

**Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**

**Departamento de Engenharia de Energia e  
Automação Elétricas**

ISSN 1413-2214

**BT/PEA/9603**

---

**Paradigma de Planejamento sob  
Incertezas - Aplicação ao Planejamento  
dos Sistemas de Distribuição de  
Energia Elétrica**

---

**Alberto Bianchi Junior  
Lineu Belico dos Reis**

**São Paulo - 1996**

O presente trabalho é um resumo da tese de doutorado apresentada por Alberto Bianchi Junior, sob orientação do Prof. Dr. Lineu Belico dos Reis: "Paradigma de Planejamento sob Incertezas - Aplicação ao Planejamento dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica", defendida em 15/04/96, na EPUSP.

A íntegra da tese encontra-se à disposição com o autor e na biblioteca de Engenharia de Eletricidade da Escola Politécnica da USP.

Bianchi Junior, Alberto

Paradigma de planejamento sob incertezas: aplicação ao planejamento dos sistemas de distribuição de energia elétrica / A. Bianchi Junior, L.B. dos Reis. São Paulo : EPUSP, 1996.

20p. -- (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, BT/PEA/9603)

1. Distribuição (Energia elétrica) 2. Sistemas difusos (Matemática) I. Reis, Lineu Belico dos II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas III. Título IV. Série

ISSN 1413-2214

CDD 621.319  
511.322



## **PARADIGMA DE PLANEJAMENTO SOB INCERTEZAS - APLICAÇÃO AO PLANEJAMENTO DOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

## **PARADIGM OF PLANNING UNDER UNCERTAINTIES - APPLICATION TO THE PLANNING OF THE ELECTRICAL ENERGY DISTRIBUTION SYSTEMS**

**PROF. DR. ALBERTO BIANCHI JUNIOR**

**PROF. DR. LINEU BELICO DOS REIS**

### **RESUMO**

Neste trabalho é apresentada uma metodologia original de planejamento multi-estágios, com objetivos e restrições conflitantes, incorporando o conceito de incertezas. Para tanto, o paradigma proposto é baseado na Programação Dinâmica<sup>[1]</sup>, que trata dos processos multi-estágios sujeitos a restrições conflitantes, na Teoria dos Conjuntos Difusos<sup>[2][3][4]</sup>, através das decisões e números difusos, que modelam as incertezas e decisões ambíguas referentes às variáveis qualitativas, e na consideração de "regras evolutivas"<sup>[5]</sup> associadas a algoritmos de "fluxos em redes"<sup>[6]</sup> ("Branch & Bound").

Em sua elaboração conceitual, o paradigma é desenvolvido de uma forma ampla, de aplicação generalizada a uma classe bem definida de problemas de planejamento. Em particular, o modelo se enquadra no âmbito do planejamento flexível<sup>[7]</sup>, que, na literatura mais recente tem sido muito discutido. Entenda-se por planejamento flexível aquele que permite ao planejador, dentro de limites bem

determinados, a avaliação da política de planejamento composta por "faixas" de opções (discretas ou contínuas), associadas a níveis de incerteza em relação ao "mundo real".

No intuito de validar e consolidar os conceitos teóricos, foi elaborado um algoritmo voltado ao planejamento agregado<sup>[8]</sup> da distribuição de energia elétrica, que apresenta características intrínsecas que se enquadram perfeitamente na aplicabilidade do paradigma.

Através de comparações efetuadas junto a um algoritmo já validado, são feitas avaliações referentes às potencialidades e à coerência da aplicação do paradigma.

### **"ABSTRACT"**

In this work it is presented an original methodology of multistage planning, with conflictive objectives and restrictions, incorporating the concept of uncertainties. To do so, the proposed paradigm is based on the Dynamic Programming, which comprehends the multistage processes subject to conflictive restrictions; on the Fuzzy Sets Theory, through the decisions and fuzzy numbers, which model the uncertainties and ambiguous decisions referent to qualitative variables; and on the consideration of "evolutional rules" associated to "network flow" algorithm.

In its conceptual elaboration, the paradigm is developed in a very ample way, of generalized application to a well defined class of planning problems. Particularly, the model fits in the ambit of the flexible planning, one which has been very discussed in the recent literature. Flexible planning must be understood as the one which allows to the planner, under well-defined limits, the evaluation of the planning policy composed by "strips" of options (discrete or continuous), associated to uncertainty levels related to the "real world".

In order to validate and consolidate the theoretic concepts, it was elaborated an algorithm turned to the aggregated planning of the distribution of electric energy, that presents intrinsic characteristics which are perfectly fitted in the paradigm's applicability.

Through comparisons effectuated with an pre-validated algorithm, evaluations referent to the potentialities and to the coherence of the paradigm's applicability were made.



## 1. - INTRODUÇÃO

A necessidade de ferramentas adequadas de apoio ao planejamento em setores econômicos estratégicos, tem atraído a atenção de planejadores e pesquisadores nos últimos anos. A busca por modelos que forneçam subsídios ao planejamento de maneira prática e objetiva, de modo confiável e adequado à realidade do problema, tem sido a grande meta almejada pelos estudiosos.

A utilização de métodos de otimização, baseados em programação matemática, vem ganhando espaço no que se refere a concepção de processos de resolução de problemas de alocação de recursos, sujeitos aos mais variados tipos de vínculos. Geralmente tais métodos se direcionam à minimização de custos globais de investimentos, necessários à implantação e manutenção de sistemas de produção, sujeitos a restrições e objetivos operativos, tecnológicos, de qualidade, ambientais etc... .

Muitos desses métodos, principalmente aqueles que se direcionam às alocações temporais de recursos, sofrem limitações em sua aplicação devido aos chamados "Problemas de Dimensionalidade". Tais problemas, devido à característica explosiva da geração de possibilidades de alocação de recursos ("estados do sistema"), levam a processamentos proibitivos em termos do espaço requerido para o armazenamento das variáveis.

Em outras situações, a utilização de modelos com sólida base quantitativa na avaliação de fatores subjetivos, e algumas vezes ambíguos, tem se mostrado ineficientes. Tal fato se deve, por um lado à necessidade de representações extremamente complexas daquelas variáveis no contexto quantitativo e, por outro lado, devido às rigorosas condições de contorno, os resultados se caracterizavam por estreitas faixas de validade. Estes problemas são patentes quando se deseja modelar graus de incerteza através de ferramentas matemáticas inadequadas.

No sentido de preencher uma importante lacuna na literatura, no que concerne a ferramentas de planejamento que considerem as incertezas oriundas do juízo humano (quer seja individual ou coletivo), partiu-se para a definição de um paradigma de análise multi-estágios, que se utiliza da Programação Dinâmica, com a modelagem das incertezas efetuada pela Teoria dos Conjuntos Difusos. Além das do ferramental citado, aspectos heurísticos, introduzidos através das chamadas "regras evolutivas", são levados em consideração na modelagem proposta.

Com o intuito de validar e verificar as potencialidades, flexibilidade e facilidades do paradigma, uma aplicação é efetuada ao planejamento agregado da distribuição de energia elétrica, para sistemas isolados (regiões não completamente urbanizadas). Este tipo de problema apresenta características intrínsecas<sup>[9][10]</sup> que se adequam perfeitamente à metodologia proposta. Além disso, a crescente importância adquirida pelo planejamento da distribuição, no setor elétrico, nas últimas décadas



torna a presente aplicação algo além de um mero elemento de validação de uma metodologia matemática.

O trabalho, além de resultar numa fonte de consulta a aplicações do paradigma a ambientes similares, mesmo de outras áreas, apresenta uma modelagem já elaborada, e validada, de sua aplicação ao planejamento dos sistemas de distribuição de energia elétrica, resultando num filão potencial de pesquisas e aperfeiçoamentos, denotando uma importante e original contribuição às literaturas de métodos quantitativos e planejamento de sistemas de distribuição.

## **2. - O PARADIGMA DE PLANEJAMENTO SOB INCERTEZAS**

No intuito de conceber um ambiente de apoio à decisão capaz de trabalhar com processos de planejamento caracterizados por objetivos e restrições conflitantes, com um interrelacionamento temporal e fortemente influenciados pelas incertezas oriundas do juízo humano, será apresentada uma metodologia de planejamento estratégico baseada nas seguintes ferramentas: Programação Dinâmica e Teoria dos Conjuntos Difusos.

Todo sistema que apresenta uma dinâmica de modificações intrínsecas, é um ambiente denotado por regras evolutivas bem definidas. Deste modo, as regras evolutivas se constituem num terceiro ferramental do paradigma. Neste contexto, a consideração das mesmas se dá no sentido de que, através delas, são gerados os possíveis estados do sistema e, o mais importante, por elas são definidas todas as relações de causa e efeito entre os estados possíveis do sistema.

### **a.- Alguns Conceitos da Teoria dos Conjuntos Difusos<sup>[2][3][4]</sup>**

A Teoria dos Conjuntos Difusos, desenvolvida por Zadeh em 1965, tem como objetivo fundamental a representação adequada das incertezas ("nebulosidades") inerentes às variáveis que representam um sem número de modelos de nosso dia-a-dia. Esta teoria é uma extensão da teoria dos conjuntos, tendo como diferença básica o fato de não somente considerar uma pertinência inteira (Booleana), mas considerar pertinências contínuas no intervalo  $[0,1]$ . Deste modo, um elemento  $x$ ,

do conjunto universal  $X$ , pode pertencer a um conjunto  $A \subset X$  com um grau de pertinência  $\mu_A(x)$  ( $0 \leq \mu_A(x) \leq 1$ ).

A representação de uma variável que apresenta graus de incerteza ou ambigüidades é efetuada considerando-se a mesma como um conjunto difuso. Para o conjunto dos números reais, um número qualquer  $a \in \mathbf{R}$ , pode ser representado pela seguinte função de pertinência:

$$\mu_a(x) = \begin{cases} 1, & x = a \\ 0, & x \neq a \end{cases} \quad (1)$$

Um número difuso qualquer  $A \subset \mathbf{R}$ , pode ser definido num intervalo de confiança  $[i, s]$  de acordo com a seguinte função de pertinência:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < i \\ f(x), & i \leq x \leq s \\ 0, & x > s \end{cases} \quad 0 \leq f(x) \leq 1 \quad (2)$$

onde:

- $i$  = valor menos possível inferior do número difuso;
- $s$  = valor menos possível superior do número difuso;
- $f(x)$  = função contínua (ou ao menos contínua por partes) definida em  $\mathbf{R}$ , para o intervalo de confiança  $[i, s]$ .

Existem inúmeras maneiras de se representar a função  $f(x)$  para os números difusos, entretanto a mais utilizada na representação das variáveis "incertas" é a dos números difusos triangulares (TFN - "Triangular Fuzzy Numbers"), mostrada na figura abaixo:

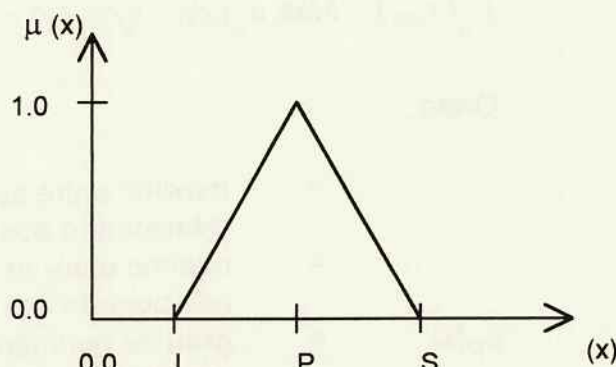


Figura 1 - Número Difuso Triangular



Onde  $p$  é o valor de maior possibilidade de ocorrência de  $x$  em  $A$ .  
O TFN é definido pela tripla de números reais  $(i, p, s)$  cuja função de pertinência é dada abaixo:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < i \\ \frac{x-i}{p-i}, & i \leq x \leq p \\ \frac{s-x}{s-p}, & p \leq x \leq s \\ 0, & x > s \end{cases} \quad (3)$$

As comparações e decisões, presentes nos processos relacionais e lógicos do ambiente difuso, são denominadas de "modelo de decisão difusa". O modelo de decisão difusa busca a melhor escolha num processo, onde tanto os objetivos e as restrições são marcadas pelas incertezas. A figura abaixo ilustra, pela decisão difusa, a escolha da melhor alternativa segundo as pertinências da função objetivo ( $\mu_O(x)$ ) e de uma restrição ( $\mu_R(x)$ ):

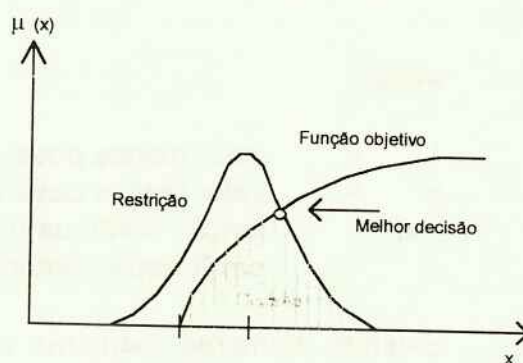


Figura 2 - Decisão Difusa

A melhor alternativa é determinada através da chamada "operação Max-Min", descrita abaixo:

$$\mu_D(x_{Max}) = \text{Max}(\mu_D(x)) = \bigvee_x \mu_D(x) = \bigvee_x (\mu_O(x) \wedge \mu_R(x)) \quad (4)$$

Onde:

$\bigvee$	=	máximo entre as pertinências de um elemento $x$ , relacionado aos números (conjuntos) difusos $O$ e $R$ ;
$\wedge$	=	mínimo entre as pertinências de um elemento $x$ , relacionado aos números (conjuntos) difusos $O$ e $R$ ;
$\mu_O(x)$	=	grau de pertinência do elemento $x$ em relação ao número difuso $O$ ;



$\mu_R(x)$	=	grau de pertinência do elemento x em relação ao número difuso R;
$\mu_D(x)$	=	grau de pertinência do elemento x em relação à decisão difusa D (região hachurada);
$\mu_D(x_{Max})$	=	grau de pertinência do elemento x em relação à melhor decisão difusa.

## b. - O Paradigma

O paradigma proposto tem como meta a minimização de uma função do tipo "custo-benefício" de recorrência dinâmica, sujeita a restrições estágio a estágio. Nesta modelagem, a partir dos custos e benefícios referentes às mudanças de estado do sistema, é efetuado o processo de otimização, que fornece a política ótima para todos os estágios do horizonte de planejamento ("caminho ótimo"). Os estados ótimos, por estágio, são armazenados em "vetores de estado". As decisões referentes às transições de estado são armazenadas em "vetores de decisão" para cada estágio. Tais vetores direcionam o fluxo da decisão através do grafo de estados possíveis ("árvore de estados")<sup>[6]</sup>, utilizando um processo "de trás para a frente" baseado no princípio de otimalidade de Bellman<sup>[1]</sup>.

As variáveis e parâmetros presentes na modelagem são consideradas números difusos triangulares. Esta consideração advém do fato de que os requisitos de mercado e os custos são fortemente influenciados pelo juízo humano (hábitos do mercado e oscilações econômicas). Todas as demais variáveis do problema são dependentes das variáveis acima e, deste modo, agregam a si as características difusas daquelas variáveis.

De uma maneira global, a metodologia proposta busca otimizar o problema de planejamento decompondo-o em duas partes: a primeira denominada de **"problema da qualidade"** e a segunda chamada de **"problema do investimento"**.

Na primeira parte, busca-se um conjunto de decisões que não violem as restrições de desempenho impostas pelo ambiente. Este conjunto de decisões fornecem os chamados "estados limites", ou seja, os estados, nos respectivos estágios, que atendem ao sistema, sem que as condições de desempenho do ambiente, naqueles estágios, ultrapassem os limites operativos, de qualidade, de economicidade, etc... Estes "estados limites", que estão relacionados com a mínima qualidade permitida ao funcionamento do sistema ao longo do horizonte de planejamento, não denotam necessariamente uma política ótima em termos da relação "custo-benefício". Tal política ótima é determinada na segunda parte. Os "estados limites", na realidade, efetuam uma primeira triagem na "árvore de estados", eliminando aquelas que não atendem aos critérios de desempenho. Assim, para a



segunda parte só são consideradas soluções alternativas que , garantidamente, atendem aos critérios de desempenho.

A segunda parte do processo de otimização é efetuada de modo semelhante à primeira. A diferença reside no fato de que, ao invés de serem consideradas as restrições de desempenho, são consideradas restrições temporais, ou seja, o espaço de estados é reconstruído de modo a considerar todas as combinações possíveis de estado entre as dimensões do espaço, respeitando-se as relações de causa e efeito, tendo como elementos restritivos os “estados limites” determinados na primeira parte.

Deste modo, a mínima relação global “custo-benefício” é determinada, sem que as restrições de desempenho sejam violadas.

Na primeira parte do problema a função de recorrência a ser otimizada é a seguinte:

$$\begin{aligned}\tilde{Z}_j(U_j) &= \text{Min}_j \left\{ \sum_k^{Ndi} \tilde{X}^k(D_j) \right\} + \frac{\tilde{Z}_{j+1}(U_{j+1})}{(1 + \tilde{\beta})^{\Delta t}}, \quad j = NH - 1, \dots, 1 \\ \tilde{Z}_j(U_j) &= \text{Min}_j \left\{ \sum_k^{Ndi} \tilde{X}^k(D_j) \right\}, \quad j = NH\end{aligned} \quad (5)$$

$S / A$

$$\tilde{g}_{i,j}(U_j) \leq R_i, \quad i = 1, \dots, Nr; \quad j = 0, \dots, NH$$

onde:

- $\beta$  = taxa de atualização de capital (por unidade);
- $Ndi$  = dimensão do espaço de estados;
- $NH$  = número total de estágios do horizonte de planejamento;
- $\Delta t$  = intervalo de tempo entre estágios, anos;
- $\sim$  = símbolo que denota que uma variável é um número difuso;
- $k$  = símbolo que referencia a k-ésima classe de elementos do problema;
- $j$  = índice que referencia o j-ésimo estágio;
- $U_j$  = vetor dos “estados limites” do ambiente de planejamento no estágio j;
- $D_j$  = vetor de decisões do estágio j, correspondente à melhor transição do estado atual para um estado posterior, segundo a melhor relação “custo-benefício” dos elementos a serem comissionados no estágio j, respeitando-se as restrições de desempenho;
- $X^k(D_j)$  = melhor relação “custo-benefício” dos comissionamentos dos elementos da classe k, considerando-se uma decisão  $D_j$ , no estágio j;



- $Nr$  = número de restrições de desempenho a serem avaliadas em cada estágio;  
 $i$  = índice que referencia a  $i$ -ésima restrição de desempenho em cada estágio;  
 $g_{i,j}(U_j)$  =  $i$ -ésima condição de desempenho do ambiente que é avaliada no estágio  $j$ ;  
 $R_i$  = restrição que limita a  $i$ -ésima condição de desempenho do ambiente (relacionada a uma regra evolutiva qualquer).

O vetor  $U_j$  apresenta a seguinte composição:

$$U_j = \begin{bmatrix} u_j^1 \\ u_j^2 \\ \vdots \\ u_j^k \end{bmatrix} \quad (6)$$

onde:

- $u_j^k$  = "estado limite" da  $k$ -ésima classe de elementos do problema, no estágio  $j$ .

O vetor  $D_j$  possui a seguinte estrutura:

$$D_j = \begin{bmatrix} (u_j^1, u_{l_1}^1, l_1) \\ (u_j^2, u_{l_2}^2, l_2) \\ \vdots \\ (u_j^k, u_{l_k}^k, l_k) \end{bmatrix} \quad (7)$$

onde:

- $l_k$  = estágio no qual é efetuado o comissionamento que denota a mudança de estado da  $k$ -ésima classe de elementos do problema, a partir do estágio  $j$ ;  
 $u_{l_k}^k$  = "estado limite" da  $k$ -ésima classe de elementos do problema, no estágio  $l_k$  ( $l_k > j$ ).

O vetor  $D_j$  é formado a partir do conjunto dos "estados limites" que apontam para um "estado limite" futuro.

A solução do processo de otimização da primeira parte ("problema da qualidade"), que define os "estados limites", é a seguinte:

$$S = \{U_j\} \quad j = 1, \dots, NH \quad (8)$$

onde:

$U_j$  = vetor de "estados limites" para o estágio  $j$ .

De posse dos "estados limites", referentes à melhor solução do "problema da qualidade" do paradigma, parte-se para a resolução final do "problema do investimento". A nova função de recorrência a ser otimizada é a seguinte :

$$\tilde{Z}_j^*(U_j^*) = \text{Min}_j \left\{ \sum_k^{Ndi} \tilde{X}^{*k}(D_j^*) \right\} + \frac{\tilde{Z}_{j+1}^*(U_{j+1}^*)}{(1 + \tilde{\beta})^\Delta} \quad , \quad j = NH - 1, \dots, 1$$

$$\tilde{Z}_j^*(U_j^*) = \text{Min}_j \left\{ \sum_k^{Ndi} \tilde{X}^{*k}(D_j^*) \right\} \quad , \quad j = NH \quad (9)$$

$S / A$

$$u_n^{*k} = u_j^k \mid n \leq j \quad , \quad k = 1, \dots, Ndi ; \quad j = 0, \dots, NH$$

onde:

- $U_j^*$  = vetor dos estados do ambiente de planejamento no estágio  $j$ ;
- $D_j^*$  = vetor de decisões ótimas do estágio  $j$ , correspondente à transição ótima do estado atual para um estado posterior ("caminho ótimo"), segundo as relações "custo-benefício" ótimas dos elementos a serem comissionados no estágio  $j$ , respeitando-se os "estados limites";
- $X^{*k}(D_j^*)$  = ótima relação "custo-benefício" dos comissionamentos dos elementos da classe  $k$ , considerando-se uma decisão  $D_j^*$ , no estágio  $j$ ;
- $n$  = índice que referencia o  $n$ -ésimo estágio;
- $u_n^{*k}$  = estado da  $k$ -ésima classe de elementos do problema no estágio  $n$ ;
- $u_j^{*k}$  = estado da  $k$ -ésima classe de elementos do problema no estágio  $j$ .

O vetor  $U_j^*$  possui a mesma estrutura do vetor  $U_j$ , descrito no "problema da qualidade":



$$U^*_j = \begin{bmatrix} u_j^{*1} \\ u_j^{*2} \\ \vdots \\ u_j^{*k} \end{bmatrix} \quad (10)$$

onde:

$u_j^{*k}$  = estado da k-ésima classe de elementos do problema, no estágio j.

Analogamente, o vetor  $D^*_j$  possui a seguinte estrutura:

$$D^*_j = \begin{bmatrix} (u_j^{*1}, u_{l_1}^{*1}, l_1) \\ (u_j^{*2}, u_{l_2}^{*2}, l_2) \\ \vdots \\ (u_j^{*k}, u_{l_k}^{*k}, l_k) \end{bmatrix} \quad (11)$$

onde:

$u_{l_k}^{*k}$  = estado da k-ésima classe de elementos do problema, no estágio  $l_k$  ( $l_k > j$ ).

O vetor  $D^*_j$  é composto pelo conjunto de estados que apontam para um estado ótimo futuro. A determinação da decisão ótima é efetuada a partir das regras evolutivas. A grande diferença reside no fato de que "estados limites", anteriormente determinados com a política ótima, deixam de existir.

a solução final do processo de otimização ("problema do investimento"), que define os "estados ótimos" e a relação "custo-benefício" ótima global, é a seguinte:

$$S^* = \{ \tilde{Z}_0^*(U_0^*), U_j^* \} \quad j = 0, \dots, NH \quad (12)$$

onde:

$U_j^*$  = vetor de "estados ótimos" para o estágio j;

$\tilde{Z}_0^*(U_0^*)$  = valor ótimo difuso de "custo-benefício" global, correspondente ao estágio inicial do processo (US\$).

### 3. - APLICAÇÃO AO PLANEJAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA

Neste item, o foco da aplicação do paradigma estará sobre as redes de distribuição isoladas, localizadas em regiões não completamente urbanizadas. Estas redes, além de apresentarem grande potencial de crescimento em função dos requisitos de carga, caracterizam-se por não possuírem históricos do comportamento da carga, de tal maneira a não permitir uma previsão da carga futura com um grau razoável de certeza. Assim, por essa dinâmica e pelos tipos e graus das incertezas presentes neste ambiente, o paradigma proposto se adequa à busca das melhores alternativas de expansão para tais sistemas.

No sentido de aproveitar ao máximo as potencialidades do paradigma com relação aos problemas de dimensionalidade do espaço de estados do problema, é adotado o chamado "planejamento agregado"<sup>[8]</sup>, que é adequado aos processos de longo prazo, onde alguns fatos de maior relevância em planejamento de curto prazo, como, por exemplo, a localização exata de uma subestação não são tão relevantes.

O modelamento das incertezas é efetuado segundo a Teoria dos Conjuntos Difusos. Este modelamento é utilizado para representar os parâmetros "incertos" do sistema de distribuição, sendo cada um deles representado por funções contínuas, contendo graus de pertinência para seus possíveis valores, sobre as quais operações algébricas "difusas" são efetuadas. Os parâmetros que, inicialmente, são tratados como variáveis difusas são os seguintes:

- Custos referentes aos equipamentos do sistema, (US\$);
- taxa de recuperação de capital (%);
- taxas de crescimento da carga (%).

Os demais parâmetros do modelo, a princípio, são tratados como variáveis escalares. Entretanto, estes parâmetros, a medida que interagem com as variáveis difusas, herdam as características difusas daquelas variáveis. Como consequência disso, todas as operações algébricas, relacionais e lógicas do modelo são representadas em um ambiente difuso. Os processos de otimização, que são o cerne das decisões referentes às políticas de planejamento, também levam em conta a representação difusa, através de técnicas de decisão difusas.

Para efeito de validação do modelo, materializado no programa "PLANINC", foi utilizada uma ferramenta de balizamento, já validada, o programa "SISPAI" do Centro de Excelência em Distribuição de Energia (convênio IEE-USP/ELETPAULO/CESP/CPFL), tendo ambos programas operado sobre uma porção de um sistema de distribuição real, composta de 40 (quarenta) redes similares, que são tratadas por uma rede "representante" na modelagem agregada. No caso do programa "PLANINC" foram simuladas duas condições de planejamento, a saber: sem a consideração das incertezas e com a consideração das incertezas. Os resultados



obtidos pelo programa "PLANINC", com a consideração de incertezas, são dados em termos de faixas difusas de valores.

**a.- Resultados Obtidos pelo Programa "SISPAI"**

<b>Obra</b>	<b>Ano</b>	<b>Custos Anuais:</b>	<b>Benefícios Anuais:</b>	<b>Bn / Ct</b>
		<b>Ct (US\$/ano)</b>	<b>Bn (US\$/ano)</b>	
<b>Desdobr.</b>	<b>1</b>	<b>34704</b>	<b>58260</b>	<b>1,68</b>
<b>Alimentador 1</b>				
<b>Desdobr.</b>	<b>1</b>	<b>38102</b>	<b>144170</b>	<b>3,78</b>
<b>Alimentador 2</b>				
<b>Desdobr.</b>	<b>2</b>	<b>81174</b>	<b>15740</b>	<b>0,19</b>
<b>Alimentador 2</b>				
<b>Desdobr. SE</b>	<b>7</b>	<b>851309</b>	<b>84770</b>	<b>0,10</b>

*Tabela 1 - Resultados do planejamento: programa de balizamento ("SISPAI")*

**b.- Resultados Obtidos pelo Programa "PLANINC" - Sem Incertezas**

Obra	Ano	Custos: Ct (US\$/ano) Ct* (US\$)	Benefícios: Bn (US\$/ano) Bn* (US\$)	Bn / Ct	Valor Presente: 40*(Ct* - Bn*) (US\$)
Desdobr. Alimentador 1	1	34704 272190	58260 456941	1,68	-6598320
Desdobr. Alimentador 2	1	38102 298840	144170 1130746	3,78	-29710931
Desdobr. Alimentador 2	2	81174 636660	15740 123451	0,19	16365082
Troca de trafo de 12,5 MVA p/ 25,0 MVA	4	61964 485993	24494 192110	0,40	7470704
Desdobr. Alimentador 1	6	27044 213114	94087 737937	1,57	-10635675
Desdobr. SE (70 % Orig. - 30 % Nova)	8	777738 6099910	93767 737663	0,12	86628865
TOTAL (Valor Presente da relação global "Custo - Benefício") :					63519725

Tabela 2 - Resultados do planejamento: programa "PLANINC" - sem incertezas



**c.- Resultados Obtidos pelo Programa "PLANINC" - Com Incertezas**

Obra	Ano	Custos: Ctmin;Ctmax (US\$/ano)	Benefícios: Bnmin ;Bnmax (US\$/ano)	Valor Presente:
		Ctmin*;Ctmax* (US\$)	Bnmin*;Bnmax* (US\$)	40* (Ctmin*-Bnmax*; Ctmax*-Bnmin*) (US\$)
Desd. Alim. 1	1	33185 ; 36241 271514 ; 272825	57478 ; 59034 432696 ; 482003	-7477407 -5740431
Desd. Alim. 2	1	36434 ; 39797 298092 ; 299593	142245 ; 146096 1070824 ; 1195325	-31873286 -27692316
Desd. Alim. 2	2	77454 ; 84992 633712 ; 639822	15173 ; 16217 114222 ; 132688	16149093 16582063
Troca de trafo de 12.5 MVA p/ 25.0 MVA	4	59073 ; 64728 483322 ; 487275	22353 ; 25058 168274 ; 205019	7228316 7937769
Desd. Alim. 1	6	25700 ; 28720 210271 ; 216204	89078 ; 102733 670582 ; 840538	-12370422 -9509685
Desd. Alim. 3	9	17602 ; 20042 144015 ; 150875	37356 ; 41269 281217 ; 337653	-2661982 -1973230
Desd. SE (75% Orig. - 25% Nova)	10	682724 ; 789469 5585893 ; 5943146	75578 ; 75942 568953 ; 621340	60611668 73033370
TOTAIS (V. Presente da relação global "Custo-Benefício" difusa) : (32267962 ; 62147225)				

Tabela 3 - Resultados do planejamento: programa "PLANINC" - com incertezas



#### **d.- Análise dos Resultados**

A análise dos resultados obtidos será feita em duas etapas. Na primeira, estará sendo colocada em jogo a validade da modelagem no que se refere à sua real utilidade para os processos de planejamento de longo prazo. Para tanto, a maneira encontrada para avaliar as coerências dos valores obtidos e das decisões tomadas através do paradigma foi a de utilizar uma ferramenta já validada e utilizada correntemente, porém que utiliza uma filosofia de planejamento diferente da proposta nesta tese. Sob tal ponto de vista, serão verificados os comissionamentos no que se refere às épocas em que os mesmos são definidos e os valores referentes aos seus respectivos custos e benefícios.

Para levar a termo tal investigação, serão consideradas as tabelas 1 e 2, respectivamente os resultados do planejamento do programa de balizamento ("SISPAI") e do programa "PLANINC", que congrega o paradigma proposto, porém sem a consideração das incertezas.

Observando-se inicialmente os comissionamentos efetuados nos dois primeiros anos do horizonte de planejamento, verifica-se que as decisões tomadas são essencialmente as mesmas, ou seja, no ano 1 são desdobrados os alimentadores 1 e 2 em ambos modelos, assim como no ano 2, o alimentador 2 sofre novo desdobramento. Da mesma forma, com relação aos custos e benefícios, os valores determinados são iguais. Isto se deve ao seguinte: apesar dos processos seguirem filosofias diferentes de planejamento, o programa "SISPAI" soluciona o problema, priorizando obras, avançando estágio a estágio e o programa "PLANINC" efetua um processo dinâmico de "ida e volta" buscando o "caminho ótimo", as temporizações e custos/benefícios obtidos são iguais. Tal informação condiz com dois fatos. O primeiro se relaciona à utilização do mesmo equacionamento básico para redes isoladas, num processo de planejamento agregado. O segundo se deve ao fato de se estar avaliando os primeiros anos do horizonte de planejamento, os quais, para o processo de programação dinâmica, apresentam justamente os comissionamentos obtidos como solução para o processo e que, para o processo de priorização de obras são as soluções de compromisso que atendem o sistema naqueles estágios.

Com relação aos demais comissionamentos, verifica-se que mudanças ocorrem. No processo definido pelo programa "SISPAI", em seguida aos comissionamentos iniciais, a subestação é alvo de um desdobramento no ano 7. O plano definido pelo programa "PLANINC" prevê uma troca do transformador original (12,5 MVA) por outro de maior capacidade (25,0 MVA) no ano 4 e um novo desdobramento do alimentador 1, no ano 6, antes do desdobramento da subestação no ano 8. Aparentemente tais diferenças mostram uma falta de coerência do modelo materializado no programa "PLANINC" com o modelo já validado "SISPAI". Entretanto, tal fato não se mostra verdadeiro, se forem consideradas as diferentes filosofias de planejamento de ambos modelos.



O programa "SISPAI" objetiva resolver o problema de planejamento através de soluções anuais de compromisso "custo/benefício", através de índices de priorização, não buscando a solução global multi-estágios, ou seja, o desdobramento da subestação no estágio 7 resolve por completo o problema de planejamento para a rede em questão, compondo-se numa das soluções factíveis do problema dinâmico. A coerência do programa "PLANINC", no que se refere à relação "Bn/Ct" no desdobramento da subestação, com o programa "SISPAI", é verificada observando-se a ordem de grandeza dos valores obtidos (0,10 e 0,12 respectivamente) e a proximidade das temporizações: ano 7 para o programa "SISPAI" e ano 8 para o programa "PLANINC".

O programa "PLANINC" efetua uma análise dinâmica recursiva das várias possibilidades de configuração da rede no processo multi-estágios, buscando a relação "custo-benefício" global, através do processo de programação dinâmica.

Outro fato a destacar se relaciona aos custos e benefícios do desdobramento da subestação para ambos os casos. O custo do desdobramento se relaciona diretamente à carga transferida para a nova subestação. O processo proposto nesta tese, como visto em parágrafos anteriores, leva em conta a otimização das divisões de carga e suas conseqüências futuras nos custos e benefícios do sistema (redes original e nova) até o horizonte de planejamento. Deste modo ao se observar os custos e os benefícios obtidos pelo planejamento efetuado pelo programa "PLANINC", e considerando-se as diferenças metodológicas, os mesmos se apresentam coerentes, haja vista as ordens de grandeza dos valores obtidos em relação aqueles determinados pelo programa "SISPAI".

Ressalta-se que os resultados (comissionamentos e temporizações) determinados pelo programa "SISPAI" fornecem as soluções anuais de compromisso "custo/benefício" que atendem às redes do problema, compondo-se as mesmas como soluções factíveis do problema de planejamento. Além disso, por ser uma ferramenta já validada e que provê soluções adequadas de planejamento, no atendimento das necessidades operativas e de qualidade das redes (através das chamadas obras de melhoria e necessárias), permitiu a verificação das potencialidades do modelo proposto que, como já foi dito, apresenta uma filosofia diferente daquela do programa "SISPAI", ou seja, é voltado à busca da solução ótima global (valores presentes dos custos e benefícios globais) numa base multi-estágios.

A partir da discussão acima, o paradigma proposto (ainda que sem a consideração das incertezas) apresenta-se coerente aos seus objetivos almejados na prática, ou seja, servir como uma ferramenta válida de apoio às decisões referentes ao planejamento de redes isoladas de distribuição, e além disso, atesta o lado teórico de sua aplicabilidade em outros ambientes, bastando para tanto modificações adaptativas aos mesmos.

Na próxima etapa da análise, será avaliado o impacto da consideração das incertezas no processo de planejamento de longo prazo, apontando os pontos nos quais a flexibilização do processo é benéfica quando se está num ambiente permeado pelas incertezas. Ressalta-se que, mesmo nos ambientes com informações suficientes para permitir um controle rígido dos processos e eventos, uma análise de médio/longo



prazo é influenciada por elementos exógenos que podem provocar grandes mudanças nos parâmetros observados em termos futuros. Assim, a consideração de faixas de valores e, conseqüentemente, a utilização de processos de decisão que tratem destas faixas procuram minimizar o efeito provocado pelas incertezas, mesmo em tais ambientes.

Assim, no intuito de prover ao planejador uma ferramenta mais ampla, é buscada na presente análise a constatação de que, num ambiente sob a consideração das incertezas, o planejamento pode ser efetuado numa base mais flexível e mais realista de apoio às decisões.

Inicialmente serão consideradas as tabelas 2 e 3, respectivamente os resultados do planejamento do programa "PLANINC" para as condições sem e com incertezas.

Observando-se os comissionamentos definidos nos seis primeiros anos, verifica-se que ambos modelos tomaram as mesmas decisões e os valores referentes aos custos e benefícios se encontram nos mesmos patamares. Isto se deve pura e simplesmente ao fato do processo dinâmico de otimização ser o mesmo para ambos os casos e as faixas de incerteza não se apresentaram tão amplas nos primeiros anos.

A partir do estágio 8 modificações importantes ocorrem. No processo que não considera as incertezas ocorreu, em seguida aos comissionamentos anteriores, o desdobramento da subestação no ano 8, sendo a divisão ótima de cargas definida como sendo de 70 % para a rede (subestação) original e 30 % para a rede (subestação) nova. Os novos comissionamentos são: instalação de 3 (três) alimentadores na rede nova (respectivamente, das famílias 1, 2 e 3) e instalação de um transformador de 12,5 MVA, 138/13,8 kV (da família 1). Tais comissionamentos, para a divisão de cargas acima citada, geram os custos relativos às instalações, bem como, geram benefícios negativos, dado que os benefícios são avaliados em função das melhorias ocorridas e, para os elementos novos, as perdas e demais índices no ano anterior são iguais a zero e, a partir do ano 8, passam a existir. Por outro lado, com o alívio provocado pela divisão de cargas na rede original são gerados benefícios positivos, que conjugados aos custos e benefícios da rede nova, provêm a melhor solução encontrada, ou seja, o desdobramento da subestação no ano 8, com a divisão 70/30 % entre as cargas.

Para o modelo sob incertezas, os comissionamentos, após o ano 6, aparentemente não apresentam relação com o comissionamento efetuado no ano 8 pelo modelo sem incertezas. Tal fato não é condizente, pois o elemento que disparou o desdobramento da subestação foi o alimentador 2, no ano 8. Isto ocorreu pelos seguintes fatos: o número máximo de alimentadores permitido para a subestação sob análise é igual a 10; no ano 8, já haviam 9 alimentadores (4 alimentadores 1, 4 alimentadores 2 e 1 alimentador 3); o alimentador 2, neste deveria ser novamente desdobrado, elevando o número de alimentadores que saem da subestação para 13 (treze), três a mais que o permitindo, disparando o desdobramento da mesma.

O alimentador 3 também deveria ser desdobrado, pois sua queda de tensão havia ultrapassado o valor limite, entretanto, ao ser desdobrado, sem que o



alimentador 2 o fosse, o número de alimentadores na subestação subiria para 10 (dez), não violando o critério.

A diferença dos últimos comissionamentos e, consequentemente, nos valores de "custo - benefício" globais são devidos ao fato do ambiente de planejamento sob incertezas ser menos "conservativo" em termos da avaliação dos critérios que o ambiente sem incertezas, isto é, pelas características difusas dos sistemas de distribuição, alguns critérios, que são violados sob o ponto de vista determinístico, não o são sob a óptica de uma distribuição de possibilidades (modelo difuso). Assim, violações de critério ocorridas no ambiente sem incertezas não ocorreram no ambiente com a consideração das incertezas devido ao "jogo de cintura" deste modelo, o que se aproxima de modo mais adequado do juízo qualitativo humano e que, por conseguinte, leva a um modelo de planejamento flexível.

#### 4. - CONCLUSÕES

O paradigma proposto apresenta as seguintes características:

- Permite que sejam incorporadas informações mais abrangentes e realistas dos ambientes sob análise, dado que considera as incertezas oriundas dos hábitos e juízos humanos através de um ferramental que se calca nas experiências e conhecimentos acerca desses ambientes.
- Efetua uma análise dinâmica, multi-estágios, avaliando a melhor política referente a relação "custo - benefício", sujeita a restrições anuais de desempenho, considerando os estados factíveis do ambiente.
- Permite a incorporação, de maneira clara, das regras evolutivas que formam a estrutura dinâmica do espaço de estados, fornecendo uma base teórica para o desenvolvimento de aplicações em áreas distintas.
- É um processo aberto a novos modelamentos, inclusive com aspectos não procedurais relacionados às regras evolutivas, permitindo, com isso, a incorporação de modelos baseados em regras, levando à consideração das regras evolutivas como dados de entrada.
- Com relação à coerência e utilidade do algoritmo concebido, verificou-se que o mesmo se apresentou dentro das expectativas, conduzindo os resultados a uma solução coerente, tanto no que se refere aos montantes de custos e benefícios, quanto às temporizações.
- Os resultados obtidos pelo programa "PLANINC", sob incertezas, determinaram a melhor solução no que concerne a um modelo flexível e que congregue de forma a mais fiel possível o juízo qualitativo humano.





## 5. - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] HILLIER, F.S. ; LIEBERMAN, G.J. . **Introdução à pesquisa operacional**. 1. ed., Tradução de Helena L. Lemos - Rio de Janeiro, São Paulo, Editora Campus/Editora da Universidade de São Paulo, 1988
- [2] ZIMMERMANN, H.-J. . **Fuzzy sets, decision making, and expert systems**. Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1987
- [3] KAUFMANN, A. ; GUPTA, M.M. . **Fuzzy mathematical models in engineering and management science**. 1. ed., 2. impression, Amsterdam, The Netherlands, Elsevier Science Publishers B.V., 1991
- [4] TERANO, T. ; ASAI, K. ; SUGENO, M. . **Fuzzy theory and its applications**. Traslated by Charles G. Aschmann,III - London, London, United Kingdom, Academic Press Limited, 1992
- [5] LEVINE, R.I. ; DRANG, D.E. ; EDELSON, B. . **Inteligência artificial e sistemas especialistas** Tradução de Maria Cândia S. R. Ratto - São Paulo, São Paulo, Editora McGraw-Hill do Brasil, 1988
- [6] JENSEN, P.A. ; BARNES, J.W. . **Network flow programming**. 1. ed., Austin, Texas, United States of America, John Wiley & Sons Inc, 1980
- [7] CIGRÉ - Working Group 37.10 . **Dealing with uncertainty in system planning - Has flexibility proved to be adequate answer ?** . ÉLECTRA, n. 151, p. 53-65, 1993
- [8] GOUVÊA, M.R. . **Bases conceituais para o planejamento de investimentos em sistemas de distribuição de energia elétrica**. São Paulo, 1993. 111 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [9] KAGAN, N. ; ADAMS, R.N. . **Electrical power distribution systems planning using fuzzy mathematical programming** . Electrical Power & Energy Systems, Vol 16, n. 3, p. 191-6, 1994
- [10] RAJ, B.N. ; RAO, K.S.P. . **A new fuzzy reasoning approach for load balancing in distribution system** . IEEE Transactions on Power Systems, vol 10, n. 3, p. 1426-32, 1995

## BOLETINS TÉCNICOS - TEXTOS PUBLICADOS

- BT/PEA/9301 - Alguns Aspectos do Problema de Planejamento de Sistemas de Transmissão sob Incertezas - CARLOS MARCIO VIEIRA TAHAN, ERNESTO JOÃO ROBBA
- BT/PEA/9302 - Vibrações em Motores Elétricos Provocadas por Forças Magnéticas - ORLANDO SILVIO LOBOSCO, HENRIQUE PRADO ALVAREZ
- BT/PEA/9303 - Corrente Contínua em Alta Tensão: Aplicação de Equipamentos Elétricos e Modelos para Análises de Confiabilidade - LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9504 - Automação e Informatização Aplicadas a Controle e Supervisão de Processos de Pesagem - EVALDO ARAGÃO FARQUI, EDUARDO MÁRIO DIAS
- BT/PEA/9505 - Modernização e Reabilitação de Usinas Hidrelétricas - DJALMA CASELATO, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR.
- BT/PEA/9506 - Estudo do Campo Elétrico Provocado por Linhas de Transmissão em Corrente Alternada - CELSO PEREIRA BRAZ, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9507 - Aspectos Sobre Processos Automatizados de Pesagem Rodoferroviária: Uma Proposta de Modernização de Postos em Operação - SERGIO LUIZ PEREIRA, CÍCERO COUTO DE MORAES
- BT/PEA/9508 - Usinas Hidrelétricas em Rotação Ajustável: Novas Premissas para o Planejamento Energético - MARCO ANTONIO SAIDEL, LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9509 - Desenvolvimento de um Sistema de Automação de Subestações pela integração de Módulos de Software e Hardware Existentes no Mercado Brasileiro - L. C. MAGRINI, J. A. JARDINI, S. COPELIOVITCH, N. KABA FILHO
- BT/PEA/9510 - Proposta de um Modelo para Estudos de Aplicação de Compensadores Estáticos em Sistemas de Potência - JOSÉ TOSHIYUKI HONDA, LUIS CERA ZANETTA JÚNIOR
- BT/PEA/9511 - Metodologia e Testes para Redução das Distâncias Elétricas entre Fases de Barramentos de Subestações de 138kV Abridadas, ANDRÉ NUNES SOUZA, ORLANDO SILVIO LOBOSCO
- BT/PEA/9512 - Avaliação da Severidade da Poluição para o Dimensionamento da Isolação das Redes Elétricas - ARNALDO G. KANASHIRO, GERALDO F. BURANI
- BT/PEA/9513 - Processos Auto-Adaptativos para Cálculo de Campos Eletromagnéticos pelo Método dos Elementos Finitos - LUIZ LEBENSZTAJN, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/9514 - Investigação Experimental sobre os Arcos Sustentados em Sistemas Elétricos de Baixa Tensão - FRANCISCO H. KAMEYAMA, GERALDO F. BURANI
- BT/PEA/9515 - Fast Voltage Compensation: A Mean to Improve the Quality of Energy Supply - H. ARANGO, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9516 - Modelo Avançado para Planejamento de Sistemas Energéticos Integrados Usndo Recursos Renováveis - LUIZ ANTONIO ROSSI, LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9601 - Metodologias para Planejamento de Sistemas de Distribuição: Estado-da-Arte e Aplicações - PAULO ROBERTO NJAIM, CARLOS MARCIO VIEIRA TAHAN
- BT/PEA/9602 - Integração de Relés Digitais em Sistemas de Automação de Subestação - JERÔNIMO CAMILO SOARES JR., JOSÉ A. JARDINI, LUIZ C. MAGRINI