

## GRUPO X

### OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (GOP)

#### UM MODELO PARA A CONSIDERAÇÃO DE INCERTEZAS NA OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

Vladimiro Miranda  
INESC / FEUP

Leontina Pinto  
DEE - PUC/RJ

## RESUMO

Este trabalho visa discutir a avaliação da qualidade de suprimento de um sistema elétrico considerando as incertezas da operação. Enquanto os modelos tradicionais procuram exprimir a demanda através de uma distribuição de probabilidades, nem sempre muito correta ou precisa, o modelo proposto utiliza uma distribuição de possibilidades baseada na teoria de conjuntos imprecisos (fuzzy sets), capaz de representar melhor uma incerteza não probabilística.

O modelo proposto é capaz de combinar as representações mais corretas para cada tipo de incerteza: *probabilidades*, no caso de falhas em componentes do sistema (geradores e/ou circuitos) e *possibilidades*, no caso das demandas. Espera-se, assim, lograr uma representação mais precisa do problema e uma utilização melhor dos dados de incertezas disponíveis.

**Palavras chave:**  
operação sob incertezas, fluxos imprecisos, análise probabilística

## 1.0 INTRODUÇÃO

A avaliação da qualidade de suprimento de um sistema elétrico é feita geralmente através de modelos que representam as incertezas da operação através das respectivas *probabilidades* de ocorrência. Esta representação é adequada quando as incertezas estão associadas a falhas em componentes do sistema, como geradores e/ou circuitos, cujas disponibilidades podem ser obtidas de dados históricos (reais ou típicos para cada classe de equipamento).

As incertezas nas demandas a serem atendidas, entretanto, não podem, geralmente, ser corretamente expressas através de probabilidades de ocorrência. A previsão exata da demanda a ser atendida, principalmente em sistemas com um alto grau de incerteza como o brasileiro, é um exercício onde as chances de acerto podem ser bastante pequenas. Normalmente, a melhor previsão a que se chega é:

*"A demanda futura deverá ficar em torno de X"*

*"O mercado a ser atendido será mais ou menos Y"*

Estas frases indicam uma incerteza na demanda futura que não está associada a nenhuma *probabilidade*, mas a *possibilidades* mais concretas ou remotas, dependendo do grau de certeza da previsão. O conceito de possibilidade leva a uma quantificação mais natural da demanda como variável sujeita a incertezas: ao invés de definir uma curva de probabilidades para o mercado, baseada em critérios nem sempre claros, é mais natural (e corre-

to) a utilização da experiência do planejador/operador para dizer, por exemplo, se um patamar é "possível", "pouco possível", "muito possível", "impossível" (ou implausível). Em outras palavras, é mais natural a atribuição de um "grau de possibilidade" a eventos ou cenários de operação que o cálculo de sua probabilidade.

As representação incorreta das incertezas associadas às demandas pode colocar em risco a precisão dos resultados obtidos com os modelos tradicionais. Por exemplo, modelos de confiabilidade, que utilizam uma representação detalhada da rede e modelos complexos de otimização serão incapazes de avaliar corretamente a qualidade de suprimento de um sistema cuja demanda seja representada incorretamente. Em outras palavras, de nada adianta a representação cuidadosa de uma parte dos componentes da rede se a representação de um dos componentes principais — o mercado — é negligenciada.

O conceito de possibilidade vem justamente preencher esta lacuna. A teoria de conjuntos imprecisos permite a análise matemática do sistema elétrico a partir de dados subjetivos. Ao invés de tentar associar uma curva artificial de distribuição de probabilidades às grandezas do sistema, o operador/planejador fornece uma "distribuição de possibilidades" associadas às variáveis imprecisas — no nosso caso, as demandas.

As modernas técnicas de análise de redes baseadas na teoria de conjuntos imprecisos vêm sendo desenvolvidas há algum tempo e avanços significativos foram obtidos na área de fluxos de potência convencional e ótimo [2,3] cuja utilização abrange diferentes aplicações a problemas de operação e planejamento [8,9]. A principal vantagem dos modelos imprecisos é a sua eficiência: ao invés da análise, por exemplo, de cada demanda possível, é utilizada uma técnica analítica para a obtenção das distribuições de possibilidades das grandezas de interesse do sistema elétrico.

Este trabalho apresenta um modelo para a análise da qualidade de suprimento que combina os conceitos de *probabilidade*, largamente utilizados nos modelos tradicionais, e *possibilidade* — até agora não tratados nos modelos disponíveis. O modelo proposto é capaz portanto de tratar adequadamente os componentes "probabilísticos", como os geradores e circuitos de transmissão, ou "possibilísticos", como as demandas. A representação da rede inclui a consideração das leis físicas estáticas da rede (fluxos de potência) e pode, a critério do usuário, considerar medidas corretivas (remanejamentos de geração, cortes de carga, chaveamentos) e indisponibilidades (perdas em equipamentos e/ou linhas de transmissão) inesperadas ou programadas.

O resultado final será uma combinação de índices probabilísticos e possibilísticos (imprecisos). É possível, por exemplo, calcular a distribuição provável das possibilidades do corte de carga (correspondente ao valor esperado da energia não suprida, no caso probabilístico) ou o grau de exposição do sistema a cenários adversos (equivalente à probabilidade de perda de carga, no caso probabilístico).

## 2.0 A MODELAGEM DE CARGAS IMPRECISAS

A modelagem de cargas imprecisas (incertas, mas não probabilísticas) baseia-se na teoria dos conjuntos imprecisos (fuzzy sets) de Zadeh [1]. Esta teoria tem sido utilizada com sucesso nos mais variados domínios da ciência; são conhecidos, por exemplo, os progressos que as tecnologias fuzzy têm conseguido no Japão, desde aplicações em robótica até máquinas fotográficas, televisores e outros aparelhos eletro-eletrônicos.

A introdução da teoria dos conjuntos imprecisos na análise de sistemas de potência ocorreu pela primeira vez em 1989, na área de fluxos de potência imprecisos [2]; desde então, sucessivos progressos vêm sendo obtidos, como o cálculo do despacho ótimo impreciso de geração [3]. Ao invés de uma descrição matemática das técnicas imprecisas (fuzzy) de análise das redes, fora do escopo deste trabalho, serão apresentadas as idéias básicas da modelagem imprecisa e correspondentes técnicas de utilização. Uma descrição mais detalhada e rigorosa pode ser encontrada nas referências citadas.

### 2.1 A distribuição imprecisa (fuzzy) das cargas

A modelagem imprecisa das cargas pode ser melhor entendida através de um exemplo simples. Considere-se o sistema apresentado na Figura 1, composto por dois geradores que alimentam uma barra de carga. Ao invés da representação convencional probabilística, a demanda a ser atendida será modelada através de uma distribuição possibilística, também apresentada na Figura 1, caracterizada por uma previsão do tipo

"A demanda deve ser em torno de 10; com certeza não será menor que 8 ou maior que 14"

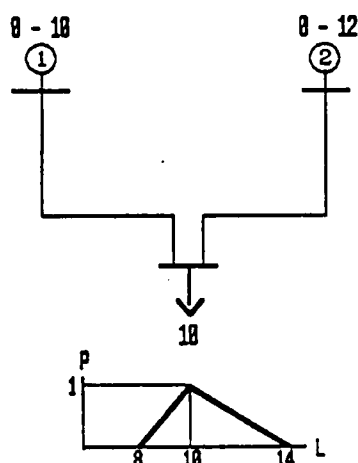


Figura 1— Sistema exemplo

A modelagem probabilística associa cada ponto de demanda à correspondente probabilidade de ocorrência; analogamente, a modelagem possibilística associa cada ponto de carga a um grau de pertença. A Figura 2 mostra, por exemplo, que o grau de pertença da demanda 12 é igual a 0.5 (ou, em outras palavras, "é possível que ocorra a demanda a 12; esta possibilidade de ocorrência tem um grau 0.5").

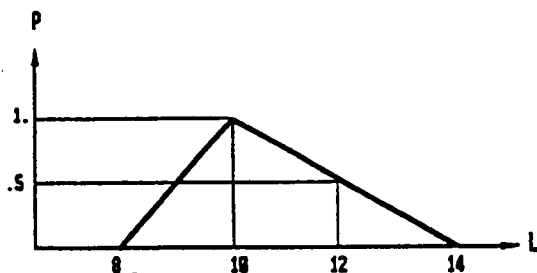


Figura 2— Incerteza e grau de pertença

A curva de possibilidades permite ainda a estimativa da possibilidade de ocorrência de um intervalo de demanda. Por exemplo, pode-se, com um grau de certeza de 50% (0.5), dizer que ocorrerão demandas entre 9 e 12.

A estimativa da possível demanda não suprida é imediata. Por exemplo, é possível ver que, com o sistema intacto (todos os circuitos e geradores disponíveis), a demanda é integralmente atendida, mesmo a correspondente à previsão mais pessimista ( $L=14$ ).

Considerando, agora, uma falha no gerador 2, a situação muda. A capacidade do gerador 1, projetada para suprir a demanda prevista de 10, torna-se insuficiente para atender demandas maiores — perfeitamente possíveis, dentro da incerteza de planejamento representada pela curva de possibilidades. A Figura 3 apresenta a distribuição de possibilidades do corte de carga do sistema correspondente à curva de possibilidades de demandas considerada.

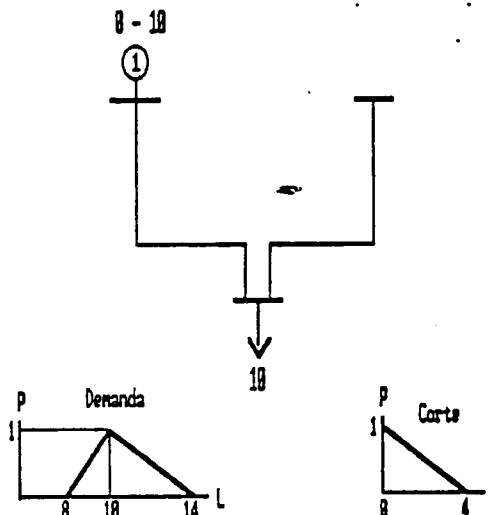


Figura 3 — Perda do gerador 2

É importante lembrar que os sistemas elétricos são normalmente projetados para o ponto central de demanda (no nosso caso, 10); mais importante ainda, sistemas planejados sob restrições financeiras, como o brasileiro, tendem a instalar o mínimo de capacidade possível para o atendimento à demanda. Isto pode significar, como no exemplo anterior, um sistema inadequado para uma demanda levemente maior que a projetada — bastante possível dentro das incertezas inerentes ao planejamento.

A mesma análise pode ser feita para a perda do gerador 1. A Figura 4 apresenta a distribuição de possibilidades do corte de carga correspondentes a este cenário.

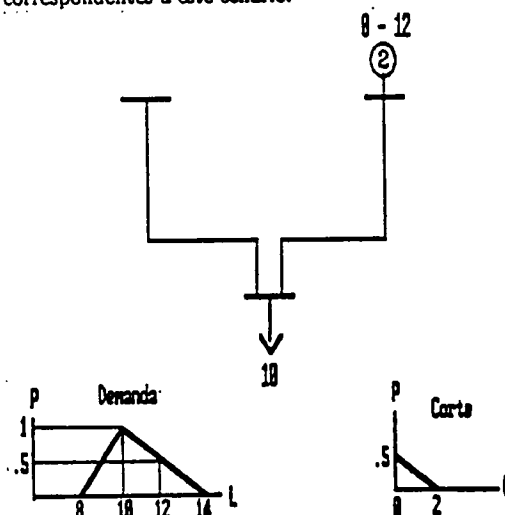


Figura 4 — Perda do gerador 1

## 2.2 A análise da rede com dados imprecisos

O objetivo dos modelos imprecisos é exatamente o tratamento dos problemas sujeitos a incertezas possibilísticas. Por exemplo, o *fluxo de potência impreciso* [2] é capaz de calcular a distribuição de possibilidades de qualquer grandeza elétrica desejada, como gerações, fluxos, etc. Sabendo-se, por exemplo, que

"A demanda deve ser *aproximadamente X*"

é possível, através do fluxo de potência impreciso, calcular a distribuição de possibilidades do fluxo em um circuito desejado e descobrir que

"O fluxo no circuito 1/2 será *aproximadamente Y*, com uma incerteza entre  $Y1$  e  $Y2$ "

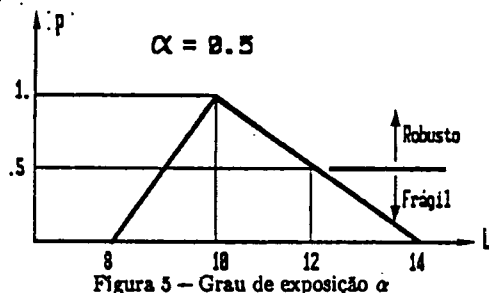
O fluxo de potência impreciso (*fuzzy power flow*) pode ser resumido nos seguintes passos:

1. Análise da rede para o ponto central das demandas; cálculo do ponto central de todas as grandezas de interesse.
2. Cálculo das incertezas associadas a cada grandeza de interesse; este cálculo é feito através da superposição das incertezas das demandas e da análise de sensibilidade da grandeza de interesse à variação na demanda.

É importante observar que, ao contrário dos métodos probabilísticos, que requerem uma análise para cada cenário de operação, a distribuição de possibilidades é obtida a partir de uma única análise. Pode-se avaliar a economia em requisitos computacionais conseguida: uma análise estática de, por exemplo, 100 cenários críticos corresponderia a 100 load-flows. O modelo proposto é capaz de calcular *todas* as distribuições das grandezas de interesse do sistema elétrico em apenas um load-flow.

## 2.3 O grau de exposição do sistema

Um resultado útil da análise imprecisa é o *grau de robustez* ou seu complemento: o seu *grau de exposição*. A Figura 5 ilustra o caso da perda do gerador 1. Como a capacidade do gerador remanescente é igual a 12, o sistema pode ser considerado *robusto* para uma demanda de até 12 unidades e *frágil* para uma demanda maior que este valor. Como o ponto 12 corresponde a uma incerteza de 0.5, pode-se afirmar, com uma certeza de 50%, que o sistema é frágil — ou, equivalentemente, que o grau de exposição do sistema é 0.5.



## 2.4 O fluxo de potência ótimo impreciso

É possível que, detetada a existência de possíveis violações em restrições operativas, o planejador queira eliminá-las através de um remanejamento de geração e/ou cortes de carga. De modo semelhante ao fluxo de potência impreciso, o fluxo de potência *ótimo impreciso* [3] é capaz de encontrar o melhor ponto de operação do sistema considerando as incertezas possibilísticas. O fluxo de potência ótimo impreciso apresenta as mesmas características do fluxo impreciso convencional: é possível, através de um único cálculo, obter todas as distribuições de possibilidades, para as grandezas elétricas desejadas — sem recorrer a um número exaustivo de análises, como no caso probabilístico.

## 3.0 A MODELAGEM DE FALHAS PROBABILÍSTICAS

### 3.1 As variáveis probabilísticas

Sabe-se que nem todas as incertezas da operação são possibilísticas. As disponibilidades de equipamentos (geradores e/ou circuitos, por exemplo) são usualmente modeladas a partir de uma distribuição de probabilidades de falha conhecida a partir de dados históricos ou típicos. Os modelos imprecisos, bastante adequados para variáveis não probabilísticas, como a demanda, não são adequados para a representação de variáveis probabilísticas.

### 3.2 Modelagem possibilística (imprecisa) x probabilística

A diferença entre as duas modelagens pode ser ilustrada através da comparação entre a Figura 6, que apresenta a distribuição de possibilidades dos valores de geração, e a Figura 7, que apresenta a distribuição de probabilidades das capacidades dos geradores (assumindo para ambos uma taxa de pane igual a 10%). No primeiro caso, o fluxo de potência impreciso é capaz de calcular a distribuição da demanda que pode ser atendida. O segundo caso é mais complexo.

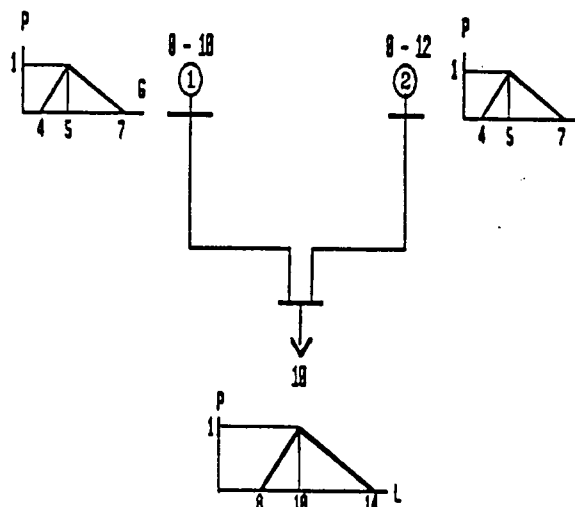


Figura 6 — Distribuição de possibilidades de geração

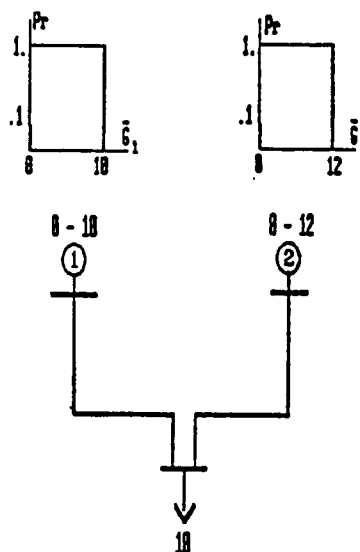


Figura 7 — Distrib. de probabilidades das capacidades de geração

A disponibilidade de capacidades de geração  $G$  não implica necessariamente na sua utilização (parcial ou integral) e pode corresponder a diferentes distribuições de possibilidades de geração — que dependem da filosofia de operação, custos dos geradores, prioridades de despacho, etc. Tomando, por exemplo, o cenário de disponibilidade dos dois geradores (nenhum falha), seria possível manter a distribuição de possibilidades da Figura 7. Uma filosofia diferente de operação — por exemplo, a utilização de parte da capacidade do gerador 1 como reserva — levaria a uma distribuição de possibilidades de geração diferentes, como a ilustrada na Figura 8.

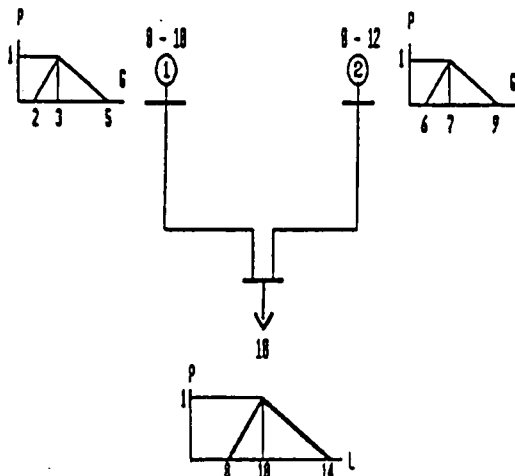


Figura 8 — Nova distribuição de possibilidades de geração

### 3.3 A análise de cada cenário

Pode-se assim concluir que existe uma distribuição de possibilidades de geração associada a cada cenário provável de disponibilidades dos componentes do sistema. Em nosso exemplo, seria necessário analisar cada um dos quatro cenários de operação:

Gerador 1 em funcionamento, gerador 2 em funcionamento  
Gerador 1 em funcionamento, gerador 2 quebrado  
Gerador 1 quebrado, gerador 2 em funcionamento  
Gerador 1 quebrado, gerador 2 quebrado

A análise de cada cenário de operação que pode ser determinística (por exemplo, considerar o valor da demanda conhecido e constante) ou imprecisa (por exemplo, considerando a distribuição de possibilidades da demanda). Esta seção descreve resumidamente a análise determinística, tradicionalmente realizada pelos modelos disponíveis. A próxima seção apresenta a análise imprecisa, correspondente ao modelo proposto por este trabalho.

### 3.4 Os modelos tradicionais

A modelagem de falhas probabilísticas é bastante conhecida e tem sido tradicionalmente aplicada na análise da qualidade de atendimento de um sistema elétrico. A referência [4] apresenta uma revisão bastante completa sobre modelos, algoritmos e software computacional baseados na análise probabilística do desempenho de redes elétricas.

Uma análise detalhada da qualidade de suprimento de um sistema exige a consideração das falhas em geração/transmissão. Os modelos convencionais baseiam-se normalmente em um algoritmo como o ilustrado na Figura 9, onde o desempenho da rede elétrica é simulado para um número suficientemente grande de possíveis cenários de operação.

O critério de seleção dos cenários depende do tipo de análise desejada. Alguns tipos de estudo visam analisar o comportamento do sistema para um número relativamente pequeno de situações de emergência que podem ser enumerados. Outros, como o planejamento da expansão ou da operação, visam estudar o desempenho do sistema considerando todas as incertezas geração/transmissão; neste caso, o número de cenários é explosivamente grande e não pode ser enumerado: são utilizados métodos, como o de Monte-Carlo, para o sorteio de um número de estados suficientemente grande para representar todos os possíveis cenários de operação.

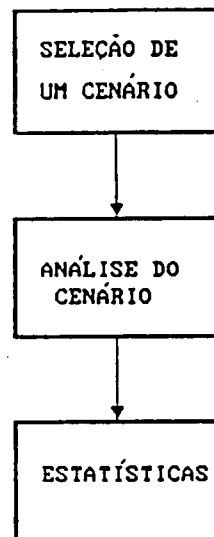


Figura 9 — Algoritmo para a análise da qualidade de suprimento

Em qualquer caso, cada estado selecionado é simulado através de modelos que visam analisar o desempenho do sistema para o correspondente cenário de operação, como o fluxo de potência convencional ou o fluxo de potência ótimo. Os resultados da análise são armazenados e utilizados para o cálculo das estatísticas desejadas, como probabilidades de sobrecarga, cortes de carga, etc.

É importante notar que, ao contrário da análise imprecisa, que visa calcular, por exemplo, a possibilidade de cortes de carga, a análise probabilística calcula, a partir das probabilidades de cada cenário de operação, a distribuição de probabilidades das grandezas elétricas desejadas. Este cálculo é mais complexo e requer um esforço computacional significativamente maior que o da distribuição de possibilidades, uma vez que requer um fluxo de potência (convencional ou ótimo) para cada cenário.

### 4.0 O MODELO PROPOSTO

Este trabalho visa apresentar um modelo capaz de combinar os dois tipos de incertezas existentes nos sistemas elétricos reais: a probabilística e a possibilística. Com este objetivo, o modelo proposto combina os algoritmos impreciso e probabilístico, de modo a manter a representação correta de cada variável incerta.

O algoritmo final é apresentado na Figura 10 e pode ser visto como uma extensão do modelo probabilístico onde a análise de cada cenário é realizada através de técnicas imprecisas, de modo a acomodar a incerteza na demanda e corresponde portanto a um fluxo de potência impreciso (ao invés de um fluxo convencional) ou a um fluxo de potência ótimo impreciso (ao invés de um fluxo ótimo convencional).

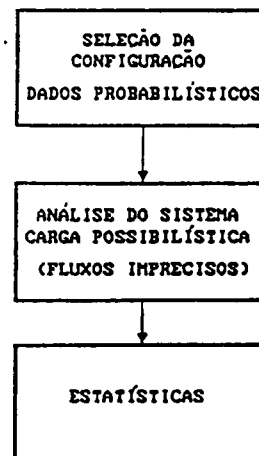


Figura 10 — O Algoritmo Proposto

Para maior facilidade de exposição, o algoritmo proposto pode ser aplicado à operação do sistema descrita na seção anterior. Considerando a seguinte distribuição de probabilidades:

CENÁRIO	Probabilidade
Nenhuma falha	0.80
Perda do gerador 1	0.10
Perda do gerador 2	0.10
Perda dos ger. 1+2	0.00

a curva provável da distribuição de possibilidades de cortes de carga no sistema é ilustrada na Figura 11, derivada da "soma ponderada" das curvas correspondentes aos três cenários.

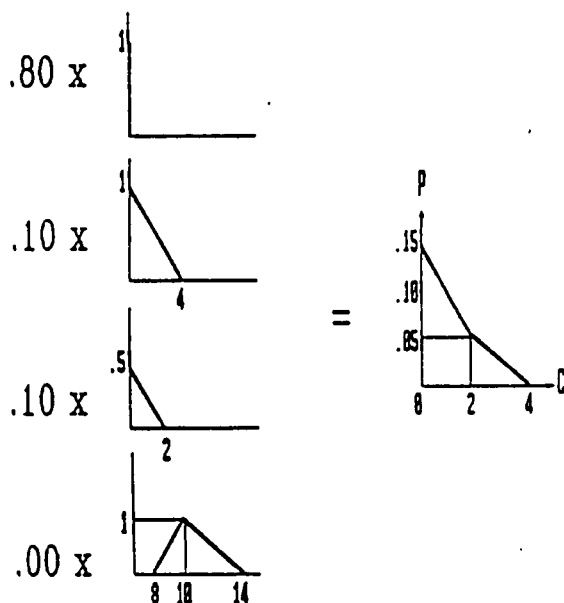


Figura 11 - Distribuição provável das possibilidades de corte

Um cálculo análogo leva à obtenção do grau de exposição do sistema:

$$\alpha = 0.8 \times 0. + 0.1 \times 1. + 0.1 \times 0.5 + 0 \times 1. = 0.15$$

ou equivalentemente

$$\alpha = 15\%$$

O grau de robustez do sistema será portanto igual a 85%.

## 5.0 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um modelo capaz de tratar simultaneamente a natureza probabilística e possibilística das incertezas associadas à operação de um sistema elétrico. É possível assim representar corretamente as diferentes incertezas associadas a cada grandeza do sistema elétrico e conseguir uma precisão maior nos resultados da análise da qualidade do sistema.

O modelo proposto combina técnicas de conjuntos imprecisos (fuzzy sets), largamente utilizadas nas mais diferentes áreas da engenharia, com técnicas probabilísticas, tradicionalmente aplicadas a problemas desta natureza. A utilização do fluxo de potência impreciso (convencional ou ótimo) permite a consideração da incerteza nas demandas sem implicar em um acréscimo substancial no esforço computacional.

A eficiência do modelo permite a sua implementação em computadores de grande porte ou microcomputadores. Um cenário de operação de um sistema real, com centenas ou milhares de barras, podem ser analisados em poucos segundos.

## 6.0 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O software correspondente ao algoritmo proposto encontra-se atualmente em fase de desenvolvimento e testes. Resultados preliminares obtidos com um sistema derivado do sistema-teste utilizado pelo IEEE [5] revelaram resultados promissores. Dentre os principais desenvolvimentos futuros podem ser citados:

- O desenvolvimento de uma interface linguística [6], possivelmente apoiada em sistemas especialistas, que permita ao usuário a definição dos dados de incertezas em linguagem natural ("cerca de", "em torno de"), sem a necessidade penosa de definição de curvas ou a edição de grande quantidade de números.
- O acoplamento a uma interface gráfica a ser incorporada à versão para microcomputadores [7], para permitir a entrada/saída de resultados através do diagrama unificar da rede, desenhada na tela.

## 7.0 REFERÊNCIAS

- [1] L.A. Zadeh, "Fuzzy Sets", *Information and Control*, pp. 338-353, August 1965
- [2] V. Miranda, M.A. Matos, J.T. Saraiva, "Fuzzy Load Flow - New Algorithms Incorporating Uncertain Generation and Load Representation", *Proceedings of the 10th PSCC*, Graz, Austria, 1990
- [3] V. Miranda, J. T. Saraiva, "Fuzzy Modeling of Power System Optimal Load Flow", *Proceedings of the Power Industry Computation Conference - PICA '91 - Baltimore* (a ser publicado na *IEEE Transactions on Power Systems*)
- [4] M.T. Schilling, A.M.L. Silva, R. Billington, M.A. El-Kadi, "Bibliography on Composite System Reliability (1964-1988)", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.5, No.1, February 1990
- [5] IEEE Task Force, "IEEE Reliability Test System", *IEEE Transactions on PAS*, PAS-98, 1979
- [6] C. Freksa, "Linguistic Description on Human Judgment In Expert Systems and in the Soft Sciences", *Approximate Reasoning and Decision Control*, M.M. Gupta & E. Sanchez, Ed. North Holland, Amsterdam, 1982
- [7] INESC, Sistema GRADES - Manual de utilização, 1990
- [8] V. Miranda, "Using Fuzzy Reliability Indices in a Decision Aid Environment for Establishing Interconnection and Switching Location Policies", *Proceedings of CIRED*, 1991, Liege, Belgium, April 1991
- [9] J.T. Saraiva, V. Miranda, M.T. Matos, "Generation and Load Uncertainties Incorporated in Load Flow Studies. MELECON'91, Ljubljana, Yugoslavia, May 1991



**XI SNPTÉE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

ENTIDADE PROMOTORA



**- COMITÉ NACIONAL BRASILEIRO**

ENTIDADE COORDENADORA

FURNAS



**CENTRAIS ELÉTRICAS SA**

**MENÇÃO HONROSA**

Conferida a VLADIMIRO MIRANDA pela co-autoria  
de Informe Técnico selecionado entre aqueles apresentados no Grupo de  
Estudo x do XI SNPTÉE - Seminário Nacional de Produção e  
Transmissão de Energia Elétrica, realizado de 06 a 10 de outubro de 1991,  
na cidade do Rio de Janeiro, sob o título: UM MODELO PARA A CONSIDERAÇÃO DE  
INCERTEZAS NA OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS.

Roberto Rodrigues do Rego  
COORDENADOR GERAL DO XI SNPTÉE

Sérgio de Oliveira Frontin  
COORDENADOR DA COMISSÃO TÉCNICA