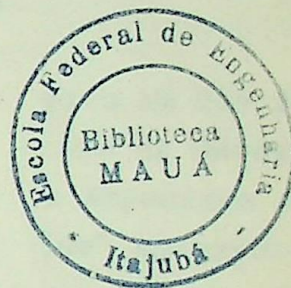


MODELOS ESPACIAIS DE EXPANSÃO DE
SISTEMAS DISTRIBUIDORES
DE ENERGIA ELÉTRICA



Dissertação apresentada ao
Departamento de Eletrotécnica
da Escola Federal de Engenharia
de Itajubá como parte dos
requisitos para a obtenção do
título de Mestre em Ciências da
Engenharia Elétrica.

Orientador: HECTOR ARANGO

Departamento de Eletrotécnica
Escola Federal de Engenharia de Itajubá

Itajubá, junho de 1993

DIFF. A.662m

10.40, 733

EFEI / BIBLIOTECA

ESTE LIVRO DEVE SER DEVOLVIDO NA

ÚLTIMA DATA CARINBADA.

2410 96

02/03/2002

23/07/03

122

09/04/93

72 7 2422

7.7.8.2005

0.9-0.9-0.3

23/09/92

20/09/12

07103117



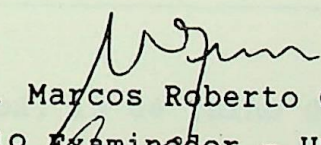
Ministério da Educação
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Reconhecida Lei 3232 05/01/1917

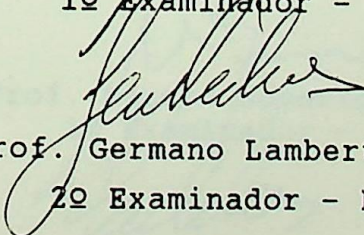
ANEXO I

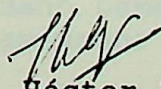
PRONUNCIAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

A Banca Examinadora, abaixo assinada, nomeada por Portaria nº 259 de 12/07/93, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: "*Modelos Espaciais de Expansão de Sistemas Distribuidores de Energia Elétrica*" apresenta pronunciamento no sentido de que o Coordenador dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola Federal de Engenharia de Itajubá solicite ao DRA (Departamento de Registro Acadêmico) a expedição do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica, na Área de Concentração de Sistemas Elétricos de Potência, satisfeitas as demais exigências regimentais, a *Hector Gustavo Arango*.

Itajubá, 13 de julho de 1993.


Prof. Marcos Roberto Gouvea
1º Examinador - USP


Prof. Germano Lambert Torres
2º Examinador - EFEI


Prof. Héctor Arango
3º Examinador - Orientador - EFEI



Ministério da Educação
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Reconhecida Lei 3232 05/01/1917

A N E X O I I

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

Título da Dissertação: *Modelos Espaciais de Expansão de Sistemas Distribuidores de Energia Elétrica*

Autor: *HECTOR GUSTAVO ARANGO*

JULGAMENTO

EXAMINADORES	CONCEITO	RUBRICA
1º	A +	
2º	A +	
3º	A +	
4º	XXXXXXXXXX	XXXXXXXXXX

Resultado Médio: Conceito A +, ou seja, _____
Aprovado com Distinção.

Observações: _____

Itajubá, 13 de julho de 1993.

Prof. Marcos Roberto Gouvea
1º Examinador - USP

Prof. Germano Lambert Torres
2º Examinador - EFEI

Prof. Héctor Arango
3º Examinador - EFEI - Orientador

A um brilhante professor,
a um homem exemplar,
a um grande amigo.
A meu pai...

-Resumo-

O tema abordado nesta dissertação é o planejamento de redes elétricas, especificamente para o segmento distribuidor de energia elétrica.

Para tal, são propostas alternativas que permitem a representação das características econômicas do consumidor, usando como referência comparativa as características de custos marginais do sistema, obtendo-se deste modo uma otimização do benefício social gerado pelo serviço, evidenciando sempre a espacialidade do planejamento da distribuição.

A primeira alternativa, consiste na criação de uma área de atendimento elétrico onde os parâmetros econômicos dos usuários do serviço são ordenados geograficamente em torno de um centro, de maneira que os consumidores mais afastados deste possuem menor capacidade em termos de renda e disposição a pagar.

A outra alternativa, parte de um enfoque probabilístico, propondo um modelo de expansão do mercado consumidor que tem como base a simulação de resultados usando sorteios aleatórios, e técnicas de análise espacial. Tal procedimento permite a visualização de prováveis configurações futuras do mercado com o objetivo de otimizar parâmetros tais como longitude dos condutores, perdas e quedas de tensão. Ao mesmo tempo, é possível adotar critérios de aceitação de carga de modo a preservar a economicidade do serviço.

-Abstract-

The subject focuses in this dissertation is the network planning, specifically for the electric energy distribution segment.

For this, two alternatives that permit the representation of consumer's economic characteristics are proposed using the system's marginal costs as a comparative reference. In this way an optimization of the social benefit produced by the service is obtained. The spaciality of the distribution planning is always evidenced.

The first alternative consists in the creation of electric attendiment area where the service users economic parameters are geographically ordered around a center. In such a way farther consumers has less capacity in terms of income and willingness to pay.

The other alternative comes from a probabilistic approach and proposed a consumer market expansion model based on a results simulation using aleatory proceedings and spatial techniques. This model permits the market configurations future visualization with the objective of optimize parameters just as net extension, losses and voltage drops. In same time, criterions of load acceptance in order to preserve the service economicity are possible to adopt.

-Agradecimentos-

Agradecer é rememorar...

Muitos são aqueles que de uma forma ou de outra tornaram possível a conclusão deste trabalho.

Lembro, de início, da oportunidade que a Pró-reitoria de Pesquisa e Extensão da EFEI me concedeu. Não posso esquecer dos professores Julio César Tibúrcio e Renato Nunes, com os quais trabalhamos no projeto que viria a ser o embrião desta dissertação. Agradeço também aos colegas de turma que me apoiaram e ajudaram, àqueles que comigo trabalham, e que julgaram importante que eu roubasse horas para poder sentar-me a escrever.

Obrigado a minha esposa e filhos, pela paciência em aceitar me dividir com uma idéia.

Sempre, obrigado a meus pais...

-ÍNDICE-

1.	Apresentação	17
2.	Modelos de Planejamento Agregado da Distribuição.	
2.1.	Considerações Gerais	25
2.2.	O Modelo da Nota Técnica 02	27
2.2.1.	A Revisão do Modelo NT-02	30
2.3.	O Modelo da Electricité de France	31
3.	O Espaço dentro do Planejamento da Distribuição.	
3.1.	Introdução : Espaço e Planejamento	37
3.2.	O Espaço Elétrico	40
3.3.	A Questão da Concentração	43
3.4.	Modelos Elementares de Concentração	46
3.5.	A Questão da Interação	50
4.	Modelos Determinísticos.	
4.1	Modelo de Otimização do Benefício Econômico Líquido	59
4.2.	Modelos Globais de Planejamento da Distribuição . .	60
5.	Modelos Estocásticos Aplicados ao Planejamento de Distribuição.	
5.1.	Introdução	77
5.2.	Metodologia do SCG : Considerações Preliminares . .	81
5.3.	Modelo de Simulação de Longo Prazo Usando o SCG . .	88
5.4.	Resumo do Funcionamento do Modelo	90
5.5.	Resultados Obtidos com o SCG	91
6.	Efeito da Interação Espacial.	
6.1.	Modelo de Expansão Gravitacional	97
6.2.	Modelo de Expansão Combinado	100
7.	Conclusões	107
8.	Referências Bibliográficas	109

-LISTA DAS FIGURAS-

- Figura [1] - Aspecto de uma isodapana
- Figura [2] - Obtenção da distância crítica no modelo de Weber
- Figura [3] - Sistema de interdependência : isopotenciais téó-ricas
- Figura [4] - Isopotenciais hipotéticas em torno de um centro real
- Figura [5] - Mapeamento de isopotenciais
- Figura [6] - Ocupação do espaço segundo a Teoria dos Círculos Concêntricos
- Figura [7] - Evolução da potência de ponta ideal
- Figura [8] - Evoluçãzo física da área de planejamento elétrico
- Figura [9] - Área padrão do Genarvre
- Figura [10] - Comparação das características dos programas de simulação da expansão do mercado consumidor
- Figura [11] - Tratamento da configuração existente na área em estudo
- Figura [12] - Número esperado de pontos de carga após T Unidades de Tempo
- Figura [13] - Matriz de informações
- Figura [14] - Aspecto inicial da tela do computador no programa SCG
- Figura [15] - Localização completada de cargas, troncos, ramais e sub-estação
- Figura [16] - Simulação efetuada com o número esperado de cargas em cada quadrícula
- Figura [17] - Mapa de probabilidades do modelo combinado

-LISTA DAS VARIÁVEIS UTILIZADAS-

A_i, A_j	- importância dos nódulos i e j , em [17] e [18];
C_o	- custo de uma unidade adicional produzida
C_{Al}	- custo de um alimentador
C_F	- custo fixo
CF_{SE}	- custo fixo de instalação de uma subestação
C_{op}	- custo de transporte da rede
CT_j	- custo de transporte até o ponto j
CT_{SE}	- custo total de uma subestação
$CTOT_j$	- custo total de produção no local j
CTM	- custo total mínimo
C_{UD}	- custo de uma unidade de distribuição
C^*_{UD}	- custo mínimo de uma UD, a partir da escolha do número ideal de troncos
d	- distância
d_{ij}	- distância do nódulo a um ponto j no espaço
D	- densidade de carga
E^*	- energia requerida pela comunidade ao custo de entrega
$E[N_i]_{comb}$	- esperança total do número de cargas (modelo combinado)
$E[N_i]_{auton}$	- esperança associada à função autônoma
$E[N_i]_{infl}$	- esperança associada à função influência
F_c	- fator de carga
F_p	- fator de potência
I	- influência de um nódulo sobre um ponto no espaço
I_w	- constante de perdas
(i_{kl})	- influência na posição (k,l) da matriz influência
I_{ij}	- grau esperado de interação entre o centro i e o centro j
I_{dj}	- isodapana de ordem j

K_w	- constante de perdas
K_{SE}	- custo marginal da SE em relação ao acréscimo de ponta (MVA a mais instalados)
K_{Al}	- custo marginal do alimentador em relação a sua extensão
L	- longitude total da rede primária
L_{Al}	- longitude total do alimentador
n_j	- número de cargas existentes na quadra j
N^*	- número ótimo de alimentadores por subestação
N_{Al}	- número de alimentadores de uma subestação
N_j	- número de novas cargas da quadra (nódulo) j
N_o	- número de cargas no início da série temporal
N^∞	- número de cargas do ponto de saturação
P	- peso locacional
P_i	- potencial de um centro i
q	- quantidade produzida ou transportada
\hat{S}^*	- potência de ponta ideal do sistema
t	- tempo
T	- tarifa média de ponta paga pelo segmento distribuidor
t_x	- taxa de transporte
x	- abscissa de um ponto de carga na matriz de influência
y	- ordenada de um ponto de carga na matriz de influência
Y	- importância genérica de um nódulo

1. APRESENTAÇÃO

"Planejar é subordinar o fato à ação".

O tema que esta dissertação focaliza é o planejamento de redes elétricas. Especificamente, dentro do setor elétrico, trata-se do sistema distribuidor, entendido como o segmento responsável pela entrega direta da energia elétrica ao usuário, e caracterizado tecnicamente, como o composto por linhas de tensão inferiores a 69 KV no subsistema primário, e tensões em 380, 220 ou 110 V no secundário, como é adotado usualmente no Brasil.

Entretanto, a característica fundamental dos sistemas distribuidores, e a que os distingue dos demais sub-sistemas elétricos, é a sua radialidade. Deste modo, ao invés de simplesmente unir distâncias entre postos de cargas, a função da distribuição é atender áreas preenchendo espaços. A noção de distância passa a ser substituída então pela de densidade : em vez de se ter distâncias mais ou menos longas, tem-se áreas mais ou menos densas, e o preenchimento dos espaços resulta uma função das características físicas, econômicas e sociais das áreas a serem atendidas.

O conhecimento deste espaço torna-se assim primordial com vistas à definição da melhor configuração do sistema, da eficiência do serviço e do suprimento ao mercado consumidor.

Parece ser difícil entender a dinâmica do planejamento de sistemas elétricos de distribuição, de características radiais, estando-se alheio as questões de espaço e distância.

Todavia, é importante notar que toda ação voltada à manutenção, reforma, eliminação ou expansão de uma parte do sistema distribuidor constitui uma tomada de decisão também econômica.

Deste modo, quer se deixar claro que não existe a decisão técnica, como é as vezes colocado, pois toda ação que afete a rede física, envolve causas e consequências de ordem econômica.

Desta forma, a compreensão plena dos conceitos e procedimentos envolvidos no planejamento de sistemas distribuidores de energia elétrica fica subordinada ao conhecimento interdisciplinar requerido pelos modelos que atuam na solução dos seus problemas, e que envolvem variáveis de natureza diversa.

Não é imediata, então, a aplicação de procedimentos extraídos da engenharia ou da economia geral. Entretanto, encontram-se referências a algumas das questões básicas referidas em artigos e livros que tratam de Economia Regional, ou, especificamente dentro desta, Economia Espacial, como em [22] e [23].

Tal ligação se dá pela ênfase dada pela Economia Regional às questões de distância e espaço, quando coloca como principal objeto de estudo a forma como se distribuem e crescem espacialmente as populações e a atividade econômica inerente a estas. Quanto a abrangência ou a pertinência dos temas envolvidos no estudo da economia espacial, ainda hoje não existe uma definição clara, embora possa se inferir que sua tendência aponta em direção de constituir uma ciência holística e interdisciplinar [22].

Como é mostrado mais adiante, parece ser mais sensato definir o espaço elétrico como um espaço não homogêneo. Esta hipótese, porém, traz consigo uma complicação adicional significativa à resolução do problema da seleção de uma estratégia ideal de atendimento. Contudo, esta dificuldade não passa de uma parte de um problema maior : o planejamento agregado da expansão do sistema distribuidor.

A ação de planejar, implica na detecção dos movimentos ocorridos em cada espaço da área de planejamento, ocasionados pelo transcurso do tempo.

Deste modo, busca-se a harmonização das variáveis técnicas e econômicas envolvidas no processo natural de evolução do sistema. Percebe-se, que a compreensão da forma pela qual o sistema se expande é relevante para iniciar a resposta a esta indagação. É necessário saber como mudam as principais variáveis, para entender as leis de crescimento espacial da área de planejamento e selecionar criteriosamente as macrovariáveis a fim de que seja possível sinalizar com clareza o caminho ótimo de desenvolvimento do sistema.

Assim, o planejamento da distribuição pode ser traduzido como a ação de estar preparado para atender as mudanças ocorridas no espaço ocupado pelo mercado consumidor final de energia elétrica, e não deve ser entendido como uma sucessão de ligações entre pontos de carga, mais como a ocupação do espaço constituído pelo mercado elétrico.

Entretanto, é preciso saber se o esforço de utilizar e aplicar metodologias de planejamento é compensador. Esta questão equivale a responder se não é mais simples apenas aguardar a ocorrência de solicitações de acréscimos de carga, e simplesmente atendê-las, utilizando os critérios técnicos adequados. Ainda, sob outro ângulo, poderia se argumentar que o planejamento é uma atividade própria do setor governamental e que busca intervir de forma a criar problemas que o mercado pode resolver. A visão perniciosa destes paradigmas leva a pensar nos grupos de planejamento como burocratas divagando e tentando adivinhar o futuro.

Não é esta visão, contudo, a mais pertinente. A atividade de planejamento, entendida como foi colocado anteriormente, constitui uma ferramenta imprescindível para qualquer empreendimento de natureza econômica. Preparar as ações futuras, como pede o planejamento, equivale, em escala maior, à reflexão antes da ação. Ainda, pela necessidade de organização e tratamento de informações, constitui uma forma de obter qualidade,

no seu sentido mais amplo.

Os males decorrentes do não planejamento podem ser avaliados ainda pelas considerações de Haddad, em [22] : "... A década de oitenta entrará na nossa História como um período em que o País, em termos práticos, abandonou as atividades de planejamento e sucumbiu-se numa sequência mal sucedida de políticas de curto prazo que se alternavam quanto ao seu conteúdo e ao seu estilo próprios...".

O planejamento da distribuição não pode ser confundido com a simples elaboração de um plano de obras. Esta confusão, decorrente da falta de conhecimento a respeito do planejamento, tem levado a grande parte das concessionárias de energia elétrica a agir de forma a condicionar o suprimento à ocorrência de acréscimos de demanda, omitindo assim qualquer caráter planejador ao método empregado, uma vez que o fato antecede a ação. Em consequência, verifica-se a falta de estratégias globais pertinentes a otimização de variáveis e procedimentos necessários a determinação de caminhos ideais entre estados subseqüentes do sistema. Embora esta omissão decorra em parte da dificuldade em conceber modelos técnico - econômicos, onde concorrem variáveis comportamentais, de natureza subjetiva e difícil avaliação com variáveis físicas maravilhosamente controláveis, a não modelagem ou o não planejamento não constitui uma solução razoável. Parafraseando Simonsen, quando discute a validade dos modelos econômicos : "...o antídoto para uma ciência inexata, não é uma lógica inexata."

Ainda, parece pertinente colocar claramente o que se quer dizer ao se falar em planejamento. Neste particular, Haddad traduz, em [22], o sentido que será dado ao termo em todo o trabalho : "...O grande potencial do processo de planejamento reside justamente na geração de alternativas específicas para o padrão de desenvolvimento, ao identificar problemas e fatores estratégicos para se atingir um conjunto de objetivos da sociedade com menores custos de oportunidade econômica e social..."

Tendo em vista estas considerações, esta dissertação objetiva introduzir em caráter exploratório alguns princípios clássicos da modelagem espacial ao planejamento da distribuição. Para isto, inicia-se montando um pano de fundo sobre a questão dos modelos existentes de planejamento da distribuição, citando as principais metodologias difundidas no Brasil, e comentando principalmente aquelas que foram de alguma forma empregadas na definição de políticas de expansão do sistema. Tem-se assim o modelo de Denton e Reys, que serviu de base para a elaboração por parte da Eletrobrás, em 1983, da Nota Técnica 02, intitulada: "Modelo Simplificado para Planejamento do Sistema Aéreo de Distribuição", e que representa o primeiro esforço organizado de estabelecer metodologias de planejamento de distribuição efetuado pelo setor elétrico no país. Ainda, relatam-se os aperfeiçoamentos introduzidos pelo modelo proposto pela CEPID-NE, efetuados após a revisão sistemática da NT-02. Por último, é focalizado o modelo proposto pela Electricité de France, EDF, empresa que influenciou os critérios de planejamento brasileiros ao ter sido escolhida como empresa de consultoria internacional no projeto vigente no contrato ECE-443. Este projeto previa a elaboração de uma metodologia de planejamento agregado da expansão para o sistema distribuidor.

Em continuação, a dissertação trata da importância do estudo da economia espacial para o planejamento da distribuição, descrevendo inicialmente alguns conceitos básicos e mostrando a aplicabilidade destes princípios, muitas vezes empregados involuntariamente nos modelos já existentes. Trata-se particularmente, de definir o espaço elétrico e de caracterizá-lo, uma vez que ele é o centro da questão para o planejamento da distribuição. Os desníveis espaciais que tornam peculiar cada área a ser estudada, são também focalizados sob a ótica do setor elétrico.

Uma vez postos estes conceitos, são descritos a seguir dois modelos básicos para aplicação no planejamento da

distribuição, e que tem, cada um dentro do seu enfoque, características espaciais.

O primeiro modelo parte da criação de uma área de atendimento elétrico onde os parâmetros econômicos dos usuários do serviço são ordenados geograficamente em torno de um centro, de maneira que os consumidores mais afastados deste, possuem menor capacidade em termos de renda e disposição a pagar. A idealização desta estrutura encontra respaldo na teoria dos círculos concêntricos, que explica a dinâmica do crescimento urbano. Deste modo, investiga-se a configuração ideal de atendimento do mercado consumidor seguindo uma trajetória de compromisso entre as exigências dos consumidores e a capacidade de oferta das concessionárias, variando-se parâmetros como a renda regional e a propensão ao consumo de energia elétrica. A abordagem deste modelo é determinística e atende as necessidades do planejamento agregado do sistema distribuidor.

O outro modelo foi idealizado com a finalidade de estudar a evolução da expansão das áreas de atendimento elétrico e fornecer, deste modo, indicações da trajetória ótima mais provável de atendimento do mercado consumidor. A base deste modelo é a simulação de diversas alternativas possíveis de configurações do mercado de energia elétrica, a partir de dois critérios fundamentais de expansão : a função autônoma de crescimento e a função de influência.

Como seu nome o sugere, o primeiro critério trata da dinâmica interna de crescimento de uma unidade caracterizada por parâmetros técnicos, econômicos e sociais, e que é assumida no caso do modelo proposto como uma quadrícula. O outro critério, busca isolar um outro tipo de componente do crescimento, a influência sofrida pelo atrito com outras unidades econômicas. A resultante da aplicação destes critérios são duas matrizes contendo informações que, sendo agregadas, constituem a base da elaboração da matriz de probabilidade do aparecimento de novas cargas. Esta última matriz

irá determinar a maior ou menor chance de localização de uma carga em uma determinada quadra, influenciando desta forma o resultado de cada simulação efetuada.

A escolha do processo de simulação como uma alternativa de antevisão dos acontecimentos futuros, neste modelo em particular, não tem a ambição de produzir uma realidade que está por vir, nem tão pouco projeta o passado, para reproduzi-lo indefinidamente. De forma coerente a que se convencionou chamar de planejamento nesta dissertação, o modelo estocástico busca a abertura de um leque de prováveis realidades futuras, onde nenhuma delas tem porque ocorrer, com a finalidade de programar diversas estratégias de atendimento ao mercado consumidor, trabalhando sempre dentro de condições de otimalidade do sistema distribuidor, do ponto de vista técnico-econômico.

Finalmente, é apresentada a conclusão da dissertação, onde se reafirma a importância da questão espacial para a elaboração de planos diretores para o segmento distribuidor de energia elétrica, especialmente no que diz respeito ao conhecimento da estrutura espacial das áreas de planejamento e a sua própria dinâmica interna e externa de evolução temporal. Enfatiza-se, todavia, a necessidade de prosseguir o desenvolvimento dos modelos propostos, com o objetivo de obter um ambiente mais próximo da realidade do planejamento elétrico, e de mais fácil manuseio por parte do usuário.

2. MODELOS DE PLANEJAMENTO AGREGADO DA DISTRIBUIÇÃO

"...o planejamento seria relativamente simples se todas as variáveis pudessem ser controladas..."

2.1. Considerações Gerais.

Antes de expor os principais modelos de planejamento existentes, é conveniente mencionar, mesmo que de forma breve, o esforço realizado para a consecução do que se denomina hoje Planejamento Agregado de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica.

Desde os primeiros intentos de organizar dados disponíveis para, em função destes, buscar alternativas convenientes para a expansão da rede do sistema, as metodologias de planejamento evoluíram paulatinamente com o transcurso do tempo, aperfeiçoando os processos já existentes, e redefinindo os próprios objetivos do planejamento da distribuição.

Deste modo, os primeiros modelos buscavam a manutenção de alguns parâmetros técnicos selecionados em níveis ideais, tomando como condição de contorno uma limitação orçamentária.

A expansão da rede era então decidida pela aplicação de critérios de análise de investimentos tradicionais a um conjunto de alternativas previamente aceitas como tecnicamente ideais.

A maior ou menor sofisticação da metodologia, diz respeito nestes casos, ao nível de detalhamento e a seleção de variáveis técnicas do problema, e à utilização de ferramentas mais ou menos possantes na resolução do mesmo.

Não demorou para se perceber que este tipo de metodologia, que poderia se denominar de solução localizada, mais

se assemelhava a um plano de obras do que propriamente ao planejamento. Era necessário responder a questões mais amplas, como de que forma a introdução de variáveis de mercado poderia influir na decisão ideal a respeito da expansão do sistema. Incorpora-se então, nesta altura, a resposta do usuário ao serviço prestado pela concessionária. Esta resposta é medida inicialmente em termos do Benefício Econômico Líquido da comunidade assitada, entendido como o ganho que as partes dessa comunidade, produtores (concessionária) e consumidores (usuários) obtém ao se realizar uma nova obra de distribuição. Esta mudança na forma de tratar o problema está bastante além de uma simples mudança de metodologias. Trata-se de um novo enfoque, no qual a concessionária torna-se inteiramente responsável pelas alterações produzidas pelo impacto das obras de expansão do sistema distribuidor, além inclusive de suas próprias conveniências. A holisticidade deste enfoque provocou também uma mudança no tratamento dos problemas de otimização associados a expansão do sistema, provocando o entrelaçamento de variáveis físicas e econômicas e transformando completamente as características do planejamento da distribuição.

Finalmente, a introdução nos modelos de planejamento de variáveis de ordem econômica e social forçou a adoção de enfoques predominantemente probabilísticos, em substituição aos modelos determinísticos que vinham sendo adotados até então.

É sempre oportuno recordar ainda que a construção de um modelo de planejamento deve levar em consideração dois aspectos fundamentais: o tamanho e diversificação da situação real sobre a qual o planejamento é praticado; e o período de tempo futuro ao longo do qual terão influência as decisões adotadas. Entretanto, quanto mais ambicioso seja o modelo em qualquer um destes sentidos, maior será a incerteza com a qual deverá conviver; no primeiro caso, porque a não linearidade das variáveis físicas e econômicas que compõem o modelo não permite a adoção de valores médios de agregação, com elevado grau de aderência; e no segundo caso, porque

na medida que o tempo avança torna-se mais difícil prever a evolução da situação real e a própria mutação das soluções técnico-econômicas em virtude das sucessivas decisões de planejamento, principalmente, em economias não estabilizadas, como vem sendo a brasileira em anos recentes.

2.2. O Modelo da Nota Técnica 02.

Como foi citado na apresentação desta dissertação, a Nota Técnica "Modelo Simplificado para Planejamento do Sistema Aéreo de Distribuição", que ficou conhecida pela denominação de Nota Técnica 02, foi publicada em novembro de 1983 sob a responsabilidade do Departamento de Planejamento e Engenharia da Distribuição, da Diretoria de Planejamento e Engenharia da ELETROBRÁS, tendo como metodologia básica o Modelo de Denton e Reys.

A representação do sistema distribuidor na NT-02, admite a existência de dois subsistemas : o subsistema primário e o subsistema secundário.

O subsistema primário é admitido como sendo formado por uma subestação central da qual partem simetricamente um conjunto de N troncos que atendem uma área de forma poligonal de tamanho A.

Para cada tronco, são consideradas ainda um número de derivações, ND, de cada uma das quais partem dois ramos em direções opostas, e perpendicularmente ao tronco.

O subsistema secundário é representado pelos circuitos de baixa tensão, ligados aos transformadores de distribuição. No modelo da NT-02, admite-se que os circuitos secundários se distribuem uniformemente ao longo dos ramos e que sua dimensão pode ser calculada efetuando o quociente entre a longitude total dos circuitos, disponível no banco de dados da concessionária, e o número total de transformadores da área em estudo.

Do ponto de vista metodológico, a NT-02 apresenta uma rotina para produzir, através de dados relativos ao sistema de distribuição existente e ao mercado consumidor, um plano de obras capaz de assegurar a operação futura deste sistema em sintonia aos critérios de planejamento adotados previamente como mais convenientes.

Esta metodologia, foi idealizada para ser aplicada inclusive em sistemas de distribuição onde a configuração do subsistema primário não é conhecida. Esta característica é importante não apenas para aplicar conceitos de planejamento a situações específicas, mas principalmente, porque uma multiplicidade de sistemas individuais podem ser estudados em uma base macroscópica, permitindo o planejamento agregado a nível regional ou nacional.

Em termos operacionais, o modelo NT-02 parte de um diagnóstico da situação inicial da área em estudo, obtido a partir da estimação de um conjunto de valores médios característicos como a energia consumida no primário, EP, o fator de carga, FC, fator de potência, FP, índice de perdas, IW, e que juntamente com dados físicos do subsistema, como o número e a capacidade dos alimentadores, permitirão verificar se o mesmo se encontra dentro das condições mínimas desejáveis de operação, que no caso, são definidas por condições de contorno associadas ao fator de utilização dos alimentadores e a queda máxima de tensão, sempre, no primário. Caso não se verifique a possibilidade do sistema suportar a demanda mantendo estes critérios, em virtude do crescimento do mercado, por exemplo, serão necessárias novas obras, que serão indicadas pelo modelo sob a forma de acréscimos no número de alimentadores que servem a área em foco.

Com relação ao secundário, a metodologia aplicada é análoga : os mesmos indicadores servem ao diagnóstico da situação, desta vez calculados para um circuito típico de configuração em forma de "H". A não tolerância do sistema às restrições de fator de

utilização e quedas de tensão, são atendidas no caso pela projeção de novos transformadores e circuitos secundários.

Ao final do processo, elaborados os diagnósticos dos subsistemas primário e secundário, e submetidos aos critérios de aceitabilidade já definidos, a rotina fornece um Quantitativo de Obras, que reflete as necessidades de acréscimos de troncos alimentadores, de transformadores, ou de remanejamento destes, para devolver o sistema à condição de operação.

Em termos de resultados, a metodologia da NT-02 tem como principal aliado a simplicidade do modelo utilizado, o que permite a aplicação das rotinas ora descritas, a partir de uma base de dados modesta. A percepção da maneira como evolue o sistema e as conseqüências das decisões de planejamento são também fáceis de visualizar, graças à simplicidade dos algoritmos de cálculo usados no programa. Contudo, se houver disponível uma base de dados completa, que forneça a configuração primária por exemplo, é possível substituir o modelo simplificado por outros mais detalhados, de maneira que os índices técnicos sejam avaliados de forma mais exata a partir de um fluxo de carga convenientemente adotado.

Resulta interessante também o tratamento dado a configuração secundária, onde é adotado um circuito típico que não necessita ter obrigatoriamente a forma antes mencionada, e são definidas características médias dele. Deste modo, trabalhando com a informação que normalmente se encontra disponível nas concessionárias, são aplicadas ferramentas de cálculo bastante simplificadas sem perdas substanciais na qualidade das respostas. Também deve ser citada a técnica de remanejamento de transformadores, baseado em parâmetros geralmente disponíveis nos registros históricos das empresas distribuidoras.

Alguns reparos podem, todavia, ser feitos à metodologia NT-02. Do ponto de vista dos indicadores técnicos, destina-se a restrição do limite térmico imposta ao carregamento do sistema, uma

vez que este limite enxerga tão somente aspectos físicos de operação. De fato, análises levando em consideração também aspectos econômicos mostram que a operação ideal do sistema acontece para níveis de carregamento muito inferiores aos ditados pelos limites térmicos. Deste modo, a aferição das perdas constitui uma variável fundamental para a avaliação do estado do sistema e a conseqüente necessidade ou não de expansão do mesmo.

Ainda com relação aos indicadores técnicos, nota-se a falta de indicadores de confiabilidade do sistema, que possam fornecer dados referentes a frequência e a duração das interrupções.

Mais uma vez, a avaliação do desempenho do sistema neste particular é fundamental para, juntamente a avaliação do custo marginal de melhora da confiabilidade, estabelecer a solução de compromisso ideal entre a concessionária e a comunidade atendida.

Finalmente, a metodologia proposta pela NT-02, propõe a seleção de obras baseando-se em critérios clássicos de análise de investimentos, de forma a se ter como saída o quantitativo de obra que apresenta o maior valor atual dentre um conjunto de alternativas possíveis. Não existe portanto sensibilidade do modelo quanto a limitação orçamentária, seja esta interpretada como uma condição de contorno, ou como uma variável para a qual se estudam seus efeitos diante de variações dentro de um intervalo coerente.

2.2.1. A Revisão do Modelo NT-02.

Após a análise detalhada do modelo proposto pela NT-02, tomando como base os estudos elaborados pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá, EFEI, e por iniciativa do então denominado Departamento de Planejamento e Engenharia da Distribuição, DEDI, da Eletrobrás, o Grupo de Trabalho de Planejamento da Distribuição, GTPL, vinculado a Comissão Especial de Programas de Investimentos em Distribuição da Região Nordeste, CPID/NE, elaborou um documento

denominado "Primeira Revisão da Nota Técnica 02". Este documento data do ano de 1987.

A intenção dos trabalhos desenvolvidos pelo GTPL, desde as revisões preliminares até o documento final, foi a de acrescentar aspectos que não tinham sido considerados na metodologia da NT-02. Entre esses aspectos, é necessário destacar o aperfeiçoamento no cálculo das perdas, incluindo metodologias para o cálculo no primário, secundário e em transformadores; a inclusão de estudos de confiabilidade, com a identificação de índices de qualidade e continuidade do serviço; a consideração de fluxos de incorporação e de migração de transformadores; o tratamento global a partir de técnicas de agrupamentos para SE's e suas áreas de influência; a consideração de limitações orçamentárias; e a introdução de conceitos econômicos que representam a interpretação global do fenômeno da expansão do sistema distribuidor.

Deste modo, a revisão da NT-02 efetuada pelo GTPL, não propõe uma modificação na estrutura metodológica da mesma, senão que funciona como um complemento à filosofia estabelecida inicialmente. O resultado de todo este trabalho mostra a preocupação com todos os aspectos básicos necessários ao planejamento da expansão da distribuição elétrica, sendo apenas desejável, talvez, a consolidação destes aspectos num corpo único, de forma a permitir maior coerência na tomada de decisões. Esta unidade viria da elaboração de um programa de planejamento agregado da distribuição elétrica, que considerasse os aspectos citados.

2.3. O Modelo da Electricité de France.

O modelo utilizado pela Electricité de France, EDF, foi proposto a Eletrobrás pela divisão internacional da estatal francesa, a EDFI, no convênio que previa a elaboração de um modelo agregado para o planejamento da distribuição de energia elétrica

para o Brasil. A experiência da EDF no planejamento da distribuição é visível pelo abundante número de documentos técnicos elaborados e que tratam dos mais diversos assuntos relacionados ao tema.

Do ponto de vista metodológico, a leitura desses documentos demonstra, desde o início, uma preocupação muito grande com o usuário do serviço elétrico. Percebe-se que, sendo a energia elétrica um insumo básico presente em quase que a totalidade das ações humanas, a não qualidade do serviço irá repercutir em toda a estrutura econômica, trazendo muitas vezes prejuízos maiores do que a economia que poderia ser conseguida não realizando melhoras no sistema distribuidor. Há então claramente, desde a formulação das primeiras questões, uma preocupação não só com a economia das empresas que prestam o serviço, mais, e em primeiro lugar, com as transformações econômicas e até sociológicas ocorridas nas áreas de influência atendidas por elas.

Como aspectos práticos desta preocupação, são colocados em primeiro lugar: a variação de tensão de fornecimento, que afeta basicamente os usuários, com conseqüências as vezes desastrosas; e o nível de perdas, que pode significar para o sistema elétrico como um todo, a necessidade de gerar, transportar e distribuir maiores potências, com o seu resultante sobredimensionamento, ou na falta deste, o sério comprometimento da sua confiabilidade [10].

O objetivo do planejamento para a EDF, espelha esta filosofia e fica claramente definido em [10]: "...é muito importante que as escolhas feitas em matéria de desenvolvimento das redes de distribuição correspondam aos melhores compromissos de curto e longo prazo, entre os investimentos, os gastos de exploração, e os riscos de falha do sistema, para as diferentes regiões. Este é o objetivo do planejamento."

Logo a seguir, menciona-se que este objetivo de planejamento é aplicável a qualquer área, sendo entretanto o campo da distribuição elétrica particularmente complexo pela

"...multiplicidade, diversidade e disseminação dos problemas e das decisões a serem tomadas." [10].

Entende-se por multiplicidade de problemas as questões relacionadas à distribuição e do dimensionamento dos recursos para investimentos ao longo do tempo. A diversidade refere-se a coexistência de problemas de "...escolhas técnicas fundamentais..." de longo prazo, como a escolha do próprio sistema de distribuição, os níveis de tensão, estrutura da rede, etc.; com uma "...multidão de decisões cotidianas...", como a ligação de um novo cliente, o remanejamento de um transformador, e outras. Dentro do intervalo entre esses "extremos", existe ainda uma série de decisões com implicação a "médio/longo prazo", como a instalação de um novo transformador nos subsistemas primário ou secundário, o reforço de um alimentador, etc.

A disseminação dos problemas é colocada como a dificuldade de , frente a enorme diversidade de redes em diferentes tipos de tensão MT e BT, e de transformadores, que alimentam uma também diversificada rede de usuários ao longo de todo o território francês (imagine-se o tamanho do problema no Brasil); conhecer efetivamente a atual rede, e as cargas que por ela circulam.

Para contemplar estes aspectos, o modelo da EDF sugere planificar a expansão de redes de distribuição apoiando-se em quatro alicerces, e que se referem aos conceitos de descentralização, coerência, adaptação aos riscos, e antecipação.

Com relação ao primeiro, coloca-se que somente a adoção de uma descentralização das tomadas de decisões será possível contornar os problemas advindos da diversidade e da disseminação. Ainda, chama a atenção para o fato do nível de descentralização ser função do tipo de problema a resolver, exemplificando com a diferença entre o nível de decisão referente à ligação de um transformador de alta para média tensão, e a ligação de um novo cliente à rede BT.

A coerência é colocada, em última instância, como o estabelecimento de um corpo doutrinário e metodológico, baseado em uma visão agregada da rede elétrica, e apoiado sobre princípios técnicos e econômicos.

Diante da multiplicidade dos problemas, coloca-se a necessidade de adaptar o horizonte de estudo aos riscos de cada decisão. Trata-se de se servir dos meios de estudo que melhor representem o compromisso entre a complexidade do problema e os custos desses meios, de modo a evitar detalhamentos inúteis em problemas de pouca relevância, ou deixar de tratar com a devida atenção outros realmente importantes. Estes meios devem auxiliar a tomada de decisões, de forma a complementar os princípios técnico-econômicos, e facilitar a descentralização.

Talvez o último alicerce do modelo de planejamento da EDF, seja sua pedra de toque. De fato, a antecipação, como simplesmente é denominada nos estudos, constitui uma preocupação básica do modelo, quando se coloca que a eficácia em matéria de distribuição é conseguida a partir do momento que a rede pode se adaptar de forma consistente às necessidades "quantitativas" e "qualitativas" dos usuários, e para isto, é fundamental antecipar-se a estas necessidades. A antecipação é concebida em dois níveis. No nível global "...o conjunto dos princípios técnico-econômicos, e das escolhas técnicas, deverá se adaptar da melhor maneira possível às evoluções externas, como necessidades de qualidade dos usuários, evolução do consumo, tecnologias disponíveis e equipamentos..."

A nível local "...o conhecimento das redes e das cargas deve ser suficiente para poder ter conhecimento de um problema, estudá-lo, decidir, efetuar os trabalhos, e assim resolvê-lo, antes que os usuários o percebam..."

Com a finalidade de concatenar os diversos aspectos mencionados, o modelo de planejamento da EDF baseia-se no princípio do esquema diretor (schéma directeur). O esquema diretor, ou

espinha dorsal do planejamento no modelo EDF, deverá subsidiar as decisões de curto e curto-médio prazo, com indicações sobre a evolução futura da rede. Tais indicações dizem respeito à localização de novas Subestações, quando estas irão surgir, etc.

Com a finalidade de conhecer estes aspectos, são efetuadas simulações ou ensaios de previsão da evolução do consumo a médio e longo prazo, e a seguir, sobre o cenário resultante, é investigado o desenvolvimento da rede que assegure o melhor compromisso entre os investimentos, as perdas, e os diferentes aspectos da qualidade do serviço.

Estas simulações são efetuadas com a intenção de estabelecer leis gerais de comportamento dos parâmetros técnicos e econômicos, e que mais tarde, servirão de base para a definição de montantes de investimentos e dos estados do sistema determinados pelos primeiros.

Deste modo, a metodologia de planejamento da EDF, constitui um corpo de conhecimentos de aplicabilidade técnica com bastante unidade, além de espelhar uma filosofia voltada para o crescimento harmônico entre as obras de distribuição e o universo socio-econômico que as circundam. Quanto à aplicabilidade ao caso brasileiro, parece que uma simples adaptação de metodologia não basta. De fato, as margens de validade de muitas relações tendem a ser seriamente violadas quando dados relativos a algumas regiões brasileiras alimentam o modelo francês. Entretanto, considera-se que a contribuição em termos de conceitos e de posicionamentos do modelo EDF deve permear qualquer tentativa de elaboração de uma metodologia de planejamento da expansão do sistema distribuidor a ser aplicada no país.

3. O ESPAÇO DENTRO DO PLANEJAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO

"...nenhuma característica do sistema distribuidor o diferencia tanto dos demais sistemas elétricos quanto a sua radialidade..."

3.1. Introdução : Espaço e Planejamento.

Ao tratar do planejamento de redes elétricas, principalmente dentro do segmento distribuidor, resulta conveniente considerar alguns conceitos desenvolvidos dentro da economia espacial. Esta idéia provém da constatação da importância das questões de espaço e distância para a dinâmica do desenvolvimento de sistemas de características radiais, como é o caso da distribuição.

Cabe a economia espacial investigar as razões da localização da atividade econômica dentro de uma região, preocupando-se primordialmente em determinar as causas da dispersão ou da concentração, bem como estabelecer padrões de distribuição desta atividade.

Segundo Hoover¹, a economia espacial é uma tentativa de responder as indagações de que tipo de atividade econômica está aonde e por quê ali se localiza. Segundo Haddad [17]: "Cumprir a análise espacial estudar os tipos específicos de atividades econômicas, sua localização em relação a outras atividades econômicas, ou seja, questionar os problemas relativos a proximidade, concentração dispersão das atividades e as semelhanças

1. (Op. cit. em 17)

ou diferenças dos padrões de distribuição geográfica dessas atividades".

A economia espacial possui dois níveis de observação, de acordo a sua finalidade. O nível macrogeográfico preocupa-se com questões ligadas a unidades administrativas, regiões ou áreas metropolitanas. O nível microgeográfico trata de locais específicos como áreas, zonas, etc.

Quanto à análise espacial, é feita uma distinção entre a análise regional e a análise locacional. A análise regional preocupa-se com o estabelecimento de padrões locais ou a organização das estruturas espaciais. Para tal utiliza-se de modelos agregados de desenvolvimento e equilíbrio econômico, aplicando técnicas extraídas da macroeconomia, de modo que as variáveis envolvidas são rendas, emprego, multiplicadores de renda, etc.

A análise locacional possui um nível de agregação microeconômico. Utiliza modelos de otimização objetivando maximizar lucros ou benefícios, minimizar custos, etc. incorporando aos modelos a variável distância. Portanto, estuda a localização de eficiência máxima dentro de uma área.

Ao se tratar da análise espacial, a primeira preocupação é a definição do espaço ou da região na qual se pretende planejar. Do ponto de vista finalístico, podem ser tomadas as palavras de Walter Stohr² : "O delineamento (de uma região) não passa de um exercício acadêmico, a menos que uma função, ou propósito específico, seja determinado. O espaço é um elemento contínuo e qualquer espaço parcial é uma simplificação seletiva, implicando um propósito ao incluir algumas coisas e excluir outras".

Então, do ponto de vista do planejamento da distribuição elétrica, o espaço ou região pode ser pré-definido, pela definição do propósito, como mencionado por Stohr, constituindo regiões

2. (Op. cit. em 17)

elétricas com características econômicas próprias diferentes de outro tipo de divisão, feita por critérios políticos, administrativos ou econômicos, e que portanto atendem a outras finalidades.

Ainda, é fundamental a idéia colocada por Isard³, de que o conceito de região não esgota na concepção de uma realidade concreta, podendo, outrossim, se constituir em um "conceito abstrato" [31].

De fato, se compreende por este mecanismo a descontinuidade pontual de uma região (espaço) que passa a ser constituída não pela acumulação de pontos contíguos, e sim pelo agrupamento de características semelhantes. Neste particular, a idéia é reforçada pelo professor Francois Perroux⁴, quando conceitua os espaços "econômicos" e os espaços "geoeconômicos".

Entende-se por espaço econômico uma estrutura de atributos relacionados referentes a condições de ordem econômica, social ou política. Como tal, formam uma construção abstrata, caracterizada por apresentar "n dimensões", estando deslocados no espaço. Ainda, os espaços econômicos podem ser classificados, segundo Perroux, como :

- espaços homogêneos.
- espaços polarizados.
- espaços programa.

Entende-se por espaço homogêneo [31], aquele que possui, para as variáveis definidas que o configuram, "características semelhantes".

O espaço polarizado é heterogêneo, na medida em que se tem dentro dele pontos de concentração, ou nódulos, que possuem uma hierarquia de grau superior aos demais, sendo os primeiros aqueles

3,4 (Op. cit. em 17)

que impõem a dinâmica do crescimento, numa relação de "dominação".

Por último, o espaço subordinado a um plano ou programa é entendido como aquele que está sujeito a uma ação centralizadora, que pode ter diversos objetivos. Entretanto, uma vez definido este objetivo, as forças agem harmônicamente ao poder central para a consecução da meta estabelecida.

Desprende-se do que foi colocado, que uma região possui obrigatoriamente um espaço. Porém, a recíproca não é necessariamente verdadeira, uma vez que a definição de espaço pode ser "deslocada" da idéia de espaço físico, entendido como um conjunto de "pontos contínuos e contíguos" [17]. Assim, a classificação de regiões segue aquela adotada para os espaços econômicos.

3.2. O Espaço Elétrico.

Uma vez postos estes conceitos, a indagação que vem a luz é a de qual o tipo de espaço mais aderente a uma região elétrica de planejamento.

Do ponto de vista da homogeneidade, existem modelos propostos de identificação de áreas com características minimamente divergentes, usando-se técnicas como variáveis padronizadas (rank), ou análise fatorial, como pode ser visto em [12].

A primeira técnica consiste na disposição matricial de regiões e atributos (ou variáveis) sendo cada elemento da matriz uma posição de ordinalidade (ou ranking). Na escolha das variáveis existem dois aspectos a considerar, o primeiro refere-se a escolha do peso de cada uma delas, e que deve ocorrer previamente a hierarquização das regiões. O segundo é a necessidade de se estabelecer, também antes de qualquer decisão final, os graus de correlação de ordem das variáveis. A finalidade deste cálculo é se ter uma noção da diversidade dos aspectos encontrados pela seleção inicial de atributos das regiões [31]. Uma vez observados estes

aspectos, a regionalização é realizada somando-se os rankings das variáveis (soma das linhas da matriz) e depois efetuar uma divisão considerando a ordem (quartis, quintis, decis, etc.).

No caso da análise fatorial, busca-se identificar grupos homogêneos, ou famílias de subestações, de modo a tornar as variabilidades intergrupos e intragupos as menores possíveis. Evidentemente, esta ordenação aplica-se a espaços destituídos de localização física, com o objetivo de adotar tratamentos específicos para cada família (pode-se alongar mais a discussão).

Embora esta construção esteja perfeitamente inserida na temática que foi citada, vale a pena observar as ponderações de Boudeville, quando "insiste na necessidade, do ponto de vista operacional e prático, de situar geograficamente as regiões, de tal modo que as análises socio-econômicas e o planejamento regional dessas áreas se refiram de modo efetivo aos habitantes dessas regiões" [17]. Deve-se colocar que esta filosofia espelha o pensamento dos teóricos da economia espacial ditos pragmáticos.

Desde que considerada pertinente, tal observação aponta para a definição de uma região elétrica sensível a geografia. Como a definição desta região está inserida dentro de um critério finalístico, que é a própria existência da rede e suas características, parece difícil imaginar a rede elétrica como sendo homogênea. Ao contrário, tratar-se-á de uma região polarizada, cuja dinâmica interna e de importância básica na definição da política de expansão mais adequada. Meyer⁵, contudo, refere-se ao fato de que o conceito de homogeneidade é relativo, não existindo uma fronteira exata entre a região homogênea e a região heterogênea. Trata-se, em todo caso de definir de alguma forma o grau de homogeneidade de uma região, que, sendo fraco, indica a conveniência de se considerar a região como heterogênea.

5. (Op. cit. em 17)

Richardson [31] observa a este respeito : "contudo, a característica mais evidente da economia espacial é sua não homogeneidade". Ainda mais adiante : "A aceitação da falta de uniformidade na economia espacial e o reconhecimento de que ela pode ter significado econômico, conduzem-nos ao conceito de regiões nodais ou polarizadas".

Uma forma de compreender a acumulação ou concentração em alguns pontos, é a observação dos fluxos econômicos dentro da região. A convergência de maior número de fluxos, ou a chegada de fluxos mais fortes (intensos) dá lugar a formação de pontos hierarquicamente dominantes, os nódulos. Estes pontos, por sua vez, possuem uma região circundante de influência, que varia em função direta a importância do nódulo. Esta idéia é tratada de forma mais direta em [14], quando trata da hegemonia metropolitana, dentro da parte de Ecologia Urbana. Gist coloca: "...Sob certos aspectos, a organização em grande escala foi tão importante quanto os transportes e comunicação no desenvolvimento regional. O crescimento do princípio de cadeias comerciais no comércio, nas finanças e em certos tipos de serviços levaram a influência da metrópole até o interior mais remoto. Em consequência, a metrópole exerce um controle diretor sobre as funções econômicas desempenhadas nas comunidades externas...". Ainda, "...Mesmo os estabelecimentos que não fazem parte de uma cadeia ordinária são altamente dependentes de uma organização central cujas diretrizes determinam as espécies de mercadorias com que operam, os preços e outras condições de venda. Muitas lojas, embora aparentemente independentes, não passam as vezes de elos de uma organização geral cujo quartel-general estabelece os métodos de distribuição das mercadorias na região."

A hegemonia metropolitana, como coloca Gist, corresponde a estrutura nodular da organização espacial da economia, explicada pela Teoria do Lugar Central, formulada inicialmente por Losch, em 1954 [17].

O estudo deste tipo de organização regional, é feito a partir de duas técnicas básicas: os modelos gravitacionais e a análise de grafos.

Os modelos gravitacionais postulam uma lei de aplicabilidade geral segundo a qual a intensidade dos fluxos e função direta da importância (tamanho) do nóculo e inversa da distância deste a outros pontos. Novamente Gist, em [32], aborda a questão de forma direta: "...A relação de um centro metropolitano com a região circundante é também influenciada pelo tempo e custo das viagens, pela expedição de mercadorias e transmissão de idéias e informações. A distância tempo-custo é variável, dependendo muito da natureza do transporte e das facilidades de comunicação, bem como das despesas envolvidas no seu uso. Em geral a distância computada em termos de tempo é decrescente."

A outra técnica, procura estabelecer a associação entre pontos dentro da região e a partir desta, identificar quais os fluxos que devem resultar mais fortes. A idéia é construir uma matriz de fluxos, e reduzir a rede selecionando o fluxo mais forte para dentro e para fora decada centro, trabalhando com um grafo binário.

3.3. A Questão da Concentração.

A questão fundamental, entretanto, não se prende ao problema do funcionamento dos fluxos e sim a indagação do motivo pelo qual a ocupação do espaço não se distribui uniformemente. Melhor ainda: porque, dentro do modelo econômico predominante, parece estrategicamente mais vantajosa uma estrutura concentrada do que uma estrutura dispersa. Ainda, como se reproduz ou realimenta o processo de aglomeração, a partir de uma organização já existente.

O professor Carlos Maurício Ferreira, em [17], afirma: "Um fato evidente, mas que nem sempre é considerado em todas as suas consequências, é que as atividades econômico-sociais ocupam um dado lugar no espaço geográfico e aparecem concentradas em alguns pontos desse espaço. Conhecer as causas e as repercussões dessas ocorrências vem se tornando indispensável para o planejamento econômico e social."

Assim, torna-se necessário analisar, até do ponto de vista histórico, se sempre foi verificado o padrão concentracionista, ou se existiram ciclos de concentração e de dispersão da atividade econômica.

Os trabalhos a respeito do assunto, listam uma série de razões que procuram sustentar a descontinuidade dentro do espaço geográfico. Hoover e, mais tarde, Isard, mencionam como principais vantagens da aglomeração: maior disponibilidade de mão-de-obra, melhores oportunidades comerciais, economia de custos de transportes, proximidade dos centros de lazer e cultura, comunicação mais fácil, etc. Entretanto, Perroux e Hirschman apontam como razão primordial a interrelação destas vantagens. "Por motivos desta natureza para muitas firmas as vantagens dos locais urbanos são esmagadoras, oferecendo os grandes centros economias externas não encontradas em unidades menores".

É possível pensar ainda em razões de ordem não econômica, ou não predominantemente econômica do modelo concentracionista.

Históricamente, os primórdios das aglomerações humanas se remontam ao período Mesolítico, situado entre 12.000 e 10.000 a.C. Esta etapa do desenvolvimento humano corresponde a uma fase de transição entre o homem predador e o homem produtor do seu próprio sustento. A característica da produção passa a ser possível a partir da organização, entendida como a ação coordenada das atividades, voltada neste caso para a atenção das necessidades primárias do homem. Lê-se, num trecho de [22]: "...A pesca

favoreceu um início de aglomerações permanentes (sedentarismo) nas localidades ao longo do litoral onde também se instalaram. A necessidade de um abrigo, nessas regiões, gerou a palafita, habitação sobre estacas, construída sobre os lagos."

É entretanto no período Neolítico, que inicia em 10.000 a.C. e se prolonga até o início da idade dos metais, em 4.500 a.C., que se concretizam as mudanças no comportamento humano iniciadas alguns milênios atrás. Entre as características mais importantes deste período é citada a "...formação de aldeias sedentárias que serviam como centros comerciais e religiosos e que mais tarde se transformaram em vilas e cidades (urbanização)." Ainda em [22], é citado de forma bastante conclusiva o processo de evolução associado a concentração humana : "...Grandes mudanças ocorreram nos modos de pensar e agir do homem neolítico que, a partir de então, tinha sua auto-suficiência assegurada... a sobrevivência do homem se amplia e o aumento populacional é evidente, formando-se grandes aglomerados." E mais adiante: "Ao longo dos rios e dos grandes lagos estabeleceram-se, inicialmente, grupos de coletores e posteriormente de agricultores, permitindo o seu desenvolvimento. O Nilo, o Tigre e o Eufrates ofereceram condições para a concentração populacional, no seio da qual eclode esse período."

A forma pela qual os grupos humanos se constituíram e organizaram em locais fixos, variou de forma significativa durante estes períodos e durante a história do homem até nossos dias. Esta questão é rotulada na literatura científica de "Padrões de Aldeamento", que na definição de Hoebel e Frost, citada em [22], é: "... a acomodação espacial de subgrupos de uma sociedade em relação uns com os outros, com seus recursos ambientais e com as outras sociedades".

Do ponto de vista sociológico, alguns autores, como Cooley, em [21], se referem ao oposto da concentração de atividades ou mesmo de existências, de modo taxativo. Num trecho de [21], referindo-se à Teoria Orgânica de Cooley, lê-se: "...Fundamenta

sua posição dizendo que o indivíduo não tem existência isolada, não vive a margem de seus semelhantes, a tal ponto que a autoconsciência é inseparável da percepção da sociedade ou consciência social. O indivíduo dificilmente pode pensar em si, desligado do grupo social de que faz parte."

Referencia-se basicamente neste trecho a idéia do homem como um ser social, cuja existência fora de um grupo é, no mínimo difícil. Esta idéia é aceita naturalmente, sem maiores fundamentos a não ser a observação da maneira como os seres humanos procuram se organizar. No trecho final, é extremamente importante perceber a idéia de imagem, ou referencial, que o indivíduo precisa ter a partir do convívio junto a outros indivíduos. É a partir deste "espelho" que será possível obter uma identidade individual, grupal, e finalmente uma organização que permita executar atividades econômicas, sociais, etc.

3.4. Modelos Elementares de Localização.

O primeiro cientista a teorizar sobre os problemas da localização foi Alfred Weber. O seu modelo de concentração da atividade econômica, parte da definição de dois conceitos fundamentais.

O peso locacional, segundo Weber, é o peso total de todos os insumos que devem ser transportados ao centro de produção, com o objetivo de transformá-los em produtos acabados (podem ser bens finais ou intermediários), dividido pelo número de unidades produzidas. Deste modo, o peso locacional indica, por unidade produzida, o quantitativo de insumos "trazidos" até o centro de processamento.

O segundo conceito básico é o de isodapana, definida como o lugar geométrico dos pontos que representam igual custo de transporte. Assim, partindo de um ponto de custo de transporte mínimo, e considerando o transporte possível em todas as direções

a taxas idênticas, uma isodapana pode ser representada graficamente como um círculo. Fig. [1].

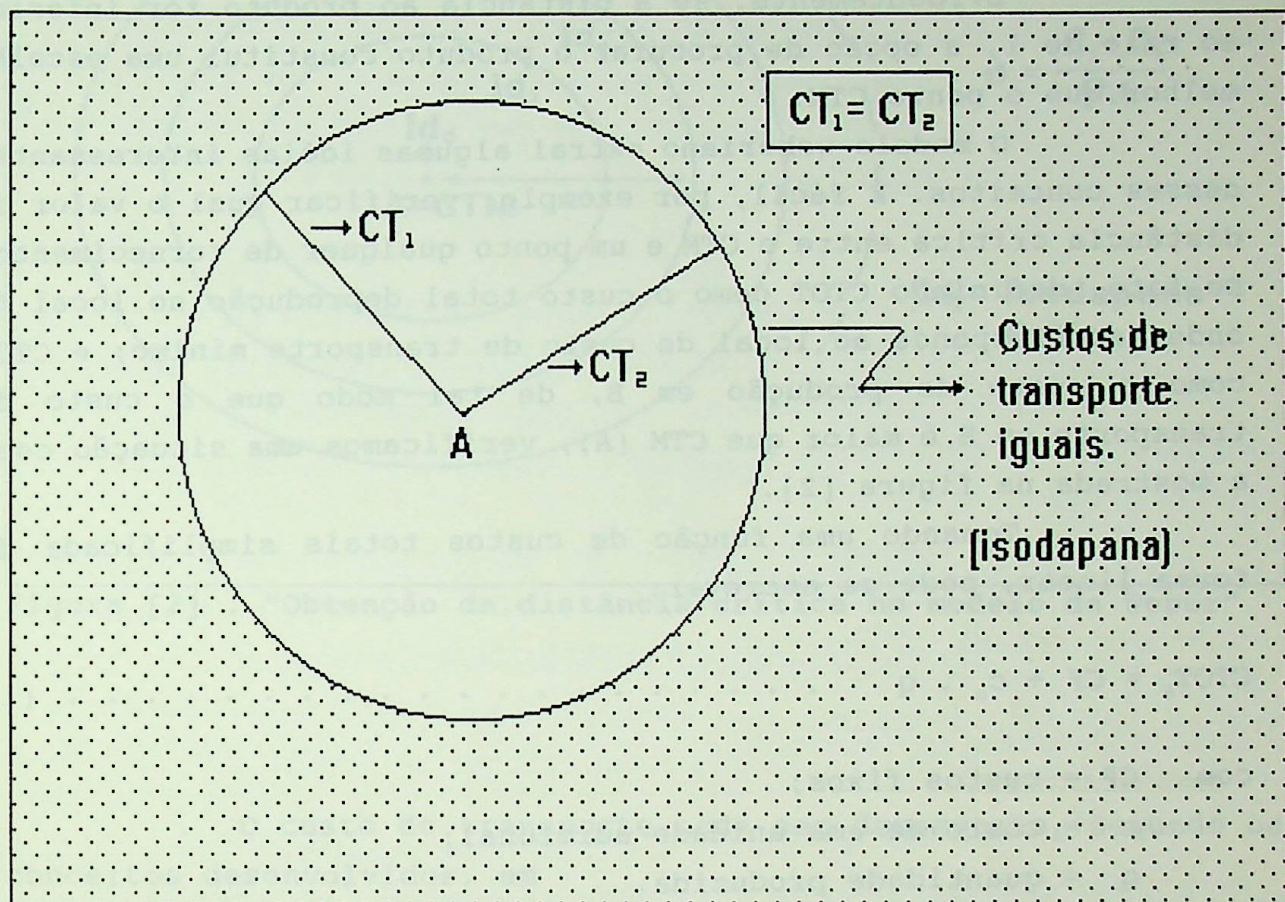


Figura [1] : "Aspecto de uma isodapana"

Evidentemente, pelo que foi exposto, as isodapanas que representam diferentes níveis de custos de transporte constituem círculos concêntricos (sem tangência ou cruzamentos entre eles) em relação ao ponto de CTM. O conjunto destas isodapanas constitui um mapa de indiferença em relação aos custos de transporte.

Trabalhando com estes conceitos um pouco mais, Weber desenvolve a idéia de isodapana crítica. Entende que se as

economias conseguidas ao se buscar um produto fora do ponto CTM forem iguais a economia de transporte numa isodapana I circundante a este, esta será uma isodapana crítica.

Evidentemente, se a distância ao produto for inferior ao raio de I, a opção de procurar o produto constitui uma escolha melhor que o ponto CTM.

O modelo weberiano extrai algumas idéias interessantes desses conceitos. É fácil, por exemplo, verificar qual o valor da distância crítica entre o CTM e um ponto qualquer de fornecimento. De fato, definindo CTOT como o custo total de produção no local A, onde A corresponde ao local de custo de transporte mínimo; e CTOT como o custo de produção em B, de tal modo que o custo de transporte em B é maior que CTM (A), verificamos uma situação como a mostrada na figura [2].

Tomando uma função de custos totais simplificada de forma linear, pode se escrever:

$$CTOT_A = CF + c_o \cdot q \quad (1)$$

com CF = custos fixos;
 c = custo de uma unidade adicional;
 q = quantidade produzida.

Considera-se ainda que CTM = 0, de modo que não há despesas com transporte. Por outro lado,

$$CTOT_B = CF + c_1 \cdot 1 + CT \quad (2)$$

corresponde ao mesmo custo fixo, mais um custo variável, sendo que $\partial CTOT / \partial q$ em B é menor do que em A, refletindo o benefício da mudança de produção para este ponto. Ainda, acrescenta-se a parcela de custo de transporte, CT, sendo CT > 0.

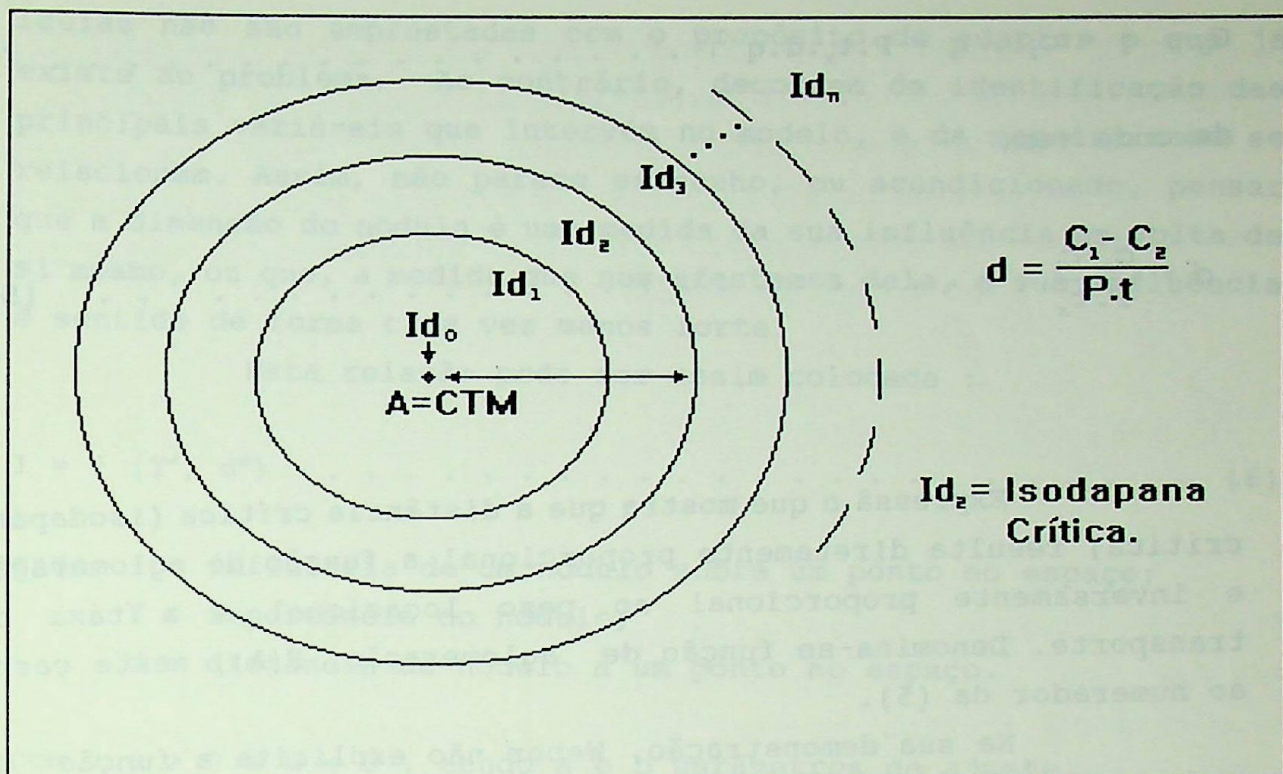


Figura [2] : "Obtenção da distância crítica no modelo de Weber"

O custo de transporte pode ser decomposto, segundo os conceitos desenvolvidos, em

$$CT = P.T_x.D.q \dots\dots\dots (3)$$

onde: P = peso locacional;
 t_x = taxa de transporte;
d = distância percorrida;
q = quantidade transportada.

Tem-se a distância crítica quando as vantagens da aglomeração igualam as desvantagens dos custos de transporte. Isto é,

$$C_0 \cdot q - C_2 \cdot q = P \cdot t_x \cdot d \cdot q \dots \dots \dots (4)$$

de onde vem,

$$d = \frac{C_0 - C_1}{P \cdot t_x} \dots \dots \dots (5)$$

Expressã o que mostra que a distância crítica (isodapana crítica) resulta diretamente proporcional a função de aglomeração e inversamente proporcional ao peso locacional e a taxa de transporte. Denomina-se função de aglomeração, $F(A)$, neste caso, ao numerador da (5).

Na sua demonstração, Weber não explicita a função de custos, e trabalha com uma $F(A)$ teórica. Ainda, trabalhando com CF 's diferentes, a validade do modelo permanece.

3.5. A Questão da Interação.

Uma vez constatada a não homogeneidade do espaço em termos de distribuição da atividade econômica - pela existência de descontinuidades com alternância de espaços polarizados, os nódulos, e espaços vazios - cabe partir para a análise de como as forças concentradas interagem umas com as outras, propiciando mudanças de caráter não autônomo nesses centros.

Segundo o professor Carlos Maurício Ferreira, em [17], existem basicamente duas linhas de análise desta questão : os Modelos Gravitacionais e de Potencial, e as Técnicas de Análise de Fluxos Intra-regionais e Inter-regionais.

Os Modelos Gravitacionais de interação espacial são uma aplicação geral das leis usadas para campos elétricos, Lei de Coulomb, e atração de corpos, 2ª lei de Newton. Entretanto, estas

idéias não são emprestadas com o propósito de adaptar o que já existe ao problema. Ao contrário, decorrem da identificação das principais variáveis que intervêm no modelo, e da maneira como se relacionam. Assim, não parece estranho, ou condicionado, pensar que a dimensão do nódulo é uma medida da sua influência em volta de si mesmo, ou que, a medida que nos afastamos dele, a sua influência é sentida de forma cada vez menos forte.

Esta relação pode ser assim colocada :

$$I = f (Y^a, d^b) \quad (6)$$

onde: I = influência de um nódulo sobre um ponto no espaço;
Y = importância do nódulo;
d = distância do nódulo a um ponto no espaço.

com : a > 0 e b < 0 , sendo a e b parâmetros de ajuste.

A teoria clássica dos modelos gravitacionais, assim como é apresentada em [17] e [31], propõe uma expressão análoga às das leis físicas. Assim a função que explica a influência entre dois nódulos é posta, em [31] :

$$I_{ij} = \frac{k \cdot A_i^a \cdot A_j^b}{d_{ij}^c} \quad (7)$$

A expressão foi literalmente transcrita de [31], cabendo apenas mencionar que as importâncias dos nódulos estão sendo denotadas neste caso por Ai e Aj, que K é uma constante de ajuste, assim como os parâmetros exponenciais a, b e c.

É interessante notar também o cuidado que o autor teve em [31] quando chama a variável I_{ij} de "grau esperado de interação

entre o centro i e o centro j", ressaltando o caráter não determinístico do modelo gravitacional. Quanto à estimativa de interação de um centro com o conjunto da totalidade dos centros, Richardson fala em potencial em i, ou P_i . Para obter o valor de P_i , é necessário calcular a soma de todas as interações do centro i com os demais centros. Tem-se então:

$$I_{i1} + I_{i2} + I_{i3} + \dots + I_{in} = \sum_{j=1}^n I_{ij} \cdot \dots \dots \dots (8)$$

lembrando da (7), fica

$$\sum_{j=1}^n I_{ij} = K \cdot \sum_{j=1}^n \frac{A_i^a \cdot A_j^b}{d_{ij}^c} \cdot \dots \dots \dots (9)$$

de onde vem,

$$\frac{\sum_{j=1}^n I_{ij}}{A_i^a} = k \cdot \sum_{j=1}^n \frac{A_j^b}{d_{ij}^c} \cdot \dots \dots \dots (10)$$

chamando o potencial de um centro i de P_i , tem-se

$$P_i = \sum_{j=1}^n \frac{I_{ij}}{A_i^a} \cdot \dots \dots \dots (11)$$

ou então,

$$P_i = K \cdot \sum_{j=1} \frac{A_j^b}{d} \cdot \dots \dots \dots (12)$$

Citando A.J.Wilson, Richardson coloca, em [31] "...Realmente, não é fantasioso sugerir que os modelos gravitacionais proporcionam uma abordagem universal a interpretação das regiões nodais." Ainda : "... Deve se ressaltar, contudo, que os modelos gravitacionais não são deterministas. Eles não otimizam, mas ao invés predizem o que é provável venha a acontecer. Interessam-se pela interação esperada e tem uma ligação óbvia com a teoria das probabilidades. Isto significa que os modelos gravitacionais representam antes uma teoria do comportamento do que de otimização."

Com relação as unidades escolhidas para medir as variáveis do modelo, existe um bom número de opções. A distância entre os centros pode corresponder, por exemplo, um vetor de segunda ordem ligando de forma direta os dois centros. É possível, e mais realista, considerar a distância efetiva entre os dois centros, entendida como a distância que se deve percorrer desde um centro até o outro. Ainda, existindo mais de um caminho, a distância pode a composição de todas as rotas possíveis, devidamente ponderadas pelo tráfego associado a cada uma delas.

A importância do centro deverá ser avaliada por uma variável, ou um conjunto de variáveis, que estejam relacionadas ao problema que está sendo tratado. Normalmente, em estudos demográficos, a variável escolhida é a população da área, ou a renda regional. Entretanto, outras alternativas são possíveis. No modelo gravitacional de expansão do mercado consumidor de energia elétrica proposto no capítulo 5, uma medida da importância do nódulo será dada pela sua demanda elétrica. Ainda, de acordo a [31], pode ser escolhida uma "cesta" de variáveis, devidamente ponderadas, para se atribuir importância a um centro.

Mais adiante, ao tratar dos possíveis usos dos modelos gravitacionais, Richardson afirma : "... no primeiro caso poderíamos ser capazes de empregar os modelos gravitacionais para identificar os nódulos dominantes numa região urbana altamente complexa. No segundo, se as regiões periféricas, como parece plausível, participarem menos do comércio inter-regional do que as regiões centrais, então os conceitos gravitacionais podem ser utilizados num modelo de simulação do comércio inter-regional."

Uma vez efetuada a estimativa do potencial de cada centro, é possível construir um mapa contendo a representação no espaço dos diversos níveis de influência de cada centro em volta de si próprio. Os pontos circundantes de um determinado centro, e que possuem o mesmo potencial, são denominados de isopotências, e as curvas formadas por estes pontos, de isopotenciais.

O conjunto de curvas isopotenciais resulta num sistema de interdependência, como é mostrado no mapa da figura [3].

A figura [3] mostra um mapa teórico, onde o espaço é considerado um meio com igual permissividade em todas as direções a partir do centro. Assim, o decréscimo de potencial ocorre de forma perfeitamente uniforme a partir do nódulo dando origem a um conjunto infinito de círculos concêntricos ao redor deste, cada um representando um valor de influência.

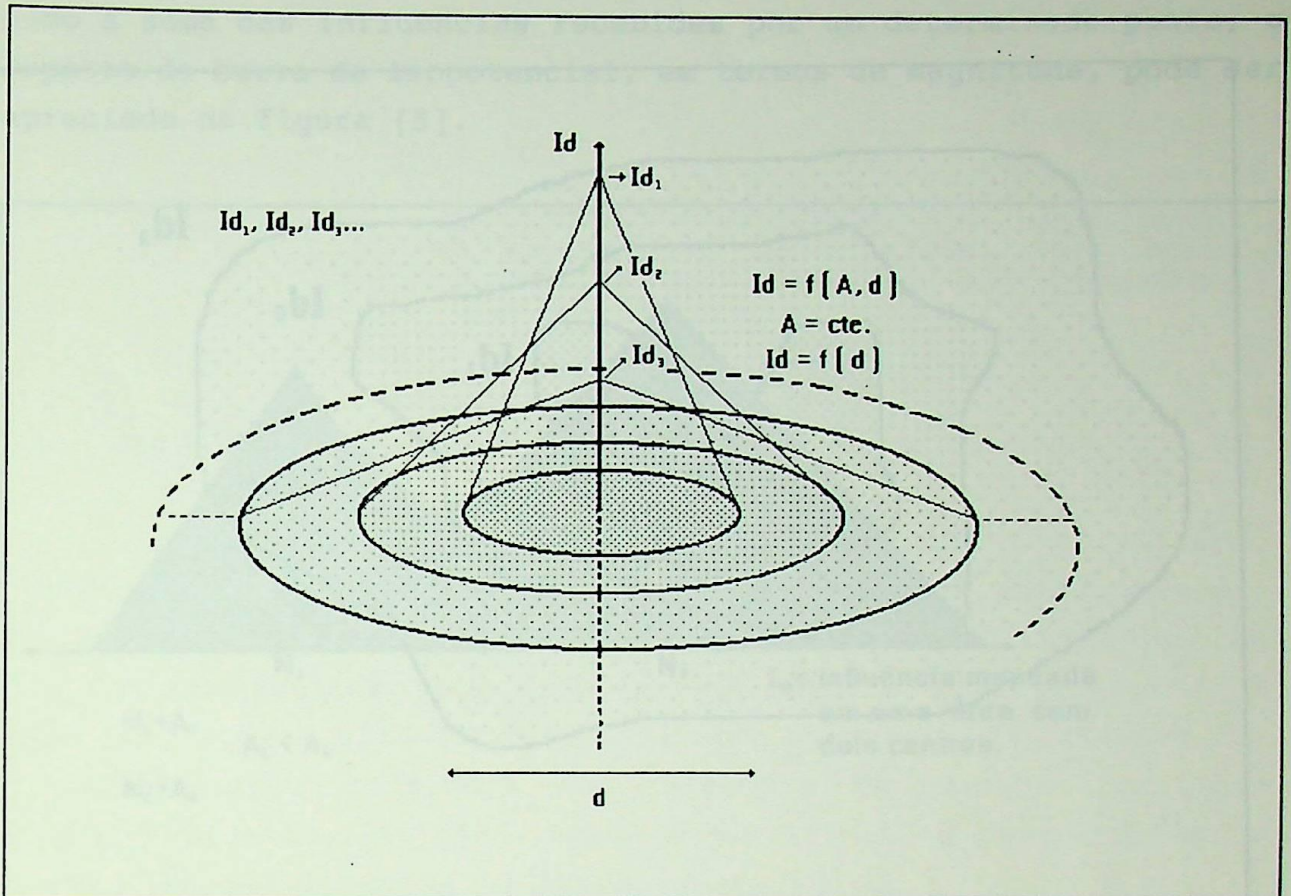


Figura [3] : "Sistema de Interdependência : Isopotenciais Teóricas"

Entretanto, a ligação entre pontos contíguos nem sempre permite que a comunicação flua de modo uniforme, em consequência de obstáculos físicos, como a topografia ou a hidrografia do terreno, obstáculos criados pelo homem, ou por facilidades de comunicação tais como caminhos, estradas, atalhos etc.

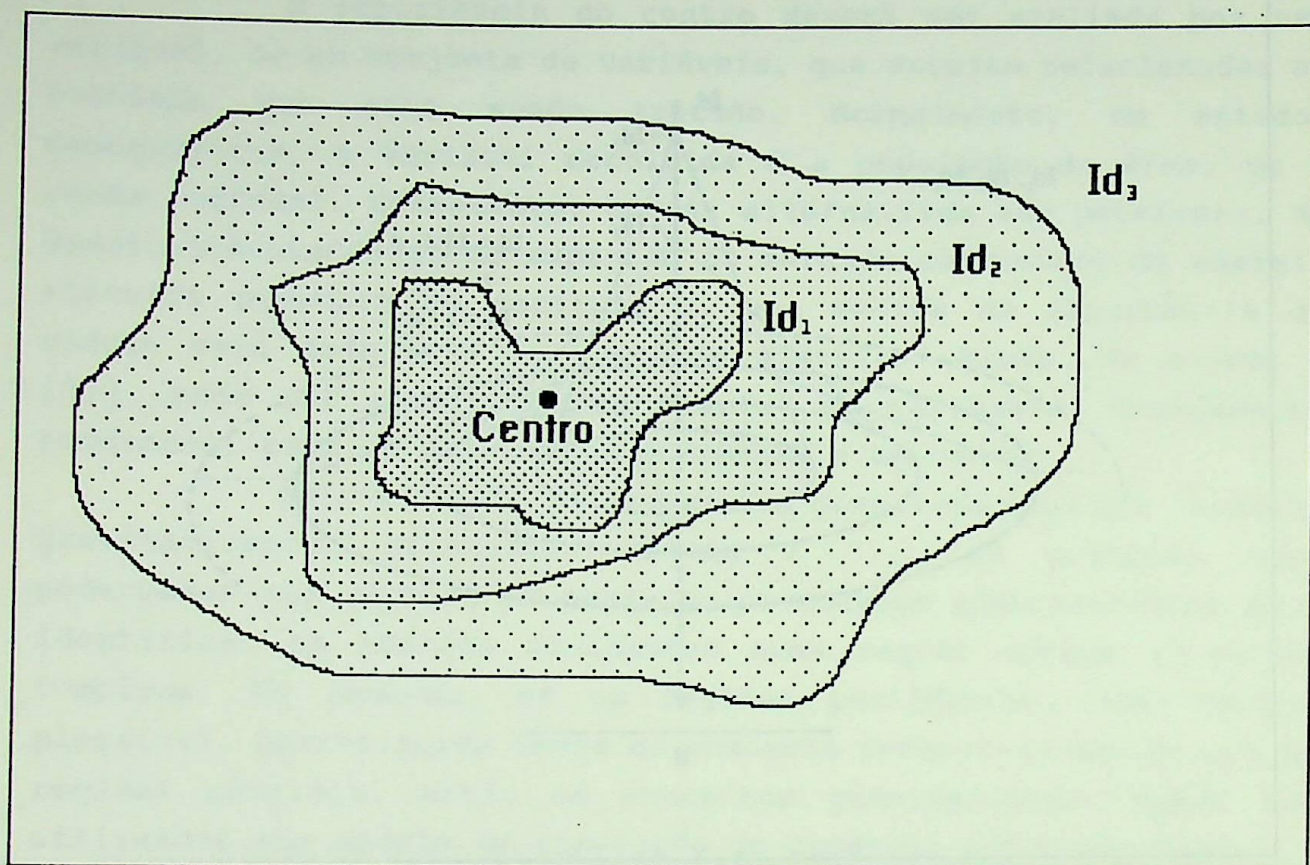


Figura [4] : "Isopotenciais Hipotéticas em Torno de um Centro Real"

Estas condições impõem as isopotenciais verdadeiras um aspecto como o que pode ser visto na figura [4].

Além da influência que um centro pode exercer sobre os pontos vizinhos ser variável em função da importância desse centro - seja medida na unidade que for - é também variável a velocidade com que esta influência diminui a medida que nos afastamos deste.

Por outro lado, o traçado das áreas de influência existentes numa área que comporta varios centros, corresponde ao Mapeamento de Isopotenciais. O mapeamento pode seguir vários critérios quando se trata de verificar a resultante de influência superpostas de dois ou mais centros. Considerando esta resultante

Como a soma das influências recebidas por um determinado ponto, o aspecto da curva de isopotencial, em termos de magnitude, pode ser apreciado na figura [5].

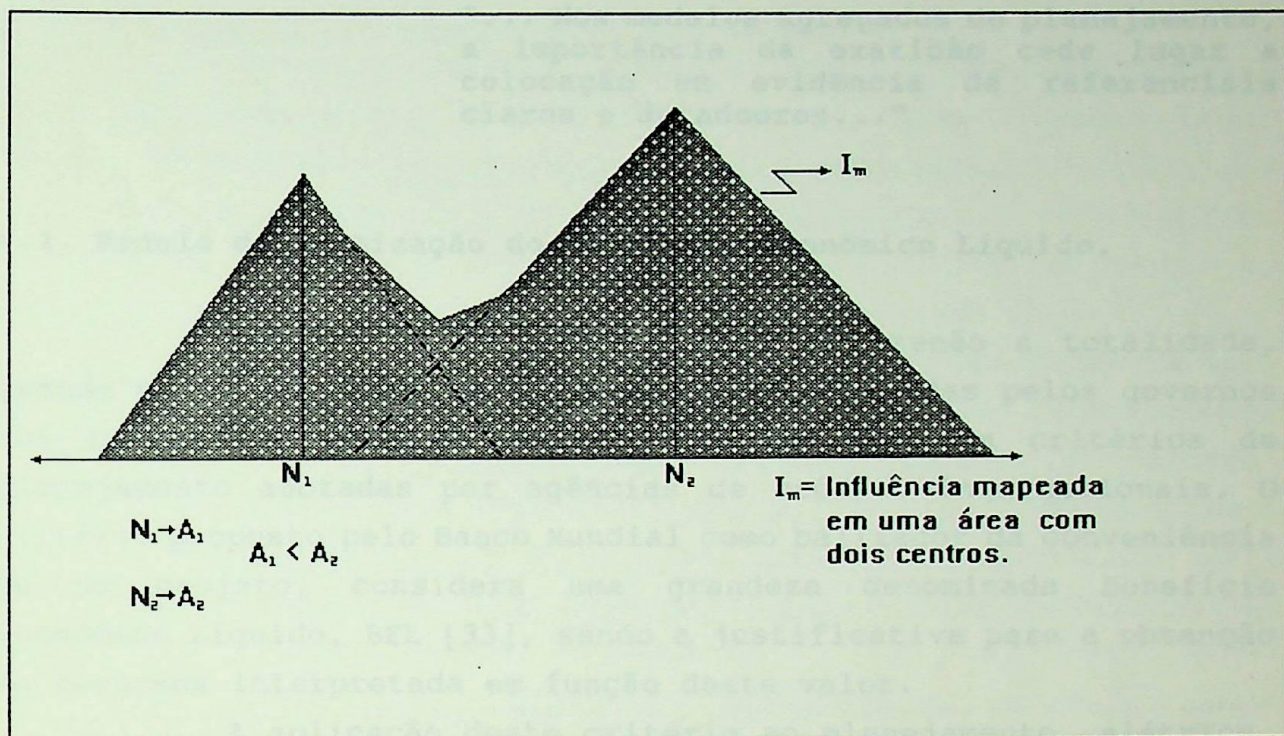


Figura [5] : "Mapeamento de Isopotenciais"

Todos estes conceitos serão mais tarde explorados na elaboração dos modelos de planejamento apresentados nos capítulos 4, 5 e 6.

4. MODELOS DETERMINÍSTICOS

"... Nos modelos agregados de planejamento, a importância da exatidão cede lugar a colocação em evidência de referenciais claros e duradouros..."

4.1. Modelo de Otimização do Benefício Econômico Líquido.

Durante as décadas de 60 a 70, senão a totalidade, grande parte das obras de infraestrutura efetuadas pelos governos dos países do terceiro mundo foram baseadas em critérios de planejamento adotadas por agências de crédito internacionais. O critério proposto pelo Banco Mundial como balizador da conveniência de um projeto, considera uma grandeza denominada Benefício Econômico Líquido, BEL [33], sendo a justificativa para a obtenção de recursos interpretada em função deste valor.

A aplicação deste critério ao planejamento elétrico, [4], conduz a modelos de coexistência de variáveis técnicas e econômicas. No caso específico da distribuição, as contribuições aplicadas ao planejamento recomendam geralmente limitar-se a trabalhar com uma função de custo total englobando parcelas referentes a investimentos e a avaliação de desempenho técnico do sistema, devidamente convertida a unidades de mensurabilidade econômica [3] e [4].

A resultante deste tratamento é uma "curva em bacia", que permite identificar o ótimo do sistema, para um instante de tempo, no seu ponto de mínimo [5]. Assim a parcela do BEL controlável pelo planejamento elétrico aparece como a parcela de não custo de fornecimento, conseguida pela realização de investimentos na parte física do sistema. Nesta análise, referida

ao modelo institucional vigente no setor elétrico brasileiro, as tarifas devem ser consideradas uma variável exógena, fixada por critérios às vezes políticos, e que não podendo ser controlada pelo técnico planejador, deixa de intervir no processo de otimização.

A parcela antes referida normalmente advém de obras que objetivam:

- a. Reduzir as perdas do sistema;
- b. Melhorar a confiabilidade do sistema.

Outras variáveis, como o nível de variação da tensão de fornecimento, são consideradas normalmente como condições de contorno do modelo, sendo aceitável qualquer valor desde que não viole as restrições ad hoc supostas pelos critérios de planejamento.

Os investimentos necessários para conseguir as melhoras indicadas em a e b, constituem obras de:

- a. Adição de troncos alimentadores;
- b. Reforço de rede e da capacidade de transformação;
- c. Instalação de bancos capacitores (compensação);
- d. Novas Subestações;
- e. Proteção e manobra.

As quatro primeiras categorias de obras influenciam fundamentalmente nos índices técnicos de desempenho do sistema, o fator de utilização e a variação de tensão, além do nível de perdas; e o último na END, ou energia não distribuída.

4.2. Modelos Globais de Planejamento da Distribuição.

A evolução dos modelos jurídico-administrativo do setor elétrico em vários países do terceiro mundo, acontecida

coerentemente a filosofia de planejamento promovida pelas agências internacionais, tende a uma concepção mais ampla, em que a tarifa elétrica é uma variável de controle que participa do processo de otimização do BEL. O modelo aqui apresentado situa-se dentro desta concepção.

Talvez a principal variável a ser otimizada quando se trata do comprimento dos troncos alimentadores. Embora possa parecer desnecessário argumentar a favor desta afirmativa, algumas razões desta escolha são a evidente relação entre o nível de perdas e queda de tensão, e a distância do ponto de entrega ao centro de carga.

Neste caso, o problema pode ser colocado, de forma mais ampla como a escolha do tamanho da área de influência ideal de cada subestação, dentro de uma região de planejamento predefinida. Entretanto, existe para cada caso, uma relação de mercado entre a empresa concessionária e o mercado consumidor, traduzida pela disposição a pagar dos usuários do serviço e a quantidade ofertada de energia elétrica, ambas, no tempo [1].

Deste modo, admitindo uma relação entre a renda disponível e a disposição a compra, resulta uma relação entre os seguintes parâmetros básicos:

- a. Renda Disponível;
- b. Densidade de demanda absorvível.

Note-se que, num modelo aderente à realidade, o comportamento da densidade de demanda absorvível pode variar com o preço, ou tarifa, de duas formas: instantaneamente, e não instantaneamente. No primeiro caso, força-se o sistema adotando, para o período de ponta, um fator de utilização da rede maior que a unidade. No segundo caso, avalia-se a conveniência de reforçar (expandir) a rede, mantendo-se os indicadores de desempenho do sistema na trajetória ótima pré-estabelecida.

O modelo considera ainda que o espaço econômico [31] referente a área de planejamento possui uma distribuição da propensão marginal ao consumo de energia elétrica decrescente a partir do seu centro. Deste modo, é possível determinar a superfície ideal de atendimento, bem como colocar as unidades de distribuição no espaço, acrescentando como condicionantes do modelo a potência máxima da subestação e um patamar mínimo de benefício econômico por unidade de área atendida.

Finalmente, é estudado o comportamento do modelo no tempo, considerando-se a evolução dos parâmetros técnicos resultantes das condições econômicas de crescimento do produto regional e elasticidade de demanda do insumo, bem como os custos operacionais e financeiros referentes a investimentos na rede, perdas e qualidade do fornecimento.

Isto posto, é possível proceder à busca da definição de uma política de suprimento de energia elétrica que represente um compromisso ideal para fornecedores e usuários do serviço (na linguagem das agências financiadoras anteriormente mencionadas, estar-se-ia maximizando o BEL) [33].

O problema da escolha da política adequada de fornecimento propicia, contudo, o surgimento de algumas questões intermediárias. A primeira delas seria:

- Como deverá ser a configuração futura? Mais precisamente trata-se de identificar os possíveis caminhos que permitirão atingir um estado preliminarmente definido como desejável, trabalhando sob condições de minimização de custos do serviço. Tal questão é colocada em [1] como "busca rede-alvo".

Ainda em [1], trata-se de sinalizar o cenário absolutamente ideal, pela procura do "desenvolvimento ótimo irrestrito". Neste caso, a função objetivo busca a maximização do

BEL, tendo-se como saídas do modelo obras e custos necessários a tal finalidade. O condicionamento destes resultados a limites econômicos e financeiros impõe o modelo de "desenvolvimento ótimo sob restrições financeiras". Esta questão admite ainda algumas alternativas de tratamento. Assim o crescimento da demanda poderá ser encarado de acordo a três critérios básicos [1]:

- Critério de garantia de suprimento, atendendo a expansão de demanda dos clientes já existentes, bem como a aqueles que solicitarem novas ligações.
- Critério de garantia de demanda vertical, cuja diferença em relação ao anterior é a não garantia de atendimento aos novos clientes.
- Critério de atendimento seletivo, no qual todo acréscimo na demanda está sujeito a uma restrição de fornecimento.

O tratamento destas questões passa pela construção de um modelo global de planejamento, a partir de uma função agregativa de custos contendo as diversas componentes de dispêndios na prestação de serviço de distribuição. Ainda no caso da análise considerando as características espaciais do sistema, resulta conveniente adotar alguns pressupostos primais quais sejam: existência de um espaço físico, denominado de área de planejamento, contendo a universalidade das variáveis do modelo; possibilidade de "preencher" este espaço utilizando "unidades de distribuição" [1]; não existência prévia de sistemas alimentadores, nem resíduos destes.

A definição da unidade de distribuição, UD, e a explicitação de suas características, é fundamental a compreensão do modelo que vem sendo descrito. Entende-se por UD o conjunto formado por uma subestação e a malha distribuidora associada a esta. Considera-se, dentro da área de planejamento, a possibilidade de servir qualquer espaço dentro desta com igual facilidade, o que

significa poder alocar uma UD em qualquer ponto, a partir de uma rede de subtransmissão "omnipresente". Deste modo o custo de instalação das UD's são equivalentes e portanto imunes à distância.

Com relação às variáveis econômicas associadas às preferências de consumo do mercado a ser servido, adota-se o pressuposto da caracterização usando apenas uma variável. Deste modo, obtém-se um modelo simples e relativamente aderente a realidade, desde que estas variáveis guardem entre si forte correlação.

Considera-se também uma disposição de consumidores tal, dentro da UD, que aqueles que possuem maior disposição ao consumo estejam localizados no centro da mesma, sendo os espaços contíguos a este ponto ocupados por consumidores em grau ordinal menor de disposição, de forma que aqueles que se igualam neste atributo, estejam situados à mesma distância. Assim, a área resultante da UD é um círculo, cujo raio explica a maior ou menor disposição ao consumo, de acordo a uma lei pré-estabelecida. No modelo em [1], utiliza-se uma relação exponencial. Ainda, a "disposição à compra" resulta função da própria densidade elétrica, como foi visto decrescente do centro para as margens do círculo formado pela UD.

A idéia da área circular é emprestada da Teoria Concêntricos, apresentada por Park e Burgess no livro "A cidade", citado em [14]. Ainda em [14] pode ser lido "... em seu processo de formação a cidade apresenta a concentração de suas atividades numa área central, tomando uma forma circular: encontram-se lado a lado as funções residenciais, comerciais e industriais. Com a expansão da cidade, esta zona central é rodeada por uma segunda zona circular, permanecendo a primeira como foco de atividades econômicas e sociais, isto é, lojas, bancos, hotéis, teatros, museus e todas as atividades relacionadas com a vida cívica, política e religiosa. Compreende ainda o distrito de comércio atacadista. É denominada Distrito Comercial Central".

Continua mais adiante, explicando o segundo círculo

concêntrico, que denomina de "Zona de Transição", por estar composta por uma mistura de residências e estabelecimentos comerciais decorrentes do Distrito Comercial Central. Esta mistura, tenderia a criar condições não ideais de habitação, de forma que haveria uma impulsão por parte dos indivíduos a escapar para uma terceira área circundante. No total, como pode ser visto na ilustração [6], são identificados dez círculos concêntricos de distribuição da atividade econômica.

No modelo proposto, a idéia dos círculos concêntricos é simplificada, admitindo-se apenas um continuum espacial sem discretizações. Assim, o atendimento dos consumidores é efetuado por alimentadores partindo da SE localizada no centro da UD. Portanto, o sistema fica caracterizado pelo número e o comprimento dos troncos, dado o caráter simétrico adotado. Os níveis de tensão de fornecimento e bitola dos cabos, consideram-se padronizados.

Ainda em [1], os custos de uma unidade de distribuição típica são divididos em custos de instalação e custos de operação. Quanto aos primeiros, podem ser subdivididos em:

- Custos da Subestação;
- Custos da rede primária (MT);
- Custos da rede secundária (BT);
- Custos de transformadores de distribuição.

A análise dos custos de instalação da UD permite identificar as principais variáveis que influenciam as distintas parcelas de despesas. Assim o custo de instalação da SE pode ser associado fortemente a capacidade máxima de transformação dos equipamentos, que naturalmente está dimensionada de acordo à solicitação máxima instatânea de carga, ou ponta do sistema. Em termos de custos fixos, pode-se equacionar a SE considerando uma parcela adicionada a anterior, na qual se aglutinam as despesas territoriais, civis, administrativas, jurídicas, etc.

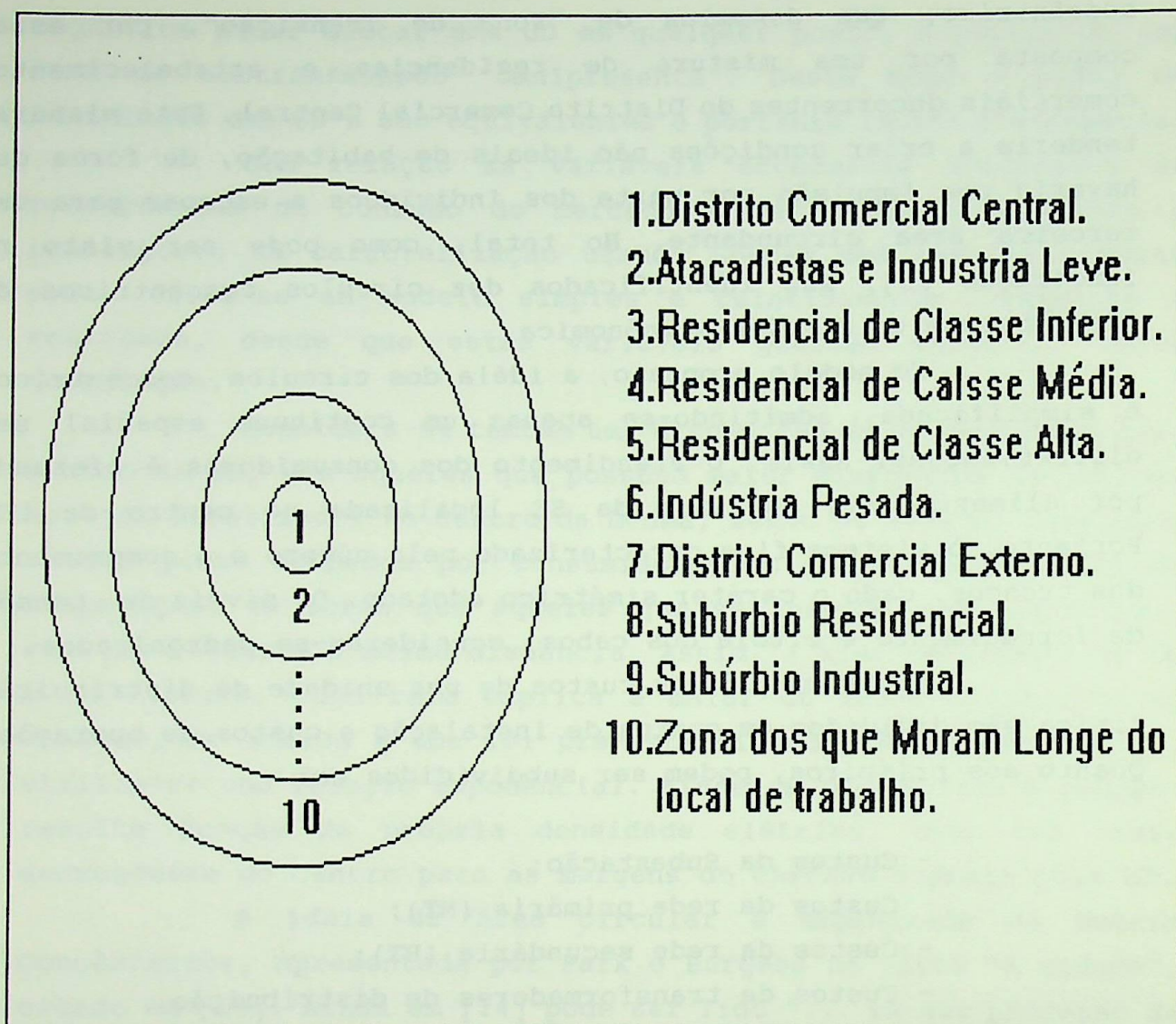


Figura [6] : "Ocupação do espaço segundo a Teoria dos Círculos Concêntricos"

Estes conceitos podem ser equacionados como:

$$CT_{SE} = K_{SE} \cdot L^2 \cdot D + CF_{SE} \quad (13)$$

onde:

CT_{SE} = Custo Total da Subestação;

$K_{SE} = \partial CT_{SE} / \partial D$, ou custo marginal da SE em relação aos acréscimos de ponta (MVA's a mais instalados);

D = densidade de carga;

L = comprimento da rede;

CF_{SE} = custo fixo de investimento.

A parcela de custos da rede BT, assim como os custos de transformação de energia, podem ser considerados como custos adicionais à rede MT, de forma que resultem proporcionais ao comprimento da rede MT, dentro de um modelo global.⁶

Assim,

$$C_{Al} = K_{Al} \cdot L_{Al} \quad (14)$$

onde: C_{Al} = custo do alimentador;

$K_{Al} = \partial C_{Al} / \partial L_{Al}$, ou custo marginal do alimentador, em relação a sua extensão;

L_{Al} = longitude total do alimentador.

Em consonância à expressão (14), e considerando uma SE simétrica tem-se:

$$CT_{SE} = N_{Al} \cdot C_{Al} \quad (15)$$

onde: N_{Al} = número de alimentadores da SE.

6. Este tratamento é uma simplificação do problema, com a intenção de preservar a idéia central do trabalho. É possível, entretanto, trabalhar com a rede BT, introduzindo variáveis como longitude, densidade, bitola etc.

Os custos operacionais do sistema distribuidor são resultado do uso do conjunto de todos os elementos que o compõem, no trajeto da aquisição até à entrega do insumo elétrico.

Desta forma, o segmento distribuidor tem custos com a compra de energia elétrica, verificada no início do trajeto, e com as perdas ocorridas ao longo de toda a rede MT e BT, até a entrega ao usuário do serviço. A compra (quando a concessionária não gera), é efetuada mediante um contrato de fornecimento que estipula preços diferenciados para a energia adquirida de acordo ao instante na qual esta é requerida, modalidade conhecida como tarifação horo-sazonal. O objetivo desta tarifação é modelar a curva de carga, de modo a exigir compensações adicionais de preço nos instantes de demanda de ponta, e incentivar o consumo nos períodos de carga leve. Percebe-se que este preço variável, embora estipulado num contrato de suprimento de energia, deveria ocorrer mesmo que a empresa concessionária produza sua própria energia elétrica. Evidentemente, os equipamentos adicionais necessários para sustentar o período de máxima demanda do sistema irão encarecer o preço do K_w médio que transita pela rede, de sorte que resulta natural se encarar o K_w de ponta como sendo mais "caro", seja ele comprado ou gerado.

Em relação ao suprimento de energia elétrica ao segmento distribuidor, e tomando-se como base um perfil de mercado estável para o consumo, pode ser admitida uma tarifa média T a ser paga ao fornecedor para cada MVA de ponta. Contudo, a energia perdida ao longo do sistema possui uma distribuição instantânea não equivalente à curva de carga de mercado. Assim, o preço de cada MVA de perdas não corresponde necessariamente a tarifa média T paga no início do trajeto, e pode ser avaliado razoavelmente bem em função de três variáveis: número de alimentadores, longitude dos alimentadores e densidade de carga.

Isto posto, a expressão básica do modelo para o cálculo dos custos operacionais do sistema pode ser colocada,

$$C_{op} = T.D.L^2 + K_w. \frac{D^2.L^5}{N} \dots \dots \dots (16)$$

onde: C_{op} = custo operacional;

T = tarifa média de ponta paga pelo segmento distribuidor;

D = densidade de carga;

L = longitude total da rede;

K_w = constante de perdas.

Uma vez colocados estes conceitos, é possível pensar em uma expressão geral que envolva todas as parcelas de custo dentro da Unidade de Distribuição. Assim resulta,

$$C_{UD} = C_{SE} + N . C_{Al} + C_{op} \dots \dots \dots (17)$$

correspondendo os dois primeiros termos do segundo membro a investimentos, e o último inerente a prestação do serviço em si.

Uma vez definidos os custos de distribuição de energia elétrica, verifica-se a necessidade de encontrar a estratégia mais adequada a consecução do objetivo fundamental do planejamento agregado, tal como foi definido anteriormente.

No caso específico do tratamento que vem sendo dado ao problema, pode-se assumir como meta de planejamento para uma determinada área a ser servida o "preenchimento" da mesma a partir de um número "ideal" de Unidades de Distribuição. Dentro desta solução, vê-se que se o atendimento desta área for efetuado a partir de um pequeno número de UD's, incorrer-se-á em custos operacionais elevados. Em contrapartida, haverá uma poupança nos investimentos do sistema como um todo. Obviamente, a recíproca é verdadeira, ficando então como incógnita principal a escolha do número ótimo de Unidades de Distribuição, e por extensão, do

comprimento dos alimentadores que a compõem e que definem sua área de influência.

Deste modo, pode-se considerar como comprimento ótimo do alimentador - e como estratégia ótima de planejamento - aquele que minimiza o custo por unidade de área atendida. Neste caso, tratar-se-á de obter o menor valor possível para a função

$$C_{UD} = \frac{C_{UD}}{L^2} \cdot \dots \dots \dots (18)$$

onde: CUD = custo total da UD por unidade de área.

que será também mínimo para toda a área de planejamento.

A expressão (18), tal como foi equacionado anteriormente, pode ser escrita :

$$C_{UD} = (K_{SE} + T) \cdot D + \frac{CF_{SE}}{L^2} + \frac{N \cdot K_{A1}}{L} + K_w \cdot \frac{D^2 \cdot L^3}{N} \cdot \dots \dots \dots (19)$$

que é a equação fundamental do modelo proposto, e que permite deduzir algumas relações de significativo interesse.

O número de alimentadores-tronco que minimiza o custo por unidade de área na UD, por exemplo, pode ser obtido calculando $\partial C_{UD} / \partial N$, e igualando a zero, de onde vem a relação:

$$N^* = \sqrt{\frac{k_w}{K_{A1}}} \cdot D \cdot L^2 \cdot \dots \dots \dots (20)$$

onde N_* é o número ótimo de alimentadores por SE.

Tem-se, então, que o mínimo custo possível a partir da escolha do número ideal de troncos é dado pela relação,

$$C_{UD} = (K_{SE} + T) \cdot S + \frac{CF_{SE}}{L^2} + K_N \cdot L \cdot D \cdot \dots \dots \dots (21)$$

onde:

$$K_N = 2 \cdot \sqrt{K_w \cdot K_{A1}}$$

A partir da (21) é possível encontrar o valor ideal da longitude dos troncos alimentadores. De fato, fazendo $\partial C_{UD}^* / \partial L = 0$, e explicitando o valor de L, tem-se:

$$L^* = \left(\frac{2 \cdot CF_{SE}}{K_N} \right)^{1/3} \cdot D^{-1/3} \cdot \dots \dots \dots (22)$$

E o custo resultante pela otimização conjunta de N e L, é dado pela relação:

$$C_{UD}^* = (k_{SE} + T) \cdot D + K_L \cdot D^{2/3} \cdot \dots \quad (23)$$

$$A^* = \frac{\pi}{4} . L^{*2} (29)$$

Como resultado do modelo aparece a configuração de cada uma das UD's, caracterizada pelo número ótimo de troncos e área ótima atendível pelas SE's.

A evolução destes valores ao longo do tempo, reflete basicamente a importância que os usuários do serviço elétrico atribuem, e que é determinada, em maior ou menor medida, pela sua capacidade de compra, uma vez que a energia elétrica atua como bem complementar a categoria de bens eletro-eletrônicos.

Assim, no início do processo de eletrificação de uma área, mesmo havendo uma "vontade" de consumo de energia elétrica, os elevados custos decorrentes da baixa densidade sobrepuxam as demais variáveis, resultando uma tarifa localizada elevada e um desestímulo forte à ocupação da área e ao consumo. Em contrapartida, na demanda efetuada em setores de predominância de crescimento vertical, que corresponde a um estágio subsequente de ocupação do espaço, mesmo havendo forte avidez pela energia elétrica, a tarifa tende a ter seu valor otimizado cada vez menor.

A solução de estratégia de ocupação, pelo menos no que se refere a unidades de distribuição pertencentes à mesma área de planejamento, ocorre trabalhando-se com uma tarifa unificada, o que representa, na prática, uma transferência de renda inter-regional dos setores de alta densidade de consumo para os setores esparsos. Neste particular, o processo de distribuição de energia elétrica segue os princípios da economia clássica, especialmente na determinação de economias e deseconomias de escala.

É especialmente por estes motivos que a política de gestão da empresa concessionária está intimamente ligada a sua

política de atendimento. Na realidade, a escolha desta política faz toda a diferença em termos não só do paradigma predominante, como principalmente do tipo de desenvolvimento resultante na área de planejamento. O critério citado de garantia da demanda vertical, por exemplo, tem características concentracionistas facilmente identificáveis a partir do modelo que está sendo discutido. De fato, considerando a opção de atendimento entre os clientes "novos" (ou periféricos, pois não se distingue, na rede existente, uma nova ligação de um simples aumento de demanda por um cliente já existente), e um cliente atual, vê-se que o KVA distribuído no primeiro caso é mais caro, de forma que, omitidas eventuais compensações, a tendência é beneficiar predominantemente os consumidores ligados à rede existente.

O critério de garantia de suprimento, diferentemente, tende a não punir a expansão horizontal da rede, proporcionando uma dinâmica de ocupação dispersa em relação à anterior.

Contudo, uma análise do ponto de vista da receita da empresa, indica que a evolução do faturamento ótimo global tende a acompanhar a taxa de crescimento da renda regional. Ainda, como o valor da longitude ótima, é proporcional ao inverso da raiz cúbica da densidade, resulta que em comunidades de alta renda e tecnológicas, o tamanho da área ótima servida pela unidade de distribuição tende a diminuir, exigindo a criação de novas subestações para realocar o serviço de distribuição. Em contrapartida, em áreas de baixa densidade, a UD tem que cobrir uma grande extensão, caracterizando-se em termos de tipo de obras pela realocação constante de transformadores.

Nas figuras [7] e [8], pode ser vista a evolução temporal de diversos parâmetros do modelo, mantendo-se a trajetória de equilíbrio de mercado.

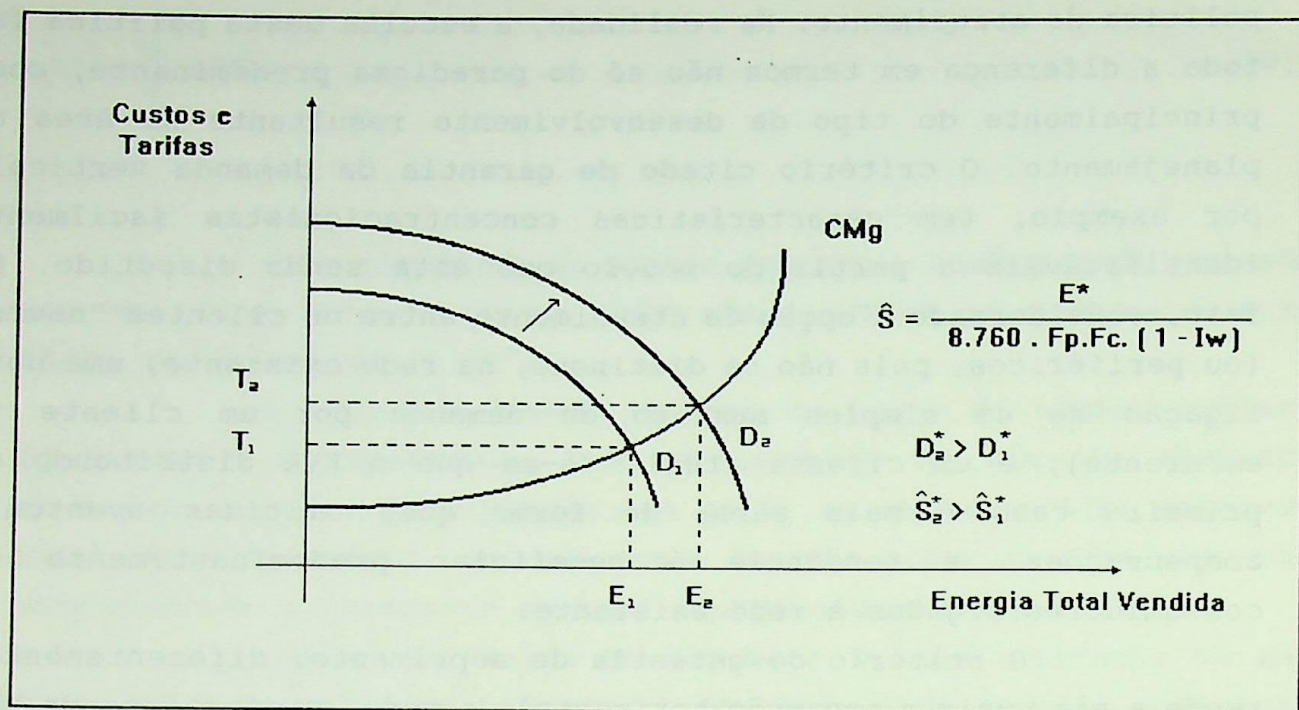


Figura [7] : "Evolução da Potência de Ponta Ideal"

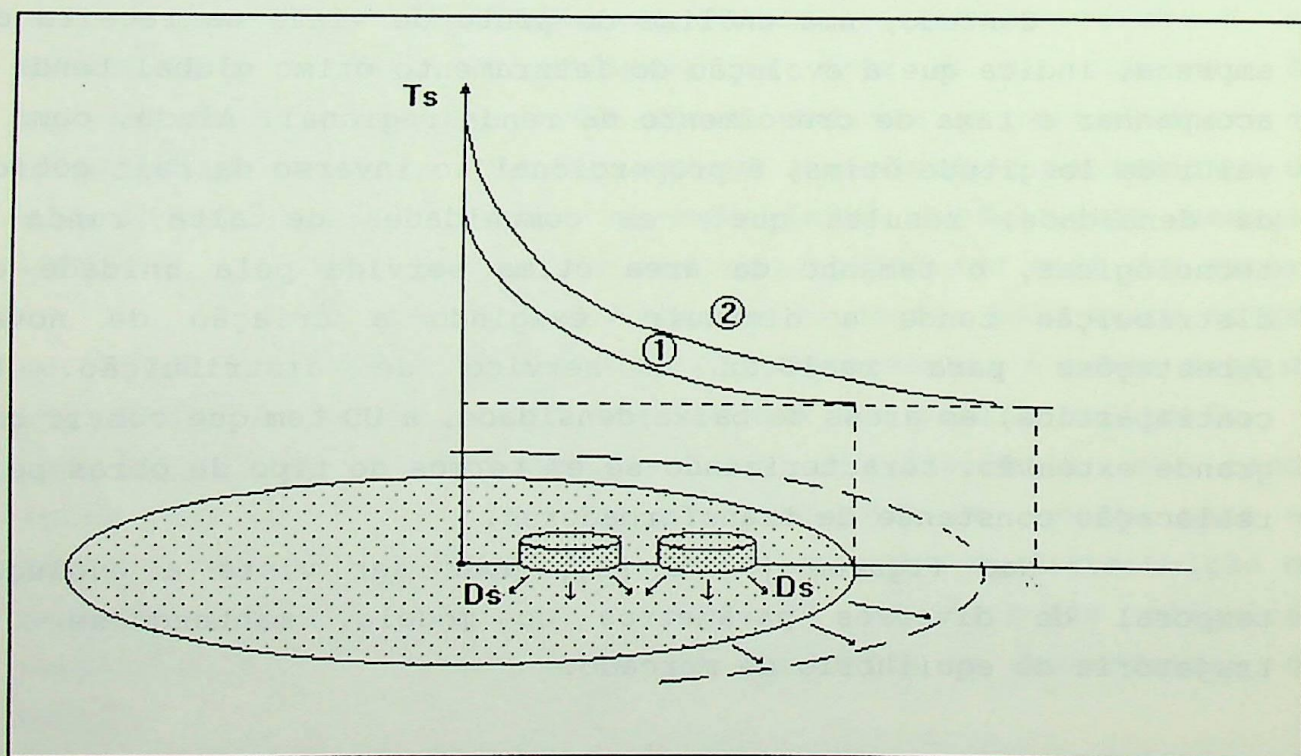


Figura [8] : "Evolução Física da Área de Planejamento Elétrico"

5. MODELOS ESTOCÁSTICOS

"... Sabemos por experiência que tentar estabelecer relações funcionais exatas entre variáveis econômicas observáveis e fútil e estéril. Portanto, se nos basearmos num esquema teórico teremos que acrescentar alguns elementos estocásticos para tapar a brecha entre a teoria e os fatos..."

Haavelmo

5.1. Introdução.

Admitindo como verdadeira a hipótese de que o conhecimento da configuração futura do mercado consumidor de energia elétrica é condição básica na definição dos limites técnicos e econômicos do sistema distribuidor e no próprio planejamento adequado do mesmo, tem-se como objetivo imediato a elaboração de um modelo de previsão do crescimento de cargas.

Entretanto, no caso do planejamento da distribuição, a estimativa da potência demandada pelo sistema não basta para obter um modelo suficientemente aderente e completo, dada a característica radial da malha distribuidora. Deste modo, além de se ter uma aproximação do quanto a demanda irá crescer, é fundamental saber onde terá lugar o incremento de carga.

Uma maneira de começar a pensar o problema do crescimento espacial da carga, consiste em imaginar uma unidade de incremento de carga, seja ela denominada ponto de carga. A alocação dos novos pontos de carga, decorrentes da evolução da rede elétrica, seria feita assumindo um caráter aleatório para a localização das cargas, sorteando-se tantos novos pontos como a previsão de incremento de carga assim o requerer.

Em termos de modelos de crescimento espacial do mercado consumidor, existe até este ponto o que se poderia chamar de um

certo consenso, embora isto não signifique a solução definitiva do problema. E também a partir deste ponto que os modelos começam a divergir quanto a linha a ser seguida. O modelo de planejamento de expansão da Electricité de France, denominado Sierra, conta com um programa auxiliar, o Genarvre, cuja função é justamente simular configurações possíveis e estabelecer leis gerais para determinar a estratégia de atendimento para elas.

Neste modelo, porém, considera-se o processo de formação das redes como completamente aleatorizado, na medida em que a nova carga sorteada tem igual probabilidade de aparecimento em qualquer ponto da área considerada, dentro de um espaço contínuo. Outras características importantes do Genarvre são o formato da área de planejamento, e a forma em que são traçadas as linhas de atendimento aos pontos de carga. De fato, o Genarvre se vale de um padrão de área semi-elíptico, com um foco principal onde é arbitrariamente colocada a subestação. O programa inicia então um sorteio de coordenadas, sendo cada par responsável pela alocação de um ponto de carga, e o atendimento é efetuado segundo uma metodologia fenomenológica, na qual a ordem de aparecimento da carga vai determinar a configuração futura do mercado consumidor, ligando-se os pontos pelo critério de distância mínima. Ver figura [9].

Uma vez alocados os pontos, o programa solicita alguns dados característicos de redes elétricas, como bitola dos cabos e tensão nas barras, e passa a calcular em função destes e da configuração recém simulada, variáveis de saída tais como perdas do sistema, quedas de tensão e outras.

Como pode ser notado, o Genarvre não tem a preocupação de obter resultados detalhados. Isto se deve basicamente ao objetivo para o qual foi criado, que é o de estabelecer leis de aplicabilidade geral do crescimento das variáveis técnicas do sistema, para serem depois usadas pelo programa principal de planejamento. Uma outra forma de simular o crescimento do

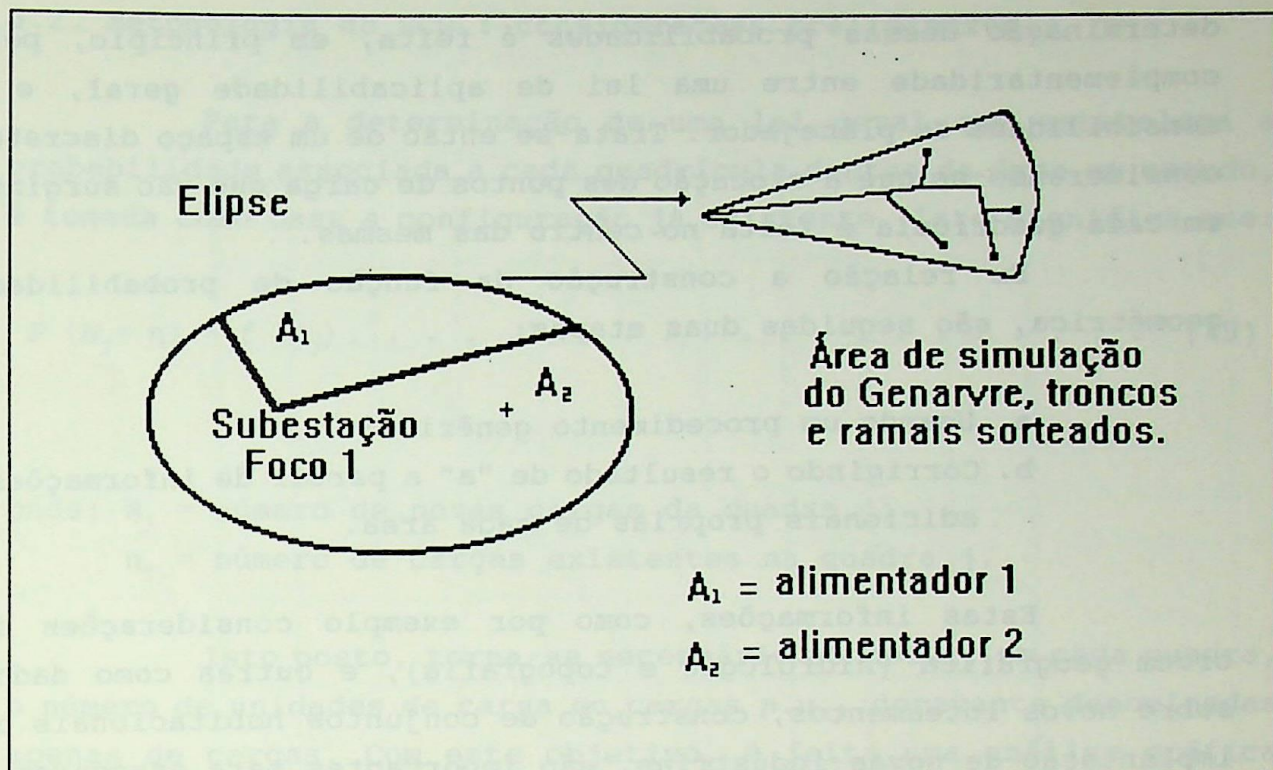


Figura [9] : "Área Padrão do Genarvre"

mercado consumidor, é dada pelo programa denominado SCG, ou Simulador de Pontos de Carga, desenvolvido na Escola Federal de Engenharia de Itajubá em conjunto com a Eletrobrás.

O programa SCG é na realidade um dos integrantes de uma família de programas desenvolvidos para distintas finalidades dentro do planejamento de redes de distribuição, e que seguem uma metodologia particular, diferente do programa francês. Esta metodologia, que será descrita a seguir, busca adaptar o problema da estimação do mercado consumidor as particularidades encontradas no caso brasileiro e a disponibilidade de dados das empresas nacionais. Especificamente neste caso, a primeira característica diferencial entre os modelos está na escolha do padrão de área, que no caso do SCG é do tipo retangular. Deste modo, a área de simulação é dividida em quadrículas, cada uma tendo associada uma certa probabilidade em termos do aparecimento de novas cargas. A

determinação dessas probabilidades é feita, em princípio, pela complementaridade entre uma lei de aplicabilidade geral, e a sensibilidade do planejador. Trata-se então de um espaço discreto, considerando-se que a alocação dos pontos de carga que vão surgindo em cada quadrícula é feita no centro das mesmas.

Em relação a construção da função de probabilidade geométrica, são seguidas duas etapas:

- a. Usando um procedimento genérico;
- b. Corrigindo o resultado de "a" a partir de informações adicionais próprias de cada área.

Estas informações, como por exemplo considerações de ordem geográfica (hidrologia e topografia), e outras como dados sobre novos loteamentos, construção de conjuntos habitacionais ou implantação de novas indústrias, são importantes para assegurar a coerência dos resultados finais (evitando-se assim o surgimento de uma nova carga no topo de um morro, ou no meio de um lago).

O resultado da simulação deverá fornecer então, uma provável nova configuração do mercado consumidor, num certo período de tempo, partindo, como será visto a seguir, da função de probabilidade do aparecimento de novas cargas.

Caracter. Programa	Espaço	Padrão de área	Padrão de atendimento	Função de Probabilidade
Generve	contínuo	semi-elíptico	distância mínima (qq.ângulo)	uniforme
SCG	discreto	retangular	distância mínima (ângulo reto)	qualquer função

Figura [10] : "Comparação das características dos programas de simulação da expansão do mercado consumidor"

5.2. Metodologia do SCG : considerações preliminares.

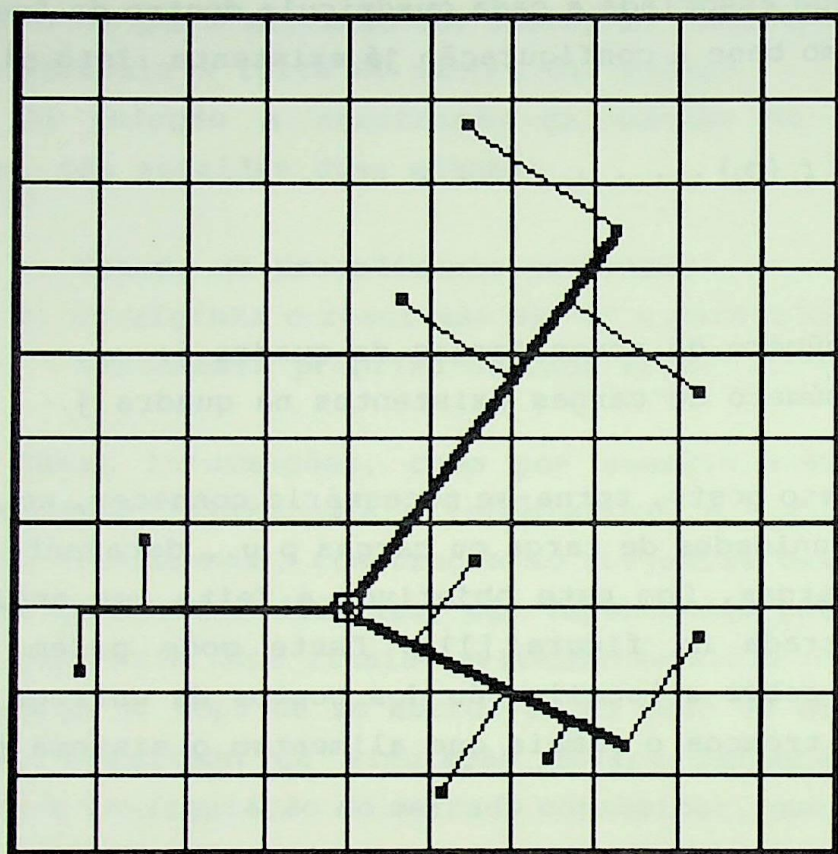
Para a determinação de uma lei geral que estabeleça a probabilidade associada a cada quadrícula dentro da área em estudo, é tomada como base a configuração já existente. Isto significa que:

$$P (N_j = \eta) = f (n_j) (29)$$

onde: N_j = número de novas cargas da quadra j ;

n_j = número de cargas existentes na quadra j .

Isto posto, torna-se necessário conhecer, em cada quadra, o número de unidades de carga ou cargas p.u., doravante denominadas apenas de cargas. Com este objetivo, é feita uma análise gráfica como a mostrada na figura [11]. Deste modo podem ser obtidas informações sobre a localização dos pontos de entrega, bem como a posição dos troncos e ramais que alimentam o sistema primário.



□ Subestação — Tronco
 ▪ Ponto de Carga — Ramal

Figura [11] : "Tratamento da configuração existente na área em estudo"

Uma vez conhecido o número de cargas por quadrícula, a questão que se põe é de que maneira evolue esta variável. Evidentemente, existem vários fatores que influenciam o incremento (decremento) de carga num determinado local. Entretanto, numa primeira análise, podem ser admitidas duas possibilidades simples:

- a. Tratar o modelo como uma Série Histórica.
- b. Efetuar uma análise de Corte (cross section).

No primeiro caso, tem-se

$$N_j = f(t) \dots \dots \dots (30)$$

onde $f(t)$ pode ser qualquer tipo de função, dependendo das características da área em estudo e do horizonte de planejamento. No tocante a área de planejamento, é conveniente catalogar os seguintes tipos:

- a. Somente residencial;
- b. Somente industrial;
- c. Misto (qualquer combinação de consumo residencial, industrial, comercial, público e rural).

E os horizontes de planejamento como :

- a. Curto prazo
- b. Médio prazo;
- c. Longo prazo.

Nos casos dos tipos de área a e b, o crescimento se diferencia sendo que o crescimento de carga industrial apresenta um p.u. maior e uma maior espacialidade. Entretanto, no que diz respeito a função específica, tanto num caso quanto no outro, é possível utilizar uma única lei de crescimento para a área toda.

Porém, na alternativa de áreas de consumo misto, o modelo deverá prever zonas cujas leis de crescimento variem conforme suas características, isto é, ter-se ão diversos tipos de funções de

Assim, dando-se entrada no número de cargas de cada quadrícula, ter-se-ão os "tempos", ou melhor, os estágios de desenvolvimento temporal de cada uma das quadras t .

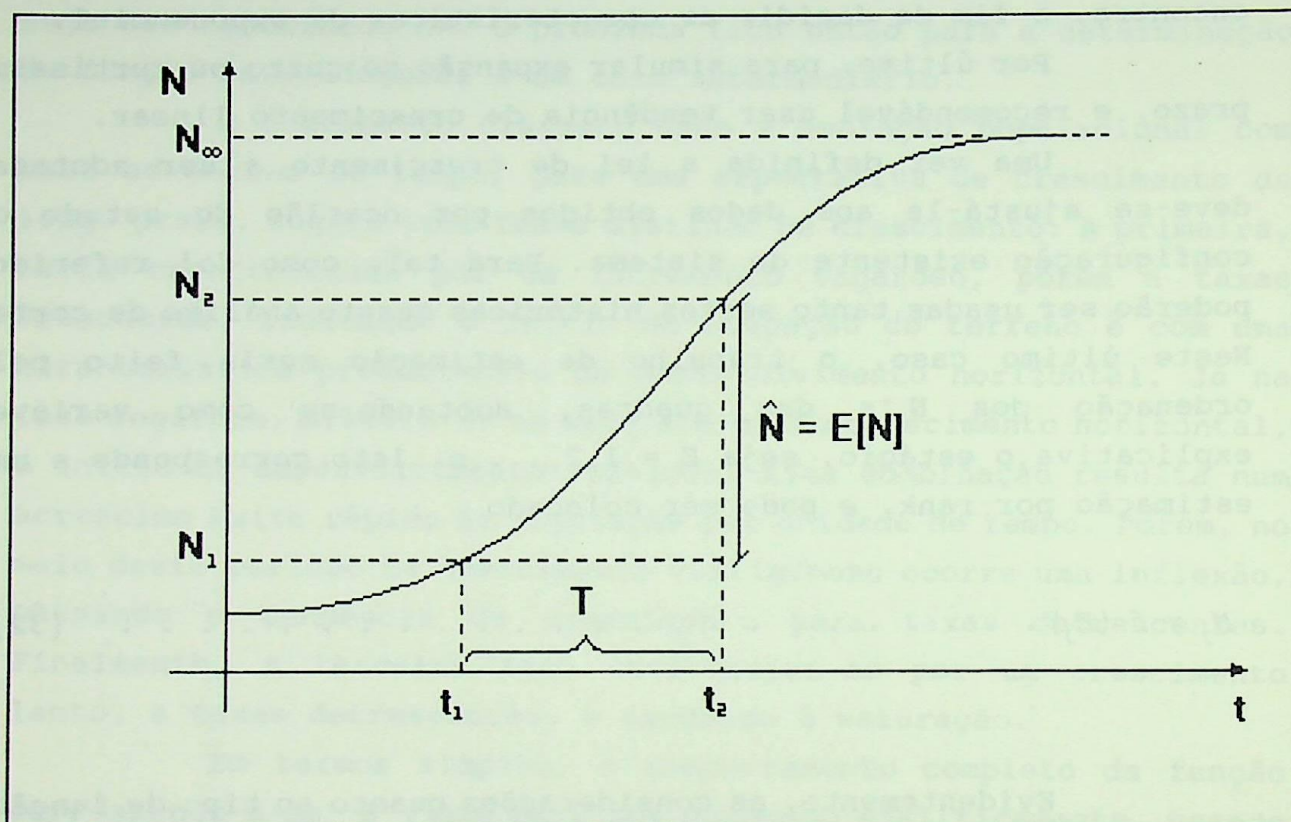


Figura [12] : "Número esperado de pontos de carga após T Unidades de Tempo"

Em seguida, arbitrado um valor para o horizonte de planejamento, T , calcula-se o número de novas cargas esperadas usando a (31), como exemplifica a figura [12]. O ponto $t + T$, corresponde ao acréscimo do horizonte de simulação, T , sobre t , de forma que o número esperado de novas cargas $E(N_j)$ resulta da diferença entre os valores da $f(t)$, nos instantes citados.

Este procedimento, aplicado a totalidade das unidades de área (quadrículas) em estudo, gera uma matriz de informações como a exemplificada à continuação.

A referida função é responsável pela localização dos novos pontos de carga, toda vez que sorteado um número aleatório, a nova carga situar-se-á na quadrícula cujos limites randômicos o contiverem. Assim, percebe-se que deverão ser sorteados tantos números aleatórios como pontos de carga correspondam ao horizonte temporal definido pela simulação.

5.3. Modelo de Simulação de Longo Prazo Usando o SCG.

No item 5.2, foi sugerido para uma simulação a ser utilizada no planejamento de longo prazo, uma função do tipo da (31). Neste caso, a metodologia de ajuste empregada considera o parâmetro N_0 como um dado de entrada do modelo. Esta concessão advém da percepção do significado físico desta grandeza. Com efeito, pode-se notar que N_∞ representa o número máximo de pontos de carga que uma quadrícula pode suportar. Assim, conhecidas as dimensões dessa quadrícula, parece bastante razoável estimar numa análise preliminar, qual o número máximo de cargas p.u. que fisicamente suporta essa área.

Posto que N_∞ como um valor exógeno a regressão, o trabalho que resta é determinar os parâmetros N_0 e α . O primeiro, nada mais indica do que o número de cargas estimadas existentes no início da serie histórica, e a, obviamente, mostra a maior ou menor velocidade de crescimento do mercado consumidor.

As equações normais para estimação de N_0 e α são obtidas linearizando a (31), de modo que resulta

$$\ln \left(\frac{N_\infty}{N_j} \right) - 1 = \ln \left(\frac{N_\infty}{N_0} - 1 \right) - \alpha \cdot t_j \cdot \dots \dots \dots (35)$$

ou

$$x_j = A + \alpha \cdot t_j \cdot (36)$$

com

$$x_j = \ln \left(\frac{N_\infty}{N_j} - 1 \right) (37)$$

e

$$A = \ln \left(\frac{N_{\infty}}{N_o} - 1 \right) (38)$$

de modo que

$$N_o = \frac{N_{\infty}}{1 + e^A} (39)$$

Ainda, os parâmetros da (36) resultam,

$$\alpha = \frac{n \cdot \sum x \cdot t - \sum t \cdot \sum x}{n \cdot \sum t^2 - (\sum t)^2} \dots \dots \dots (40)$$

$$A = \frac{\sum t \sum x.t - \sum t. \sum x^2}{n. \sum t^2 - (\sum t)^2} \dots \dots \dots (41)$$

Finalmente, de posse dos valores dos parâmetros da (36), o estágio de desenvolvimento de cada quadra é obtido, como foi anteriormente referido, invertendo a função, de onde vem

$$t_j = \left(\frac{\frac{N_{\infty}}{N_o} - 1}{\frac{N_{\infty}}{N_j} - 1} \right) / \alpha \dots \dots \dots (42)$$

5.4. Resumo do Funcionamento do Modelo.

As etapas do modelo de simulação podem ser resumidas como segue:

- a. Obtém-se o número de cargas de cada quadrícula;
- b. Usando uma regressão de N para t, calcula-se o estágio de desenvolvimento temporal de cada quadrícula;
- c. É estabelecido o horizonte desejado da simulação;
- d. Calcula-se o número esperado de cargas que deverão surgir em cada quadrícula para o horizonte escolhido;
- e. Converte-se o número de cargas esperado em cada quadrícula em um intervalo randômico tal que espelhe a maior ou menor expectativa de aparecimento de novas cargas (função de probabilidade);
- f. Efetua-se o sorteio e localizam-se as cargas.

5.5. Resultados Obtidos com o SCG.

Nas figuras (14), (15) e (16), são mostrados alguns estágios de uma simulação efetuada com o auxílio do programa simulador de pontos de cargas.

Dados de Entrada.

A construção vista na figura (14), requer que sejam informados

- a. Comprimento da área em estudo.
- b. Largura da área em estudo.
- c. Número de quadrículas horizontais e verticais.

A partir destes dados são mostradas as opções para reproduzir a configuração do sistema existente, usando os comandos S, T, e R; como pode ser observado na figura. São informadas, complementarmente as coordenadas de cada opção escolhida e a distância ao centro de carga. Os comandos D e A servem apenas para facilitar a localização das linhas.

Na figura (15), vê-se completada a localização das cargas. No exemplo, é mostrado um sistema composto de dois troncos, o primeiro com quatro ramais que sustentam sete cargas p.u.; é o segundo com dois ramais e três cargas. Vê-se na parte inferior da figura, o início da solicitação de dados para a construção da função de probabilidade. São eles :

- d. O número máximo de cargas por quadra, N_{∞} .
- e. O número de termos da série histórica, n.
- f. Os t_j 's e N_j 's.
- g. O horizonte da simulação, T.

Finalmente, na figura (16), vê-se a simulação já efetuada, com o número de cargas esperadas em cada uma das quadriculas da área em estudo.

O programa permite ainda que seja selecionada uma área com amplitude igual a um quadrante, na qual será traçado um alimentador ideal, segundo um critério de inércia mínima.

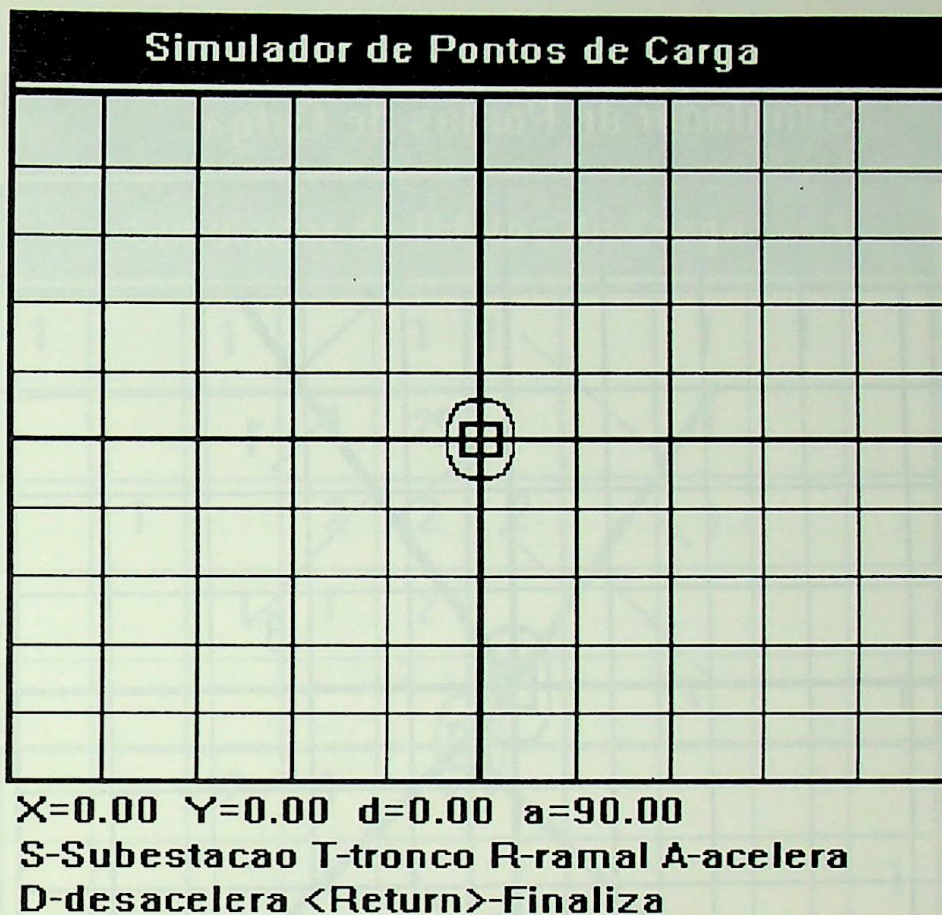


Figura [14] : "Aspecto Inicial da Tela do Computador no programa SCG"

As opções na parte inferior da tela são usadas para reproduzir a configuração real.

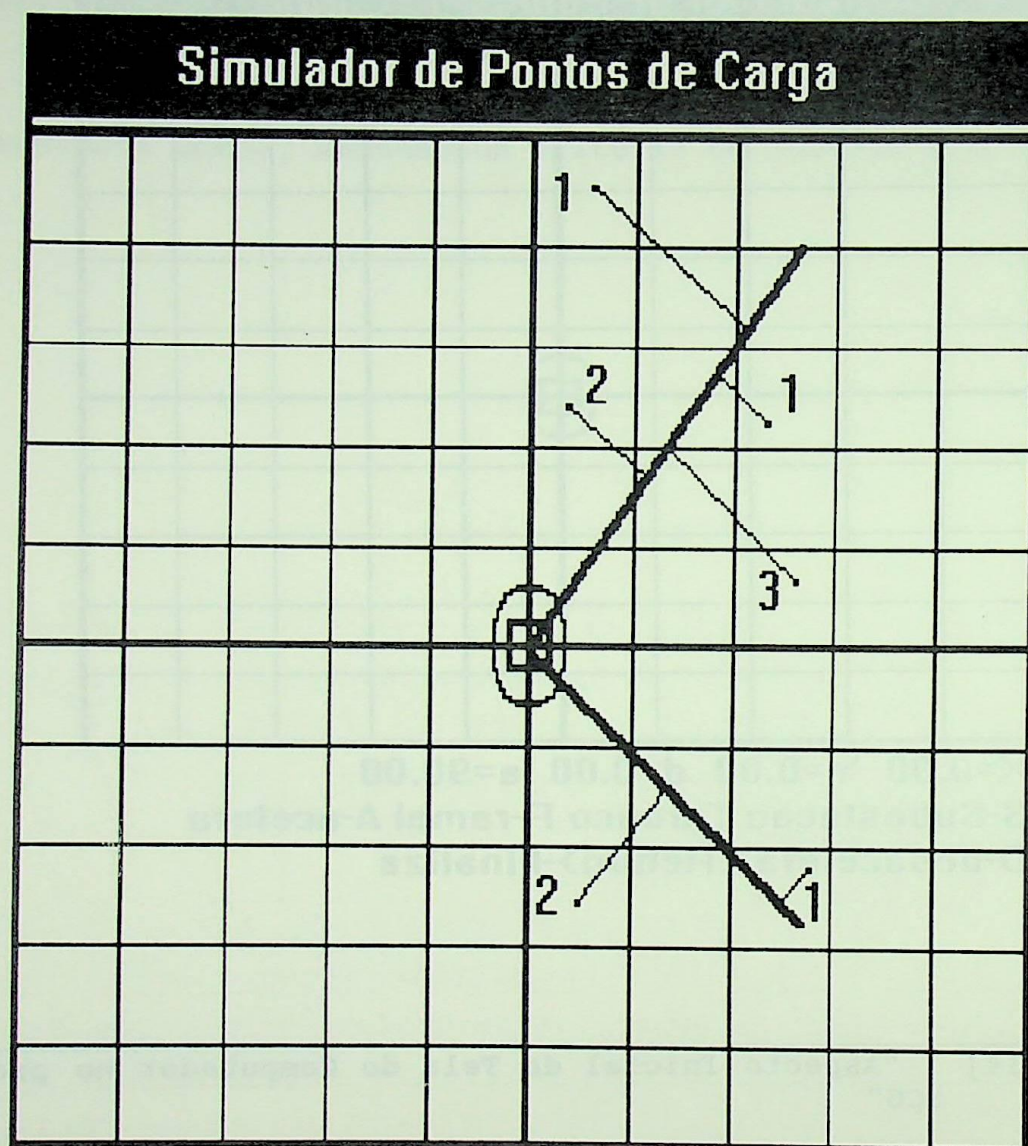
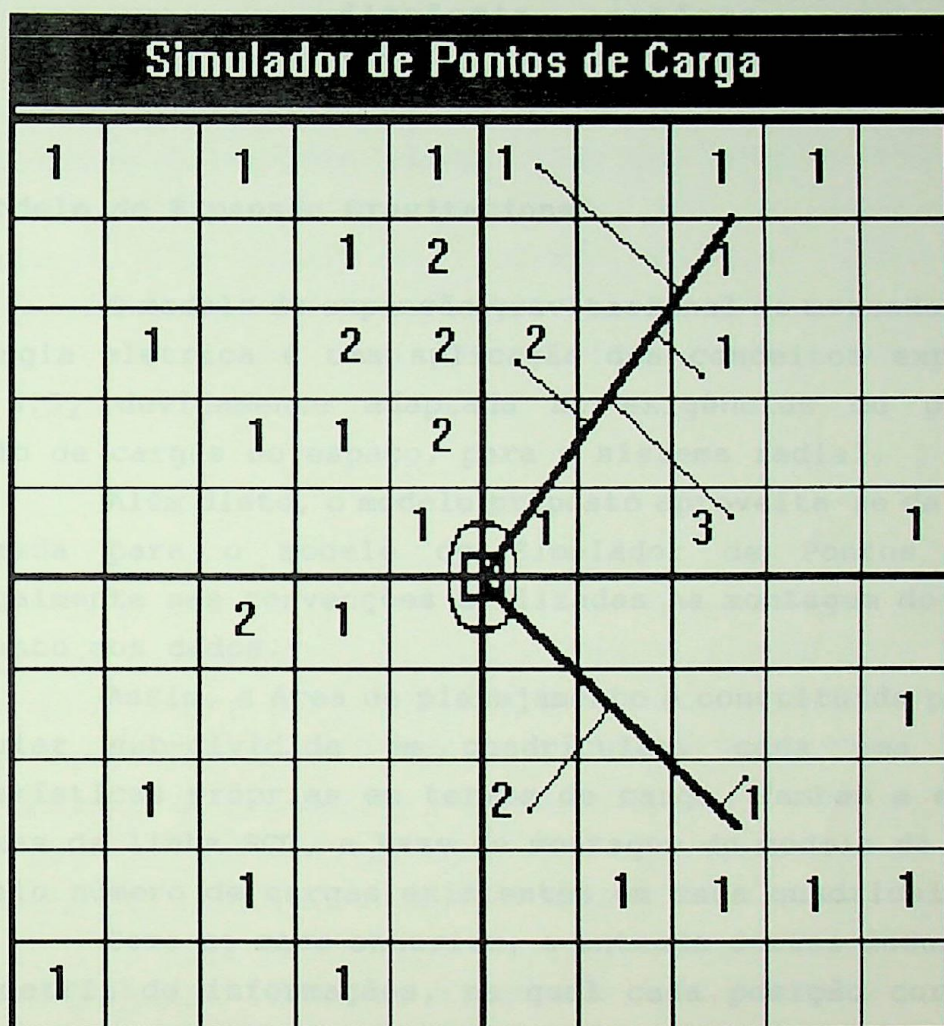


Figura [15] : "Localização Completada de Cargas, Troncos, Ramais e Sub-Estação"



Use as setas esquerda e direita para selecionar área
 Após a escolha da área pressione RETURN

Figura [16] : "Simulação Efetuada com o Número Esperado de Cargas em cada Quadrícula"

6. EFEITO DA INTERAÇÃO ESPACIAL.

"... A economia espacial se caracteriza por diversas imperfeições de mercado, devido ao fato de que a própria fricção da distância confere uma proteção monopolística às firmas próximas dos consumidores..."

6.1. Modelo de Expansão Gravitacional.

O modelo de expansão gravitacional do mercado consumidor de energia elétrica é uma aplicação dos conceitos explicados na seção 3.5, devidamente adaptada as exigências do problema da previsão de cargas no espaço, para o sistema radial.

Além disto, o modelo proposto aproveita-se da formulação idealizada para o modelo do Simulador de Pontos de Carga, principalmente nas convenções utilizadas na montagem do problema e tratamento dos dados.

Assim, a área de planejamento e constituída por uma área retangular sub-dividida em quadrículas, cada uma delas com características próprias em termos de carga. Também a exemplo dos programas da linha SCG, a base de montagem do modelo de previsão é dada pelo número de cargas existentes em cada quadrícula.

Como no caso anterior, a entrada destes dados dá origem a uma matriz de informações, na qual cada posição corresponde a informação em termos de cargas, que é denominada de Matriz Base.

A partir destes dados, os principais fundamentos dos modelos gravitacionais são adaptados da seguinte forma:

- A importância do nódulo é avaliada pela densidade de carga da quadrícula (que para áreas iguais nada mais indica do que o número de cargas p.u. de cada uma delas).

- A distância entre os nódulos é simplesmente a distância entre quadrículas que possuem carga.

É importante definir o efeito que estas adaptações deverão trazer ao resultado final da simulação. Neste particular, devem ser definidas as funções que irão determinar a influência da densidade e da distância de um nódulo (quadrícula) sobre o crescimento de carga verificado em outro nódulo (quadrícula).

A rigor, qualquer função matemática relacionando as variáveis pode ser definida, desde que, coerentemente à teoria gravitacional, haja uma relação de influência direta com a importância do nódulo e uma relação de influência inversa com a distância. Assim, neste caso específico, tem-se:

$$I_{ij} = f (N_i , d_{ij}) (43)$$

onde: I_{ji} = influência no ponto j de um nódulo i.

N_i = número de cargas do nódulo.

d_{ji} = distância do nódulo ao ponto j.

A relação (43), indica a influência sofrida por um ponto no espaço, decorrente da existência de um nódulo de importância N_i , situado a uma distância d_{ji} .

A função mais elementar que pode ser associada a esta relação, é considerar a influência I variando linearmente com a distância entre os nódulos e com o número de cargas de cada quadrícula. Neste caso tem-se:

$$I_{ij} = N_i - a.d_{ji} (44)$$

$$(i_{kl}) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \frac{(n_{ij}) - (n_{kl})}{[(x_k - x_i)^2 + (y_l - y_i)^2]} \cdot \dots \cdot \dots \cdot \dots \quad (47)$$

$i \neq k \text{ e } j \neq l$

com: $k = 1(1)m$.

$l = 1(1)n$.

onde: i_{kl} = Matriz Influência, de ordem $m \times n$.

n_i = número de cargas.

x e y = coordenadas das cargas.

No primeiro membro do duplo somatório, na (46), ou no numerador da (47), tem-se a matriz base, e no segundo membro (ou denominador), tem-se a matriz distâncias, com as coordenadas das cargas.

Uma vez definida a matriz influência, ela serve de base para a construção da função de probabilidade do aparecimento de novas cargas, seguindo um procedimento análogo ao descrito no modelo do SCG.

Construída esta função, o modelo passa a operar também de forma idêntica à mostrada no simulador de pontos de carga, isto é, sorteia valores que vão se alocar dentro de certos intervalos de classe, correspondentes à maior ou menor probabilidade de aparecimento de cargas em cada quadrícula.

6.2. Modelo de Expansão Combinado.

Como seu nome o sugere, o modelo de expansão combinado junta elementos dos dois modelos que acabaram de ser apresentados.

Deste modo, o princípio fundamental que passa a determinar a esperança de novas cargas numa quadrícula é dado por:

- Uma função de crescimento autônomo, que depende unicamente do número de cargas existentes na própria quadrícula.
- Uma função de crescimento induzido, que resulta de todas as influências exercidas sobre a quadrícula pelos nódulos próximos a ela.

Como resultado destes dois efeitos, é obtida uma Matriz Combinação, que mais uma vez serve como base para a elaboração de uma função de probabilidade do aparecimento de novas cargas. A matriz combinação é formada pelas esperanças combinadas decada quadrícula, que pode ser obtida fazendo:

$$E [N_i]_{Comb} = \alpha . E [N_i]_{Auton} + \beta . E [N_i]_{Infl} (48)$$

com $\alpha + \beta = 1$, de modo que a esperança total não se altere em relação ao modelo SCG. Então,

$$E [N_i]_{Comb} = \alpha . E [N_i]_{Auton} + (1-\alpha) . E [N_i]_{Infl} (49)$$

e $0 \leq \alpha \leq 1$,

onde: $E [N_i]_{Comb}$ = esperança total.

$E [N]_{Auton}$ = esperança associada à função autônoma.

$E [N]_{Infl}$ = esperança associada à função influência.

De posse desta função, é possível realizar simulações de forma parecida com a já apresentada nos modelos independentes, tomando-se o cuidado apenas de observar que a simulação no modelo combinado deve ser feita passo a passo, uma vez que, alterado o número de cargas de cada quadrícula, muda a Matriz Influência.

Um Exemplo Simples de Funcionamento.

É mostrado a seguir um exemplo hipotético, propositalmente simplificado, com o intuito de clarificar os procedimentos que foram sugeridos. A matriz de influências é construída seguindo o modelo gravitacional linear.

Imagine-se um mapa elétrico que resulte na seguinte Matriz Base:

0	1	1	0	1
0	0	1	2	1
1	1	3	2	1
0	1	1	1	0
0	0	0	0	0

Como resultado da aplicação da função autônoma de crescimento, com esperanças matemáticas do aparecimento de novas cargas dadas por:⁷

N_i	0	1	2	3
$E [N_i]$	1	2	4	6

tem-se a matriz base do programa SCG para o cálculo da função de probabilidade. Esta matriz resulta :

7. No modelo proposto a esperança matemática era calculada segundo uma série histórica que permitia obter o estágio desenvolvimento de cada quadrícula.

1	2	2	1	2
1	1	2	6	2
2	2	4	6	2
1	2	2	2	1
1	1	1	1	1

A matriz influência, também é calculada a partir da matriz base. Neste caso, lembrando da (46), ter-se-á :

0,17	0,76	1,59	1,76	0,76
0,76	1,59	3,59	2,59	2,35
1	2	1,59	3	2,59
0,76	1,59	2,59	2,59	1,35
0,17	0,76	1	0,76	0,17

Comparando alguns resultados entre o número de cargas esperado a partir da matriz de crescimento autônomo e a matriz influência, vê-se uma significativa diferença de propósito. Por exemplo, de acordo com a primeira, a esperança nas quadrículas 1.1 e 1.4 é a mesma. Portanto, as probabilidades de surgimento de cargas são iguais. Considerando a matriz influência, as esperanças para estas mesmas quadrículas são respectivamente 0,17 e 1,76, o que significa uma probabilidade 10,35 vezes maior na quadrícula 1.4 por conta da sua proximidade aos nódulos 2.4 e 3.3. O mesmo pode ser verificado com relação às quadrículas 1.5 e 2.3, com uma probabilidade 4,72 vezes maior na matriz influência para a segunda. Neste caso, aliás, a proximidade da quadrícula 2.3 com os nódulos centrais, lhe conferem a maior probabilidade em termos da matriz influência.

Definindo agora o valor do parâmetro associado à parte autônoma de crescimento, por exemplo $\alpha = 0,75$ é possível montar a matriz combinada de esperanças.

Tem-se assim:

0,7925	1,6900	1,8975	1,1900	1,6900
0,9400	1,1475	2,3975	5,1475	2,0875
1,7500	2,0000	3,3975	5,2500	2,1475
0,9400	1,8975	2,1475	2,1475	1,0875
0,7925	0,9400	1,0000	0,9400	0,7925

O que corresponde a uma matriz de probabilidades :

0,0171	0,0366	0,0411	0,0258	0,0366
0,0203	0,0248	0,0519	0,1114	0,0452
0,0379	0,0433	0,0735	0,1136	0,0465
0,0203	0,0411	0,0465	0,0465	0,0235
0,0171	0,0203	0,0216	0,0203	0,0171

Gráficamente, o mapa de probabilidades resulta:

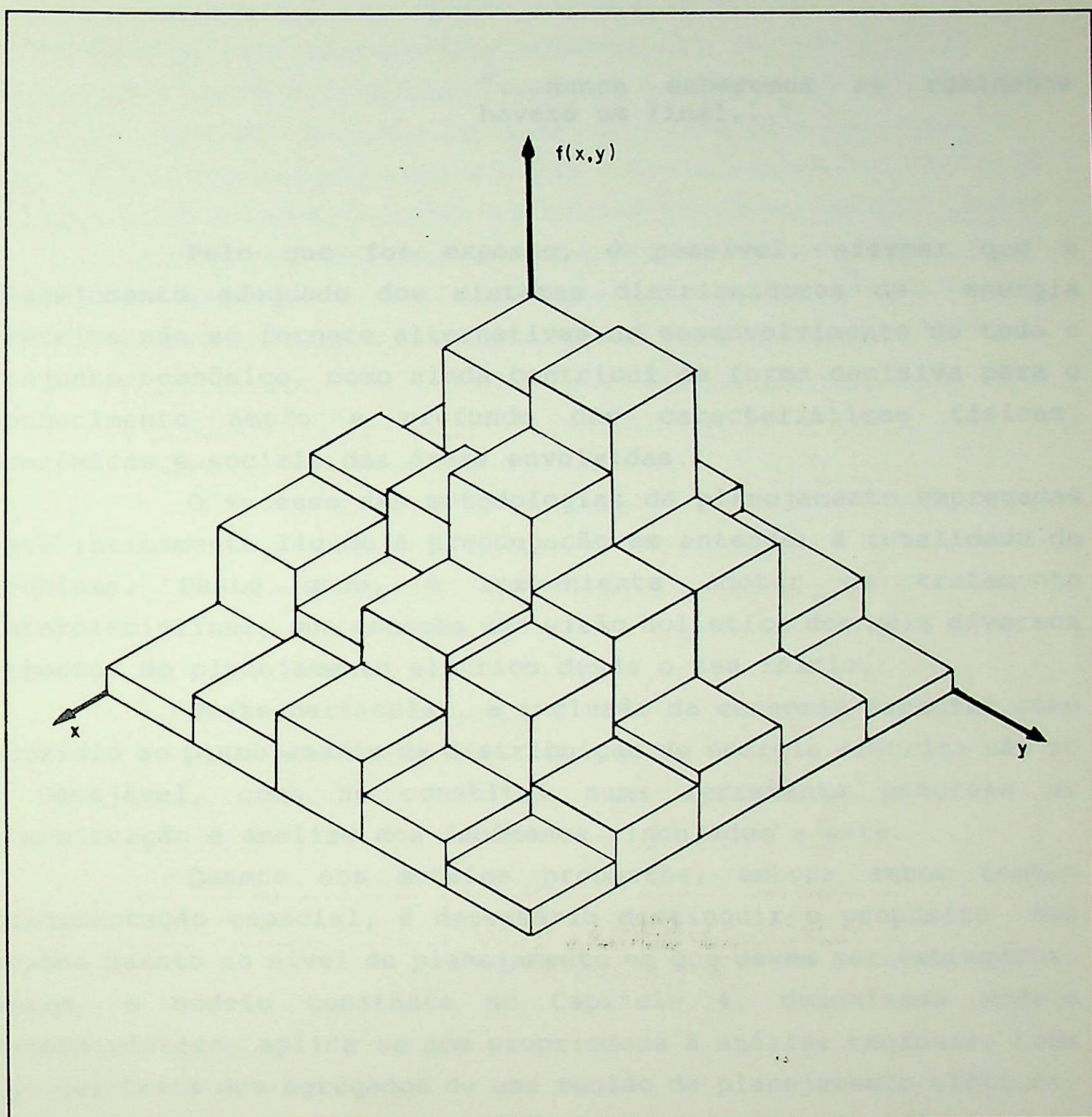


Figura [17] : "Mapa de probabilidades do modelo combinado"

7. CONCLUSÕES

**"...Nunca saberemos se realmente
haverá um final..."**

Pelo que foi exposto, é possível, afirmar que o planejamento adequado dos sistemas distribuidores de energia elétrica não só fornece alternativas de desenvolvimento de todo o conjunto econômico, como ainda contribui de forma decisiva para o conhecimento amplo e profundo das características físicas, econômicas e sociais das áreas envolvidas.

O sucesso das metodologias de planejamento empregadas está intimamente ligado à preocupação em entender à totalidade do problema. Deste modo, é conveniente adotar um tratamento interdisciplinar, que conceba uma visão holística dos mais diversos aspectos do planejamento elétrico desde o seu início.

Neste particular, a inclusão da economia espacial como subsídio ao planejamento da distribuição de energia elétrica não só é desejável, como se constitui numa ferramenta preciosa de conceituação e análise dos fenômenos vinculados a este.

Quanto aos modelos propostos, embora ambos tenham fundamentação espacial, é necessário distinguir o propósito dos mesmos quanto ao nível de planejamento em que devem ser empregados. Assim, o modelo constante no Capítulo 4, denominado Modelo Determinístico, aplica-se com propriedade à análise regional, toda vez que trata dos agregados de uma região de planejamento elétrico. Resulta, neste caso, conveniente para definir tendências de crescimento de longo prazo, bem com a evolução dos parâmetros técnico-econômicos médios regionais. É próprio também na discussão

e na definição de montantes de investimento, e nas conseqtências destes no estado do sistema distribuidor.

O modelo de expansão combinado, apresentado no Capítulo 6, ou qualquer um dos modelos apresentados no Capítulo 5, são basicamente aplicáveis a análise locacional, tal como definida no Capítulo 3. A partir deles, é possível otimizar diversas alternativas de atendimento dos mercados gerados pelas simulações. Estes modelos permitem também um grau de detalhe conveniente à formulação de planos de obras, tornando assim possível uma visualização mais clara da problemática de curto prazo do planejamento da expansão do sistema distribuidor de energia elétrica.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Arango, Héctor; Tiburcio, J.C.; Nunes, R.A.F.; Arango, H.G.- "Desenvolvimento futuro do Sistema de Distribuição Elétrica"- 1º Seminário Internacional de Distribuição, Belo Horizonte, Brasil-Novembro de 1991.
- [2] Arango, H.G.; Arango, H.- "A Tool for Simulating the Expansion of the Electrical Consumer's Market" - Second International Conference in Modelling and Simulation MS'93, Victoria University, Melbourne, Austrália, Julho de 1993.
- [3] Arango, H.G.; H.; Arango -"Compensação de Reativos : Uma Análise Técnico-Econômica"- IV Seminário Interno da EFEI, Itajubá, Brasil-Setembro de 1988.
- [4] Arango, H.; Arango, H.G.-"Otimização Técnico-Econômica da Confiabilidade em Sistemas de Distribuição"- 2 Congresso Latinoamericano de Control Automático, Asociación Argentina de Control Automático, Buenos Aires, Argentina-Outubro de 1986.
- [5] Arango, H.G.; Costa R.A. -"Otimização dos Parâmetros Técnicos no Planejamento da Distribuição"- 3 Congresso Latinoamericano de Control Automático, Vina del Mar, Chile-Outubro de 1988.
- [6] Arango H.; Arango H.G.- "Compensação de Reativos no Planejamento da Distribuição : Um enfoque Técnico-Econômico." IV Seminário de Pesquisa da EFEI, Itajubá, Brasil, setembro de 1988.
- [7] Banes et alii- "Seleção de Investimentos no Setor Elétrico"- Cadernos do Plano 2015, N 5, Eletrobrás- 1991.
- [8] CPID-NE.- "Revisão da Nota Técnica 02"- 1988.
- [9] EDF - "Application des Theories Economiques aux Travaux de la Distribution". France, Mai 1982.
- [10] EDF - "Relatorios sobre Planejamento da Distribuição no Brasil- 1986 a 1989.

- [11] Ekwue, A.O.- "Economics and reliability of supply of developing power systems". IEE PROCEEDINGS, Vol 133, Pt C, Num 7, November 1986.
- [12] Eletrobrás, Diretoria de Planejamento e Engenharia- "Classificação de áreas atendidas por sistemas de distribuição utilizando análise fatorial e análise de grupamentos". Nota Técnica Num 08. Fevereiro de 1988.
- [13] ELETROBRÁS/DEDI; CPID-Nordeste, Sub-grupo Econômico - "Uma Estrutura Geral para a Avaliação de Projetos de Capital para Empresas Concessionárias de Distribuição de Energia Elétrica.
- [14] Gist, N.P.; Halbert, L.A.- "A Cidade e o Homem: a sociedade urbana". Editora Fundo de Cultura, Rio de Janeiro, 1961.
- [15] Gonen, Turan - "Electric Power Distribution System Engineering"- Mc. Graw Hill Book Company - 1986.
- [16] Gustafson, M.W.- "Demand, energy, and marginal electric systems losses". IEEE Transactions, Vol. PAS-102, Num 9, September 1983.
- [17] Haddad, Paulo R. et alii - "Economia Regional: Teorias e Métodos de Análise". Banco do Nordeste do Brasil S.A.- Fortaleza, 1989.
- [18] Hemmer, S.- "Qualite de desert et Planification du Developement des Réseaux MT - Cired , Liege - 1987
- [19] Homi, M.H.; Tiburcio, J.C.- "Metodologias de Planejamento da Distribuição no Brasil e em Outros Países: Estudo Comparativo" - IV Seminário de Pesquisa da EFEI, Itajubá, Brasil, Setembro de 1988.
- [20] Institut de Recherche de L'Hidro Quebec, IREQ- "Le probleme du choix economique des equipaments de distribution: l'etat de l'art". Rapport num. IREQ 7RT-3533G, Outubro de 1985.

- [21] Lakatos, E.M.- "Sociologia Geral".3ª Edição. Editora Atlas, São Paulo, 1979.
- [22] Marconi, M. de A.; Presotto, Z.M.N.- "Antropologia, uma introdução".1 Edição. Editora Atlas, São Paulo, 1985.
- [23] Messenger, P.- "Le Equilibre Optimal Entre Investissements et Matériels dans le Développement des Réseaux Arborescents" - EDF Bulletin de la Direction des Études et Recherches- Série B, Nº 1, pg. 33/38- 1991.
- [24] Messenger, P.- "Le Développement des Réseaux MT"-RGE. 7/8,pg 472/486 - 1982
- [25] Messenger, Pierre- "Modélisation du développement de la structure d'un réseau rural en moyenne tension". RGE-7-8/82 Juillet-Août1982.
- [26] Messenger, P.; Thibon - "Modelisation et Lois Théoriques des Développements des Réseaux de Distribution" -Cired 1981-Brigton 6.8.
- [27] Mincart, G. - "Tendances Nouvelles dans la Planification des Réseaux MT" - Cired , 6.11 - 1985.
- [28] Miranda, V et alii - "Localization Optimale des uns Réseaux de Distribution" - Cired , Liege A.13 - 1982.
- [29] Munasinghe, M.- "Electricity Pricing" - A World Bank Publication - 1985.
- [30] Oyama, Tatsuo- "Applying mathematical programming to measure electricity marginal costs". IEEE 82 WM 114-7, 1982.
- [31] Richardson, H.W.- "Elementos de Economia Regional". Zahar Editores - Rio de Janeiro, 1973.
- [32] Santos, C.C.X.; Nunes, R.A.F.; Arango, H.G.-"Principais Metodologias para Avaliação dos Custos das Interrupções de Energia Elétrica"- IV Seminário Interno da EFEI, Itajubá, Brasil-Setembro de 1988.

[33] Squire, Lyn; van der Tak, H.G.- "Análisis Económico de Proyectos" - Editorial Tecnos, S.A. - Madrid, 1980.

[34] Tiburcio, J.C.; Arango, H.- "Equacionamento das Perdas de Potência Ativa em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica." IV Seminário de Pesquisa da EFEI, Itajubá, Brasil, setembro de 1988.

DATA 23 / 12 / 19 93
PROC. _____
PED. PPG-
LIV. _____
Cz\$ DOAÇAS

EFEI - BIBLIOTECA MAUÁ

8200733



NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA

FICHA 01

T. 733

EFEI / Biblioteca Mauá

S662m

621.315:621.3.011.7(043.2)

ARANGO, H. G.

Modelos espaciais de expansão de sistemas distribuídos de energia elétrica.

Data	N.º Registro	Data
Adquirida		Devolvida

EFEI

BIBLIOTECA MAUÁ

Esta publicação deverá ser devolvida dentro do prazo estipulado.

O leitor é responsável pela publicação em seu poder.