



V SBQEE

Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica

17 a 20 de Agosto de 2003

Aracaju – Sergipe – Brasil



Código: AJU 03 145

Tópico: Modelagens e Simulações

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA SIMULADOR DE INDICADORES DE CONTINUIDADE DE FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA

N. Kagan	C. C. B. de Oliveira	G. F. Vasconcelos	M. A. I. H. Torres	S. C. N. Araújo	A. Meffe	D. J. da Rosa	A. B. Neto	M. F. C. Martins	I. Wunderlich	A. J. S. Rios	A. F. M. Bueno	C. A. Ewald
USP	USP	USP	USP	USP/UFG	USP	CELESC	CERJ	CERJ	COPEL	CPFL	CEMIG	ESCELSA

RESUMO

Este artigo objetiva apresentar uma ferramenta que proporcione às concessionárias a avaliação, a partir da formação de conjuntos de unidades consumidoras (cfr. Resolução 024/2003 da ANEEL), das possibilidades de transgressões dos indicadores de continuidade de serviço (DEC, FEC, DIC e FIC). Para tanto, desenvolveu-se um programa computacional, denominado SIMULADOR, capaz de realizar análises de riscos, a partir de banco de dados específico contendo atributos de alimentadores e postos de transformação que compõem os conjuntos estabelecidos pelas empresas

PALAVRAS-CHAVE

Indicadores de continuidade, risco de transgressão, simulação.

1.0 - INTRODUÇÃO

O SIMULADOR proporciona às concessionárias importante ferramenta de planejamento permitindo previsão da possibilidade de transgressões em indicadores médios (DEC e FEC) e individuais (DIC e FIC) através da análise de riscos, considerando diferentes cenários. Para os indicadores médios (DEC e FEC) são feitas análises de regressão, sobre dados históricos, agregados nos alimentadores que formam os conjuntos, sobre os próprios conjuntos, ou sobre agregados de outros entes (p.ex., transformadores de distribuição/particulares). Cada análise de regressão resulta numa tendência de evolução do indicador, em intervalos de confiança com correspondentes desvios

padrão, com fatores de sazonalidade avaliados a partir de método especificamente desenvolvido. A partir de tais desvios padrão, são compostas curvas de distribuição de probabilidades dos indicadores médios do conjunto e, os níveis de risco para transgressão de um dado limite são avaliados.

A avaliação dos indicadores individuais baseia-se em dados de atributos dum alimentador (p.ex.: comprimento de rede, área e ângulo de ação, n.º de transformadores de distribuição, etc.) e a partir de parâmetros específicos da simulação que fornecem dados relativos às políticas de instalação de equipamentos de proteção e seccionamento utilizados em cada empresa. Através da geração aleatória de alimentadores que apresentam os atributos fornecidos, são simuladas redes existentes resultando em distribuições dos indicadores individuais, onde é destacado o risco de ser transgredido um dado limite.

Nas análises de riscos, incorporadas ao SIMULADOR, podem ser considerados diferentes cenários e metas, como as metas estabelecidas pela ANEEL (primeiro decil dos Clusters de conjuntos) e aquelas estabelecidos nos contratos de concessão das empresas. O SIMULADOR permite a realização de estudos de reagrupamento das unidades consumidoras, formando diferentes conjuntos para cada empresa, quando o usuário pode avaliar os eventuais benefícios decorrentes de tais simulações.

2.0 - METODOLOGIA

2.1 Simulador de DEC e FEC

2.1.1 Tendência de Evolução dos Indicadores

A previsão dos indicadores de DEC e FEC para os anos futuros utiliza uma função ajustada do tipo $DEC=f_1(t)$ e $FEC = f_2(t)$ resultantes da aplicação de análise de regressão, pelo método dos mínimos quadrados, sobre os correspondentes dados históricos, com intervalos de confiança definidos pelo planejador, fato que interfere diretamente no desvio padrão e no erro da amostra.(Figura1).

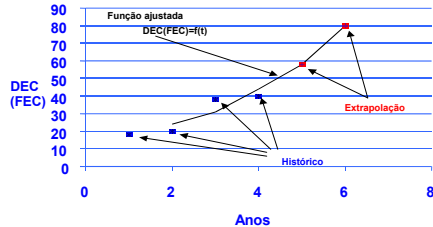


Figura 1- Função ajustada e extrapolada

O SIMULADOR disponibiliza a extrapolação por meio de funções lineares e funções exponenciais.

2.1.2 Sazonalidade

As variações cíclicas que ocorrem ao longo da série histórica e se repetem de períodos em períodos caracterizando uma série temporal, denominadas sazonalidade.(Figura 2)

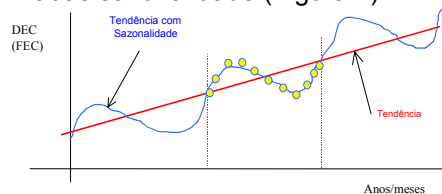


Figura 2 Série Temporal

Na previsão de séries temporais, principalmente para o caso de previsão de cargas futuras, utiliza-se os métodos de média móvel centrada e o método de Furnas[1]. Será proposto um outro método, mais consistente com os indicadores de continuidade e a quantidade de dados disponíveis, que foi concebido após análise das séries históricas disponíveis.

Inicialmente, são calculados os valores de DEC e FEC médios de cada ano, a partir de uma série histórica de DEC e FEC mensais:

$$DEC_{m,k} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} DEC_{i,k} \quad (1)$$

$$FEC_{m,k} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} FEC_{i,k} \quad (2)$$

$$k = 1, 2, 3, \dots, n \quad i = 1, 2, \dots, 12$$

onde:

$DEC_{m,k}$ – DEC médio do ano k;
 $FEC_{m,k}$ – FEC médio do ano k;
 $DEC_{i,k}$ – DEC verificado mês i;
 $FEC_{i,k}$ – FEC verificado do mês i;
i – mês; k – ano; n – número de anos.

Em seguida determina-se os Fatores de Sazonalidade mensais $FSDEC_{i,k}$ e $FSFEC_{i,k}$, para cada mês i do ano k:

$$FSDEC_{i,k} = \frac{DEC_{i,k}}{DEC_{m,k}} \quad (3)$$

$$FSFEC_{i,k} = \frac{FEC_{i,k}}{FEC_{m,k}} \quad (4)$$

$$\text{para } i = 1, 2, 3, \dots, 12 \quad k = 1, 2, \dots, n$$

Feito isso, calcula-se os Fatores de Sazonalidade médios $FSDEC_i$ e $FSFEC_i$, para cada mês do ano, utilizando-se as expressões:

$$FSFEC_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n FSFEC_{i,k} \quad (5)$$

$$FSDEC_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n FSDEC_{i,k} \quad (6)$$

$$\text{para } k = 1, 2, \dots, n \text{ (ano)}$$

Finalmente, aplica-se o fator de sazonalidade sobre a tendência. (função obtida através da regressão sobre a Série histórica).

2.1.3. Análise de Risco

O SIMULADOR realiza análises de riscos para transgressão de metas anuais(ANEEL), trimestrais(40% da anual) e mensais(30% da anual). A análise de riscos considera cada conjunto representado por uma distribuição normal de DEC (FEC), obtida a partir da regressão sobre os valores da série histórica. A metodologia adotada para avaliação da distribuição de probabilidades constitui-se da execução das seguintes etapas:

- 1) para cada conjunto, considera-se uma distribuição normal nos valores de DEC (FEC);
- 2) a função densidade acumulada da distribuição normal foi discretizada em 41 patamares;
- 3) realiza-se ensaios consecutivos até que a variação do valor médio do indicador entre dois ensaios seguidos seja menor que uma tolerância;
- 4) obtidos os valores de DEC(FEC) do conjunto, estes são normalizados e, desta forma, obtém-se as distribuições estatísticas em 20 faixas de DEC e FEC com suas respectivas freqüências de ocorrência dentro de cada faixa;;
- 5) a partir dos histogramas de distribuição estatística, obtém-se histogramas de freqüência acumulada com os riscos esperados do indicador superar as metas pré-estabelecidas (Figura 3)

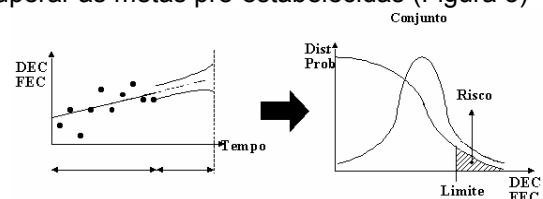
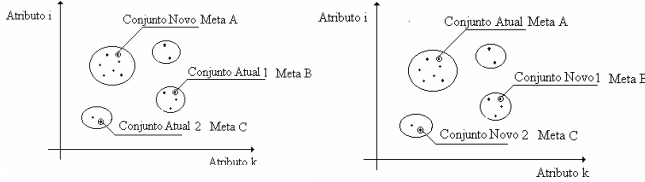


Figura 3 Análise de Risco

2.1.4. Operações com Conjuntos

O SIMULADOR permite a desmembramento ou união a outro conjunto de um conjunto pré-existente, atualizando as metas de DEC e FEC para valores obtidos através do método das K-médias[2] ou ainda escolhidos pelo planejador de forma direta. (Figuras 4(a) e 4(b))



(a) Desmembramento de Conjuntos

(b) União de Conjuntos

Figura 4- Desmembramento e União de Conjuntos

2.2 Simulador de DIC e FIC

2.2.1. Cálculo dos Indicadores de Continuidade

A quantificação dos indicadores é feita pela simulação de falhas nos ramos da rede, considerando as taxas de falhas correspondentes e o tempo médio de restabelecimento. Para tanto, o alimentador é subdividido em blocos de carga, definidos como conjunto de ramos derivados de dispositivo de chaveamento e proteção (Figura 5).

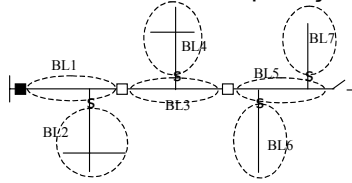


Figura 5- Blocos de carga (BL_i)

Ainda, pressupõe-se a existência de três tempos de interrupção:

T1 – tempo de restabelecimento das cargas à montante do defeito;

T2 – tempo de restabelecimento de cargas no trecho em defeito;

T3 – tempo de restabelecimento das cargas à jusante do defeito (socorro de outras fontes).

Considera-se para o restabelecimento as duas regras seguintes:

Falta em ramal com fusível: só os consumidores do ramal são afetados, o suprimento de energia é restabelecido no tempo T₂.

Falta no tronco ou em ramal não protegido por fusível: inicialmente todos os consumidores do alimentador são desligados pelo chaveamento do disjuntor instalado na SE. Os consumidores a montante tem o suprimento restabelecido depois que bloco da falta é isolado para reparo (tempo T₁). Os consumidores a jusante são restabelecidos por meio de transferência da carga (chave de socorro) para outro alimentador (tempo T₃). Os consumidores localizados no bloco de defeito são restabelecidos no tempo T₂.

Desta forma, os indicadores de continuidade são definidos como:

a) consumidores localizados nos ramais protegidos por fusível:

$$FIC_i = \lambda_i \ell_i + \sum_{j \in \Omega_D} \lambda_j \ell_j \quad (7)$$

$$DIC_i = \lambda_i \ell_i T_2 + \sum_{j \in \Omega_D} \lambda_j \ell_j T_{ij} \quad (8)$$

$$FEC_i = \left(\lambda_i \ell_i + \sum_{j \in \Omega_D} \lambda_j \ell_j \right) NC_i / NC_t \quad (9)$$

b) consumidores localizados no tronco ou nos ramais sem proteção:

$$FIC_i = \sum_{j \in \Omega_D} \lambda_j \ell_j \quad (11)$$

$$DIC_i = \sum_{j \in \Omega_D} \lambda_j \ell_j T_{ij} \quad (12)$$

$$FEC_i = \left(\sum_{j \in \Omega_D} \lambda_j \ell_j \right) NC_i / NC_t \quad (13)$$

$$DEC_i = \left(\sum_{j \in \Omega_D} \lambda_j \ell_j T_{ij} \right) NC_i / NC_t \quad (14)$$

onde:

λ_i : taxa de falha para o ramo associado ao bloco de carga BL_i, em n.^o falhas/km/ano;

ℓ_i : comprimento total do ramo associado ao bloco de carga BL_i, em Km;

FIC_i : frequência equivalente de interrupção anual individual considerando as interrupções dos consumidores do bloco de carga BL_i;

FEC: frequência equivalente de interrupção anual média considerando todos os consumidores do alimentador.

FEC_i : Contribuição do bloco de carga BL_i para o FEC;

DIC_i : duração equivalente de interrupção anual individual considerando as interrupções dos consumidores do bloco de carga BL_i;

DEC: duração equivalente de interrupção anual média considerando todos os consumidores do alimentador,

DEC_i : Contribuição do bloco de carga BL_i para o DEC;

NC_i : n.^o de consumidores do bloco de carga BL_i;

NC_t : n.^o total de consumidores do alimentador.

Ω_D : conjunto de blocos compreendendo os blocos de carga do tronco e de ramais sem proteção;

T_{ij} : Tempo de restabelecimento para o bloco de carga BL_i quando ocorre uma falta no bloco BL_j (igual a T₁, T₂ ou T₃ dependendo da posição do bloco BL_i em relação ao bloco BL_j).

Os indicadores médios do alimentador são determinados por:

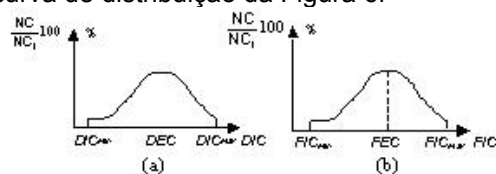
$$FEC = \sum_{i=1}^{nbl} FEC_i = \frac{1}{NC_t} \sum_{i=1}^{nbl} (FIC_i NC_i) \quad (15)$$

$$DEC = \sum_{i=1}^{nbl} DEC_i = \frac{1}{NC_t} \sum_{i=1}^{nbl} (DIC_i NC_i) \quad (16)$$

sendo nbl o n.^o total de blocos de carga do alimentador.

Demonstra-se que os indicadores médios DEC e FEC são iguais a média dos valores dos indicadores individuais DIC e FIC.

A quantificação dos indicadores individuais para todos os blocos de carga do alimentador resulta na curva de distribuição da Figura 6.



(a) Número de consumidores (%) versus DIC

(b) Número de consumidores (%) versus FIC

Figura 6 – Curvas de Distribuição para DIC e FIC

2.2.2. Método de Monte Carlo

O método desenvolvido consiste na geração de redes radiais fictícias (Método de Monte Carlo) com características topológicas e da carga pré-definidas. As redes geradas têm parâmetros técnicos avaliados de forma convencional. Os índices de continuidade (END, DEC, FEC, DIC e FIC) são calculados com base nos valores médios da taxa de falha, dos tempos de restabelecimentos e nos critérios de utilizados para alocação de dispositivos de proteção/chaveamento ao longo da rede.

O método considera as seguintes hipóteses na implementação do modelo:

- todos os pontos de carga atendem a cargas iguais e mesmo n.º de consumidores. A demanda individual de cada ponto de carga é calculada pela relação demanda máxima e o número total de pontos de carga do alimentador;
- circuito primário cresce de forma arborescente à medida que um novo ponto de carga é incorporado em sua área, sendo atendido através da extensão da rede, pela menor distância condicionada restrições urbanas;
- surgimento do novo ponto de carga é aleatório, condicionado a restrições urbanas e por lei que determina a densidade esperada ao longo de um raio de setor circular;
- a metodologia adotada se aplica a alimentadores de distribuição primária urbano e não urbano. A diferença das leis formadas para tais casos decorre da função de densidade de carga adotada (constante, para urbanos e decrescente, para não urbano), das eventuais restrições de caminhamento (alimentador urbano deverá caminhar sobre reticulado previamente estabelecido), dos parâmetros de condutores.

A metodologia pode ser descrita como:

Gera-se, aleatoriamente, para N simulações, uma rede radial, distribuindo os pontos de carga sobre um setor circular (Figura 7), em consonância com os descritores dos alimentadores. Fixa N tal que, com uma dada probabilidade, o máximo intervalo

de confiança com relação ao valor real de cada parâmetro não seja excedido. A função densidade de carga no alimentador como sendo:

$$D_r = D_0 r^\alpha \quad (17)$$

onde:

D_r : Densidade de carga por um raio r relativo a um setor circular definido por um ângulo de ação e a área de cobertura do alimentador;

D_0 : Densidade de carga para $r=0$, em kVA/km^2 ;

α : Expoente que define a variação da densidade de carga ao longo do raio r .

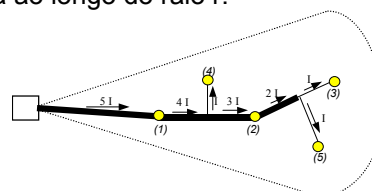


Figura 7- Geração aleatória da rede radial

Os indicadores individuais de cada alimentador, são determinados através das N simulações, com respectivas definições das curvas de distribuição dos valores de DIC e FIC, obtidas para os blocos de carga dos alimentadores gerados aleatoriamente. Assim, obtém-se uma curva de distribuição de probabilidades “média” dos valores dos indicadores DIC e FIC em alimentadores com os atributos definidos.

A avaliação dos índices de interrupção e continuidade para cada alimentador gerado pelo método descrito acima é baseado nas normas de projeto utilizadas pelas distribuidoras para alocação de dispositivos de proteção e chaveamento. A seguir são citadas algumas das práticas utilizadas pelas distribuidoras:

- a) alimentadores rurais: distância entre os dispositivos de chaveamento nos ramos tronco não deve exceder a distância pré-estabelecida. Em alimentadores urbanos: certo n.º de dispositivos de chaveamento é uniformemente alocado ao longo do ramo tronco.
- b) ramal com comprimento maior que $L_{\min}$ ou carga superior a $I_{\min}$ deve ter chaves fusíveis.
- c) Chaves de socorro de alimentadores estão disponíveis para restaurar a energia à montante.

2.2.4- Calibração das curvas de distribuição probabilísticas de DIC e FIC para os DEC e FEC medidos.

A maioria das distribuidoras apuram os indicadores de DEC e FEC pelo sistema pela composição das ocorrências e as interrupções correspondentes, método a posteriori. Desta forma, as curvas de distribuição probabilísticas para os indicadores individuais DIC e FIC devem ser calibradas para que os valores médios apurados coincidam com a média, pelo conveniente ajuste dos valores das taxas de falha

e do tempo de restabelecimento. De fato:

$$\lambda_f = \lambda_i \frac{FEC_{\text{apurado}}}{FIC_{\text{média}}} \quad (18)$$

$$T_f = T_i \frac{\lambda_i}{\lambda_f} \frac{DEC_{\text{apurado}}}{DIC_{\text{média}}} \quad (19)$$

onde

λ_f : taxa de falha ajustada;

λ_i : taxa de falha inicial;

FEC_{apurado} : FEC apurado;

$FIC_{\text{média}}$: FIC médio para λ_i ;

T_f : tempos de restabel. ajustado (T_1, T_2, T_3);

T_i : tempos de restabel. iniciais (T_1, T_2, T_3).

3.0 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Nesta seção apresentar-se-á a aplicação do SIMULADOR aos conjuntos e alimentadores, de uma concessionária hipotética. (Tabela 1)

Tabela 1-Conjuntos e seus Alimentadores

CONJUNTO	ALIMENTADOR
Conjunto 1	Alim 11
	Alim 23
	Alim 24
Conjunto 2	Alim 08
	Alim 09
Conjunto 3	Alim 10
	Alim 12
	Alim 13
	Alim 22
	Alim 25

3.1. DEC e FEC

As Figura 8(a) e 8(b) apresentam uma série histórica para o DEC do Conjunto 1 e a curva ajustada através da regressão com e sem a “sazonalidade”, respectivamente. Verifica-se, das figuras, que a curva com a “sazonalidade” é melhor ajustada a série histórica.

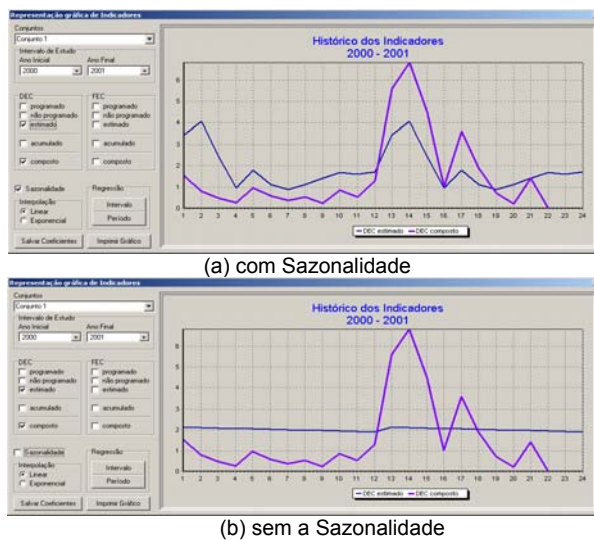


Figura 7 - Série Histórica DEC para o conjunto Conjunto1

A Figura 9 apresenta a previsão para DEC do Conjunto 3, janeiro/2003, intervalo de confiança 90%.

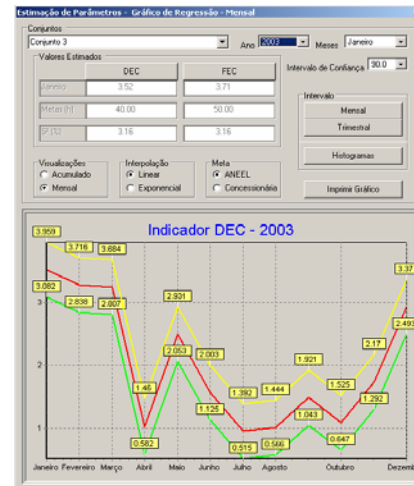
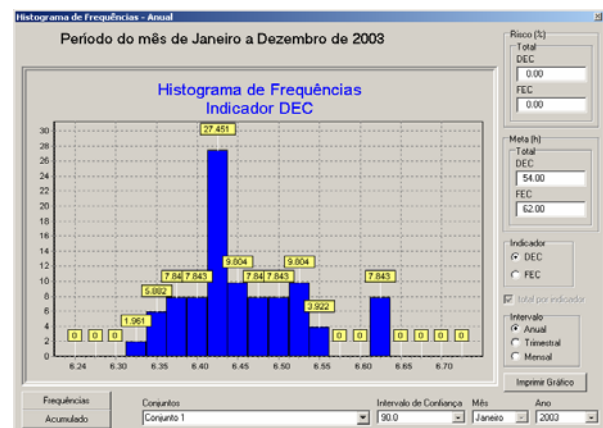
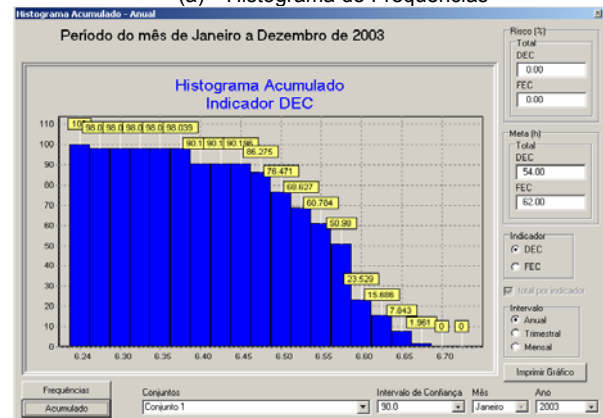


Figura 9 - Previsão dos indicadores para o conjunto Conjunto3

As Figuras 10(a) e (b) apresentam os histogramas de frequência e acumulado para o DEC do Conjunto 3, ano de 2003. Donde, extrai-se que o risco de transgressão do DEC é nulo.



(a) Histograma de Frequências

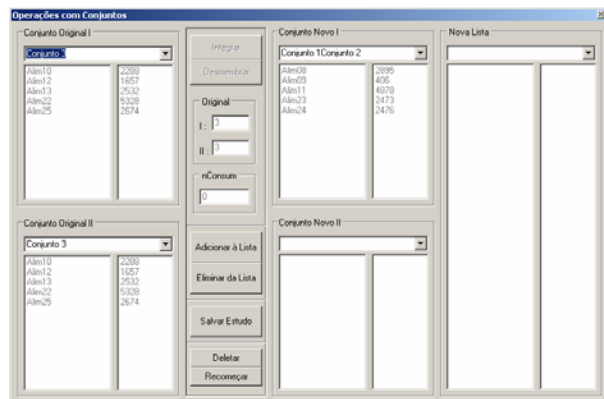


(b)Histograma Acumulado

Figura 9- Histogramas para o DEC previsto para 2003 do conjunto Conjunto 3

3.1.1. Operação com Conjuntos

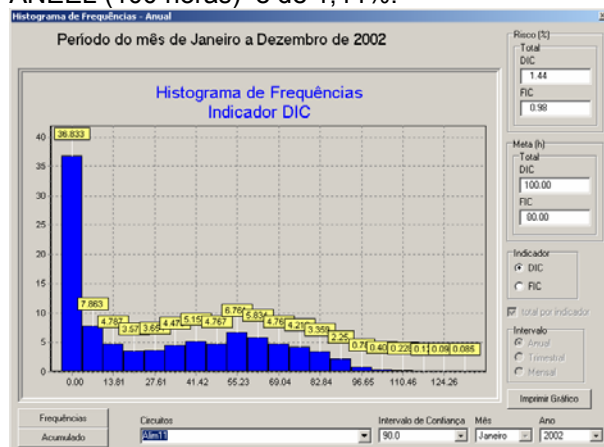
A Figura 10 mostra a união dos conjuntos Conjunto01 e Conjunto02, que resulta no novo conjunto Conjunto1Conjunto2.



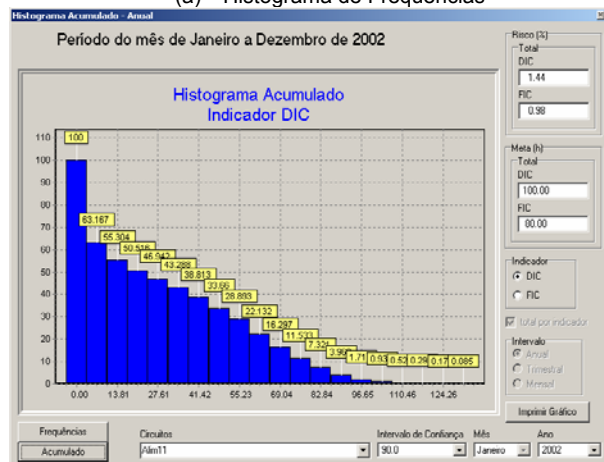
União dos Conjuntos Conjunto1 e Conjunto2
Figura 10- União e Desmembramento de Conjuntos

3.2. DIC e FIC

As Figuras 11(a) e (b) apresentam os histogramas de frequência e acumulado para DIC do alimentador Alim11 do Conjunto1. Da figuras, obtém-se que o risco de transgressão da meta ANEEL (100 horas) é de 1,44%.



(a) Histograma de Frequências



(b)- Histograma Acumulado

Figura 11 - Histogramas para o Alimentador Alim 11 do Conjunto Conjunto 1

Realizaram-se estas simulações para os outros alimentadores do universo de estudo. A Tabela 2 sintetiza os resultados obtidos para o DIC e e FIC.

Tabela 2-Probabilidade de Risco de Transgressão do Dic e Fic Alimentadores

CONJUNTO	ALIMENTADOR	META DIC (horas)	META FIC (n.º inter)s	RISCO DIC (%)	RISCO FIC (%)
Conjunto 1	Alim 11	100	80	1,44	0,98
	Alim 23	100	80	21,43	9,79
	Alim 24	100	80	18,94	19,81
Conjunto 2	Alim 08	100	80	0,0	0,0
	Alim 09	100	80	0,0	0,10
Conjunto 3	Alim 10	100	80	0,19	1,06
	Alim 12	100	80	0,0	0,0
	Alim 13	100	80	1,01	0,83
	Alim 22	100	80	0,0	1,63
	Alim 25	100	80	8,25	14,08

4.0 - CONCLUSÕES

O presente artigo apresentou metodologia e software para realização de estudos e simulações sobre os indicadores individuais e coletivos de conjuntos de unidades consumidoras. A metodologia desenvolvida está de acordo com a nova regulamentação do setor, Resolução ANEEL 024/2003, permitindo aos engenheiros realizarem uma série de análises, principalmente quanto ao risco de transgressões de metas dos indicadores (mensais, anuais e trimestrais), e ainda a verificação do impacto de mudança dos conjuntos de unidades consumidoras. Acredita-se que as empresas distribuidoras estarão municiadas de mais uma ferramenta de gestão da qualidade de fornecimento da energia elétrica, permitindo com que a tomada de decisões seja realizada com instrumentos mais consistentes com as necessidades e realidade do setor elétrico.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Njaim, P.R.. "Metodologia para Planejamento de Sistemas de Distribuição – Estado da Arte e Aplicações". São Paulo. SP 1995. Dissertação de Mestrado- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [2] ANEEL. Resolução 024/2003. Brasília, DF .2003.
- [3] Gouvêa,M.R., Valente, A. "Especificação do Modelo de Planjamento Agregado de Investimentos em Sistemas de Distribuição" . CED/103/PLAN 002/RL 001/OR. São Paulo, SP. 1994.