



GRUPO X

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

SISTEMA ESPECIALISTA TUTORIAL PARA O ENSINO DE COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO EM UM CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Raimundo Celeste Ghizoni Teive*
Universidade do Vale do Itajaí – UNIVALI

Paulo César Charles
CHS Consultores Associados

RESUMO

Este trabalho apresenta as idéias básicas do desenvolvimento de um Sistema Especialista Tutorial (SET) de suporte ao ensino da coordenação de isolamento em sistemas de transmissão de energia elétrica (STEE), em um curso de graduação de engenharia elétrica.

PALAVRAS-CHAVE

Sobretensões, Coordenação de Isolamento, Sistemas Especialistas.

1.0 - INTRODUÇÃO

Entende-se por *Coordenação de Isolamento* o processo de correlação da rigidez dielétrica dos equipamentos elétricos, em relação às sobretensões esperadas, com as características dos dispositivos de proteção contra surtos, reduzindo assim a um nível econômico e operacionalmente aceitável a probabilidade de que os esforços de tensão resultantes causem danos ao isolamento dos equipamentos, ou afetem a continuidade de serviço (norma IEC em [01]).

Para o tratamento do problema de coordenação de isolamento é necessário o entendimento de várias disciplinas correlatas, tais como : probabilidade e estatística , materiais elétricos , sistemas de energia, proteção, sobretensões, modelagem dos componentes e dos fenômenos.

A função da coordenação de isolamento, portanto, é de proporcionar a combinação entre as disciplinas acima, até um ponto onde a decisão de engenharia, ditada pela

economia e confiabilidade da operação, possa ser tomada, considerando a capacidade do equipamento planejado [03].

A complexidade deste tema, traduzida não somente pelas áreas do conhecimento envolvidas, mas também pela grande quantidade de informações necessárias à sua solução, aliada à relevância do mesmo, e ao fato de não ser muito explorada no meio acadêmico, levou-nos a idéia de especificar um ambiente computacional amigável que propiciasse aos alunos a possibilidade de aprenderem a projetar a coordenação de isolamento em uma forma interativa com o computador.

Para isto, é necessário a representação de forma apropriada neste sistema de todo o conhecimento necessário para a solução deste problema, sendo que boa parte dela é baseada num significativo domínio das disciplinas elencadas anteriormente e uma parte não desprezível desse conhecimento é constituído de regras práticas e heurísticas obtidas da experiência de especialistas.

Além disto, como a solução deste problema se constitui em um processo semi-estruturado de tomada de decisão, é necessário que o sistema computacional proposto possibilite aos alunos o entendimento de todas as etapas deste processo, o encadeamento entre estas etapas e quais variáveis e fatores relevantes permanecem ativos para cada problema específico.

Assim, é proposto um ambiente computacional para o ensino da disciplina de coordenação de isolamento no 'software' KAPPA-PC [06], o qual permite não somente o desenvolvimento de um sistema especialista baseado em regras, mas facilita a criação de interfaces gráficas amigáveis, possibilitando também a utilização da programação orientada a objetos.

O ambiente computacional baseado em sistemas especialistas descrito possibilita a integração com um banco de dados com valores nominais dos pára-raios comerciais, e com um banco de dados dos valores nominais dos transformadores.

Além destes dados que são incorporados à memória de trabalho do sistema especialista, valores padrão (norma) para margens de segurança, surtos temporários, níveis de isolamento e fatores de segurança estatística são também armazenados nos objetos do sistema especialista.

Por outro lado, através de um conjunto de regras baseadas em critérios de projeto, o sistema especialista fornece subsídios para a especificação da coordenação de isolamento, considerando métodos convencional e estatístico.

2.0 - TIPOS DE SOBRETENSÕES

As sobretensões que atuam em um STEE podem ser classificadas em dois tipos:

- externas – geradas por distúrbios atmosféricos, principalmente devido a raios;
- internas – geradas por mudanças nas condições de operação, podendo ser transitórias ou temporárias.

Na Figura 1 a seguir, os três tipos de sobretensão são apresentados, de forma ilustrativa.

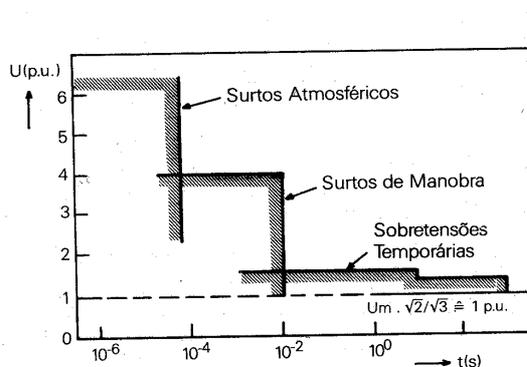


Figura 1 – Sobretensões em Sistema de Alta Tensão

Com o aumento dos níveis de tensão de transmissão, para atender ao aumento requerido de potência transmitida, as sobretensões de manobra transitória e temporária passam a ter um papel de destaque, em conjunto com as sobretensões por descargas atmosféricas, papel esse que normalmente não se evidência em níveis de tensão mais baixos. Isto ocorre basicamente por três razões:

I. o aumento relativo do efeito capacitivo, por unidade de comprimento, das linhas de transmissão, associado às correspondente reduções dos efeitos indutivo e resistivo, bem como o aumento do comprimento dessas linhas;

II. o isolamento dos equipamentos tem seus níveis de suportabilidade intrinsecamente reduzidos, a medida que as frentes de onda se reduzem. No caso das sobretensões transitórias de manobra, têm-se tempos de crista da ordem de centenas de microsegundos, ao passo que para as de descargas atmosféricas, da ordem do microsegundo a dezenas de microsegundos.

III. o que foi mencionado em I, também produz efeitos adicionais com respeito ao aumento das amplitudes das sobretensões temporárias, que podem ser agravadas por distorções harmônicas.

2.1 - Sobretensões de Manobra

As sobretensões de manobra têm sua origem a partir do chaveamento de equipamentos de manobra, ou qualquer variação brusca de tensão ou corrente na rede. Estas sobretensões, de natureza oscilatória com amortecimentos extremamente rápidos (vários milissegundos até vários ciclos) são normalmente representados por uma onda tipo impulso (250 x 2500 μ s).

As operações de manobra mais importantes para o projeto da isolação podem ser classificadas como segue [03]:

- energização de linhas de transmissão, cabos, transformadores, reatores e barramentos;
- religamentos rápidos de linhas de transmissão;
- sobretensões devidas a ocorrência e eliminação de faltas em linhas de transmissão ou em cabos.

2.2 - Sobretensões Temporárias

Estas sobretensões tem a forma de oscilação não amortecida ou levemente amortecida, na frequência industrial ou próximo dela (60 Hz).

Podem ser decorrentes de [02] e [03]:

- rejeição de carga,
- elevação de tensão por efeito Ferranti,
- faltas fase-terra;
- sobretensão com distorção harmônica, devido à saturação magnética;

2.3 - Sobretensões de Descargas Atmosféricas

Estas sobretensões resultam do impacto de raios na linha de transmissão ou nas torres, desenvolvendo elevadas solicitações em tempos extremamente curtos, de vários microsegundos a centenas de microsegundos. São caracterizadas da seguinte forma [05]:

- os raios têm associados ondas de corrente de forma tipicamente de impulso. Ao atingirem o sistema de transmissão, desenvolvem ondas de tensão que se propagam até os isolamentos desse sistema (isoladores, equipamentos, etc.). Tipicamente, as corrente de descargas atmosféricas estão contidas num espectro de amplitude entre alguns kA a centenas de kA.

- nos laboratórios esta onda é simulada como uma onda padrão de tensão de $1,2 \times 50 \mu\text{s}$ ou onda padrão de corrente impulsiva, do tipo $8 \times 20 \mu\text{s}$.

3.0 – PROTEÇÃO ATRAVÉS DE PÁRA- RAIOS

A utilização de pára-raios no controle de sobretensões permite que se possam reduzir os níveis de isolamento de diversos equipamentos em sistemas de transmissão.

De forma sucinta, os pára-raios são formados por blocos de resistores não-lineares, podendo ou não terem centelhadores em série, que disparam assim que o nível de tensão nos seus terminais exceda um determinado valor.

De modo ideal, os pára-raios deveriam se comportar da seguinte forma [02]:

- I. começar a conduzir somente a partir de uma tensão acima de sua tensão nominal;
- II. manter esta tensão com pequenas variações durante todo o tempo que permanecer o surto de tensão;
- III. cessar a condução a uma tensão muito próxima àquela em que começou a conduzir.

Desta forma, tais pára-raios conduziram somente a corrente requerida à redução da sobretensão ao nível de proteção dos pára-raios.

Os pára-raios de óxido metálico em geral (óxido de zinco, bismuto ou cobalto) apresentam resistores com um elevado de não-linearidade, sobre uma grande faixa de corrente, com características tensão x corrente próximas da ideal, eliminando a necessidade do centelhador série.

4.0 – MÉTODOS DE COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO

4.1 - Introdução

Para efeitos dos procedimentos que serão adotados, seguem-se as definições abaixo:

Tensão suportável estatística (SWV) - é o valor de pico da tensão de teste ao impulso de manobra ou descarga atmosférica, na qual a isolação exibe sob condições especificadas uma probabilidade de suportabilidade igual a 90% (Norma IEC em [01]).

Sobretensão estatística (SOV) - sobretensão de manobra ou de descarga atmosférica, que quando aplicada a um equipamento como resultado de um evento de um tipo especificado no sistema, seu valor de pico tem uma probabilidade de ser excedido de 2% (Norma IEC em [01]).

Fator de Segurança Estatístico (SSF) - é a razão, para um dado tipo de evento, entre a tensão suportável à

manobra ou descarga atmosférica apropriada e a sobretensão estatística, estabelecida sobre as bases de um dado risco de falha, levando em consideração as funções distribuição de probabilidade da tensão suportável e da sobretensão. (Norma IEC em [01]).

Nível de Isolamento a Impulso Atmosférico (BIL) - tensão suportável ao impulso atmosférico (convencional ou estatístico). [01].

Nível de Isolamento a Impulso de Manobra (BSL) - tensão suportável ao impulso de manobra (convencional ou estatístico). [01].

4.2 - Método Convencional

Esse método, normalmente utilizado para isolamentos do tipo não regenerativos, consiste em estabelecer condições nas quais a isolação do equipamento não sofrerá qualquer descarga disruptiva. O procedimento é feito considerando as características dos pára-raios existentes.

Os seguintes dados são necessários para que se verifique a coordenação de isolamento de uma subestação:

- Sobretensões da rede – obtido por analisador de transitórios de rede (TNA) ou simulação digital.
- Tensão mais alta que o equipamento a ser protegido estará sujeito em operação normal (tensão de linha).
- Margens de segurança em relação ao nível de isolamento BIL (Ci) e em relação ao nível de isolamento BSL (Cs).

Esse método é baseado na determinação do nível de proteção do pára-raios. O nível de proteção de um dispositivo é definido como o mais alto valor de sobretensão que pode aparecer nos terminais do equipamento protegido.

No caso dos pára-raios de óxido metálico (ZnO, pode-se dizer que seus níveis de proteção, à manobra e a descargas atmosféricas, correspondem aos respectivos valores de tensão residual, nas correntes de descarga especificadas.

Seu valor nominal está vinculado à sua tensão máxima de operação contínua (MCOV) e à sua suportabilidade a sobretensões temporárias.

Define-se então o nível de proteção a partir dos dados anteriores e dos valores das tensões residuais especificadas dos pára-raios. Em seguida, determinam-se os níveis de isolamento (BIL e BSL) recomendados, levando-se em conta as margens de segurança Ci e Cs já definidas.

4.3 - Método Estatístico

Normalmente utilizado para isolamentos regenerativos

tem, como principais justificativas, a natureza aleatória das sobretensões e das suportabilidades dos isolamentos.

As sobretensões que estressam a isolação podem ser expressas por uma distribuição de probabilidade conjunta da magnitude V_m e do tempo de crista t [$f(V_m, t)$]. Ao mesmo tempo, a probabilidade de disrupção da isolação pode também ser expressa como uma função do tipo $P(V_m, t)$ [01].

O risco de falha da isolação R pode ser descrito como:

$$R = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} P(V_m, t) \cdot f(V_m, t) dV_m dt$$

A correta avaliação de R é bastante complexa, exigindo grande quantidade de simulações [08]. Por isso, costuma-se considerar um enfoque mais simplificado, para a obtenção do risco de falha de isolamento:

$$R = \int_0^{\infty} P(V_m) \cdot f(V_m) dV_m$$

Onde $P(V_m)$ é a função distribuição de probabilidade de disrupção. A Figura 2 a seguir fornece uma representação gráfica desta equação.

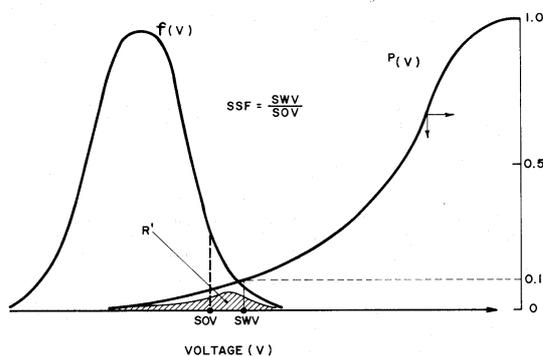


Figura 2 – Determinação do Risco de Falha de Isolação

Assim, a tensão suportável (de manobra ou descarga atmosférica) de isolação para o equipamento é obtida combinando-se os valores dos índices SOV e SWV, de forma a obter valores de $SSF=SWV/SOV$ coerentes com o risco de falha de isolação admissível, especificado previamente.

A relação entre SSF e o risco de falha de isolação pode ser representado por uma função, de acordo com a classe de tensão (Norma IEC em [01]), conforme apresentado na Figura 3 a seguir.

5.0 – SISTEMA ESPECIALISTA PROPOSTO

A utilização de técnicas oriundas da inteligência artificial (IA), tais como os sistemas especialistas, para resolver problemas de sistemas de potência tem sido cada vez mais frequente. Na verdade isto vem

ocorrendo principalmente em função da deficiência das técnicas convencionais em emular determinados aspectos da inteligência humana.

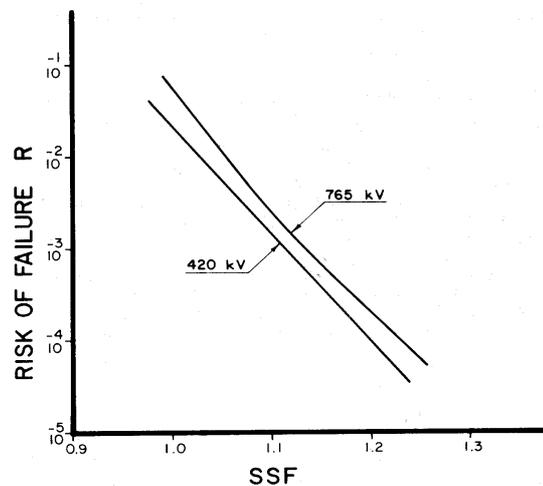


Figura 3 – Efeito do SSF no Risco de falha de Isolação

A escolha da ferramenta computacional para realizar este projeto recaiu sobre os SETs pelas seguintes razões:

- ⇒ o sistema especialista possibilita o processamento simbólico do conhecimento, principalmente através de regras de produção, o que é necessário para problemas semi e não-estruturados, envolvendo um processo de tomada de decisões, como é o caso;
- ⇒ a capacidade explanatória dos sistemas especialista pode fornecer ao usuário explicação das etapas do processo de tomada de decisão, bem como do encadeamento entre as regras disparadas durante o processo, o que é conveniente para o objetivo didático proposto;
- ⇒ o sistema especialista possibilita a representação apropriada não só do conhecimento heurístico, mas também de todas as informações relacionadas com este problema;
- ⇒ o sistema especialista permite a emulação do raciocínio do especialista através do processo de inferenciação de regras, gerenciado pelo seu mecanismo de inferências.

Aqui, o sistema especialista proposto é composto de quatro componentes principais: memória de trabalho, motor de inferência, base de regras e interface gráfica com o usuário. A interrelação entre estes componentes está apresentada na Figura 4, a seguir:

A memória de trabalho é onde são armazenados os fatos (dados e conhecimento concreto) do problema e tem um caráter transitório. As informações são armazenadas na forma de triplas *objeto-atributo-valor*.

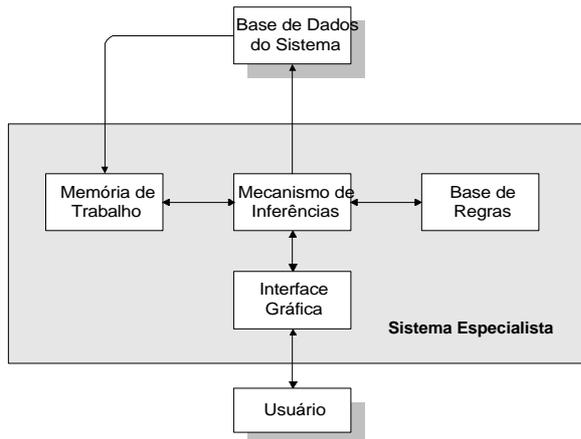


Figura 4 - Estrutura do Sistema Especialista Proposto

A base de regras é onde estão armazenados o conhecimento abstrato sobre o problema (heurísticas e critérios de projeto). Neste caso, para representar este tipo de conhecimento foram adotadas as regras de produção (SE condição, premissa; ENTÃO ação, conclusão).

O mecanismo de inferência (MI) é o processador de conhecimento do sistema especialista. Ele busca combinar o conhecimento concreto com os fatos do sistema, procurando gerar novos fatos, inferir conclusões e gerar ações sobre o sistema.

A interface gráfica é feita através de um conjunto de telas produzida por funções as quais têm o objetivo de criar um ambiente amigável e interativo com o usuário, além de fornecer explicações sobre inferências e decisões tomadas.

Antes de iniciar o processo de inferenciação, o sistema especialista questiona o usuário e suas respostas são armazenadas na memória de trabalho. Estas questões são relacionadas com o tipo de equipamento a ser protegido (transformador/linha de transmissão), tensão de linha máxima a qual o equipamento estará sujeito (tensão rms em kV), método de coordenação de isolamento adotado (convencional/estatístico).

A partir destes dados, o mecanismo de inferências do SE proposto dispara o processo de inferenciação das regras (encadeamento para frente – Dados \Rightarrow Conclusões), o qual está representado de forma esquemática na Figura 5 a seguir. Como é apresentado nesta Figura, a base de regras do SE é constituída de quatro conjuntos de regras, os quais são descritas rapidamente abaixo.

I. Regras para especificação do pára-raios. Este conjunto de regras leva em consideração aspectos como:

- \Rightarrow tensão máxima que o equipamento deve suportar,

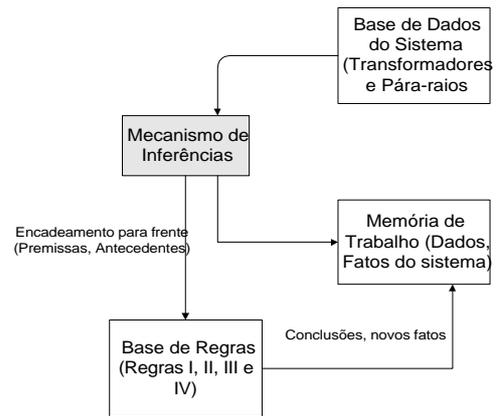


Figura 5 – Processo de Inferenciação guiado pelo MI

- \Rightarrow valores nominais para pára-raios (busca no banco de dados um valor comercial imediatamente acima do obtido no item anterior),

- \Rightarrow valor de proteção do pára-raios (informação do fabricante, obtida do banco de dados do sistema).

II. Regras de definição dos níveis de isolamento BSL e BIL do equipamento.

Estas regras buscam definir os níveis básicos de isolamento dos equipamentos dadas as informações obtidas das regras anteriores, mais da margem de segurança (manobra e descarga atmosférica). O SE considera as margens de segurança de norma para descarga atmosférica (1,25) e para surto de manobra (1,15) (norma IEC). Se não definido, toma-se $BSL = 0,83 \times BIL$.

III. Regras para definição dos valores de SOV e SWV (método estatístico).

Os valores de SOV devem ser fornecidos através de um programa de análise de transitórios de rede, representando a função de probabilidade da Figura 2. O formato dos dados deve ser em duas colunas (tensão X sobretensão esperada). As regras buscam neste arquivo o valor de SOV para um tensão especificada (tensão de linha).

IV – Regras de especificação do valor de SSF e SWV.

Estas regras combinam os valores de SOV e SSW, de forma a obter valores de SSF que fornecem valores de riscos de disrupção da isolação admissíveis. Os valores de SSF são substituídos na função corresponde àquela apresentada na Figura 3, onde foi mostrado um exemplo com SWV de 745 kV. Nestas regras também devem ser considerados aspectos econômicos com respeito a relação aumento do nível de isolamento X diminuição do risco X custos, introduzindo-se então regras para suporte à tomada de decisão de projeto.

6.0 – DISCUSSÃO DE UM CASO EXEMPLO

Seja um sistema de tensão nominal E_n kV (tensão de linha). Quer se fazer o projeto de especificação do nível de isolamento do transformador e pára-raios correspondente, através do método convencional.

O mecanismo de inferências do SE dispara inicialmente o conjunto de Regras I, tais que :

- tensão é transformada para tensão fase-terra ;
- a tensão máxima de operação contínua, imposta pelo sistema aos pára-raios ZnO, se não fornecida, considera-se como $1,15 - 1,20$ pu da tensão fase-terra do sistema;
- para a tensão máxima de operação contínua dos pára-raios (MCOV), se não disponível, considera-se $MCOV = (0,80 \text{ a } 0,90) \times \text{Tensão nominal}$;
- se não for fornecido dados de sobretensão, o sistema assume um valor de sobretensão sustentada de $1,4$ pu (falta fase- terra – mais comum), com duração igual ao tempo de eliminação da falta (por exemplo, 3 a 5 ciclos);
- compara-se o valor da sobretensão sustentada com a suportabilidade a sobretensões temporárias do pára-raios, disponível no banco de dados;
- com o MCOV e com a suportabilidade a sobretensões temporárias, é definido um valor de tensão nominal de pára-raios tal, que satisfaça a ambas as condições, simultaneamente;
- são determinados os valores dos níveis de proteção (manobra e descargas atmosféricas) do pára-raios.

A seguir o conjunto de Regras II são disparadas :

- com a margem de segurança à sobretensões de manobra de 15% , o valor do BSL do transformador é calculado e ajustado ao valor normalizado mais próximo (consulta ao banco de dados);
- com a margem de segurança à sobretensões de descargas atmosféricas de 25% , o valor do BIL do transformador é calculado e ajustado ao valor normalizado mais próximo, dentre aqueles associados ao BSL anteriormente escolhido (consulta ao banco de dados);
- conclui a simulação, fornecendo os valores da especificação :

1. Transformador

⇒ BSL(nível básico de isolamento contra sobretensão de manobra);

⇒ BIL(nível básico de isolamento contra sobretensão atmosféricas);

2. Pára-raios ⇒ tensão nominal

7.0 - CONCLUSÕES

Neste trabalho procurou-se mostrar a importância de se desenvolver ferramentas computacionais que possam auxiliar o ensino de disciplinas em um curso de engenharia elétrica, principalmente com relação a área de sistemas de potência. É necessário para isto que se utilize técnicas que possam agregar valor ao que já existe, tornando o resultado atraente para os alunos.

O processo de especificação da coordenação de isolamento, por ser uma área interdisciplinar , não ser muito difundida nos meios acadêmicos e ser bastante interessante e complexo, foi escolhido para esta aplicação.

Os SET, que são uma técnica proveniente da IA, tem se demonstrado uma ferramenta muito apropriada para o desenvolvimento de software com cunhos didáticos ou mesmo para treinamento de engenheiros, como mostrou o relatório do CIGRÉ internacional [07].

O SET proposto possibilitará um ambiente computacional amigável para o usuário (alunos), com grande capacidade exploratória (decisões tomadas, inferências realizadas, critérios adotados), processamento simbólico e numérico, além da capacidade de emulação do raciocínio do especialista.

8.0 – BIBLIOGRAFIA

- [1] KHALIFA, M. High Voltage Engineering - Theory and Practice. Marcel Dekker Inc., 1990, USA.
- [2] D’AJUIZ, A. et alli. Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento. Aplicação em Sistemas de Potência de AT, UFF-Furnas, Ed. Universitária, 1987, R.J., Brasil.
- [3] CURSO DE ENGENHARIA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA - série PTI, Coordenação de Isolamento, Vol. 8, 1979, R.S., Brasil.
- [4] WELLAMER, M. Introdução à técnica das altas tensões, Ed. da USP, 1973, São Paulo, Brasil.
- [5] CURSO DE COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO EM LT’s, ELETROSUL, 1982.
- [6] TEIVE, R.C.G. Planejamento da Transmissão de Sistemas de Energia Elétrica Utilizando Sistemas Especialistas, Tese de Doutorado, Engenharia de Produção, UFSC, Março 1995.
- [7] CIGRE TF 38-06-05 ‘Application of Expert System to Education an Training of Power System Engineers’, Final Report, March 1995.
- [8] CHARLES, P.C. et alli; Estação Conversora de Frequência de Uruguiana – Sobretensões de Origem Atmosférica e Coordenação de Isolamento com Enfoque Probabilístico, IX SNPTEE, MG, 1987.