



**SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GSC 17
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO X

GRUPO DE ESTUDO DE SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO – GSC

ASPECTOS RELEVANTES EM ESTUDOS PROBABILÍSTICOS COM ÊNFASE AO RELIGAMENTO AUTOMÁTICO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Alécio Barreto Fernandes (*)

ABF Consultoria

Antonio Carlos S. Lima

Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ

RESUMO

Em estudos de transitórios eletromagnéticos, para quantificar as solicitações mais severas devidas a energização de equipamentos e circuitos, simulações estatísticas devem ser realizadas considerando a aleatoriedade do instante de fechamento e a dispersão entre pólos dos equipamentos de manobra. Em função deste comportamento probabilístico, disjuntores e chaves sob manobra devem ser modelados como chaves estatísticas, contemplando a execução de um número significativo de casos, de forma a assegurar sua representação estatística.

No presente trabalho, apresenta-se uma análise das simulações estatísticas em um estudo de religamento trifásico automático para uma linha de transmissão, quando da sua entrada em operação no Sistema Interligado Nacional (SIN). Para tanto, os valores máximos, médias e desvios padrões obtidos para as tensões e correntes, são correlacionadas ao modelo computacional utilizado na representação da linha de transmissão sob manobra, ao número de energizações e à faixa de variação do tempo médio de fechamento dos disjuntores. Adicionalmente, quantificam-se os eventuais acréscimos no esforço computacional (tempo de processamento).

Verifica-se a aderência dos resultados (tensões e correntes) à distribuição Normal de probabilidades.

Simulações probabilísticas mostram que, a depender do modelo computacional utilizado, pode-se restringir a ativação do religamento automático, quando uma representação mais precisa do fenômeno físico da propagação de ondas revela a possibilidade desta ativação.

Mostra-se ainda que ao simular 100, 200 ou 300 manobras estatísticas, os resultados obtidos são estatisticamente similares, enquanto que espaçar uniformemente o tempo médio das manobras, ao longo de 1 ou ½ ciclo na frequência fundamental, produz resultados estatisticamente distintos.

Conclui-se que a escolha do modelo computacional para a linha de transmissão é determinante para os resultados das simulações, sendo mais significativa e mais relevante se comparada aos outros aspectos analisados.

PALAVRAS-CHAVE

Transitórios Eletromagnéticos, Modelos de linhas de transmissão, Dependência com a frequência, Estudos estatísticos, Distribuição Normal de probabilidades, Religamento automático.

1.0 - INTRODUÇÃO

Estudos estatísticos devem ser realizados, visando quantificar as solicitações transitórias, ao se levar em consideração a aleatoriedade do instante de fechamento e a dispersão entre pólos dos equipamentos de manobra. Em função deste comportamento probabilístico, disjuntores e chaves sob manobra devem ser modelados como chaves estatísticas, contemplando a execução de um número significativo de casos, de forma a assegurar sua representação estatística [1; 2; 3].

Em seguida, estudos determinísticos devem ser realizados naquelas situações identificadas como mais severas nos estudos probabilísticos [3].

O disjuntor ou a chave sob manobra deve ser modelado como sendo uma chave estatística, a ser operada um dado número de vezes, em instantes aleatórios, gerados de forma randômica com base em uma dada distribuição de probabilidade [4].

Recomenda-se que os tempos de operação individuais de cada uma das três fases devam seguir uma distribuição gaussiana (ou Normal) de probabilidades, tendo um tempo médio de manobra associado a uma dispersão entre pólos (traduzido por um desvio padrão), no instante de fechamento dos contatos (principais ou auxiliares). O tempo médio de operação, por sua vez, deve ser espaçado uniformemente (distribuição uniforme) ao longo de um dado período de tempo, de forma a considerar as defasagens típicas de um sistema trifásico [3; 4].

Diante destas recomendações, indaga-se:

- 1) Qual o número mínimo de energizações necessárias para assegurar a representação probabilística dos estudos?
- 2) Distribuir uniformemente os tempos médios de operação dos contatos nas três fases, em 200 energizações ao longo de 01 ciclo da frequência fundamental é equivalente a 100 energizações distribuídas ao longo de $\frac{1}{2}$ ciclo?
- 3) Modelos computacionais distintos na representação da linha de transmissão podem gerar resultados significativamente distintos?

O presente trabalho se propõe a fornecer subsídios para responder tais questionamentos.

2.0 - REPRESENTAÇÃO DO FENÔMENO DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Nos estudos de transitórios eletromagnéticos a correta representação do fenômeno de propagação de ondas em linhas de transmissão é fundamental para uma avaliação precisa das grandezas envolvidas [5 - 10].

No presente trabalho, apresentam-se as diferenças que podem ser verificadas em estudos probabilísticos de religamento automático de linhas de transmissão, em função do modelo computacional utilizado na representação da linha de transmissão sob análise. Tem-se como enfoque os modelos de linhas de transmissão no domínio modal a parâmetros distribuídos constantes e dependentes da frequência [5; 9; 10], disponibilizados no programa ATP (*Alternative Transients Program*) [4].

3.0 - RELIGAMENTO AUTOMÁTICO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

A grande maioria dos desligamentos intempestivos de linhas de transmissão é de caráter temporário, extinguindo-se após algumas centenas de milissegundos, a exemplo dos desligamentos devido a descargas atmosféricas, diretas ou indiretas, e queimadas. Nestes casos o religamento automático das linhas de transmissão pode ser efetuado com uma alta probabilidade de sucesso, sem maiores conseqüências para o sistema.

Caso o defeito permaneça após a primeira tentativa de religamento, tem-se um religamento sem sucesso e nestes casos o sistema de proteção tornará a atuar desligando novamente a linha.

Visando uma maior probabilidade de sucesso no religamento, como função da extinção do arco elétrico no ponto de falta, é previsto um retardo no tempo para a inicialização do processo de religamento do disjuntor.

Este tempo de retardo é comumente denominado de “tempo morto”, e quanto maior for este tempo, maior será a probabilidade de extinção do arco elétrico, e assim maior a probabilidade de sucesso do religamento.

Quando do fechamento do primeiro terminal da linha (terminal líder), mais uma vez se prevê um retardo no tempo para o fechamento do segundo terminal (terminal seguidor) visando evitar o restabelecimento da linha no caso de um religamento sem sucesso.

A este novo tempo de retardo soma-se ainda um tempo comumente denominado de “verificação de sincronismo”, no qual alguns ajustes de diferenças (tensão, ângulo e frequência) têm de ser verificados para o restabelecimento completo da linha, sendo da ordem de algumas centenas de milissegundos.

O religamento pode ser monopolar ou tripolar, uma vez que o defeito pode se dar em apenas uma das fases ou envolver as três fases.

Para se ter uma avaliação dos valores de sobretensões e sobrecorrentes, bem como as energias dissipadas nos pára-raios, decorrentes do processo de religamento (com e sem sucesso), nos diversos pontos do sistema em questão, faz-se necessário realizar estudos de transitórios eletromagnéticos.

Estes estudos estabelecem as condições para a ativação, ou não, do religamento, de acordo com critérios previamente estabelecidos [3; 10; 11].

4.0 - ESTUDO DE CASO: RELIGAMENTO DA LT VILA DO CONDE – SANTA MARIA 230KV

Quando da entrada em operação da linha de transmissão Vila do Conde – Santa Maria 230kV (Área Pará, Sistema Norte do Sistema Interligado Nacional - SIN), foram realizados estudos pré-operacionais visando definir os procedimentos para energização, religamento tripolar automático e operação da referida linha de transmissão, bem como avaliar a recomposição da SE Santa Maria 230kV por esta nova rota [11].

Até então a SE Santa Maria 230kV era suprida a partir da SE Utinga 230kV por um circuito único, sendo esta a última subestação no sistema radial Vila do Conde – Guamá – Utinga – Santa Maria 230kV, conforme ilustrado na Figura 1.

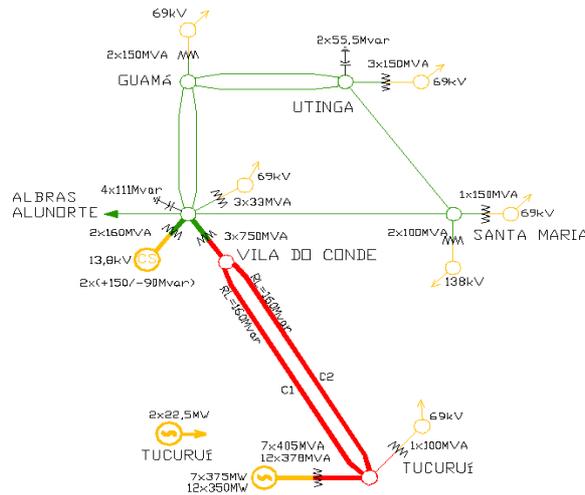


Figura 1 - Diagrama unifilar: Área Pará, Sistema Norte do Sistema Interligado Nacional – SIN.

A referida linha de transmissão tem como particularidade o fato de ser descontínua nas suas características construtivas, e, portanto, nos seus parâmetros elétricos.

A linha Vila do Conde – Santa Maria 230kV é uma Linha de Potência Natural Elevada (LPNE, com reatância reduzida e capacitância elevada) em cerca de 80% da sua extensão de 154,95km, a partir da SE Vila do Conde, sendo uma linha convencional nos 20% restantes, até a SE Santa Maria. Esta configuração foi adotada visando a entrada em operação de uma subestação (SE Castanhã) neste ponto de descontinuidade no ano de 2010.

5.0 - DISTRIBUIÇÃO NORMAL DE PROBABILIDADE E TESTES DE NORMALIDADE OU ADERÊNCIA

Uma distribuição normal de probabilidade (também denominada de distribuição Gaussiana), é completamente caracterizada pela média, μ (medida de localização), e pelo desvio padrão, σ (medida de dispersão) [10, 11].

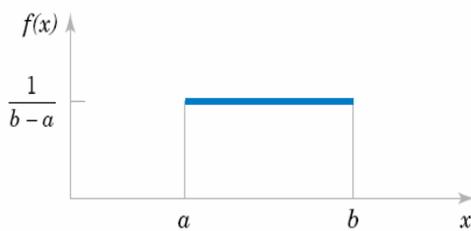


Figura 2 – Função densidade de probabilidade da distribuição uniforme.

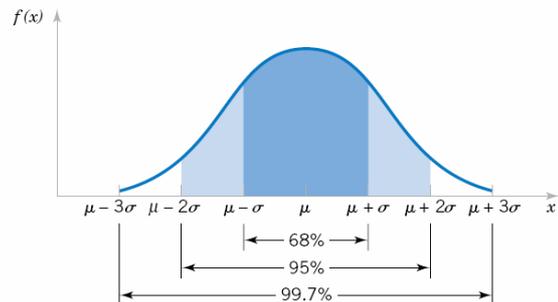


Figura 3 - Probabilidades associadas a uma distribuição normal, com média μ e desvio padrão σ .

Quando existem razões para suspeita quanto à presença de um grande número de pequenos incrementos agindo aditivamente e de forma independente, é razoável assumir que tais amostras (variáveis aleatórias) podem ser aproximadas, com boa precisão, a uma distribuição normal de probabilidade.

O teorema do limite central [1] estabelece que a soma das amostras independentes, para qualquer distribuição de probabilidade com média e variância finitas, converge para uma distribuição normal quando o número de amostras tende para infinito. Como desdobramento deste teorema, distribuições normais se verificam em diversas aplicações. Mesmo amostras que não obedecem a uma distribuição normal, podem ser aproximadas com boa precisão por uma distribuição normal [1].

Existem diversos métodos estatísticos, denominados de testes de normalidade, para testar de forma empírica a aderência das amostras a uma distribuição normal, a exemplo dos testes de Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors, Anderson-Darling, dentre outros [1, 2].

O teste de Kolmogorov-Smirnov (frequentemente denominado de *K-S teste*) também pode ser usado para quantificar as diferenças entre duas distribuições de probabilidade unidimensionais, ou para quantificar as diferenças entre uma dada distribuição de probabilidade e uma distribuição hipotética (curva teórica), em ambos os casos com base em um número finito de amostras [1, 2, 12].

O programa ATP faz uso do teste de Kolmogorov-Smirnov para verificar a aderência dos tempos de manobra gerados aleatoriamente pelo componente *STATISTIC SWITCH* [4]. Este teste é muito utilizado, por ser sensível às distinções tanto na localização (média) quanto na forma das funções empíricas de distribuição cumulativa (dispersão, ou desvio padrão) [1].

6.0 - RESULTADOS

Nos casos aqui analisados, verifica-se a sensibilidade dos resultados obtidos nos estudos estatísticos em relação:

- 1) Ao número de energizações: 100, 200 e 300;
- 2) A faixa de variação do tempo médio de fechamento: 01 ciclo ou ½ ciclo na frequência 60Hz;
- 3) Ao modelo computacional utilizado na representação da linha de transmissão sob manobra.

Lista-se na Tabela 1 os dados de entrada para o componente *STATISTIC SWITCH* do programa ATP [4]. Na Tabela 2, têm-se os resultados do teste de Kolmogorov-Smirnov realizado pelo programa ATP. Verifica-se a aderência dos tempos de fechamento dos disjuntores (gerados aleatoriamente) a uma distribuição Normal.

Tipo de Chave	Tempo Médio (s)	Dispersão Pólos (ms)	Faixa de Variação (Graus)	Número de Energizações
Distribuição Gaussiana	5,12 terminal líder	± 2,5	0 a 180 (1/2 ciclo)	100
				200
				300
	5,42 terminal seguidor		0 a 360 (01 ciclo)	100
				200
				300

Tabela 1 - Dados de entrada para os estudos estatísticos do programa ATP – Componente *STATISTIC SWITCH*.

Terminal	Tempo Médio uniformemente espaçado (s)	Desvio Padrão (ms)	Fase do disjuntor	Resultado do teste de Kolmogorov-Smirnov
Líder	5,12 (100 pontos distribuídos entre 5,12 ± 0,0512)	0,83333	A	0,180521422
			B	0,197646853
			C	0,650147470
Seguidor	5,42 (100 pontos distribuídos entre 5,42 ± 0,0542)	0,83333	A	0,723139361
			B	0,351740950
			C	0,437436217

Tabela 2 - Aderência dos tempos de fechamento dos disjuntores a uma distribuição Normal de probabilidade - Teste de Kolmogorov-Smirnov – Religamento com sucesso, modelo CF, 100 energizações, 01 ciclo da frequência fundamental.

A seguir, verificam-se os resultados quanto ao comportamento aleatório da média, desvio padrão e função cumulativa de probabilidade, se estes são aderentes a uma distribuição normal. Para a análise da aderência, comparam-se as distribuições cumulativas de probabilidade (empíricas) às curvas normais teóricas. No caso das tensões e correntes obtidas nas simulações, o teste de Kolmogorov-Smirnov não pode ser aplicado, pois na saída do programa ATP não são disponibilizadas todas as amostras geradas internamente. Caso um dado resultado mostre aderência à curva normal, pode-se calcular a probabilidade de superação dos valores máximos obtidos.

6.1 Quanto aos modelos computacionais adotados na modelagem da linha de transmissão sob estudo

Comparações gráficas para os resultados obtidos com os modelos CF e DF, são apresentadas nas figuras 4 a 6.

Da Figura 4, observa-se que as sobretensões são aderentes a uma distribuição Normal. Comparando os resultados obtidos com os modelos CF e DF (Figura 5), pode-se verificar, estatisticamente, a relevância do modelo computacional para os resultados em um estudo de religamento de linhas de transmissão.

Dos resultados obtidos, destaca-se ainda:

- A escolha do modelo computacional, se a parâmetros distribuídos constantes na frequência (modelo CF) ou a parâmetros distribuídos dependentes com a frequência (modelo DF), se mostrou determinante para os resultados.
- Em todos os casos estatísticos simulados, observam-se sobretensões de maior amplitude quando se faz uso do modelo CF, em virtude do religamento tripolar, seja este com ou sem sucesso. Verificam-se diferenças de até 69% nos resultados obtidos com os modelos CF e DF.
- Se considerarmos uma máxima sobretensão instantânea permitida de 638,5kV (750kV ou 4,00pu, em 230kV, guardando-se 15% como margem de segurança) como sendo o NBI (Nível Básico de Isolamento), tem-se:
 - Modelo CF: 09 casos proibitivos dentre 12 simulados = 75%.
 - Modelo DF: 03 casos proibitivos dentre 12 simulados = 25%.
- Destaca-se o valor de 45,164kA obtido para a corrente de armadura do compensador síncrono da SE Vila do Conde 230kV, quando se faz uso do modelo CF, com 300 energizações espaçadas em 01 ciclo. Este resultado difere significativamente dos demais.
- Apesar de demandar um esforço computacional adicional, o uso do modelo DF resultou em um acréscimo máximo inferior a 10% (em um caso único), sendo pouco relevante na maioria dos casos. A título de exemplo, o

maior acréscimo verificado de 9,9% corresponde a 127,63s (cerca de 2 minutos e 7s), para um tempo total de processamento de 1.417,34s (23 minutos e 37s).

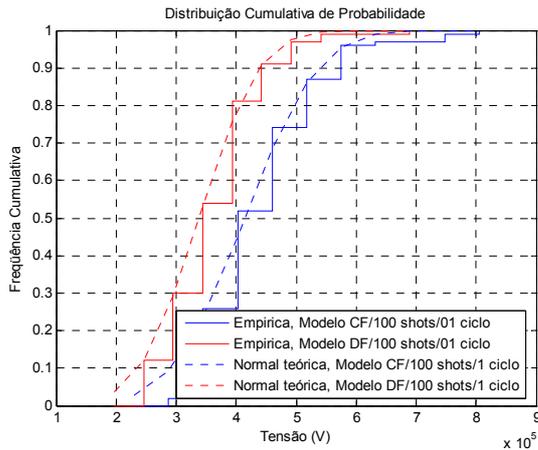


Figura 4 – Religamento com sucesso – Tensão no terminal aberto da linha – Distribuição cumulativa de probabilidade – Curvas empírica e teórica para os modelos CF e DF.

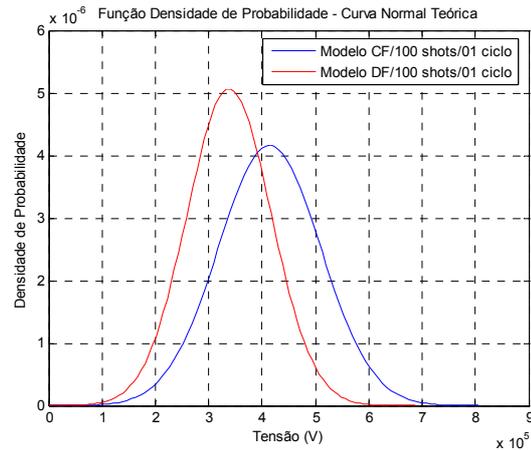


Figura 5 – Religamento com sucesso – Tensão no terminal aberto da linha – Função densidade de probabilidade – Curvas Normal teórica para os modelos CF e DF.

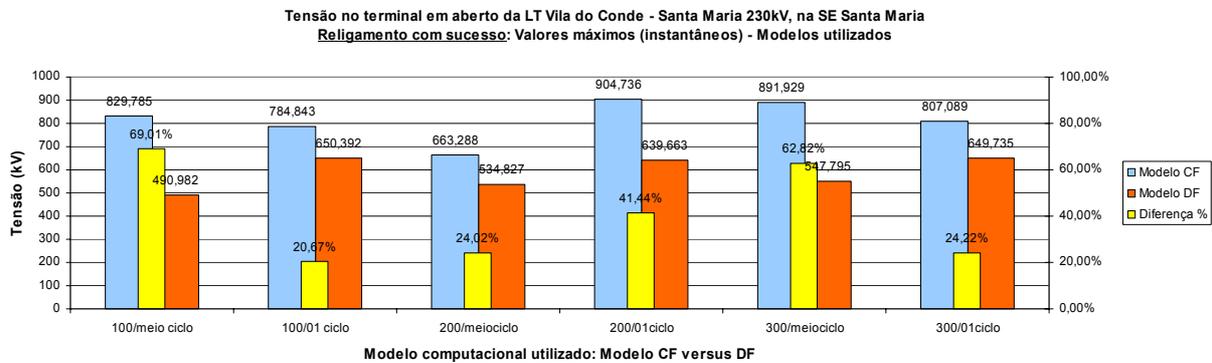


Figura 6 - Sensibilidade dos resultados quanto ao modelo computacional na representação da linha de transmissão sob manobra.

6.2 Quanto ao número de energizações adotadas nos casos estatísticos

Comparações gráficas entre os resultados obtidos com 100, 200 e 300 energizações, são apresentadas na figuras 7 a 10.

Da Figura 7, observa-se que as sobretensões são aderentes a uma distribuição Normal. O mesmo não se verifica para as sobrecorrentes de armadura nos compensadores síncronos da SE Vila do Conde 230kV (Figura 9). Neste caso as não linearidades têm maior impacto sobre as amostras, não sendo possível aproximá-las a uma distribuição Normal.

Comparando os resultados obtidos com 100, 200 e 300 energizações, pode-se verificar, estatisticamente, a similaridade entre os resultados (Figura 8). Mostra-se, portanto, que o acréscimo no número de manobras estatísticas, de 100 para 200, ou 300, não traz ganhos, sendo estatisticamente irrelevante para os resultados.

Dos resultados obtidos, destaca-se ainda:

- Em nenhum dos casos simulados, o fato de se adotar 100, 200 ou 300 energizações nos estudos estatísticos não alteram as conclusões, quanto a possibilidade de implantação do religamento tripolar, frente à máxima tensão instantânea permitida nos terminais em aberto da linha de transmissão sob análise.
- A forte aleatoriedade observada para as sobrecorrentes, em função do maior impacto nestas das não linearidades, é um aspecto que merece destaque.
- No que se refere ao número de energizações, o esforço computacional demandado, não justifica a adoção de mais que 100 energizações em estudos estatísticos.

Na Tabela 3, apresenta-se um resumo com valor médio, desvio padrão, valor máximo e probabilidade de superação do valor máximo (assumindo que as distribuições são normais), obtidos para a tensão no terminal em aberto da linha de transmissão.

Os valores médios e os desvios padrão definem as distribuições normais teóricas apresentadas na Figura 8.

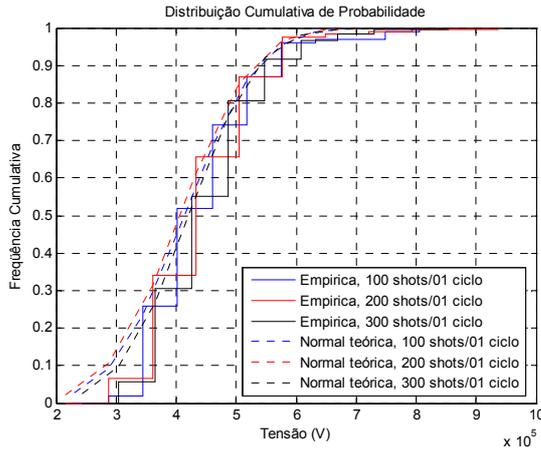


Figura 7 – Religamento com sucesso – Tensão no terminal aberto da linha – Distribuição cumulativa de probabilidade – Curvas empírica e teórica para 100, 200 e 300 energizações.

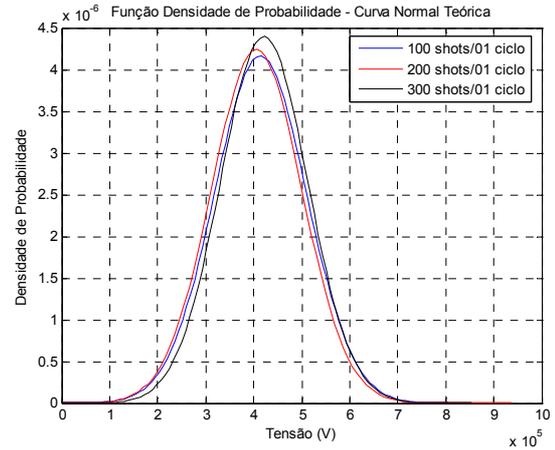


Figura 8 – Religamento com sucesso – Tensão no terminal aberto da linha – Função densidade de probabilidade para 100, 200 e 300 energizações.

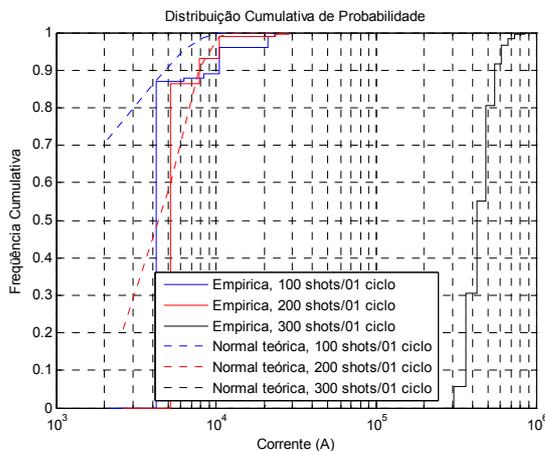


Figura 9 – Religamento com sucesso – Corrente de armadura no compensador síncrono – Distribuição cumulativa de probabilidade – Curvas empírica e teórica para 100, 200 e 300 energizações.

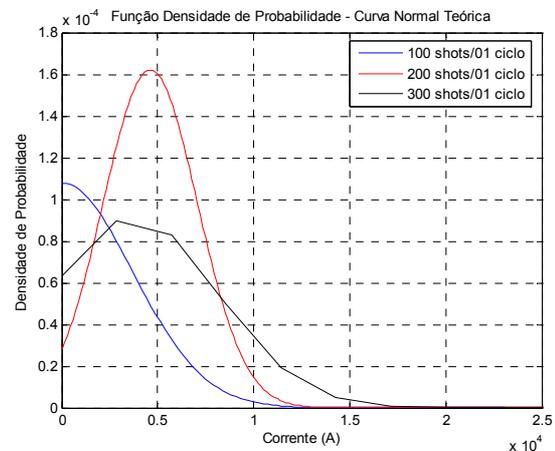


Figura 10 – Religamento com sucesso – Corrente de armadura no compensador síncrono – Função densidade de probabilidade para 100, 200 e 300 energizações.

Variável	Fase	Número de Energizações / Espaçamento	Valor Médio (kV)	Desvio Padrão (kV)	Valor Máximo (V _{máx} , em kV)	Probabilidade de Superação P (> V _{máx})
Tensão no terminal em aberto da linha de transmissão	C	100 / 01 ciclo	414,064	95,848	784,844	$5,477 \times 10^{-05}$
	B	200 / 01 ciclo	405,858	94,036	904,736	$5,628 \times 10^{-08}$
	A	300 / 01 ciclo	421,468	90,670	807,089	$1,061 \times 10^{-05}$

Tabela 3 – Resumo dos resultados estatísticos obtidos para a tensão no terminal em aberto da linha de transmissão – Probabilidade de superação do valor máximo para distribuições normais – Dados das distribuições teóricas da Figura 8.

Investigou-se ainda a possibilidade das sobretensões elevadas serem provenientes de oscilações numéricas (em função do método de integração trapezoidal, utilizado pelo programa ATP). Constatou-se, no entanto, a inexistência de problemas numéricos. Os valores elevados ocorrem devido as suas características construtivas, em função da descontinuidade na capacitância da LT Vila do Conde – Santa Maria 230kV, que é elevada no trecho Vila do Conde – Castanhal (LPNE), sendo bem inferior no trecho Castanhal – Santa Maria (linha convencional).

6.3 Quanto à faixa de variação da chave estatística sobre $\frac{1}{2}$ ou 01 ciclo na frequência fundamental

Comparações gráficas entre os resultados obtidos com $\frac{1}{2}$ ciclo e 01 ciclo, são apresentadas nas figuras 11 a 15.

Da Figuras 11, mais uma vez observa-se que as sobretensões são aderentes a uma distribuição Normal. À priori, as sobrecorrentes de armadura nos compensadores síncronos da SE Vila do Conde 230kV (Figura 13), também apresentam um comportamento que pode ser aproximado por uma distribuição Normal.

Neste caso, verifica-se, no entanto, que é relativamente alta a probabilidade de se ter valores máximos superiores aos observados. Uma análise mais detalhada da função cumulativa de probabilidade (Figura 11) impõe dúvidas quanto à possibilidade de aproximar as amostras a uma distribuição Normal.

Comparando os resultados obtidos com espaçamentos de 1 e ½ ciclo, pode-se verificar, estatisticamente, as diferenças significativas entre os resultados. Mostra-se, portanto, que o espaçamento nos tempos médios é um parâmetro estatisticamente relevante para os resultados.

Com ênfase à determinação dos valores máximos, recomenda-se o espaçamento uniforme dos tempos médios, distribuídos ao longo de 01 (um) ciclo da frequência fundamental.

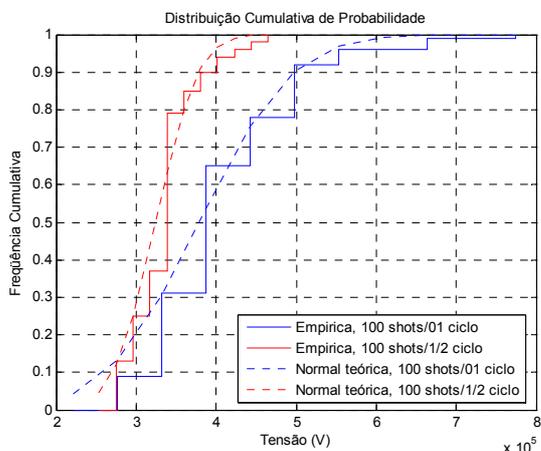


Figura 11 – Religamento sem sucesso – Tensão no terminal aberto da linha – Distribuição cumulativa de probabilidade – Curvas empírica e teórica para ½ ciclo e 01 ciclo.

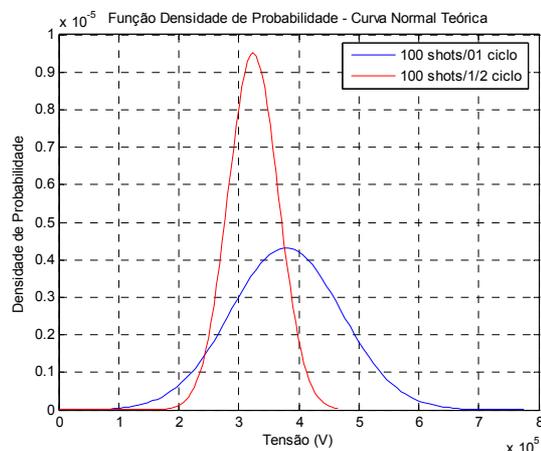


Figura 12 – Religamento sem sucesso – Tensão no terminal aberto da linha – Função densidade de probabilidade para ½ ciclo e 01 ciclo.

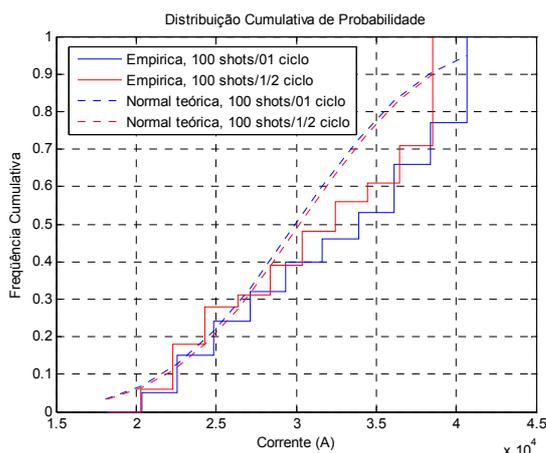


Figura 13 – Religamento sem sucesso – Corrente de armadura no compensador síncrono – Distribuição cumulativa de probabilidade – Curvas empírica e teórica para ½ ciclo e 01 ciclo.

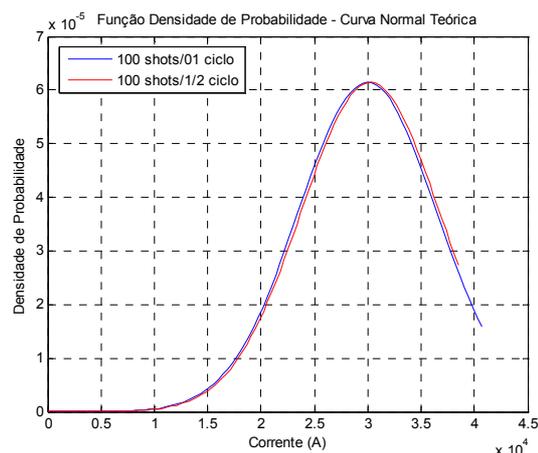


Figura 14 – Religamento sem sucesso – Corrente de armadura no compensador síncrono – Função densidade de probabilidade para ½ ciclo e 01 ciclo.

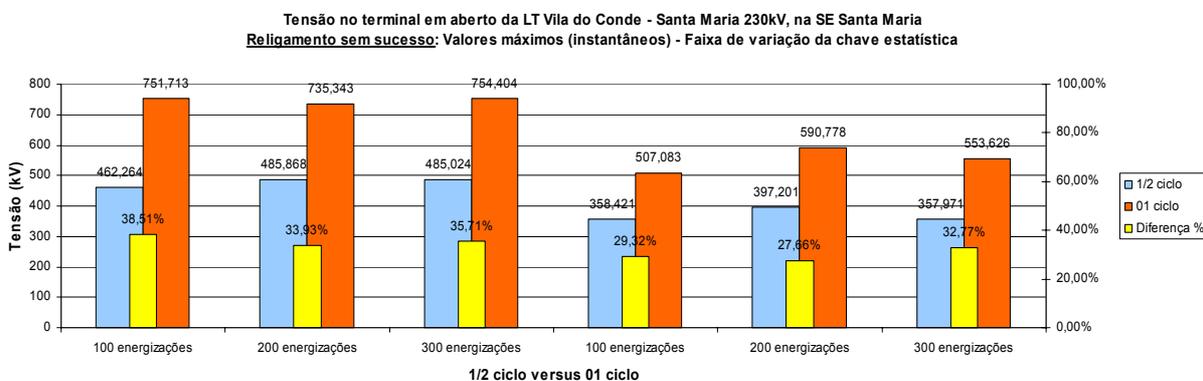


Figura 15 - Sensibilidade dos resultados quanto ao distribuição uniforme do tempo médio em ½ ciclo e 01 ciclo em 60Hz.

7.0 - CONCLUSÕES

Ao se fazer uso de modelos computacionais distintos, as diferenças observadas nos resultados são significativas e mais relevantes frente aos demais aspectos analisados no presente estudo.

A depender do modelo computacional utilizado, pode-se restringir a ativação do religamento automático, quando uma representação mais precisa do fenômeno físico da propagação de ondas revela a possibilidade desta ativação.

Teoricamente, a escolha por um modelo de linha de transmissão a parâmetros distribuídos dependentes com a frequência (modelo DF), é mais realista, reproduzindo com maior precisão o fenômeno físico da propagação de ondas. No entanto, frente às significativas diferenças nos resultados, apenas medições em campo podem aferir as simulações.

Dos resultados aqui apresentados, o acréscimo no tempo de processamento decorrente do uso do modelo DF, não pode ser apontado como um fator limitante ou restritivo para o uso e aplicação destes.

Verifica-se que as sobrecorrentes são mais afetadas pelas não linearidades quando comparadas às sobretensões. Em função do maior impacto sobre as amostras, alguns resultados não se mostram aderentes a uma distribuição Normal de probabilidades.

Análises estatísticas dos resultados obtidos com 100, 200 e 300 energizações, mostram que o acréscimo no número de manobras não traz ganhos, sendo estatisticamente irrelevante para os resultados.

Quanto ao número de energizações estatísticas, recomenda-se o uso de 100 manobras.

Dos resultados obtidos com espaçamentos de 1 e $\frac{1}{2}$ ciclo, mostram-se estatisticamente as distinções entre os resultados e a sua relevância para os resultados.

Com ênfase à determinação dos valores máximos, recomenda-se o espaçamento uniforme dos tempos médios ao longo de 01 (um) ciclo da frequência fundamental.

As constatações listadas acima podem ser extrapoladas para outros estudos probabilísticos, na falta de uma análise mais detalhada, a exemplo da apresentada neste trabalho.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. C. Montgomery, G. C. Runger, *Applied Statistics and Probability for Engineers – Third Edition*, New York: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [2] T. T. Soong, *Fundamentals of Probability and Statistics for Engineers*, John Wiley & Sons, Ltd, 2004.
- [3] Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, *Procedimentos de Rede – Módulo 23: Critérios para Estudos, Submódulo 23.3 - Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos, Revisão 0, Datado de 25/03/2002*, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.
- [4] Leuven EMTP Center, *ATP - Alternative Transient Program - Rule Book*, Herverlee, Belgium, 1987.
- [5] J. R. Martí, *Accurate Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transients Simulations*, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 1, pp. 147-157, January, 1982.
- [6] H. W. Dommel, *Electromagnetic Transients Program Reference Manual*, Vancouver: Department of Electrical Engineering, The University of British Columbia, Canada, 1996.
- [7] IEEE Working Group 15.08.09, *Modeling and Analysis of System Transients Using Digital Programs*, Piscataway: IEEE PES Special Publication, 1998.
- [8] A. B. Fernandes, *Linhas de Transmissão: Um Modelo no Domínio de Fases Preciso e Eficiente*, Tese de Doutorado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Brasil, 2001.
- [9] J. A. Martinez-Velasco, *Computer Analysis of Electrical Power System Transients: Selected Readings*, Piscataway: IEEE Press, 1997.
- [10] A. B. Fernandes, A. C S. Lima, R. M. Silva, *Religamento Automático de Linhas de Transmissão: Distinções nos Resultados em Função do Modelo Computacional Utilizado*, XVIII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Grupo X - Grupo de Estudo de Sobretensões e Coordenação de Isolamento – GSC, Curitiba, PR, Brasil, 16 a 21 de Outubro 2005.
- [11] Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, *Estudos de Transitórios Eletromagnéticos para Entrada em Operação da Linha de Transmissão Vila do Conde – Santa Maria 230kV, RE 3/178/2004 rev 1*, 2004.
- [12] MathWorks, Inc., *Statistics Toolbox for Use with MATLAB - User's Guide, Version 4*, 2003.

9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Alécio Barreto Fernandes nasceu em Brasília, Brasil, em 1971. Recebeu os títulos de B.Sc., M.Sc. e Ph.D. em engenharia elétrica pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB) em 1994, 1996 e 2001, respectivamente. De 1996 a 1998 trabalhou como engenheiro do Consórcio de Alumínio do Maranhão (ALUMAR) em São Luis, Brasil. De 2001 a 2003 esteve como Diretor de Pesquisas do NEPEN (Núcleo de Estudos e Pesquisas do Nordeste) e atuou como professor e coordenador do curso de graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade Pio Décimo, em Aracaju, SE, Brasil. De 2003 a 2005 trabalhou como consultor do Operador Nacional do Sistema Elétrico, ONS. Desde 2005 é engenheiro do ONS, em Recife, PE, Brasil. Membro do IEEE e do CIGRÉ, seus principais interesses incluem transitórios eletromagnéticos e modelagem computacional de equipamentos de sistemas de potência.

Antonio Carlos S. Lima nasceu no Rio de Janeiro, Brasil, em 1971. Graduou-se em Engenharia Elétrica em 1995, obteve o mestrado em 1997 e o doutorado em 1999, todos pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. De 2000 a 2002 esteve na Gerência de Estudos Especiais do Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS. Desde 2002 é professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio de Janeiro e na COPPE/UFRJ. Membro do IEEE, seus principais interesses são modelagem de sistemas de potência a aplicações em engenharia de alta tensão.