



VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005
Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 10 7677
Tópico: Indicadores e Limites

ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

THIAGO CLÉ DE
OLIVEIRA

UNIFEI

JOSÉ POLICARPO G.
DE ABREU

UNIFEI

JOSÉ MARIA DE
CARVALHO FILHO

UNIFEI

ROGÉRIO PRINA
GOMES

LIGHT

RESUMO

Este artigo apresenta a aplicação de um sistema de *software* desenvolvido para a estimação de parâmetros de AMTs, utilizando-se tanto a metodologia conhecida como curto-circuito deslizante como a metodologia estocástica. A fim de comparar as duas metodologias, um caso teste é apresentado contendo análises e possibilidades de aplicações dos resultados obtidos.

PALAVRAS-CHAVE

Qualidade da Energia Elétrica, Simulação de Afundamentos Momentâneos de Tensão, Processos Estocásticos.

1.0 INTRODUÇÃO

Os estudos envolvendo afundamentos momentâneos de tensão (AMTs) são conduzidos a partir da monitoração das tensões do sistema elétrico ou através da utilização de metodologias de predição. A monitoração pode fornecer resultados representativos do distúrbio desde que o número de ocorrências do fenômeno monitorado seja elevado. Para distúrbios como AMTs, onde se pode encontrar ocorrências da ordem de um evento por mês, o período de monitoração deve ser da ordem de 30 anos, admitindo-se um grau de confiança de 90%, o que representa uma probabilidade de erro de 10%. Portanto, para evitar extensos períodos de monitoração, uma boa alternativa é a utilização de métodos de predição. As metodologias de predição têm, como base, a utilização de programas computacionais para cálculo de tensões e correntes pós-falta, a utilização dos tempos de sensibilização e atuação de relés de

proteção e, finalmente, a utilização de dados estatísticos de taxas de faltas em linhas de transmissão e de distribuição. Neste contexto, este trabalho apresenta a aplicação de um sistema de *software* dedicado à estimação de parâmetros de AMTs, utilizando-se duas metodologias distintas: o curto-circuito deslizante e a metodologia estocástica. Por fim, a aplicação do procedimento sobre um caso teste é apresentada com o objetivo de comparar os resultados provenientes das duas metodologias.

2.0 METODOLOGIAS PARA ANÁLISE DE AMTs – ABORDAGEM TEÓRICA

Para a estimação de parâmetros de AMTs (intensidade, duração e número de ocorrências), pode-se utilizar tanto métodos prospectivos quanto retrospectivos. Os primeiros buscam estimar o comportamento futuro do sistema, podendo-se destacar ainda duas vertentes. A primeira é composta pelos estudos baseados na metodologia do curto-circuito deslizante, onde são analisados todos os defeitos simulados ao longo de todas as linhas, a cada passo fixo previamente determinado. A segunda é composta pelos estudos estocásticos, onde são sorteados as linhas, as posições de falta e os tipos de falta.

Nos estudos retrospectivos, busca-se calcular o desempenho de determinadas barras do sistema com base em um histórico operacional, tendo em mãos o relatório de faltas durante um certo período de tempo, como por exemplo, 1 ano. Este estudo permite avaliar, por exemplo, se a reclamação de um determinado consumidor tem procedência ou não, caso não haja um monitor de qualidade instalado na barra daquele consumidor reclamante, ou que o tempo de

medição ainda não tenha sido suficiente para ser conclusivo.

2.1 Método do curto-circuito deslizante

O princípio do método das posições de falta [1], [2], também conhecido como curto-circuito deslizante, está baseado na sistemática de simular faltas em posições diferentes ao longo do sistema elétrico, principalmente nas linhas de transmissão e distribuição e observar o comportamento da tensão nos barramentos de interesse. Desta maneira, pode-se avaliar a influência da posição da falta tanto na magnitude como na duração dos afundamentos de tensão.

A magnitude do afundamento de tensão (tensão remanescente durante a falta) na barra i de interesse, é calculada a partir da utilização de um programa de cálculo de curto-circuito, mediante a aplicação da equação (1) para defeitos trifásicos.

$$E_{i,k} = E_i^P - \frac{E_k^P}{Z_{k,k} + Z_f} \cdot Z_{i,k} \quad (1)$$

sendo:

- $E_{i,k}$ - tensão remanescente na barra i devido a curto-circuito trifásico na barra k ;
- E_i^P - tensão pré-falta na barra i ;
- E_k^P - tensão pré-falta na barra k ;
- $Z_{i,k}$ - impedância de transferência entre as barras $i - k$;
- $Z_{k,k}$ - impedância própria da barra k ;
- Z_f - impedância de falta.

Para o cálculo da tensão remanescente devido a defeitos fase-terra, fase-fase e fase-fase-terra, são utilizadas equações equivalentes à expressão (1), porém, por questões de espaço, não serão detalhadas neste documento.

Para estimar o número de ocorrência de afundamentos devido a curtos-circuitos em linhas, deve-se proceder conforme (2):

$$N_n = \Delta L \cdot \lambda \quad (2)$$

sendo:

- N_n o número esperado de afundamentos de tensão associado à ocorrência de curtos-circuitos no segmento n de uma determinada linha, em eventos / ano;
- ΔL o incremento do curto-circuito deslizante, em km;
- λ a taxa média de falta da linha, em eventos / km / ano;

Assim, para se obter o número total de

ocorrência de afundamentos para uma determinada barra do sistema, basta que sejam somadas as contribuições individuais de cada segmento de linha onde a ocorrência de curtos-circuitos venha resultar em afundamentos de tensão.

2.2 Metodologia estocástica

Os estudos baseados na metodologia estocástica para cálculo de afundamentos [3] não consideram todos os curtos-circuitos simulados como o faz a metodologia baseada no curto-circuito deslizante. Todas as características das faltas são sorteadas considerando o período de simulação selecionado pelo usuário, em anos. O processo de sorteios tem como base o método de simulação de Monte Carlo [4] e utiliza o processo da transformada inversa da função distribuição das variáveis aleatórias para determinar o valor de cada variável sorteada. As principais variáveis sorteadas são: linha sob falta, posição e tipo da falta.

Para a seleção das linhas, o sorteio é conduzido com base na distribuição de probabilidades uniforme e a ponderação para cada linha é realizada pelo resultado do produto da taxa de falta pelo comprimento da respectiva linha. Desta forma, a probabilidade $p(j)$ da linha j ser sorteada é dada pela expressão (3).

$$p(j) = \frac{\lambda_j \cdot l_j}{\sum \lambda_i \cdot l_i} \quad (3)$$

sendo:

- λ_i e λ_j a taxa de falta das linhas, em nº de faltas / 100 km / ano;
- l_i e l_j o comprimento das linhas, em km.

Para o sorteio da posição de falta, é geralmente considerada a distribuição de probabilidades uniforme, indicando que todas as posições das linhas são equiprováveis.

Para determinar o tipo da falta a ser simulado, a ponderação de cada tipo de falta para o sorteio é determinada pela distribuição percentual para cada linha, baseada em dados históricos de operação do sistema que será simulado.

Uma vez determinadas todas as condições para o sorteio, o algoritmo deve executar automaticamente a geração de números aleatórios para determinar as características de cada falta. Este processo de sorteio deve ser repetido quantas vezes for necessário até que se atinja o número total de faltas esperado por ano de operação do sistema elétrico estudado,

conforme expressão (4).

$$n_{\text{sorteios}} = \sum \lambda_i \cdot \frac{l_i}{100} \quad (4)$$

Para mais de um ano de simulação, este procedimento deve ser repetido diversas vezes, até que o número de anos desejado seja atingido.

A determinação da magnitude dos AMTs para os cálculos estocásticos segue o mesmo procedimento já apresentado para o curto-circuito deslizante no item 2.1. Por outro lado, no cálculo do número de ocorrência, algumas importantes diferenças devem ser observadas, pois basta que, para cada sorteio, seja executada a verificação do valor da magnitude do afundamento em cada barra monitorada. Caso este valor esteja abaixo de 0,9 p.u., o valor do número de ocorrência é acrescido em uma unidade. Caso contrário, tal valor permanece no seu estado anterior.

Desta forma, ao final dos sorteios, o número esperado de afundamentos para a(s) barra(s) monitorada(s) é dada pelo quociente entre o valor total acumulado do número de ocorrência para cada barra monitorada e o total de anos simulados.

3.0 ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DE AMTs – CASO TESTE

3.1 Sistema para análise de afundamentos de tensão (SAT)

Para a realização das simulações foi utilizado o sistema SAT (Sistema para Análise de Afundamentos de Tensão), *software* desenvolvido no âmbito de um Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) em parceria com a Light Serviços de Eletricidade S.A.. Este programa tem como objetivo retratar com maior fidelidade as características aleatórias dos AMTs buscando-se preencher algumas das principais lacunas identificadas em outros aplicativos [5], destacando-se:

- Integração das ferramentas de análise retrospectiva e prospectiva em um único sistema, tornando este *software* abrangente e flexível;
- Utilização dos tempos de atuação do sistema de proteção para a estimativa da duração dos afundamentos;
- Ampliação do leque de filosofias de proteção contempladas nos estudos de afundamentos de tensão, incorporando rotinas de cálculo para as proteções de distância e sobrecorrente, além do tipo tempo definido;
- Análise probabilística da localização dos curtos-circuitos, uma importante variável aleatória a ser considerada nos cálculos e ainda não completamente difundida entre os demais

softwares desenvolvidos.

Estas são apenas algumas das funcionalidades do sistema de software que serão utilizadas neste trabalho. A descrição completa do SAT pode ser consultada em [5].

3.2 Descrição do caso-teste

O sistema elétrico utilizado para a realização dos estudos tem sua configuração baseada na rede de uma concessionária do sistema elétrico brasileiro [5].

Tal sistema possui 39 linhas de transmissão, totalizando 1946 km, sendo duas de 345 kV, duas de 230 kV e 35 de 138 kV. No total, o sistema possui 32 barras, sendo 7 delas de geração [5].

As taxas de falta para as linhas, bem como a sua composição percentual, são apresentadas na Tabela 1 [1], [2].

Tabela 1 – Taxas de falta nas linhas.

Nível de Tensão	Taxa de Falta (*)	Fase-Terra	Bifásica-Terra	Bifásica	Trifásica
345 kV	2,31	91 %	7 %	1 %	1 %
230 kV	1,68	80 %	17 %	1,5 %	1,5 %
138 kV	2,98	73 %	17 %	6 %	4 %

(*) nº de faltas / 100 km / ano.

Vale salientar que, para os propósitos deste trabalho, foram adotadas algumas premissas:

- Tensão pré-falta igual a 1 p.u.;
- Impedância de falta nula;
- Desconsideradas faltas em barramentos;
- O parâmetro do AMT que será analisado é o número de ocorrências/ano.

Foram escolhidas quatro barras como pontos de monitoração, pois nestes locais do sistema real encontram-se conectados grandes consumidores sabidamente possuidores de cargas sensíveis. Nestas quatro barras, foram analisados os resultados para as tensões fase-fase.

Nos estudos apresentados neste trabalho, em função de limitações de espaço, somente serão levadas em conta algumas das incertezas associadas ao cálculo de AMTs, a saber: linha sob falta, posição de falta na linha e tipo de falta. Portanto, não serão avaliadas as incertezas relacionadas à tensão pré-falta e resistência de falta.

3.3 Resultados obtidos da metodologia do curto-circuito deslizante

Neste caso foram simulados curtos-circuitos ao longo de todas as linhas do sistema, com passo fixo de 1% do comprimento das mesmas.

O número esperado de AMTs em cada uma das barras monitoradas, divididos de acordo com a contribuição dos diferentes tipos de falta é apresentado na Tabela 2. Os resultados desta

tabela retratam o comportamento médio das barras considerando a distribuição uniforme para as posições de falta.

Tabela 2 – Frequência de AMTs – curto-circuito deslizante.

Tipo de Falta	Barra 41	Barra 95	Barra 113	Barra 119
FF	2,59	2,58	2,59	2,58
FFF	1,77	1,77	1,77	1,76
FFT	8,00	7,97	8,04	7,90
FT	31,58	25,08	25,65	22,77
TOTAL	43,94	37,40	38,05	35,01

Pela observação dos resultados apresentados, pode-se concluir que a barra 119 é aquela que apresenta o melhor desempenho com relação ao número esperado de AMTs.

Também, pode-se observar que a distribuição percentual entre os tipos de falta não segue exatamente os dados informados na Tabela 1. Isto se explica pelo fato de que apenas uma parcela das faltas simuladas vão causar afundamentos nas barras do sistema. Por exemplo, as faltas fase-terra geralmente são menos severas, não chegando, em muitos casos, a ultrapassar o limite de 0,9 p.u. quando se monitora a tensão fase-fase, como é este caso. Por outro lado, as faltas trifásicas são mais severas, causando AMTs mais profundos.

3.4 Resultados obtidos da metodologia estocástica

Para o sistema analisado, a combinação das taxas de falta com o comprimento das linhas, através da aplicação da equação (4), resulta em 53 curtos-circuitos por ano. Desta forma, repete-se exaustivamente o sorteio das características destas 53 faltas para cada ano de simulação do sistema.

A Figura 1 mostra a comparação da evolução do número de ocorrência anual de afundamentos para a barra 119, levando em conta três séries de sorteios para um horizonte de 40 anos. Tal gráfico enfatiza a grande variabilidade de resultados para diferentes simulações, evidenciando o caráter aleatório e não-linear do distúrbio em foco.

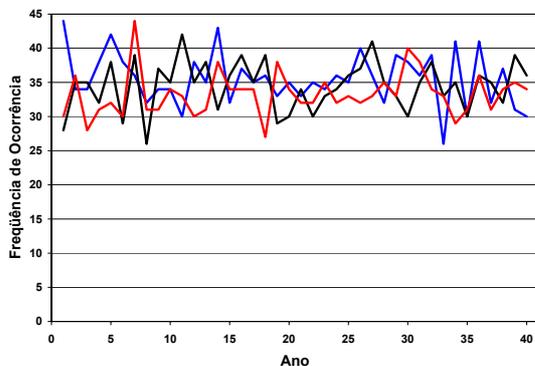


Figura 1 – Evolução do número de ocorrência de afundamentos na barra 119 para três séries de sorteios diferentes.

Apesar da grande variabilidade do número de afundamentos de tensão para cada ano de sorteio, quando se trabalha com o valor médio de ocorrências, observa-se uma convergência dos resultados. A Figura 2 mostra o comportamento da média de afundamentos na barra 119 para as mesmas três séries de sorteio citadas anteriormente. Por inspeção da Figura 2, observa-se que a linha de tendência do número esperado de afundamentos de tensão para a barra 119 converge para um valor próximo daquele apresentado na Tabela 2.

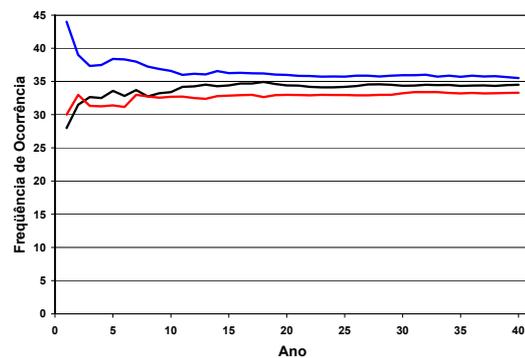


Figura 2 – Linha de tendência do número de ocorrência médio de afundamentos na barra 119.

O mesmo comportamento é verificado para as demais barras do sistema, conforme pode ser constatado na Tabela 3, onde é mostrada uma comparação entre os resultados obtidos pelo método estocástico, considerando uma série específica de 40 anos, com aqueles obtidos pela metodologia do curto-circuito deslizante.

Tabela 3 – Frequência de AMTs – comparação das metodologias.

Barra	Curto Deslizante	Estocástico
41	43,94	44,05
95	37,40	37,63
113	38,05	38,48
119	35,01	35,08

A proximidade destes resultados se deve principalmente ao fato de que ambos estudos utilizam a distribuição uniforme para posição de falta nas linhas. Adicionalmente, também foram adotados nos dois tipos de simulação valores idênticos para as taxas de falta, bem como para a distribuição estatística dos tipos de falta.

3.5 Análise estatística do número de AMTs

A fim de sintetizar estatisticamente os resultados da metodologia estocástica, foram simuladas mais 10 séries de 40 anos de observação, monitorando-se o parâmetro número de afundamentos de tensão. Com base nestes

resultados pode-se traçar a função densidade de probabilidade, cujo comportamento pode ser aproximado por uma distribuição normal.

A Tabela 4 apresenta os resultados para a média, desvio padrão e coeficiente de variação percentual do número de AMTs considerando 400 anos de simulação. Vale ressaltar que o coeficiente de variação é dado pelo quociente entre o desvio padrão e a média.

Tabela 4 – Análise estatística no número de AMTs por barra

Barra	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
41	43,63	2,94	6,74
95	37,03	3,41	9,21
113	37,64	3,16	8,40
119	34,64	3,56	10,28

Novamente, pode-se observar que a barra 41 é aquela que possui o pior resultado, ou seja, a média do número de afundamentos é a mais elevada. Por outro lado, a barra 119 é a que apresenta o melhor desempenho.

Em contrapartida, a barra 41 é aquela que apresenta tanto o menor desvio padrão como o menor coeficiente de variação. Isto significa que esta barra possui a menor dispersão de valores ao redor da média, tanto em nível absoluto quanto em nível relativo. Para contrapor, a barra 119, apesar de apresentar menor número de AMTs, é a que possui as maiores dispersões, tanto absoluta como relativa.

3.6 Aplicação das estimativas na avaliação de resultados de medição

Visto que, em uma distribuição normal, aproximadamente 95,4% dos valores se encontram a uma distância menor que ± 2 desvios padrões da média, pode-se estabelecer intervalos de classificação dos resultados de medições a partir dos resultados de simulações, utilizando tanto a metodologia do curto-deslizante como a estocástica. Conforme já comentado, a metodologia do curto-deslizante fornecerá o número médio de afundamentos de tensão e a metodologia estocástica fornecerá a variabilidade dos resultados, retratados pelo desvio padrão e coeficiente de variação. É evidente, conforme já mostrado, que se o número de simulações utilizando o método estocástico for suficientemente grande, os valores médios resultantes da metodologia estocástica convergirão para aqueles valores obtidos do curto-circuito deslizante, desde que adotadas as mesmas premissas (mesma distribuição para a localização das faltas e mesma composição dos tipos de falta).

Com base nos resultados obtidos de 400 anos de simulação, as Figuras 3 a 6 mostram

graficamente as funções densidade de probabilidade, cujo aspecto, de fato, se aproxima da distribuição normal.

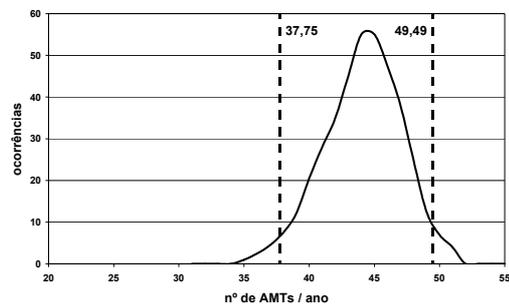


Figura 3 – Intervalo de confiança para a barra 41.

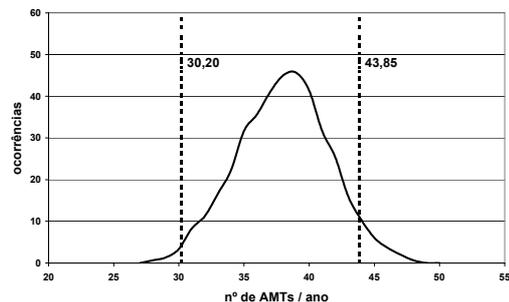


Figura 4 – Intervalo de confiança para a barra 95.

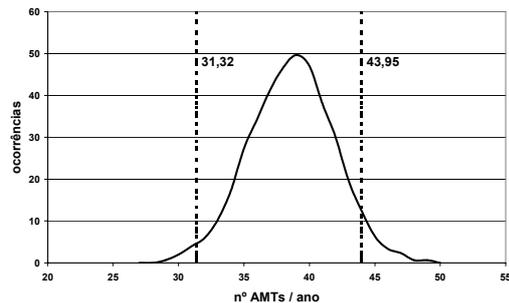


Figura 5 – Intervalo de confiança para a barra 113.

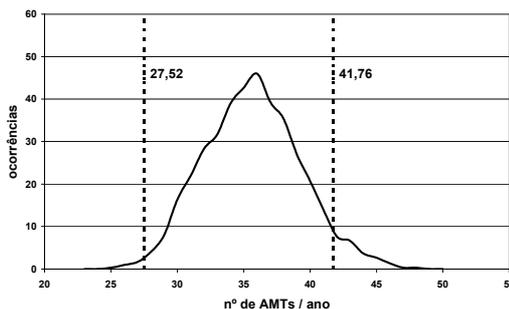


Figura 6 – Intervalo de confiança para a barra 119.

Também nestas mesmas figuras são traçados os intervalos de confiança correspondentes às quatro barras analisadas, adotando-se um grau de confiança de 95,4%. Por exemplo, o intervalo de confiança do número de AMTs na barra 41 é desde 37,75 a 49,49, com 95,4 % de grau de confiança.

Uma importante aplicação prática dos

intervalos apresentados é na análise de resultados provenientes de medições de campo. Por exemplo, com base nos resultados de simulação pode-se estabelecer o quão distante os resultados de 1 ano de medição estão do comportamento médio esperado do sistema. Em última análise, está-se buscando quantificar a probabilidade de tal situação voltar a ocorrer

Para aplicar tal procedimento, deve-se, inicialmente, certificar-se da correspondência das condições do sistema simulado com o sistema real em operação. Os aspectos mais relevantes são: taxas de falta, distribuição da posição das faltas, distribuição dos tipos de falta, topologia da rede, despachos de geração. Quanto mais próximas forem as condições utilizadas, mais exatos serão os resultados.

A fim de ilustrar tal procedimento, considere que os valores apresentados na Tabela 5 correspondam a 5 anos de medição do sistema utilizado no caso teste.

Tabela 5 - Resultados de 5 anos de "medição".

Barra	Ano				
	1	2	3	4	5
41	45	44	43	46	48
95	34	38	39	40	46
113	36	37	39	43	45
119	32	34	37	38	46

O procedimento consistirá basicamente na verificação se os intervalos de confiança apresentados nas Figuras 3 a 6 conterão ou não, ano a ano, os valores de medição mostrados na Tabela 5. Confrontando-se tais dados, pode-se concluir:

- A barra 41 apresentou todos os resultados anuais dentro do intervalo apresentado na Figura 3. Apenas o valor para o quinto ano se aproximou do limite superior do intervalo;
- As barras 95, 113 e 119 apresentaram o resultado do quinto ano acima dos intervalos de confiança apresentados nas Figuras 4, 5 e 6, respectivamente, o que caracteriza um resultado atípico, sobreestimando o número de AMTs;
- De maneira geral, o quinto ano apresentou resultados medições atípicos, com probabilidade de ocorrência muito baixa, com três entre quatro barras tendo o resultado não compreendido pelo intervalo de confiança de 95,4%.

4.0 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a aplicação de um sistema de *software* para a estimação de parâmetros de AMTs, através do uso de duas metodologias de predição: curto-circuito deslizante e metodologia estocástica. Nas análises deste trabalho somente foi levado em

consideração o parâmetro número de ocorrência. No entanto, o mesmo procedimento pode ser aplicado para os demais parâmetros, intensidade e duração.

Com a aplicação das duas metodologias em um sistema-teste, cuja configuração baseou-se na rede de uma concessionária do sistema elétrico brasileiro, verificou-se uma grande aderência entre os resultados, com o número médio de ocorrências da metodologia estocástica convergindo para o resultado do curto deslizante. É importante ressaltar a necessidade de correspondência entre as condições das simulações em se tratando de distribuição para as posições de falta, taxas de falta e distribuição estatística dos tipos de falta.

Como principal contribuição deste trabalho, destaca-se a aplicação de um procedimento estatístico para utilização de resultados das simulações estocásticas na avaliação de resultados de medição. É possível estabelecer, com base em um intervalo de confiança, o quão distante os valores de medição se encontram do valor médio, e também quantificar a probabilidade de tal situação tornar a ocorrer. O caso-teste apresentou a análise de cinco possíveis resultados de medição e a avaliação das probabilidades de ocorrência dos mesmos, com base em um intervalo de confiança de 95,4%.

5.0 REFERENCIAS

- [1] Conrad, L., Little, K., Grigg, C., "Predicting and Preventing Problems Associated with Remote Fault - Clearing Voltage Dips", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, No. 1, p.167-172, Jan/Feb 1991;Becker, C., Braun Jr., W., Carrick, K., Dilberti, T., Grigg, C., Groesch, J., Hazen, B., Imel, T., Koval, D., Mueller, D., St. John, T., Conrad, L., "Proposed Chapter 9 for Predicting Voltage Sags (Dips) in Revision to IEEE Std 493, The Gold Book". IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 30, No. 3, p.805 – 821, May/Jun 1994;
- [2] Fonseca, V. R. C., "Cálculo Estocástico do Afundamento de Tensão", Dissertação de Mestrado, PUC-MG, Dezembro, 1999;
- [3] Fishman, G. S., "Monte Carlo: Concepts, Algorithms, and Applications", Springer-Verlag New York, Inc., 1995;
- [4] Oliveira, T. C., "Desenvolvimento e Aplicação de um Sistema de Software para Estudos de Afundamentos de Tensão", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Outubro, 2004;