



GRUPO X

GRUPO DE ESTUDOS DE SOBRETENSÕES, COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO E INTERFERÊNCIAS (GSI)

VISAGE- UM SOFTWARE PARA AVALIAR DEPRESSÕES DE TENSÃO

José Policarpo G. Abreu
Júlia C. Caminha Noronha

José Maria de Carvalho Filho (*)
Hector Arango

Escola Federal de Engenharia de Itajubá -EFEI

RESUMO

O objetivo inicial deste artigo é apresentar uma ferramenta computacional destinada à avaliação do impacto das depressões de tensão em instalações consumidoras providas de cargas sensíveis, partindo-se do princípio que a maior causa das depressões de tensão são as ocorrências de curto-circuitos em linhas de transmissão e de distribuição.

A metodologia utilizada associa o cálculo de curtos deslizantes nas linhas do sistema e suas respectivas taxas de faltas com as características do sistema de proteção. Com base nestes resultados estima-se a magnitude e frequência de ocorrência de depressões de tensão em cada consumidor.

Por fim, são mostrados os principais produtos gerados pelo programa e também é apresentado um exemplo de aplicação.

PALAVRAS-CHAVE

Qualidade da Energia Elétrica, Power Quality, Depressões de Tensão, *Voltage Sags*, *Voltage Dips*.

1.0 - INTRODUÇÃO

Com a modernização do parque industrial brasileiro, houve a introdução maciça de processos controlados eletronicamente. Isto tem destacado um aspecto de vital importância da QEE e que diz respeito à sensibilidade destas cargas frente a variações momentâneas de tensão, inevitáveis no sistema elétrico e resultantes de curto-circuitos em extensas áreas, mesmo que localizadas em ponto remotos do sistema elétrico. Tais distúrbios, conhecidos internacionalmente como *voltage sags* e neste artigo denominadas de depressões de tensão, representam, atualmente, o

principal desafio a ser enfrentado pelas empresas de energia, consumidores e fornecedores de equipamentos. Ocorrências de depressões de tensão, combinadas com a sensibilidade dos equipamentos modernos, têm resultado em um número expressivo de interrupções de processos industriais. Como conseqüência, os índices de produtividade preconizados pelos projetos industriais não são na maioria das vezes atingidos, seja na sua forma quantitativa, seja na forma qualitativa, contabilizando perdas da ordem de milhões de dólares anuais para os consumidores. Dentro deste contexto, o sistema computacional VISAGE- *Voltage Sag Estimation*, foi desenvolvido com o objetivo de calcular índices de desempenho para o sistema elétrico, incorporando o item depressões de tensão, e visa basicamente auxiliar os planejadores do sistema (concessionárias e consumidores) na busca da compatibilidade entre a qualidade oferecida pelos sistemas de fornecimento de energia e as necessidades impostas pelos modernos processos industriais.

2.0 O SOFTWARE DESENVOLVIDO

2.1 Geral

O *software* VISAGE (1) foi implementado em Visual Basic para ambientes Microsoft Windows 3.x e Windows 95. A metodologia empregada esta baseada em (2). Os indicadores de desempenho do sistema elétrico são obtidos segundo o modelo markoviano proposto em (3) e apresentados no item 2.3. A estrutura básica do *software* é composta de dois módulos:

- Importação de dados de um estudo de curto-circuito;

- Tratamento dos dados e cálculo dos índices de desempenho.

2.2 Importação de Dados

Este módulo é compatível com o formato de saída dos principais programas utilizados no setor elétrico brasileiro (ANAFAS - CEPEL e CCINT - COPEL) e gera um banco de dados contendo:

- intensidade e ângulo das tensões pós-falta nos barramentos dos consumidores monitorizados, considerando curtos-circuitos 3F, 2F, 2FT e FT ao longo das linhas de transmissão e de distribuição; tensões pré-falta diferentes de 1 pu e impedância de falta;
- intensidade e ângulo das correntes de curto-circuito.

2.3 Tratamento dos Dados

Este módulo calcula os índices de desempenho por barramento de carga propostos em (3), a partir da leitura dos dados obtidos do módulo anterior e com base nas seguintes informações:

- características da carga dos consumidores (sensibilidade às depressões de tensão, demanda, fator de carga, tempo médio para a retomada de produção e custo médio da interrupção);
- informações do sistema de proteção (a versão deste programa considera somente relés de tempo definido);
- comprimento e estatísticas de falhas das linhas de transmissão e de distribuição.

Os índices de desempenho podem ser obtidos para cada consumidor e para o sistema como um todo considerando-se os seguintes critérios para a sensibilidade da carga:

- tensão fase - fase ou fase - neutro;
- tensão mínima ou média.

A tela principal do programa VISAGE está apresentada na Figura-1. Já nas Figuras 2 a 4 são mostradas as principais formas de entradas de dados.

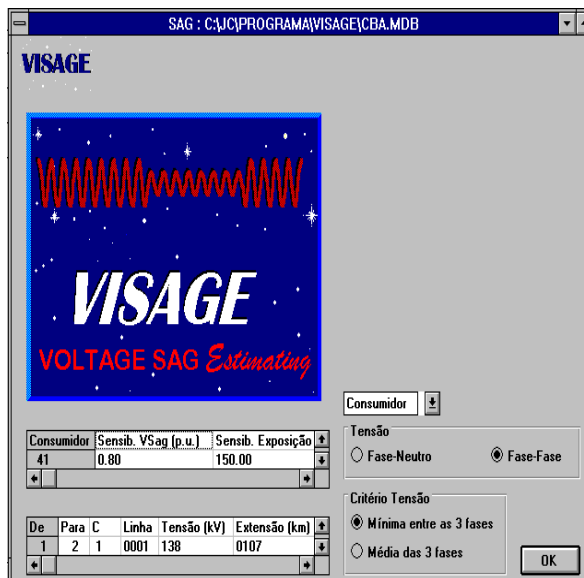


FIGURA-1- TELA PRINCIPAL DO PROGRAMA

De	Para	C	Linha	Tensão (kV)	Extensão (km)	Falhas.ano/km	%Faltas 3F	%Faltas FT
1	2	1	0001	138	0107	0.029800	4.00	73.00
1	2	2	0001	138	0107	0.029800	4.00	73.00
2	40	1	0002	138	0067	0.029800	4.00	73.00
2	40	2	0002	138	0067	0.029800	4.00	73.00
36	48	1	0003	138	0038	0.029800	4.00	73.00

FIGURA-2- ENTRADA DE DADOS DE LTS

De	%Faltas FFT	%Prot. Dist. Zona 1	%Prot. Dist. Zona 2	Zona 1 (ms)	Zona 2 (ms)
1	17.00	90	10	150	800
1	17.00	90	10	150	800
2	17.00	90	10	150	800
2	17.00	90	10	150	800
36	17.00	90	10	150	800

FIGURA-3- ENTRADA DE DADOS DE PROTEÇÃO DE LTS

Consumidor	Sensib. VSag (p.u.)	Sensib. Exposição (ms)	Demanda (MW)	Fator de Carga
41	0.80	150.00	20.00	0.80
95	0.80	150.00	20.00	0.80
113	0.80	150.00	20.00	0.80
119	0.80	150.00	20.00	0.80

FIGURA-4- ENTRADA DE DADOS DE SENSIBILIDADE DA CARGA

2.4 Metodologia Utilizada

A metodologia utilizada tem como base a confrontação da sensibilidade da carga com as solicitações impostas pelo sistema fornecedor em termos de predição da intensidade, da duração e da frequência de ocorrência das depressões de tensão.

Cada consumidor é representado no PAC (Ponto de Acoplamento Comum) por uma curva tensão x tempo, representativa da sensibilidade da carga e/ou processo industrial. A título de exemplo a Figura 5 apresenta a sensibilidade de um consumidor genérico i .

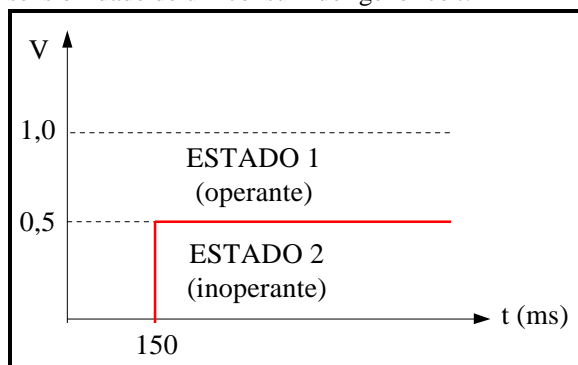


FIGURA 5- SENSIBILIDADE DO CONSUMIDOR i .

Além da curva de sensibilidade, a cada consumidor são associadas as seguintes variáveis:

- T_i - tempo médio gasto em horas pelo consumidor i para retomar a plena produção;
- C_i - custo de interrupção do consumidor i provocada por depressão de tensão. Neste custo serão contabilizados os custos associados a parada de produção, perda de especificação de produto, reparos de equipamentos, mão de obra, etc.;
- D_i - demanda do consumidor i em MW.
- $F(i)$ - fator de carga do consumidor i

No programa cada consumidor é representado pelo modelo de dois estados, sendo que o estado 1 é considerado como estado operante e o estado 2 inoperante. A taxa de transição do estado 1 para o estado 2 (λ_{12}) é igual ao número anual de ocorrências de depressão de tensão que provocam a parada do processo industrial. Já a taxa de transição do estado 2 para o estado 1 (λ_{21}) é calculada segundo a relação inversa do tempo necessário para o consumidor i retomar a plena produção T_i .

$$\lambda_{12} i = N_i \quad (1)$$

N_i - número anual de ocorrência de depressões de tensão disruptivas para o consumidor i .

$$\lambda_{21} i = 8760 / T_i \quad (2)$$

A Figura 6 ilustra o modelo de dois estados para os consumidores.

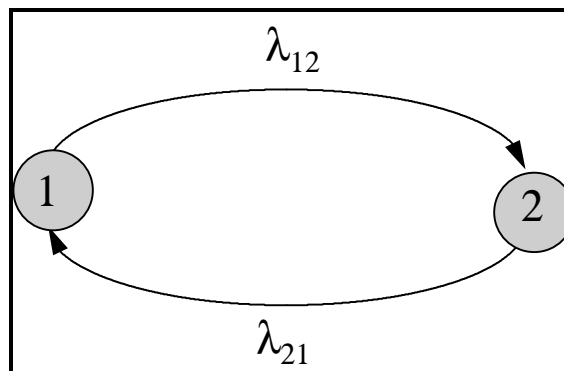


FIGURA 6. REPRESENTAÇÃO DOS CONSUMIDORES.

As probabilidades do consumidor i se encontrar nos estados 1 e 2 são calculadas segundo as expressões (3) e (4).

$$P_i(1) = \lambda_{21} / (\lambda_{12} + \lambda_{21}) \quad (3)$$

$$P_i(2) = \lambda_{12} / (\lambda_{12} + \lambda_{21}) \quad (4)$$

Para o cálculo das depressões de tensão são simulados curto - circuitos deslizantes em linhas aéreas e para cada tipo e localização da falta nos sistemas de transmissão e distribuição, são calculadas a intensidade, duração e frequência da depressão de tensão percebida por cada barra de carga. Para a determinação da duração da depressão de tensão é acrescido ao tempo de atuação da proteção o tempo de abertura dos disjuntores. Já para o cálculo da frequência são utilizados os dados de taxas de falha das linhas de transmissão. Posteriormente, de posse dos resultados obtidos, é calculado o número esperado de paradas anuais de produção por consumidor N_i que consiste da soma das depressões de tensão que incidem na região inoperante da Figura 5.

Finalmente, são calculados os índices de desempenho por barra de carga, conforme equações (5) a (7).

$$DND_i = P_i(2) \cdot D_i \quad (5)$$

$$END_i = 8760 \cdot DND_i \cdot F_{ci} \quad (6)$$

$$C_{sag_i} = N_i \cdot C_i \quad (7)$$

onde:

DND_i - Demanda não distribuída [MW]

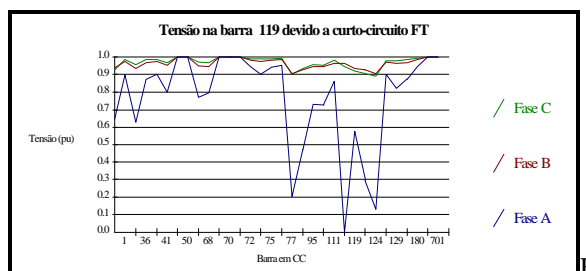
END_i - Energia não distribuída [MWh]

C_{sag_i} - Custo devido a depressão de tensão [US\$/ano]

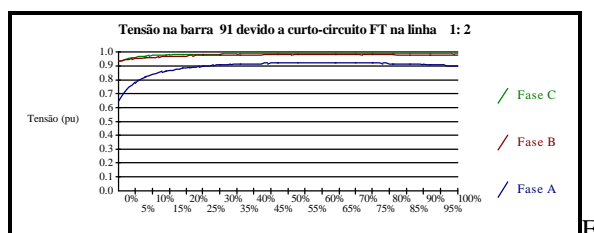
F_{ci} - Fator de carga

2.5 Saídas Gráficas

As principais saídas gráficas oferecidas pelo programa são apresentadas nas Figuras 7 a 9.



IGURA 7. CURTO-CIRCUITOS EM BARRAMENTOS



IGURA 8. CURTO- CIRCUITO DESLIZANTE EM LTS

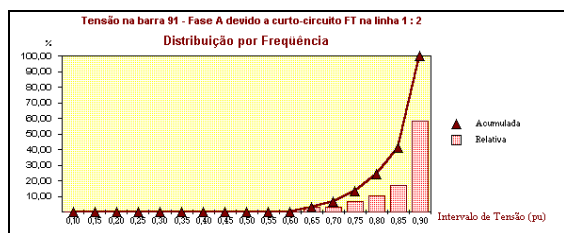


FIGURA 9. DISTRIBUIÇÃO POR FREQUÊNCIA

3.0 – EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Utilizando o programa VISAGE em um sistema hipotético apresentado na Figura 10, constituído de 32 barramentos, 1946 quilômetros de linhas de transmissão nas tensões de 138 kV, 230 e 345 KV.

O objetivo deste caso exemplo é mostrar a forma de aplicação do programa desenvolvido, como instrumento de auxílio, para que os planejadores do sistema (concessionárias e consumidores) possam buscar o melhor local da rede para conectar a carga. As barras 41, 95, 113 e 119 foram escolhidas como pontos prováveis para alimentação da carga sensível. As características da carga sensível são apresentadas na Tabela-1.

TABELA-1- CARACTERÍSTICAS DA CARGA

Dados do consumidor	Valores
Demanda (Di)	20 MW
Fator de Carga (Fci)	0,80

Tempo de Retomada de Produção (Ti)	8 hs
Custo por interrupção (Ci)	U\$50 mil
Sensibilidade da Carga	0,80pu/ 133 ms

Os tempos de atuação do sistema de proteção (relés + disjuntores) estão apresentados na Tabela-2

TABELA 2- TEMPOS DE ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO

Identificação das LTs	Tipo de Proteção	Tempo de Atuação (ms)
L24	Teleproteção	83
L25 e L26	Teleproteção	110
L20	Fio Piloto	110
L6, L13,L19, L21 e L22	Sobrecorrente	300
Demais linhas	Distância (alcance de 90%)	1ª Zona: 150ms 2ª Zona: 550 ms

As taxas de falha consideradas para as LTs estão apresentadas na Tabela-3.

TABELA 3- TAXAS DE FALHAS DAS LTS

Nível de Tensão	Taxa de Falha (*)	FT	2FT	FF	3F
345 kV	2,31	91%	7%	1%	1%
230 kV	1,58	80%	17%	1,5%	1,5%
138 kV	2,98	73%	17%	6%	4%

(*) No de ocorrências/ano/100 Km de linha

Para a execução dos cálculos foram adotadas as seguintes premissas:

- a tensão pré – falta é de 1 pu;
- a impedância de falta foi desprezada;
- o critério de avaliação foi o da tensão mínima entre fases.

Após a utilização do programa desenvolvido obtém-se como resultados os dados apresentados nas Tabelas 4 e 5.

TABELA 4- ÍNDICES DE DESEMPENHO

Índices	Barra 41	Barra 95	Barra 113	Barra 119
Pi(1)	0,98371	0,98831	0,98829	0,98894
Pi(2)	0,01629	0,01169	0,01171	0,01106
N(i)	18,14	12,95	12,98	12,24
DND(i)	0,33	0,23	0,23	0,22
END(i)	2.283,88	1.638,84	1.641,86	1.549,71
C _{dep} (i)	906,918	647,747	648,954	612,121

TABELA-5 –NÚMERO DE DESLIGAMENTOS ANO/BARRA - TODOS TIPOS DE DEFEITO

LTs	Barra	Barra	Barra	Barra
-----	-------	-------	-------	-------

	41	95	113	119
L1	2,28	1,14	0,12	0,82
L2	2,74	1,08	0	1,08
L3	1,13	0,52	0,31	0,46
L4	1,26	1,26	0,68	1,26
L5	0,60	0,31	0,16	0,27
L6	1,14	0,30	0	0,30
L7	1,34	0,36	0,12	0,36
L8	1,13	0,31	0,07	0,31
L9	0,84	0,68	0,79	0,68
L10	0,53	0,53	1,01	0,53
L11	0,50	0,80	1,32	0,80
L12	1,32	1,76	2,10	1,62
L13	0,54	0,54	2,02	0,54
L14	0,24	0,24	0,61	0,24
L15	0,29	0,29	0,44	0,29
L16	0,17	0,15	0,62	0,11
L17	0	0,06	0,68	0,02
L18	0	0	0,03	0
L19	0,48	0,48	0,48	0,48
L20	0	0	0	0
L21	0,45	0,72	0,35	0,67
L22	0,45	0,69	0,35	0,67
L23	0,72	0,72	0,72	0,72
L24	0	0	0	0
L25	0	0	0	0
L26	0	0	0	0
TOTAL	18,15	12,94	12,98	12,23

Através de inspeção da tabela 4, chega-se a conclusão de que a barra-119 é a que apresenta os melhores índices de desempenho, seguida da ordem decrescente das barras 95, 113 e 41.

A barra 41 é a que apresenta os piores índices com o número anual esperado de paradas de produção, da ordem de 18,14 ocorrências, representando 48 % a mais de interrupções de processo (5,90 ocorrências), se comparada com o desempenho da barra-119 (12,24 ocorrências).

O exemplo mostra claramente que sem qualquer investimento de melhoria no sistema, é muito mais vantajoso, tanto para o empreendedor, como para a concessionária, que o consumidor se conecte prioritariamente nas barras 119, 95 e 113, respectivamente, em vez da barra-41.

Também a partir da Tabela 5, pode-se extrair informações importantes como a identificação das linhas que contribuem com a maior parcela para os desligamentos das cargas sensíveis conectadas nos diversos barramentos. Como por exemplo, as linhas L2, L4 e L12 são as que mais contribuem para desligar o consumidor conectado na barra-119. É importante ressaltar que estas informações são vitais para que os planejadores identifiquem aqueles pontos no sistema que merecem investimento, seja na melhoria do desempenho do sistema de proteção, diminuindo a

duração das depressões de tensão, seja no investimento de medidas preventivas que diminuam as ocorrências de curtos-circuitos.

Também, igualmente importante, a Tabela 5 permite identificar as linhas que estão fora da área de vulnerabilidade dos consumidores, e, portanto, não carecem de nenhuma preocupação adicional, como por exemplo, as linhas L20, L24, L25 e L26.

4.0 – CONCLUSÕES

Este trabalho coloca à disposição dos planejadores do sistema, de concessionárias e/ou de consumidores, uma ferramenta computacional que permite avaliar o impacto da depressão de tensão sobre consumidores que tenham cargas sensíveis.

Através da comparação dos índices de desempenho calculados, pode-se definir as alternativas que resultem na melhor relação custo - benefício para os investimentos, tanto sob o enfoque da concessionária como sob a ótica do consumidor.

Para o cálculo da duração de depressão de tensão, os autores estão avaliando a possibilidade de implementação de falha na atuação da proteção principal, bem como características diversas de tempo x corrente para os dispositivos de proteção.

5.0 - BIBLIOGRAFIA

- (1) NORONHA, J.C.C. Análise Computacional de *Voltage Sags* em Consumidores com Cargas Sensíveis- EFEI, 1999, abril. Dissertação (mestrado em Engenharia Elétrica)
- (2) Power System Reliability Subcommittee Voltage Sag Working Group (Chairman: L. E. Conrad), Proposed Chapter 9 for Predicting Voltage Sags (Dips) in Revision to IEEE Std 493, *The Gold Book. IEEE Transaction on Industry Applications*, v. 30, n 3, May/June 1994, p. 805-821.
- (3) CARVALHO FILHO, J.M et all. *Voltage Sag* : Proposta de Novo Critério para Avaliação do Atendimento a Consumidores com Cargas Sensíveis” XII CBA, Uberlândia. 1998, pp. 1575-1580.

