



**XXI SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO –III

GRUPO DE ESTUDOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO (GLT)

CONSIDERAÇÕES SOBRE PROJETO DE ISOLADORES ATCC PARA AMBIENTE POLUÍDO

A. Pigni
Consultor

R. W. S. Garcia*
CEPEL

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise sobre aspectos relevantes na definição de projeto de isoladores para aplicação em sistemas de transmissão de energia em alta tensão corrente contínua (ATCC) em ambientes poluídos. Baseado em especificações de norma e considerando uma abordagem simplificada, caracteriza a problemática em dois aspectos: a severidade da poluição do local da instalação e o valor de referência da distância de fuga unificada específica. Apresenta um comparativo com isoladores para corrente alternada e faz uma análise baseada em resultados obtidos em laboratório e na experiência de campo, indicando que a aplicação da metodologia proposta permite uma boa avaliação preliminar do comportamento dos isoladores sob esta condição de serviço.

PALAVRAS-CHAVE

Poluição; Isoladores; ATCC; Linhas de Transmissão; Projeto

1. INTRODUÇÃO

As especificações da IEC para a seleção de isoladores para transmissão em corrente alternada (CA), sob condições de poluição, foram recentemente revisadas e publicadas [1]. Contudo, especificações similares para transmissão em corrente contínua (CC) ainda estão sendo preparadas. Em recente trabalho apresentado na 42ª Sessão Bial do Cigré [2], foram citados três métodos de procedimentos para projeto de isoladores para essa condição, caracterizados especialmente pelo grau de confiança de sua aplicação, a saber:

- Projeto baseado em experiência de campo;
- Projeto baseado na aplicação de resultados obtidos com isoladores desenergizados ou energizados em CA; e
- Projeto baseado na extrapolação de resultados de ensaios de laboratório.

Este trabalho apresenta os resultados da aplicação do terceiro método, de característica mais simplificada, que pode ser usado em uma primeira aproximação para o projeto de isoladores para estas condições e mostra uma significativa adequação aos resultados obtidos de isoladores em serviço.

2. SEVERIDADE DA POLUIÇÃO DO LOCAL

Para propósitos técnicos, a Norma IEC 60815 [1] descreve cinco ambientes que se configuram importantes para o estudo do efeito de poluição sobre isoladores, são eles: desértico, costeiro, industrial, de agricultura e rural, cujas características estão descritas naquele documento. Também estabelece cinco classes de severidade de poluição do local, a saber: muito leve, leve, média, pesada e muito pesada.

(*) Av. Horácio Macedo, 354, Ilha da Cidade Universitária - 21941-911 - Rio de Janeiro, RJ
Tel. (21) 2598-6224 - Fax. (21) 2270-4189 - e-mail: rwesley@cepel.br

Severidades típicas para regiões costeiras medidas em isoladores CA são reportadas na Figura 1 [3]. O nível máximo da severidade de poluição, medido em termos de densidade de depósito de sal equivalente (ESDD, do inglês *Equivalent Salt Deposit Density*), é de cerca $0,2 \text{ mg/cm}^2$. Em geral o nível de poluição é mais baixo que $0,1 \text{ mg/cm}^2$, mesmo sendo próximo ao mar. Como exemplo, numa média de 1 km de distância do mar, o valor de ESDD estimado é de $0,05 \text{ mg/cm}^2$.

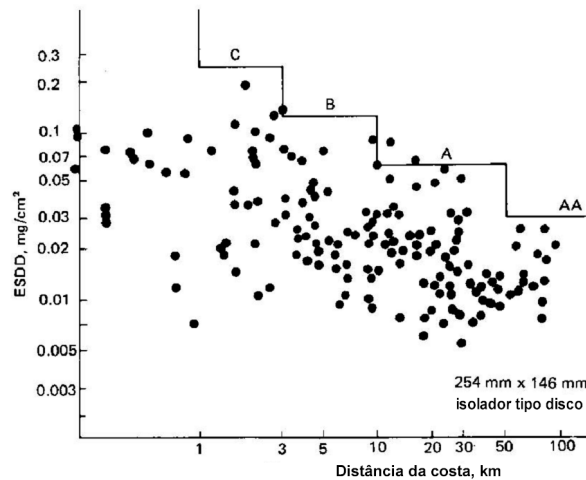


FIGURA 1 - Relação entre severidade da poluição e distância da costa [3]

Severidades de poluição típicas para regiões industriais, sob tensão CA, são apresentadas na Figura 2. Novamente a severidade máxima medida em termos de ESDD é de cerca de $0,2 \text{ mg/cm}^2$. Entretanto, para uma distância da fonte poluidora maior que 2 km, o nível de poluição torna-se rapidamente mais baixo que $0,05 \text{ mg/cm}^2$.

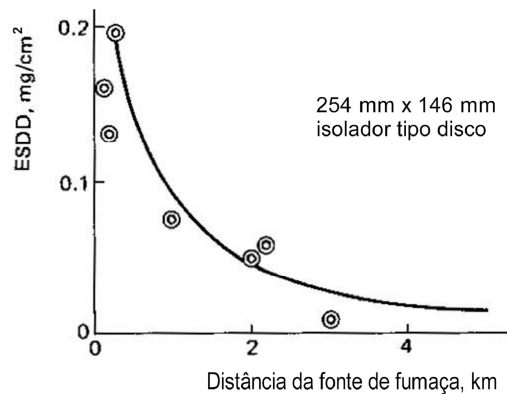


FIGURA 2 - Relação entre severidade de poluição e distância de uma fonte de poluição industrial [3]

Contudo, severidades de poluição muito mais altas podem ser encontradas em ambientes desérticos, e não é raro que nestas regiões alcancem valores de ESDD de $0,5 \text{ mg/cm}^2$ ou mais. Valores típicos de projeto em áreas desérticas para isoladores aplicados em CA são mostrados na Tabela 1 [4].

TABELA 1 - Valores típicos de ESDD presumidos para projetos em ambientes desérticos [4]

País	ESDD (mg/cm^2)
Tunísia	0,6
Austrália	0,5
África do Sul	0,45
Marrocos	0,4
Egito	0,48
Arábia Saudita	0,55

A classificação da severidade de poluição para projetos em CA é uma função não somente do valor de ESDD mas também do valor da densidade de depósito não-solúvel (NSDD, do inglês *Non Soluble Deposit Density*) [1]. A

Figura 3, retirada de [1], apresenta a relação entre os valores de ESDD e de NSDD, considerando as cinco classes de severidade de poluição, com base em informações obtidas para isoladores do tipo disco padrão.

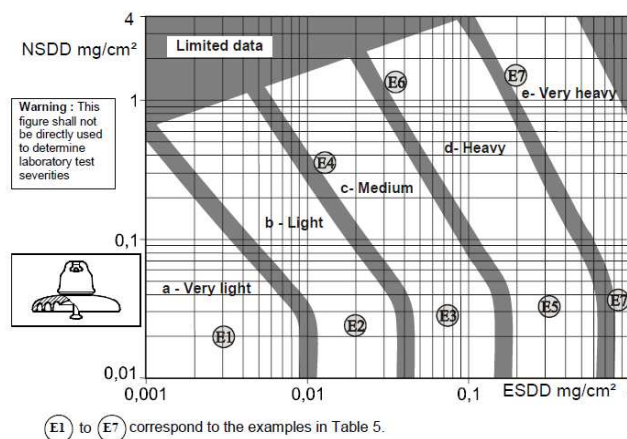


FIGURA 3 – Relação entre ESDD e NSDD, considerando as classes de severidade de poluição, para isoladores tipo disco padrão [1]

Uma vez conhecidos os valores de ESDD e NSDD que caracterizam a severidade da poluição de um determinado local, o valor da severidade da poluição equivalente, que é o valor de ESDD para um valor de NSDD de 0,1mg/cm² (estabelecido para testes normalizados), permite uma comparação entre diferentes resultados de campo ou de ensaios de laboratório, pode ser obtido de acordo com a seguinte equação de interpolação:

$$ESDD_{NSDD=0,1} = ESDD * (NSDD/0.1)^p$$

com $p=0,39*ESDD^{-0,127}$

Da Figura 3, pode-se obter a variação da severidade de poluição equivalente de um determinado local para cada classe de poluição, cujos valores estão mostrados na Tabela 2.

TABELA 2 - Severidade de poluição equivalente para isoladores tipo disco padrão

Classe de severidade de poluição	ESDD min mg/cm ²	ESDD max mg/cm ²	ESDD med mg/cm ²
muito leve	-	0,004	-
leve	0,004	0,02	0,01
média	0,02	0,1	0,05
pesada	0,1	0,5	0,2
muito pesada	0,5	>1	-

Assim como para CA, o nível de poluição para projetos em CC também é função dos valores de ESDD e de NSDD. A partir de comparações com os dados de CA e CC, não mostradas neste trabalho, foi verificado que a influência do valor de NSDD não é muito diferente para CA e CC [5]. Então, a Figura 3 pode ser considerada válida em primeira aproximação também para CC.

Por outro lado, enquanto que para CA a referência da severidade de poluição de um determinado local pode ser feita pela poluição medida em isoladores energizados ou não (acumulando mais ou menos a mesma poluição), para CC este valor deve ser considerado pela poluição medida em isoladores energizados. De fato, isoladores energizados em CC podem acumular mais poluição que sob CA devido ao efeito das forças eletrostáticas que aumentam com o aumento do nível de tensão a que os isoladores estejam submetidos [5, 6, 7, 8, 9]. A Figura 4 [2] apresenta o efeito da conjugação destes aspectos no comprimento requerido dos isoladores, numa comparação com isoladores CA, onde a tensão indicada é a fase-terra. O fator Kp que aparece na figura é definido como a relação entre o acúmulo de poluição, para um mesmo ambiente, mesmo tipo de isolador e mesma amplitude na tensão aplicada, entre isoladores submetidos às tensões CC e CA [2]. Valores maiores de Kp indicam maior efeito das forças eletrostáticas em relação às forças gravitacionais e às devidas ao vento, e vice-versa.

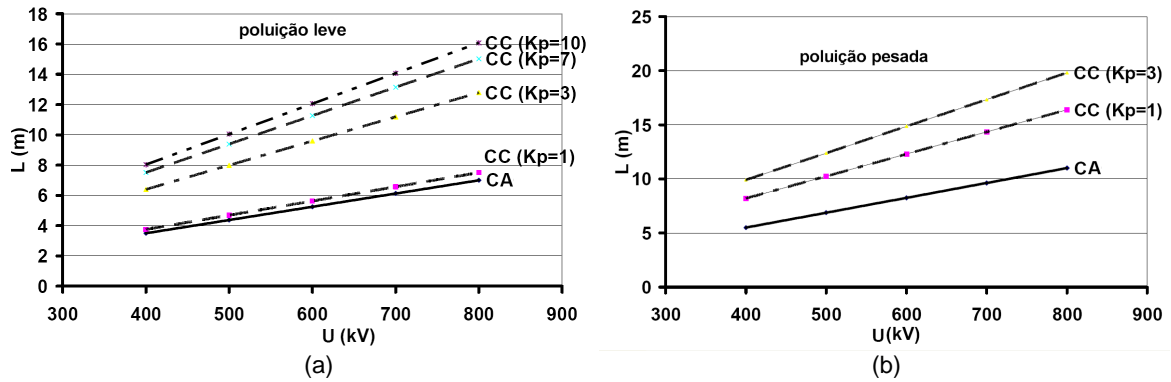


FIGURA 4 – Exemplo da influência do efeito das forças eletrostáticas no comprimento das cadeias de isoladores, em função da tensão aplicada aos isoladores e da classe de severidade da poluição: (a) leve e (b) pesada

Em princípio, baseado nos dados típicos reportados nas Figuras 1 e 2, e mesmo considerando o aumento da poluição devido à influência da NSDD e ao efeito das forças eletrostáticas presentes em CC, pode-se assumir que a severidade da poluição na maioria dos locais não ultrapassa àquela referente à classe “média”. Somente em locais muito próximos ao mar ou a indústrias, severidades mais altas de poluição podem ser encontradas. Entretanto, altos níveis de NSDD, como os encontrados em ambientes específicos, como os desérticos, podem influenciar de forma significativa o valor da $ESDD_{NSDD=0,1}$, a ser levado em consideração no projeto.

Há ainda outros fatores importantes que podem influenciar a severidade de poluição para isoladores energizados em CC, como a origem do material poluente e a distribuição da poluição na cadeia de isoladores, que sofre a influência da intensidade do vento. Entretanto, estes fatores não serão considerados na primeira aproximação a que este trabalho se refere.

3. PERFORMANCE EM ENSAIOS DE LABORATÓRIO

A Figura 5 apresenta os resultados das medições da distância de escoamento unificada específica (USCD, do inglês *Unified Specific Creepage Distance*, conforme [1]), em relação à severidade de poluição utilizada em diversos ensaios de laboratório (SDD, do inglês, *Salt Deposit Density*), com isoladores tipo disco com perfil “antifog”, energizados em ATCC e testados de acordo com método camada sólida.

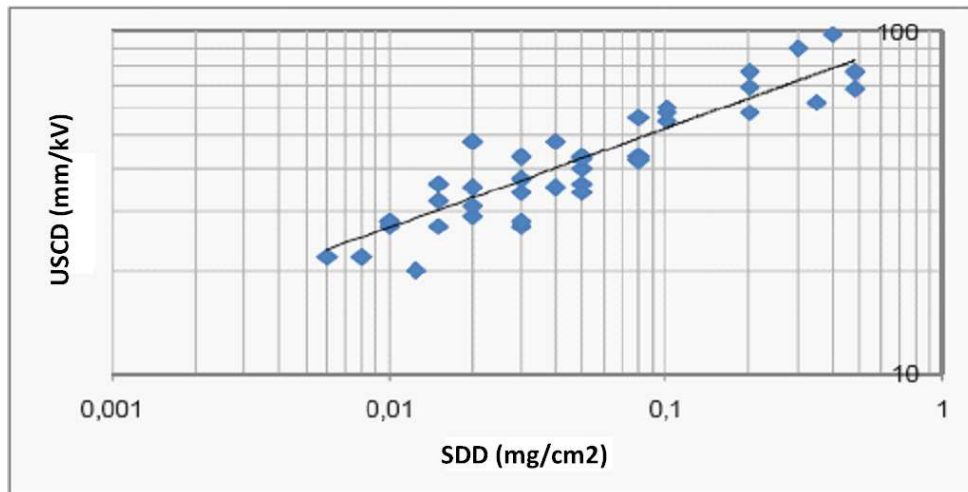


FIGURA 5 - Distância de escoamento unificada específica requerida como função da severidade de poluição dos ensaios, para isoladores tipo disco com perfil “antifog” [2]

O valor de SDD a ser aplicado no teste não pode ser diretamente derivado do valor de $ESDD_{NSDD=0,1}$ avaliado anteriormente, devido a fatores como tipo de poluição e uniformidade da distribuição. Entretanto, apenas como avaliação preliminar, o valor da severidade de poluição para projeto em CC pode ser presumido como o nível máximo de $ESDD$ para cada classe, conforme mostrado na Tabela 2. As distâncias de escoamento unificadas específicas requeridas resultantes da aplicação desses valores no gráfico da Figura 5 são reportadas na Tabela 3 que representa a metodologia adotada em [2].

TABELA 3 - Distância de escoamento unificada específica requerida como função de SDD para cada classe de severidade de poluição

Classe de severidade de poluição	SDD	USCD
----------------------------------	-----	------

		(mg/cm ²)	mm/kV
a	muito leve	0,004	19
b	leve	0,02	31
c	média	0,1	50
d	pesada	0,5	81
e	muito pesada	>1	>100

Os dados para as classes “pesada” e “muito pesada” estão em destaque para mostrar que estas condições necessitam atenção especial e considerações de projeto específicas.

4. COMPARAÇÕES ENTRE LABORATÓRIOS E EXPERIÊNCIA EM SERVIÇO

Indicações sobre a distância de escoamento unificada específica adotada pelas diversas empresas ao redor do mundo podem ser obtidas na Figura 6 e na Tabela 4 [10].

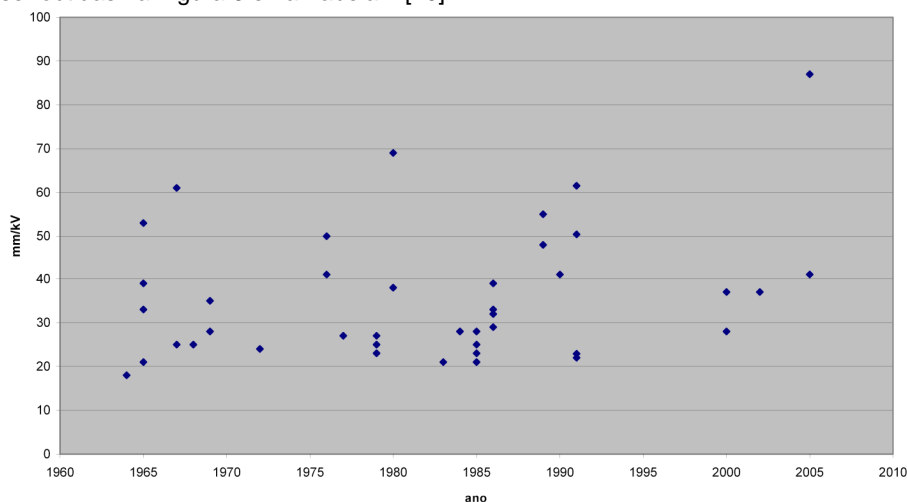


FIGURA 6 - Evolução da distância de escoamento unificada específica para isoladores tipo disco

TABELA 4 - Distância de escoamento unificada específica para diferentes isoladores

Tipo de aparato	USCD			p.u. médio
	mm/kV min	mm/kV max	mm/kV médio	
Isoladores de disco	18	87	34,7	1
Isoladores suporte	25	44	35,3	1,02
Reator	30	50	37,5	1,08
Divisor de tensão	30	60	40,6	1,17
Transdutor de corrente	30	54	40,3	1,16
Buchas	25	62	44,5	1,28

Entretanto, como reportado em várias publicações, em muitos casos as distâncias de escoamento unificadas específicas não foram suficientes por si próprias para assegurar uma performance confiável [11] e [12]. Em nota particular, em [11]:

“Cerca de 10% das estações não precisa de nenhuma manutenção para manter seus isoladores livres de descargas elétricas. Em cerca de 30%, apenas limpeza é suficiente e satisfatória. Recobrimentos com RTV ou graxa de silicone são usados em cerca de 45% (normalmente para apenas uns poucos isoladores), “booster sheds” em 9%, e outras soluções em cerca de 5%”.

Também deve ser considerado que em muitos casos a opção para operar o sistema em uma tensão mais baixa do que a fixada foi adotada durante poluição extrema, para manter de qualquer forma o sistema operante, mesmo em uma voltagem reduzida.

As figuras a seguir apresentam a aplicação da metodologia simplificada, considerando uma experiência de campo como resultado de um questionário lançado (com poucas respostas) e da análise dos dados na literatura. São considerados o valor da $ESDD_{NSDD=0,1}$, os valores da USCD requeridos, de acordo com [2] e [13], e a USCD adotada pelas diversas empresas, junto com a performance experimentada em algumas linhas examinadas [11 e 14]. Os dados analisados foram retirados de [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21 e 22]. Os dados para isoladores tipo disco estão resumidos na Figura 7.

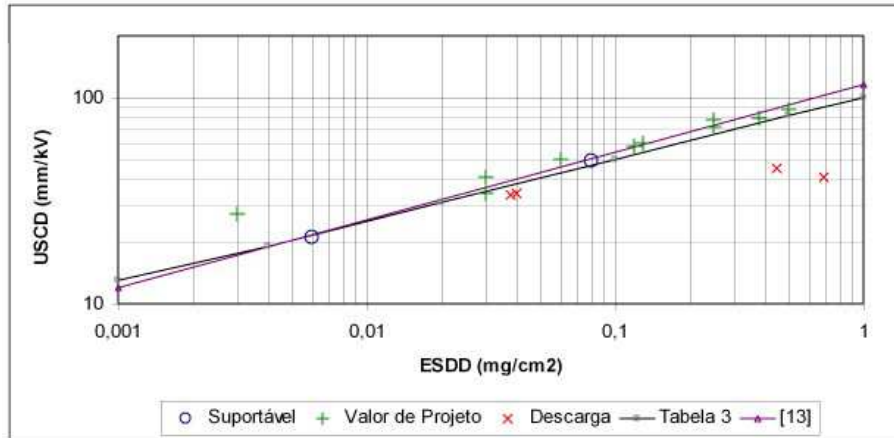


FIGURA 7 - USCD de linhas CC equipadas com isoladores tipo disco em função da severidade da poluição equivalente

Como se nota, os resultados da comparação indicam que as recentes experiências de projetos para linha de ATCC com isoladores tipo disco são compatíveis com as avaliações apresentadas em [2] e [13]: aqueles projetos em que os valores da USCD foram adequadamente estabelecidos em relação à severidade de poluição apresentam um resultado de desempenho satisfatório. O contrário ocorre para as linhas projetadas com menor USCD. Informações similares para os isoladores tipo estação cerâmicos são apresentadas na Figura 8. Neste caso, a comparação é feita com os cálculos de acordo com [2] e [13], com um aumento de 20% para levar em conta o maior diâmetro dos isoladores tipo estação.

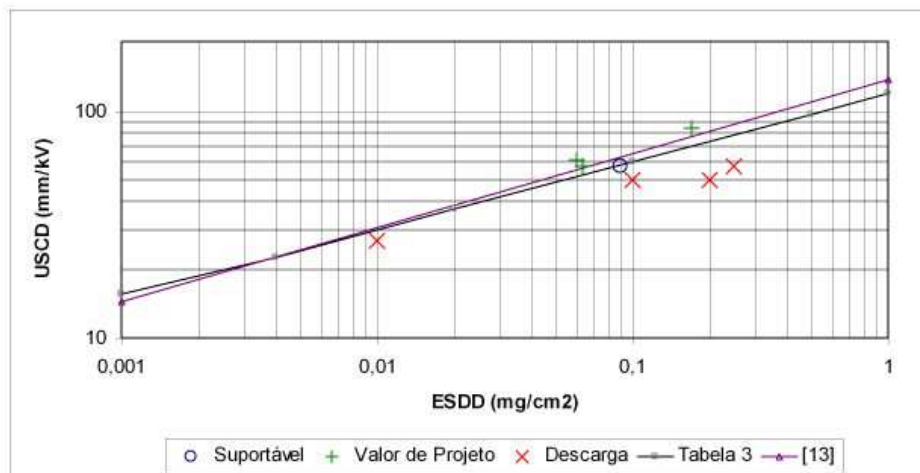


FIGURA 8 - USCD de linhas CC equipadas com isoladores tipo estação cerâmicos em função da severidade da poluição equivalente

Mais uma vez os critérios de projeto adotados estão em concordância com as referências [2] e [13]. Também neste caso, isoladores com valores mais baixos de USCD não obtiveram um rendimento satisfatório, demandando alguns dos procedimentos de manutenção específicos para o caso.

Finalmente, resultados para linhas com isoladores compostos são reportados na Figura 9. A mesma referência para isoladores tipo disco foi utilizada. A pouca experiência indica uma performance satisfatória com USCD mais baixa do que aquela para isoladores tipo disco. O resultado é levado em consideração pelas abordagens de projeto mais recentes, onde são indicados valores de USCD menores em até 25% daqueles relativos a isoladores tipo disco.

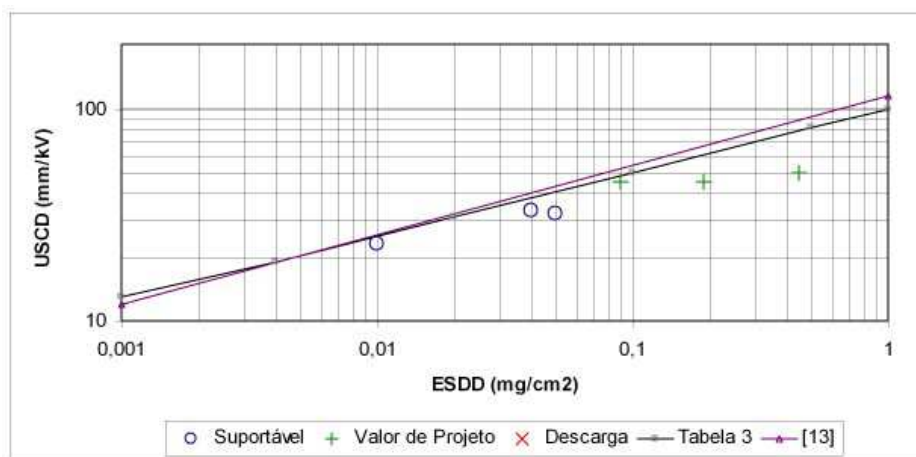


FIGURA 9 - USCD de linhas CC equipadas com isoladores compostos em função da severidade da poluição equivalente

5. CONCLUSÕES

- A severidade da poluição de um determinado local geralmente não é maior do que o valor correspondente à classe média. Somente quando muito próximo às fontes de poluição ou em situações ambientais peculiares, como o deserto, é que severidades correspondentes às classes “pesada” e “muito pesada” podem ser encontradas.
- No passado, em muitos casos, foram selecionadas distâncias de escoamento unificadas específicas relativamente muito baixas, com uma performance de campo consequentemente pobre. Paliativos foram aplicados como engraxamento, lavagem, cobertura com RTV e operação em tensão reduzida em condições de poluição críticas.
- Como uma avaliação preliminar de projeto de isoladores para CC sob condições de poluição, a metodologia simplificada apresenta resultados coerentes. Contudo, é recomendável determinar cuidadosamente a poluição com as devidas medições em isoladores energizados antes da definição final de projeto. A performance do isolador selecionado sob a contaminação específica deve também ser cuidadosamente investigada.

6. REFERÊNCIAS

- [1] IEC 60815 “Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions: parts 1, 2 and 3, 2008
- [2] A. Pignini, A.C. Britten, C. Engelbrecht “Development of guidelines for the selection of insulators with respect to pollution for EHV-UHV CC - state of the art and research needs”, Cigre paper C4-101, 2008
- [3] NGK insulators LTD “Technical Guide” Cat N91 R
- [4] R. Znaidi “Comportement des Isolateurs en milieu Pollué: Expériences en Service & Retour D’Information” Seminaire Sonelgas, March 2007
- [5] R.Suzuki “Study of site pollution severity for CC” 36-WG11/Wiesbaden/352 IWD
- [6] EPRI “HVCC Transmission line reference Book” EPRI TR 102764, September 1993
- [7] T.Fujimura, K. Naito “ Insulators for CC transmission lines” International Symposium on Ceramics, Bangalore, 1982
- [8] N. Hylten Cavallius, S. Annestrand, H. Witt, V Madzarevc, “Insulation requirements, corona losses and corona radio interference for HV CC lines” IEEE Trans. on PAS Vol 83, No. 5,
- [9] Su Zhiyi, Liang Xidong, Yin Yu, Zhou Jun, Li Peng “Outdoor insulation selection method of HVCC lines” Proceeding of 14th ISH, paper D18, August 25-29 2005
- [10] A. Pignini, D. Perin, M. Ramamoorthy, C.S. Lakshminarasimha., V. B. Rammohan “Performance of insulators for EHVDC systems under polluted conditions” CIGRE report 33.22 1988
- [11] Bengt Almgren, Urban Åström, Dong Wu “A survey of the flashover performance of HVCC converter station insulators” International Conference On Power System Technology Proceedings, Aug 18-21 1998, China
- [12] Bengt Almgren, Urban Åström, Dong Wu “Operating experiences of insulators in HVCC converter stations” NPSC Conference, Bangalore, India, December 20-22, 2000
- [13] Y. Hasegawa, K. Naito, K. Arakawa, H.M.Schneider, L. Zaffanella “ A comparative program on HVCC contamination tests” IEEE Transactions on Power Delivery Vol 3 No 4, October 1988
- [14] Gleadow J., Heyman O. and Burtnyk V. “External Insulation Requirements for the New Zealand CC Project” Cigre International Colloquium on Insulation, Wellington, New Zealand, September 29 – October 4 1993
- [15] Epri Project 1013857 “Advanced HVCC Systems at ±800 kV and above”, 2006
- [16] D. Wu, U. Åström, Z.Y. Su and W.M. Ma “The Design and Operational Experience of an Indoor CC yard for ±500 kV HVCC Transmission” ISH 2007

- [17] Urban Åström, Bengt Almgren and Dong Wu, "Outdoor Insulation Design for the Three Gorges-Changzhou ± 500 kV HVDC Project" Proceedings of the International Conference on Power Systems, Sept 3-5 2001, Wuhan China
- [18] Y. Yamamoto, K. Kawabata, Y. Maekawa "Design of the Anan- Kioku CC Trunk line" Cigre SC 22, Sendai Meeting, 1997
- [19] K. Kondo, S. Ito, S. Kondo and T. Imakoma "Investigation Results of Suspension Insulators Removed from CC 500kV GEZHOUBA-SHANGHAI Line in China" NGK Review, 2001
- [20] F. F. Bologna, A. C. Britten, R. E. Kohlmeier H. F. Vosloo "Investigation into the Cause of 'Unknown' Line Faults On a ± 533 kV CC Line in South Africa" Cigre WG C40303 06 33 IWD
- [21] I. Gutman, L. Carlshem and T. Kiiveri "Statistical approach for the insulation dimensioning of the 500 kV HVCC line in Scandinavia" ISH 2007
- [22] Zhiyi Su, Yu Yin, Jun Zhou, Haifeng Gao, Tao Deng, Xidong Liang and Jiafu Wang "Reliability of Composite Insulators Used For UHV AC/CC Transmission Lines" International Conference on UHV Transmission, Beijing 2009

7. DADOS BIOGRÁFICOS

Alberto PIGINI

Nascido na Itália, em 1946, recebeu o grau de Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade de Milão, em 1971. Trabalhou por mais de 35 anos no CESI, Itália, primeiramente como pesquisador, depois como Gerente de Pesquisa e finalmente como Diretor de Divisão, sendo responsável por diversas atividades relacionadas a sistemas elétricos de alta tensão, incluindo impactos ambientais e geração de energia. "Fellow" do IEEE e membro distinto do Cigré, participa de diversos grupos de trabalho em ambas as organizações, tendo publicado inúmeros artigos técnicos. Atua hoje como consultor internacional

Ricardo Wesley Salles Garcia

Nascido em Nova Friburgo, RJ, em 1959, é graduado em Engenharia Elétrica pela UFRJ em 1982, e com grau de M. Sc. pela COPPE/UFRJ em 1988. Trabalha no CEPEL, desde 1985, como pesquisador. Atua nas atividades de pesquisa relacionadas a isolamento externo de sistemas de transmissão de energia. É coordenador do GTB2.03 (Isoladores) do Cigré-Brasil, membro regular do WGB2.21 (Insulators) e membro correspondente do WGC4.303 (Pollution and environmental influence on the electrical performance of power systems), ambos do Cigré internacional