



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

BR/GDS/12
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - X

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – GDS

**EFEITO DE DIFERENTES DISTRIBUIÇÕES DE TEMPOS DE FECHAMENTO NOS RESULTADOS DAS
SIMULAÇÕES ESTATÍSTICAS DE ENERGIZAÇÃO E RELIGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Pablo Mourente Miguel(*)
TgDelta Engenharia e
Consultoria LTDA.

Antonio Carlos C. de Carvalho
ONS - Operador Nacional
do Sistema Elétrico

Paulo Estevan de Carvalho
COPEL – Geração e
Transmissão S.A.

RESUMO

Este artigo analisa o efeito da modelagem dos disjuntores nos estudos estatísticos para determinação das sobretensões de manobra observadas na energização ou religamento de linhas de transmissão. Inicialmente é apresentada a modelagem dos disjuntores através do componente SW_STAT existente no ATP (ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM). Posteriormente se descreve a elaboração de um MODEL para uso no ATP, que considera o efeito da velocidade finita dos contatos e da variação da suportabilidade de tensão entre os contatos.

Um circuito de simulação é definido, considerando a conexão de uma linha de 500 kV entre as subestações de Taubaté e Araraquara 2. Essa linha é dotada de para-raios e reatores em ambas as extremidades. Alguns casos são simulados e os valores de sobretensão encontrados são comparados, tendo sido verificado que os resultados obtidos usando o componente SW_STAT apresentam consistentemente sobretensões mais reduzidas.

PALAVRAS-CHAVE

Disjuntores, Sobretensões de Manobra, Simulação Digital, Isolamento

1.0 - INTRODUÇÃO

No dimensionamento da suportabilidade do isolamento frente a surtos de manobra são utilizados processos estatísticos de simulação digital. Nesses estudos os disjuntores são modelados com o uso do componente SW_STAT. Ocorre que esse componente não leva em conta o fato de a velocidade dos contatos de um disjuntor ser finita e portanto, a variação da tensão suportável entre os contatos não varia de forma instantânea. Dessa forma a corrente não é estabelecida quando a diferença de tensão entre os contatos é muito baixa. Ao desconsiderar esse fato, o componente SW_STAT introduz na série estatística valores de sobretensão calculados com a energização a partir de tensões mais baixas, ou seja, inclui amostras que não aparecem no sistema real. Assim, a distribuição de sobretensões calculada tende a apresentar um valor médio mais baixo do que o real.

Para verificar o efeito da variação da suportabilidade entre contatos foi elaborado um MODEL que simula o tempo mecânico do fechamento de um disjuntor. O funcionamento desse MODEL foi avaliado de forma a verificar a coerência com a operação de um disjuntor real.

Foi simulada a conexão de uma linha de 500 kV entre as subestações de Taubaté e Araraquara 2, dotada de para-raios e reatores em ambas as extremidades. Os valores de sobretensão obtidos pelo processo convencional usando o componente SW_STAT e os obtidos com o MODEL DISJSTAT são comparados de forma a verificar o efeito da variação da tensão suportável entre contatos nas sobretensões de manobra.

(*) Rua João Dias, n° 110 –CEP 21.931-100 Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Tel: (+55 21) 3396-7308 – Email: pmourente@tgdelta.com.br

2.0 - MODELAGEM DO FECHAMENTO DE DISJUNTORES NO ATP

A modelagem do fechamento de disjuntores no ATP é feita com o uso do componente SW_STAT, que é descrito na seção VI.B.1 do RuleBook do ATP. Esse componente pode ser configurado para reproduzir diversas situações, através do ajuste de parâmetros, conforme o comportamento desejado. A chave estatística tem o tempo de atuação variável a cada execução da simulação, sendo essa variação aleatória. A chave estatística pode ser definida com comportamento: INDEPENDENTE, MESTRE ou SEGUIDORA.

Os ajustes indicados a seguir são aplicados a todas as chaves estatísticas usadas na simulação.

- SIGMAX – define o número de desvios padrão a ser usado na geração dos tempos de chaveamento, o valor default é 4,0. Foi observado que a prática dos estudos de sobretensões de manobras efetuados no Brasil tem sido a utilização de 3,0 para esse parâmetro, será então usado SIGMAX=3 neste estudo.
- RETARDO ALEATÓRIO ADICIONAL – um retardo adicional pode ser definido, sendo expresso em graus elétricos na base da frequência industrial, a distribuição aplicável a este retardo será sempre UNIFORME.
 - DEGMIN – define o retardo aleatório adicional mínimo
 - DEGMAX – define o retardo aleatório adicional máximo
 - STATFR – valor da frequência industrial usado na simulação
 - ITEST
 - 0 – o retardo aleatório é aplicado a todas as chaves estatísticas
 - 1 – nenhum retardo adicional será aplicado às chaves estatísticas
 - 2 – o retardo adicional é aplicado apenas às chaves estatísticas em operação de fechamento
 - 3 – o retardo adicional é aplicado apenas às chaves estatísticas efetuando operação de abertura
- IDIST – seleciona a distribuição de probabilidades a usar nas chaves
 - 0 – GAUSSIANA
 - 1 – UNIFORME
- IDICE – define o gerador de números aleatórios a usar
 - 0 – gerador dependente do computador
 - 1 – gerador padrão
- NENERG – número de vezes de execução da simulação do mesmo circuito

2.1 Interpretação dos resultados de uma simulação estatística

Os resultados da simulação estatística são impressos no arquivo LIS, podem então ser inspecionados visualmente. Considerando o volume de informações resultantes, convém automatizar o procedimento de análise. Para tal o arquivo LIS será lido por um programa computacional desenvolvido para separar os dados e os agrupa em tabelas que permite ao usuário uma análise mais detalhada.

Foi utilizado o caso base mostrado na figura 1, que consiste de várias fontes de 550 kV – 60 Hz e uma linha de transmissão. O sistema opera em regime e no instante $t=10$ ms o disjuntor a montante da linha é aberto. Com isso a linha retém carga elétrica e havendo reator conectado passa a haver uma oscilação de tensão, conforme mostrado na figura 2. As chaves estatísticas farão então a reenergização da linha no instante $t=640$ ms.

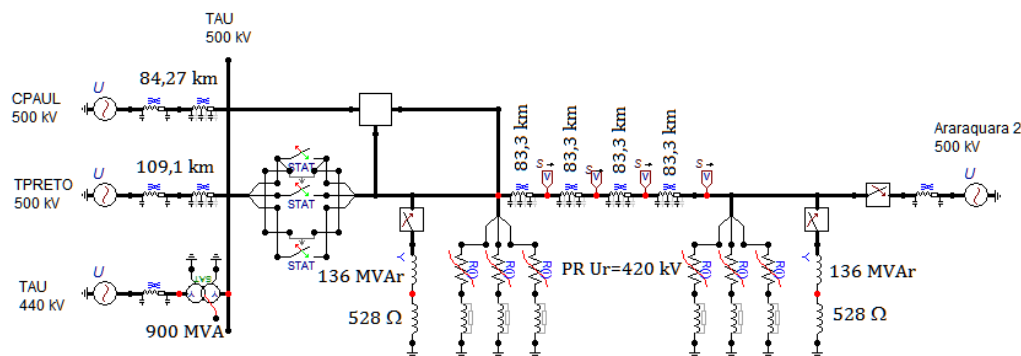


FIGURA 1 – Esquema simplificado

Foram definidas 3 chaves estatísticas, sendo uma MESTRE (fase A) e duas SEGUIDORAS (fases B e C), com os ajustes mostrados na tabela 1.

Tabela 1 – Ajustes das chaves estatísticas

ISW=1 (sem retardo adicional)	IDIST=0 (Gaussiana)	IDICE=1	NSEED=0
chave 1	$\mu=0,64$ s	$\sigma=2$ ms	MESTRE
chave 2	$\mu=6,0$ ms		SEGUIDORA DA CHAVE 1
chave 3	$\mu=6,0$ ms		SEGUIDORA DA CHAVE 1

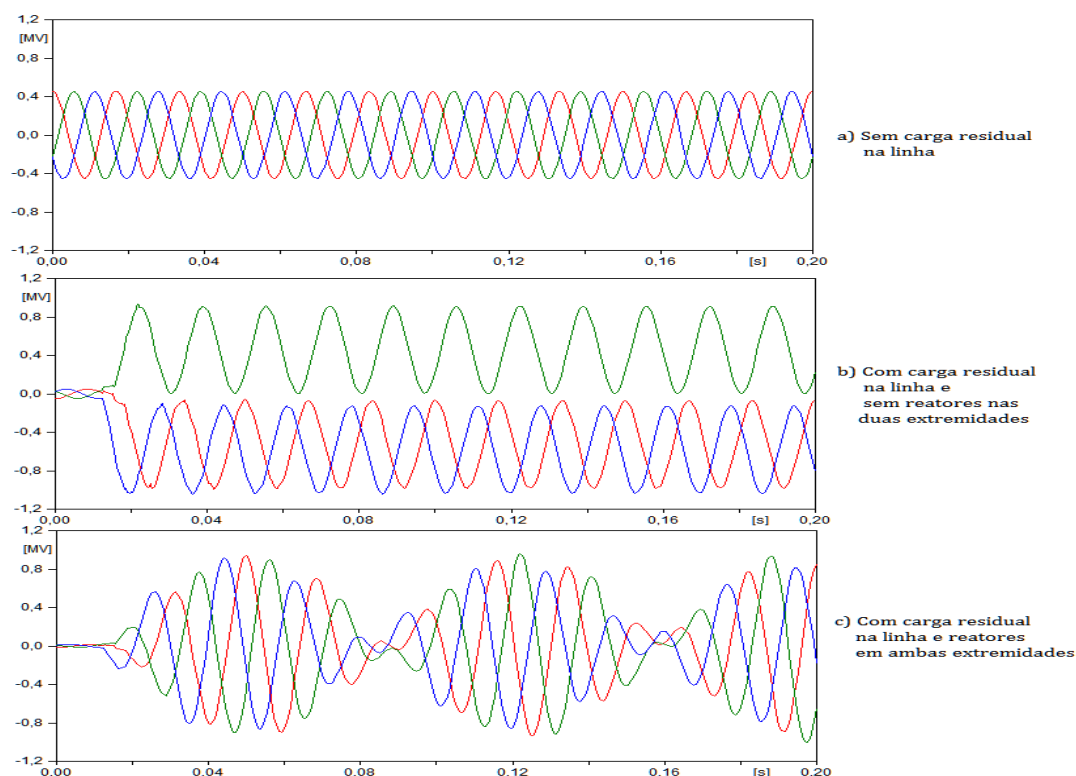


FIGURA 2 – Tensão sobre os polos do disjuntor com e sem reatores de compensação

A partir da distribuição ajustada aos valores de sobre tensão obtidos no conjunto de simulações, determina-se o valor de E_2 , que apresenta a probabilidade acumulada de ser excedido igual a 2%, dado por:

$$E_2 = E_{50} + 2,055 \times \sigma_E$$

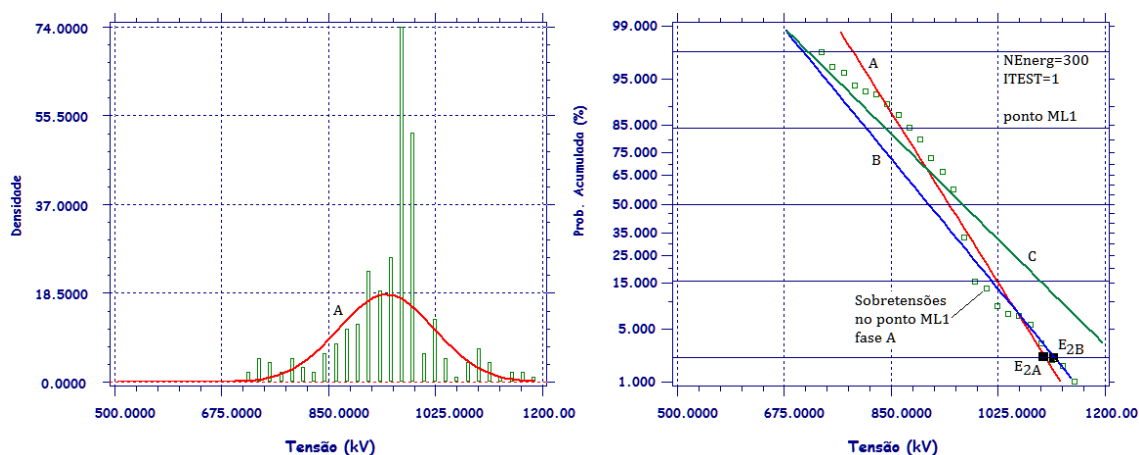


FIGURA 3 – Distribuição das sobretensões no meio da linha 1 - ponto ML1

2.2 Influência da tensão sobre os polos do disjuntor

Dependendo da existência de carga residual na linha e da conexão dos reatores, a tensão existente entre terminais dos polos do disjuntor é alterada. Esse efeito é mostrado na figura 4.

Na figura 5 é mostrada a densidade de probabilidade do valor de tensão sobre o polo da chave no instante imediatamente anterior ao estabelecimento do circuito. Pode-se então avaliar a dispersão dos valores da tensão de pré-arco ao longo das simulações, com e sem a presença da carga residual e dos reatores. A figura 5 mostra também a probabilidade acumulada das sobretensões calculadas na fase A no meio da linha. Pode ser visto o efeito da carga residual, que aumenta a dispersão nos valores de sobretensão.

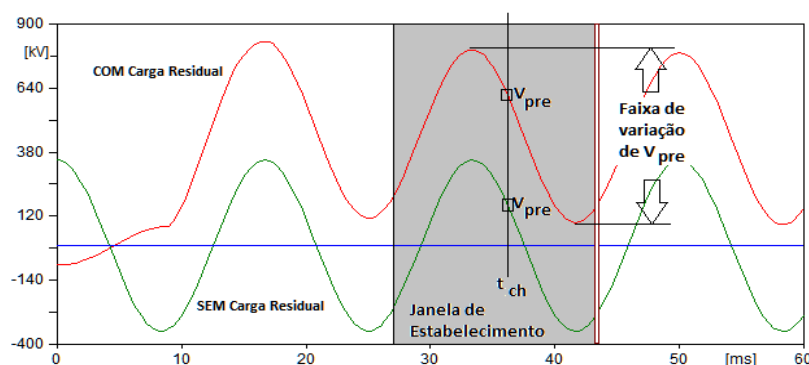
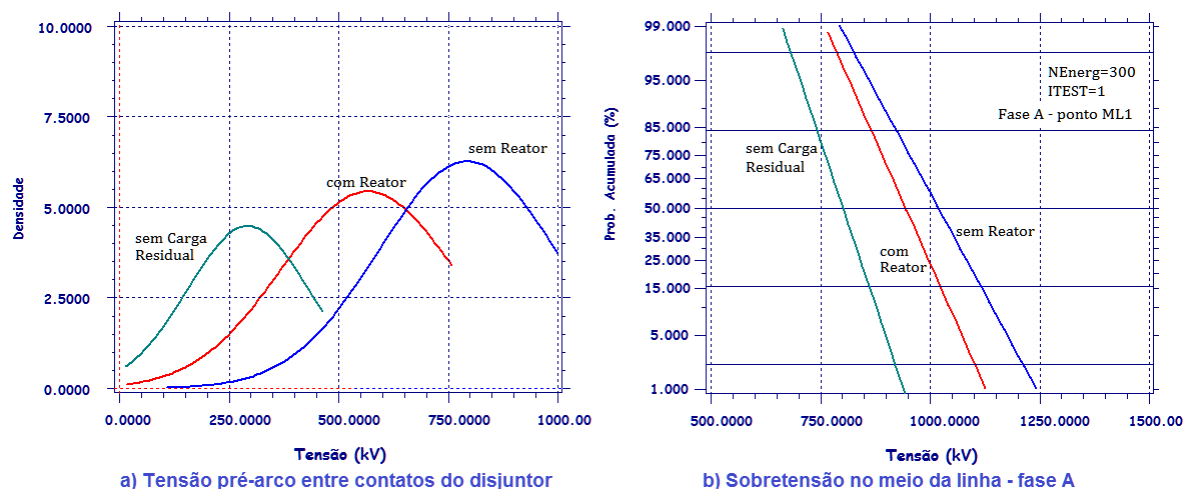


FIGURA 4 – Tensão sobre o polo da chave estatística da fase A



a) Tensão pré-arco entre contatos do disjuntor

b) Sobretensão no meio da linha - fase A

FIGURA 5 – Tensão pré-arco para a chave e sobretensão no meio da linha 1 – fase A

A tabela 2 compara os resultados das sobretensões calculadas para a fase A no meio da linha 1.

TABELA 2 – Sobretensões calculadas no meio da linha 1 com SW_STAT (Nenerg=300 e ITEST=1)

Caso	Fase	Média (kV)	Desvio (kV)	E ₂ (kV)
SEM Carga Residual	A	800,8	59,4	922,9
	B	767,0	61,5	893,3
	C	832,7	74,7	986,2
COM Reator em Araraquara 2 COM Carga Residual na linha	A	944,0	78,6	1105,5
	B	910,8	102,6	1121,7
	C	966,2	126,3	1225,8
SEM nenhum reator COM Carga Residual na linha	A	1018,4	96,2	1216,1
	B	829,5	89,5	1013,6
	C	793,6	139,8	1081,0

3.0 - DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO PARA SIMULAÇÃO DA CARACTERÍSTICA FRIA DO DISJUNTOR

As chaves estatísticas existentes no ATP não simulam a característica fria dos disjuntores reais. Essas chaves comportam-se como chaves ideais, ou seja, chegado o instante de fechamento atribuído, estabelecem o circuito ainda que a diferença de tensão entre os contatos seja muito baixa. Isso faz com que se observem estabelecimentos localizados nas regiões de baixas tensões, o que leva a valores de sobretensão mais reduzidos. A figura 9 ilustra a diferença na tensão sobre o polo da fase A da chave estatística. Deve ser notado que a faixa de variação da tensão de estabelecimento difere conforme exista ou não a carga residual armazenada na linha. É importante ressaltar que os instantes PRE1 e PRE2 indicados na figura 9 não são os instantes de energização da

chave estatística representada pelo componente SW_STAT, esse componente estabelece o circuito sem levar em consideração a diferença de tensão entre os terminais do polo da chave. Tudo se passa como se o circuito fosse estabelecido no momento em que a CARACTERÍSTICA FRIA chega ao eixo horizontal, sendo a tensão de pré-arco considerada pelo ATP a tensão PRE_SW.

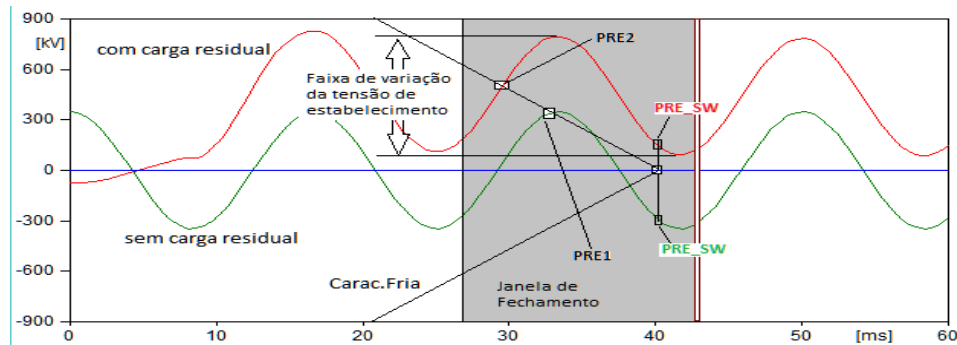


FIGURA 6 – Tensão sobre o polo da fase A da chave estatística

O MODEL a ser utilizado como base para o chaveamento estatístico é baseado nos modelos apresentados em [1,2], com as seguintes alterações:

- A modelagem do arco elétrico foi removida;
- A dispersão nos tempos de operação é introduzida de duas formas:
 - Dispersão no tempo mecânico de operação - A chave apresenta um tempo mecânico de fechamento ou abertura, que é caracterizada por um valor médio, um desvio quadrático médio e uma distribuição de probabilidades que pode ser do tipo GAUSSIANA OU UNIFORME;
 - Retardo adicional – A cada simulação é calculado o retardo adicional em função dos ajustes da simulação (ITEST, DEGMIN, DEGMAX e STATFR), o instante em que os contatos iniciam o seu deslocamento será então alterado por esse retardo adicional, conforme for aplicável para cada chave;

Dessa forma o MODEL apresenta basicamente as mesmas características que o componente SW_STAT, mas passa a ser afetado pela amplitude da tensão entre os terminais do polo da chave. Num caso em que existe carga armazenada em uma linha, como o mostrado no exemplo utilizado, a tensão sobre o polo da chave sofre um deslocamento, como pode ser visto na figura 3. Com o componente SW_STAT, a chave continua fechando no intervalo definido, ainda que a tensão aplicada tenha sido largamente aumentada. O MODEL desenvolvido ao levar em conta a suportabilidade de tensão, representada pela CARACTERÍSTICA FRIA, faz com que o instante de pré-arco seja definido pelo momento em que a CARACTERÍSTICA FRIA corta a tensão aplicada sobre o polo da chave. Dessa forma, a existência de uma carga elétrica armazenada na linha irá provocar uma antecipação nos instantes de pré-arco, em relação aos obtidos com o componente SW_STAT.

Na chave estatística original do ATP a velocidade dos contatos é considerada infinita, assim os instantes de tempo de fechamento são obtidos a partir de um gerador de números aleatórios, conforme ilustrado na figura 10. Já para o MODEL DISJSTAT a velocidade dos contatos é finita e o instante de início de movimentação dos contatos é relevante. A aleatoriedade dos instantes de tempo de fechamento dos contatos aparece em diversas parcelas:

- Retardo adicional (δt_1) – quando aplicável, corresponde a um retardo entre o instante de recebimento do comando de atuação (T_{cmd}) e o efetivo início de movimentação dos contatos;
- Dispersão entre polos mestre e seguidor – quando for estabelecida uma relação de dependência entre polos, um intervalo de tempo aleatório é calculado após o recebimento do sinal de acionamento (T_{cmd}) e aplicado aos polos definidos como seguidores;
- Dispersão entre os tempos de fechamento do mesmo polo (δt_2) – para cada polo é calculado um intervalo de tempo aleatório que é adicionado ao tempo de atuação mecânica do disjuntor, fazendo com que a cada simulação o tempo mecânico de fechamento seja diferente.

Os intervalos de tempo aleatórios calculados podem ser tanto positivos como negativos e são somados algebricamente para que se estabeleça o tempo mecânico total de fechamento de cada polo. Além do instante de tempo de fechamento mecânico, ou seja, o tempo de FIM DE CURSO dos contatos (T_{fin}), há que definir-se o instante de efetivo estabelecimento do circuito elétrico, o instante de pré-arco (T_{pre}).

Na figura 7 é mostrada a tensão entre os terminais de um polo do disjuntor e a suportabilidade de tensão entre contatos decresce conforme os contatos se aproximam. O instante de início de movimento dos contatos varia de uma simulação para outra (δt_1), assim como o tempo mecânico de fechamento (δt_2). Em um dado instante a tensão entre contatos excede a suportabilidade de tensão e o arco se estabelece.

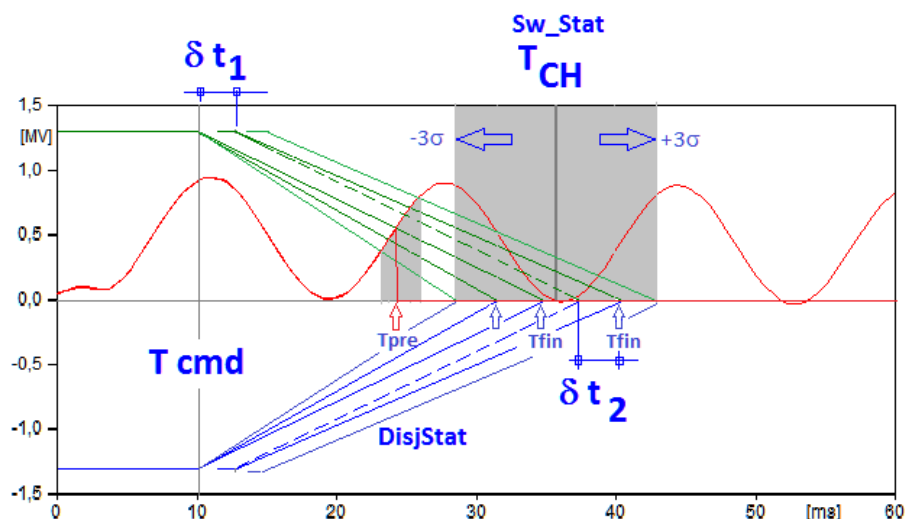


FIGURA 7 – Ilustração das componentes da composição do tempo de fechamento dos polos

O componente SW_STAT por sua vez estabelece o circuito na região delimitada pelo valor médio indicado para o tempo de fechamento e quatro vezes o desvio quadrático médio de dispersão dos tempos de acionamento do disjuntor. O instante de estabelecimento do arco será portanto independente da diferença de tensão entre os contatos da chave.

A figura 8 mostra a distribuição dos instantes de tempo de fechamento mecânico (Tfin) e elétrico (Tpre) para as três fases do MODEL DISJSTAT ao longo de 300 iterações.

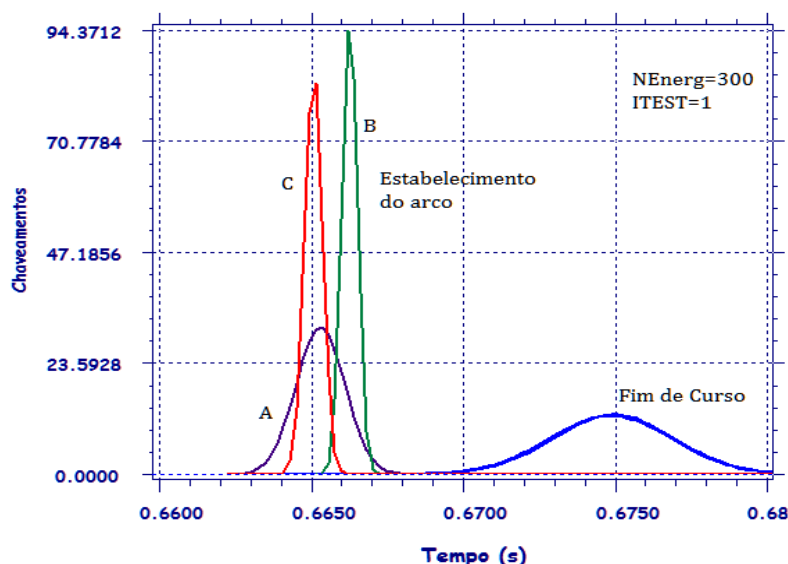


FIGURA 8 – Distribuição dos instantes de estabelecimento elétrico e fechamento mecânico

Na obtenção da distribuição dos instantes de tempo de fechamento, foi utilizado ITEST=1, ou seja, o retardo adicional não é aplicado às chaves, de forma que se testa apenas a dispersão nos instantes de fechamento. Observa-se que eliminando o retardo adicional ($\delta t_1=0$) e emitindo o sinal de comando em um mesmo instante de tempo ($T_{cmd}=10$ ms), se obtém uma dispersão muito reduzida nos instantes de ocorrência de arco nos polos das fases C e B.

O valor ITEST=1 foi utilizado apenas para a verificação do funcionamento do MODEL DISJSTAT, para cálculo das sobretensões, decorrentes das manobras de energização, será utilizado ITEST=0. Ou seja, o retardo adicional será incluído na geração dos instantes de fechamento. Para que os instantes de fechamento se distribuam por pelo menos um período da frequência industrial, serão usados $DEGMIN=0^\circ$ e $DEGMAX=360^\circ$. Esse procedimento equivale a distribuir uniformemente a ordem de comando ao longo de um ciclo.

4.0 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção serão comparados os resultados obtidos com o uso das chaves estatísticas do ATP (componente SW_STAT) e com o MODEL DISJSTAT.

TABELA 4 – Sobretensões calculadas no meio da linha 1 – ITEST=0 – 300 energizações

Caso	SW_STAT			MODEL DisjSTAT		
	Média (kV)	Desvio (kV)	E ₂ (kV)	Média (kV)	Desvio (kV)	E ₂ (kV)
Sem Carga Residual na Linha						
Fase A	804,7	62,5	933,2	828,8	61,3	954,8
Fase B	766,1	60,5	890,4	825,2	63,5	955,7
Fase C	845,9	74,4	998,9	828,0	61,6	954,7
Com Carga Residual na Linha e Reator no lado Araraquara						
Fase A	840,3	134,2	1116,1	862,4	94,9	1057,4
Fase B	792,4	123,0	1045,2	874,9	127,7	1137,3
Fase C	771,8	151,2	1082,6	982,5	73,0	1132,6
Com Carga Residual na Linha e nenhum Reator						
Fase A	933,6	116,9	1173,8	1013,1	147,7	1316,7
Fase B	926,4	148,9	1232,4	1062,1	100,4	1268,4
Fase C	914,2	178,0	1279,9	1120,3	98,7	1323,0

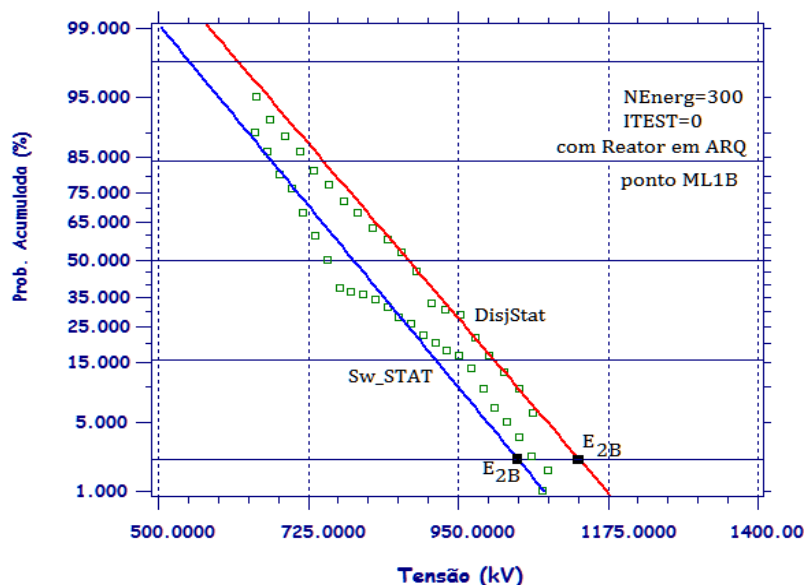


FIGURA 9 – Comparação da Probabilidade Acumulada das sobretensões no meio da linha com ITEST=0

5.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho visa a estudar a influência no cálculo das sobretensões de manobra, da consideração da variação da suportabilidade de tensão entre os contatos de um disjuntor com a posição dos contatos. Nesse tipo de estudo são usadas as chaves estatísticas existentes no ATP, o componente SW_STAT, que emula uma chave ideal. O componente SW_STAT estabelece o circuito levando em conta apenas o comando estabelecido pelo gerador de números aleatórios, não sendo esse estabelecimento da corrente afetado pela tensão entre os terminais do polo.

Com o objetivo de verificar se existe algum efeito na distribuição de sobretensões calculadas da variação da suportabilidade de tensão entre os contatos, foi criado um MODEL que emula um disjuntor real. Em um disjuntor real, a velocidade de deslocamento dos contatos é finita. O tempo de fechamento mecânico, intervalo transcorrido entre o recebimento da ordem de fechamento até o toque dos contatos é da ordem de 35 ms. Ou seja, um disjuntor de 500 kV passa da posição totalmente aberto para a posição totalmente fechado em 35 ms, um intervalo equivalente a pouco mais de 2 ciclos a 60 Hz. A taxa de variação da tensão suportável entre contatos varia de acordo com o projeto do equipamento e é bastante dependente da velocidade de fechamento dos contatos. Para que um disjuntor de 550 kV possa fechar na passagem por zero da tensão da rede, condição necessária para o

chaveamento controlado de banco de capacitores, a taxa de variação da suportabilidade dielétrica entre contatos deve ser da ordem de 170 kV/ms, que corresponde à derivada da tensão da máxima tensão da rede na passagem por zero. No presente artigo foi adotada um disjuntor lento com taxa de variação de 37 kV/ms. Dessa forma, o estabelecimento da corrente não se dá na região dos baixos valores de tensão, mas ocorre quando a diferença de tensão entre os contatos apresenta um valor mais elevado. Nesse aspecto o MODEL reproduz o comportamento de um disjuntor real.

Ao efetuar um estudo estatístico utilizando uma chave ideal, que estabelece o circuito em qualquer posição da onda, incluem-se nos dados a analisar uma série de valores mais baixos que na prática nunca serão observados. Em um estudo de energização ou religamento de linhas, esses valores mais baixos, fazem com que a sobretensão calculada seja menor do que a que realmente acabará por impactar as instalações.

Não haveria espaço neste artigo para realizar um estudo completo de religamento aplicado a uma linha, assim optou-se por analisar um caso base. Esse caso base, mostrado na figura 2, foi resolvido com o uso dos disjuntores modelados com os componentes SW_STAT e com o MODEL DISJSTAT. Inicialmente foi verificado o comportamento do MODEL com o parâmetro ITEST=1, de forma a verificar a consistência de operação. Os resultados obtidos com o MODEL DISJSTAT mostraram que a distribuição do instante de estabelecimento de corrente tem distribuição diferente do instante de fechamento mecânico dos contatos, devido à influência da suportabilidade de tensão.

Posteriormente foi utilizado ITEST=0, o que faz com que seja introduzido um retardo adicional no fechamento das chaves. Esse retardo adicional, uniformemente distribuído entre 0 e 360° elétricos na frequência industrial, faz com que se cubra toda a gama de possibilidades de variação da tensão entre contatos. A comparação entre os resultados obtidos com o componente SW_STAT e com o MODEL DISJSTAT, mostrou que os valores de sobretensão calculados pelo procedimento usual são consistentemente mais reduzidos. A diferença entre esses valores de sobretensão é da ordem de 8%.

Em trabalhos futuros será incluído no MODEL DISJSTAT a capacidade de emular contatos auxiliares para inserção de resistores no fechamento. Também a utilização de chaveamento sincronizado será incluída e sua aplicação na energização de transformadores.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Miguel P.M. – “Introdução à Simulação de Relés de Proteção usando a linguagem MODELS do ATP” – ISBN 978-85-399-0055-8 – Editora Ciência Moderna - Rio de Janeiro – Brasil – 2011
- (2) Miguel P.M. – “Modelo de chave com representação do arco elétrico e sua utilização para a simulação de fenômenos de VFTO” – XXI SNPTTEE – Grupo VIII– 23 a 26 de outubro de 2011 – Florianópolis – SC
- (3) Miguel. P. M., Carvalho A.C., “Um método para verificar a capacidade de interrupção de corrente capacitiva e de pequenas correntes indutivas de disjuntores não dotados de resistores paralelos” – VII SNPTTEE – Grupo VIII-01 – SGE03 - Brasília – Brasil – 1984.
- (4) ONS –Procedimentos de rede–SubModulo 23.3 rev:2.0 – Diretrizes e critérios para estudos elétricos – 12/2010

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Pablo Mourente Miguel, brasileiro naturalizado, nascido na Espanha em 1951. Engenheiro Eletricista (1975) pela UFRJ, Mestre (1981) e Doutor (1984) em Ciências da Engenharia Elétrica pela COPPE/UFRJ. Área de atuação: Transitórios eletromagnéticos, coordenação de isolamento e proteção de sistemas elétricos. Para maiores detalhes, consultar <http://lattes.cnpq.br/6049316115897758>



Antônio Carlos C. de Carvalho, nascido em 1956 no Rio de Janeiro, é engenheiro formado em 1978 na UFRJ e mestre em sistemas de potência pela COPPE/UFRJ (1984). É membro do CIGRE e é especializado na interação equipamentos-rede. Trabalhou com P&D no CEPEL e em desenvolvimento de equipamentos na ABB. Atualmente ocupa a Gerência de Padrões de Desempenho e Requisitos mínimos da Rede Básica no ONS.

Paulo Estevan de Carvalho. Atuou como Técnico em Eletrotécnica em FURNAS Centrais Elétricas no período de 1996 até 2006. Graduado em Engenharia Elétrica no ano de 2005 pela Universidade Federal de Uberlândia. Desde o ano de 2006 trabalha na COPEL como Engenheiro Eletricista exercendo atividades que envolvem estudos de Transitórios Eletromagnéticos, Coordenação de Isolamento, Especificações Técnicas de Equipamentos de Alta Tensão e Qualidade de Energia.