

Notas: (*) Obras necessárias para viabilizar a universalização do atendimento.

Tabela formulada a partir de resultados obtidos em estudos do P&D com a USP - ENERQ sobre Desenvolvimento de Índice de Mérito para a Escolha Otimizada de Cortes Orçamentários Levando em Consideração Parâmetros quantitativos.

Mantendo-se as mesmas condições orçamentárias anteriormente definidas resulta a seguinte formulação.

Minimizar: $0,1 \cdot x_1 + 1,0 \cdot x_2 + 0,5 \cdot x_3 + 0,2 \cdot x_4 + 0,75 \cdot x_5 + 2,0 \cdot x_6 + 2,5 \cdot x_7$

Sujeito: $10 \cdot x_1 + 5 \cdot x_2 + 20 \cdot x_3 + 10 \cdot x_4 + 8 \cdot x_5 + 20 \cdot x_6 + 25 \cdot x_7 \geq 30$

Utilizando a técnica de enumeração implícita para resolução do correspondente problema de programação linear segue o resultado ilustrado na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultado do problema de otimização

Índice da obra	Priorização (1 = Sim; 0 = Não)
1	0
2	1
3	0
4	1
5	1
6	1
7	1

Nota: Tabela formulada a partir de resultados obtidos em estudos do P&D com a USP - ENERQ sobre Desenvolvimento de Índice de Mérito para a Escolha Otimizada de Cortes Orçamentários Levando em Consideração Parâmetros quantitativos.

Portanto, nesta nova condição foram eliminadas as obras 1 e 3 e priorizadas as demais, incluindo as duas obras associadas à universalização de atendimento que mesmo onerosas e impondo um prejuízo pequeno ao sistema, foram mantidas dado o elevado fator de ajuste atribuído.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÃO E COMENTÁRIOS FINAIS

No segmento de distribuição de alta tensão, dado a magnitude das cargas envolvidas, bem como da importância operativa em relação ao sistema como um todo, é imperativa a alta confiabilidade requerida. Desta forma, a atividade de planejamento, tanto da expansão, quanto da operação e manutenção, reveste-se de suma importância, e as ações propostas podem implicar em um considerável impacto nos demais segmentos do sistema de distribuição.

Permeando este contexto, ambientes de restrições orçamentárias podem influir de modo significativo no desempenho do sistema, aspecto este que se reveste de suma importância, uma vez que há uma série de obrigações regulatórias e contratos assumidos com os clientes que devem ser respeitados, além da imagem da empresa, intrinsecamente associada ao serviço prestado.

Uma concessionária de energia que não disponha de nenhum instrumental metodológico que dê respostas efetivas a alguns aspectos importantes inseridos neste contexto, como, por exemplo, a avaliação do impacto, em termos técnicos e econômicos, resultante do descarte de um determinado conjunto de obras potenciais, inicialmente propostas, em virtude de restrições orçamentárias, poderá ser afetada por impacto bastante amplo, uma vez que não se vislumbra as conseqüências somente no segmento de alta tensão, mas, no sistema como um todo (incluindo os demais segmentos de média e baixa tensão).

Deste modo, a partir da atual sistemática, as concessionárias de energia tornam-se imprescindíveis ao processo para determinação de um plano de reforços/ações, o que inclui a análise da natureza das obras, aspectos contratuais e regulatórios exigido pela ANEEL. Esta metodologia descrita nesta dissertação que, efetivamente, busca equacionar os aspectos mais importantes inseridos neste contexto, prevendo recursos para avaliação técnica e econômica resultante da eliminação de determinadas obras em relação ao plano original, e que efetivamente discrimine as conseqüências observadas quanto a operacionalidade e economicidade do sistema motivadas por ambientes de restrições orçamentárias.

A decisão final de alocação de recursos de uma concessionária para expansão/melhoria do sistema de distribuição de alta tensão constitui-se em tarefa complexa, onde a análise técnico-econômica adjacente deve contemplar aspectos de operação segura (atendimento do mercado com respeito aos critérios técnicos), melhoria do sistema (fornecimento com nível de tensão, confiabilidade, sinal sem distorções, entre outros) ou de natureza específica (motivadas por cláusulas contratuais, vinculadas a compromissos assumidos junto a clientes, universalização, eletrificação rural, entre outros).

Focalizando em relação ao procedimento de descarte de obras, apresentou-se um procedimento de subsídio a da análise à concessionária Celpe, a qual, serviu como estudo de caso, fundamentado em técnicas de otimização (programação linear inteira), que utiliza um índice de mérito adequado calcado na avaliação consistente do prejuízo econômico que a eliminação de um conjunto de obras, e complementado por fatores subjetivos que permitem um tratamento de obras de natureza específica que, a despeito da reduzida atratividade, tem um nível de prioridade, em muitas ocasiões, superior aos dos reforços tradicionais.

Para tanto, este procedimento apóia-se numa concepção metodológica que permite uma avaliação consistente do desempenho operacional do sistema nas condições antes e depois da priorização do conjunto de obras propostas, e as conseqüentes estimativas dos benefícios técnicos e econômicos, facilitado pelo resultado de uma ferramenta computacional, originado dessa dissertação e dos recursos de pesquisa e desenvolvimento (P&D) junto com a Universidade de São Paulo (USP) e a Universidade Salvador (UNIFACS), servindo de base para por em prática a utilização de índices de méritos calcados em relações de “benefício/custo” ou “prejuízo/custo” visando a priorização ou eliminação correspondente.

Com base nas análises descritas nesta dissertação, avalia-se que o procedimento adotado constitui-se num instrumental adequado de subsídio aos estudos de qualquer concessionária de energia e não somente ao nosso estudo de caso, no tocante a complexa atividade de se proceder ao corte de obras no sistema de distribuição de alta e média tensão motivados por restrições orçamentárias.

REFERÊNCIAS

ANTUNES, A. U.; KAGAN, N.; SILVEIRA, C. S. **Desenvolvimento de índice de mérito para a escolha otimizada de cortes orçamentários levando em consideração parâmetros de qualidade de fornecimento (aumento de perdas técnicas, alteração nos indicadores de continuidade e conformidade)**. São Paulo: ENERQ/CELPE, 2004a. (Documento Técnico).

_____. **Modelo para avaliação do impacto sobre os indicadores de continuidade de serviço e o impacto de possíveis efeitos de cortes em obras na expansão do sistema de média tensão da CELPE**. - São Paulo: ENERQ/CELPE, 2004b. (Documento Técnico).

_____. **Modelo para avaliação do impacto das perdas do sistema de distribuição levando em conta os impactos sobre os sistemas de média tensão da empresa**. São Paulo: ENERQ/CELPE, 2004c. (Documento Técnico).

ARANGO, H. G. et al. **Concepção de modelo de integração dos métodos de valoração econômica de obras de distribuição**. São Paulo: ENERQ/BANDEIRANTE, 2004. (Documento Técnico).

BINATO, S.; OLIVEIRA, G. C. Multi-year expansion planning of large transmission Networks. In: SYNPOSIUM OF SPECIALIST IN ELECTRIC OPERATIONAL AND EXPANSION PLANNING, 4., 1994, Foz do Iguaçu, **Anais...** Curitiba: [s.n.], 1994. p. 16-29.

BIRGE, J. R.; LOUVEAUX, F. **Introduction to stochastic programming**. New York: Springer-Verlag, 1997.

BRASIL. Congresso Nacional. **A Crise de abastecimento de energia elétrica**. Brasília, DF: Senado Federal, Secretaria de Editoração e Publicações, 2002. (Relatório).

_____. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução n. 24 de 27 de janeiro de 2000**. Estabelece as disposições relativas à continuidade da distribuição de energia elétrica às unidades consumidoras. Brasília, 2000. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 10 jan. 2006.

_____. _____. **Plano 2010: Relatório Geral**. Plano Nacional de Energia Elétrica 1987/2010. Brasília, DF: Centrais Elétricas do Brasil (ELETROBRÁS), 1987.

_____. _____. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução n. 505, de 26 de novembro de 2001**. Estabelece de forma atualizada e consolidada, as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime

permanente. Brasília, 2001. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 11 jan. 2006.

CACHAPUZ, P. B. de B. **O Planejamento da expansão do setor de energia elétrica**: a atuação da Eletrobrás e do Grupo Coordenador do Planejamento dos Sistemas Elétricos (GCPS). Rio de Janeiro: Centro de Memória da Eletricidade no Brasil, 2002. p. 377.

CHANG, S. K. et al. Optimal real-time voltage control. **IEEE Transactions on Power Systems**, Palo Alto, CA, v. 5, n. 3, p. 750-758, Aug. 1990.

CIGRE, W. G. Methods for planning under uncertainty towards flexibility in power system development. **Electra**, n. 161, aug. 1995.

COOK, W. J. et al. **Combinatorial optimization**. New York: John Wiley, 1997.

DUSONCHET, Y. P.; EL-ABIAD, A. Transmission planning using discrete dynamic optimization. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Palo Alto, CA, v. 92, p. 1358-1371, jul. 1973.

FLOUDAS, C. A.; PARDALOS, P. M. **Recent advances in global optimization**. New Jersey: Princeton University, 1992.

GARVER, L. L. Transmission network estimation using linear programming. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Palo Alto, CA, v. 89, n. 7, p. 47-54, Sept., 1970.

GUARALDO, J. C. et al. **Documentação de sistema computacional desenvolvido**. São Paulo: ENERQ/CELPE, 2005. (Documento Técnico).

KAGAN, N. et al. **Desenvolvimento de índice de mérito para a escolha otimizada de cortes orçamentários, levando em consideração parâmetros de impacto econômico**. São Paulo: ENERQ/CELPE, 2004a. (Documento Técnico).

_____. **Modelo para avaliação do impacto das perdas do sistema de distribuição levando em conta os impactos sobre os sistemas de alta tensão**. São Paulo: ENERQ/CELPE, 2004b. (Documento Técnico).

KAGAN, N.; SILVEIRA, C. S.; OLIVEIRA, C. C. B. Utilização de Algoritmos Genéticos para a Minimização de Perdas em Redes de Distribuição de Energia Elétrica. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 3, 1998, São Paulo. **Anais...** São Paulo: EPUSP/IEEE, 1998. p. 587-591.

KALL, P.; WALLACE, S. W. **Stochastic programming**. New York: John Wiley, 1997.

LEE, S. T. Y.; HOCKS, K. L.; HNYILICZA, E. Transmission expansion of branch and bound integer programming with optimal cost capacity curves. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Palo Alto, CA, v. 93, n. 5, p. 1390-1400, dec. 1974.

LESSA, Carlos et al. **O Brasil a luz do apagão**. Rio de Janeiro: Palavra & Imagem, 2001.

MANZONI, E. ; PARIS, L. ; VALTORTA, M. Power system planning practice in Italy. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Palo Alto, CA, v. 98, n. 3, p. 2055-2062, may/june, 1979.

MASSÉ, P.; GIBRAT, R. Applications of linear programming to investments in the electric power industry. **Management Science**, Evanston, IL, v. 36, n. 2, p. 149-166, jan.1957.

MONTICELLI, A. J. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica**. São Paulo: Edgar Blücher, 1983.

MONTICELLI, A. J. et al. Interactive transmission network planning using a least-effort criterion. **IEEE Transactions on Power Apparatus and System**, Palo Alto, CA, v. 101, n. 10, p. 3919-3925, oct. 1982.

MOROZOWISKY FILHO, M. **Planejamento integrado de sistemas multiárea com restrições de energia e de confiabilidade**: uma abordagem via Programação Estocástica. 1995. Tese (Doutorado)- Universidade Federal do Rio de Janeiro(UFRJ/COPPE), 1995.

MOROZOWISKY FILHO, M. et al. Priority evaluation and ranking of transmission system projects computer models and results. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Palo Alto, CA, v. 5, n. 3, aug. 1990.

NEMHAUSER, G. L.; WOLSEY, L. A. **Integer and combinatorial optimization**. New York: John Wiley, 1988.

OLIVEIRA, G. C. Um ambiente computacional integrado para o planejamento de redes de transmissão. In: SIMPÓSIO DE ESPECIALISTAS EM PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO E EXPANSÃO ELÉTRICA, 5., 1996, Recife. **Anais...**, Recife, 1996. p. 754-783.

OLIVEIRA, G. C.; COSTA, A. P. C.; BINATO, S. Large scale transmission Network: planning using optimization and heuristic techniques. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Palo Alto, CA, v. 10, n. 4, nov. 1995.

PEREIRA, M. V. F.; PINTO, L. M. V. G. Application of sensitivity analysis of local supplying capability to interactive transmission expansion planning. **IEEE**

Transactions on Power Apparatus and Systems, Palo Alto, CA, v. 104, n. 2, p. 349-356, feb. 1985.

RUDINICK, H. et al. Economically adapted transmission systems in open access schemes - application of genetic algorithms. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Palo Alto, CA, v. 11, n. 3, p. 1427-1440, aug. 1996.

SANTOS JÚNIOR, A. et al. An optimization model for long-range transmission expansion planning. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Palo Alto, CA, v. 4, n. 1, feb.1989.

SILVEIRA, C. S.; KAGAN, N.; ANTUNES, A. U. **Modelo para avaliação do impacto sobre os indicadores de continuidade de serviço e o impacto de possíveis efeitos de cortes em obras na expansão do sistema de alta tensão da CELPE**. São Paulo: ENERQ/CELPE, 2004a. (Documento Técnico).

_____. **Modelo para avaliação do impacto sobre os indicadores de continuidade de serviço e o impacto de possíveis efeitos de cortes em obras na expansão do sistema de baixa tensão da CELPE**. São Paulo: ENERQ/CELPE, 2004c. (Documento Técnico).

_____. **Modelo para avaliação do impacto sobre os níveis de tensão e o impacto de cortes orçamentários, ou seja, de cortes de obras de expansão, no sistema de média tensão da CELPE**. São Paulo: ENERQ/CELPE, 2004b. (Documento Técnico).

STOTT, B.; ALSAC, O.; MONTICELLI, A. J. Security analysis and optimization. **Computers in Power Systems Operations**, New York, v. 75, n. 12, p. 1623-1644, dec. 1987.

VEGA, M.; SARMIENTO, H. G. Image processing application maps optimal transmission routes. **IEEE Computer Applications in Power**, New York, v. 9, n. 2, p. 45-71, apr. 1996.

VILLASANA, R.; GARVER, L. L.; SALON, S. J. Transmission network planning using linear planning. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Palo Alto, CA, v. 104, n. 2, p. 349-356, feb., 1985.

WOLSEY, Laurence A. **Integer programming**. New York: Jonh Wiley, 1998.