



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

GCQ - 03  
16 a 21 Outubro de 2005  
Curitiba - Paraná

**GRUPO XIII  
INTERFERÊNCIAS, COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E QUALIDADE DE ENERGIA – GCQ**

**DESENVOLVIMENTO DE GUIA DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA  
PARA APLICAÇÃO EM USINAS EÓLICAS**

**Luis R. A. Gamboa\***

**Carlos E. Ribas**

**Marcelo A. Ravaglio**

**Wolmer R. Zanin**

**LACTEC**

**LACTEC**

**LACTEC**

**COPEL GERAÇÃO**

**RESUMO**

As usinas eólicas são instalações com estruturas elevadas que ocupam grandes áreas, portanto muito expostas à incidência de descargas atmosféricas. Usinas como as de Palmas, PR, e Horizonte, SC, estão situadas em regiões com nível cerâmico de aproximadamente 120 dias com trovoadas por ano. Mesmo assim, o Brasil não possui um programa federal para acompanhar os efeitos destas ocorrências, como acontece na Europa. O presente trabalho apresenta alguns tópicos do guia em desenvolvimento, cujo objetivo é integrar informações esparsas em normas e estudos especializados com a experiência das empresas que operam as usinas eólicas no Brasil.

**PALAVRAS-CHAVE**

Compatibilidade eletromagnética, Usina eólica, Descargas atmosféricas.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

O presente trabalho apresenta um resumo do guia de compatibilidade em desenvolvimento, que visa integrar informações disseminadas em normas, estudos e experiência no Brasil sobre o tema. Considerações sobre a proteção contra os efeitos indiretos das descargas atmosféricas e sobre o comportamento de protetores de surto são apresentadas. Resultados de experiências realizadas no Lactec com estes dispositivos e requisitos da instalação para sua operação otimizada em uma usina eólica típica são também comentados.

A interligação dos geradores eólicos à rede de distribuição aérea, feita por transformadores elevadores em cada máquina, aumenta a exposição da usina aos efeitos diretos e indiretos de descargas próximas (nas turbinas, por exemplo). Mesmo usinas como as do nordeste, situadas em regiões com níveis cerâmicos entre 20 a 50 trovoadas por ano, estão sujeitas a estes efeitos. Vários são os equipamentos sujeitos a avarias: pás das turbinas, rolamentos do rotor, equipamentos de controle e serviços auxiliares da casa de comando. Aperfeiçoamentos são freqüentes, uma vez que não há uma norma que atenda todos aspectos de compatibilidade de uma usina eólica contra descargas atmosféricas. Por exemplo, a transferência de surtos entre alta e baixa tensão dos transformadores não é lembrada. A transferência de potenciais a partir do ponto de impacto e a melhor forma de interligar (ou não) diferentes sistemas de aterramento (torre, pára-raios e sua localização ideal, supressores, casa de comando, torre de telecomunicações, etc.) carecem de pormenores nas normas sobre proteção.

**2.0 - DESENVOLVIMENTO**

**2.1 ATIVIDADES RELACIONADAS COM A CONFECÇÃO DO GUIA DE COMPATIBILIDADE**

Centro Politécnico da UFPR, s/n  
81531-990  
Curitiba - PR

Entre as atividades já desenvolvidas para fundamentar o guia de compatibilidade estão: levantamento de dados em usinas em operação – junto ao pessoal técnico da *Wobben Windpower* e do CBEE (Centro Brasileiro de Energia Eólica) –, revisão bibliográfica, ensaios de laboratório em supressores de surto de tecnologia recente, ensaios para determinar causas de avarias e critérios de especificação e manutenção em pára-raios de distribuição aplicados em usinas do litoral. O sumário do guia que está sendo desenvolvido é mostrado a seguir.

## SUMÁRIO DO “GUIA DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA PARA APLICAÇÃO EM USINAS EÓLICAS”

### **1. Introdução**

- 1.1 Objetivo do Projeto
- 1.2 Aspectos Gerais
- 1.3 Particularidades das Usinas Eólicas do Brasil

### **2. Definições, Símbolos, Siglas e Normas de Referência**

- 2.1 Definições
- 2.2 Siglas e Símbolos
- 2.3 Normas de Referência

### **3. Compatibilidade Eletromagnética e Usinas Eólicas**

- 3.1 Fontes de Perturbações. Modelo de Interferência

### **4. Descargas Atmosféricas em Sistemas Elétricos**

- 4.1 Efeitos Diretos e Indiretos das Descargas Atmosféricas em Sistemas Elétricos
- 4.2 Estatísticas de Avarias em Usinas Eólicas
- 4.3 Características das Avarias em Usinas Eólicas
  - 4.3.1 Avarias em Pás. Histórico, Tipos Construtivos, Técnicas de Proteção
  - 4.3.2 Engrenagens
  - 4.3.3 Sistema de Controle e Auxiliares
  - 4.3.4 Sistema de Telecomunicações

### **5. Propriedades das Descargas Atmosféricas**

- 5.1 Parâmetros da Corrente de Descarga Atmosférica
- 5.2 Fenômenos Elétricos Transitórios Devidos a Descargas Atmosféricas
- 5.3 Campos Elétricos e Magnéticos Devidos a Descargas Atmosféricas

### **6. Proteção Contra Descargas Atmosféricas**

- 6.1 Caracterização das Zonas de Proteção Contra Descargas Atmosféricas
- 6.2 Zonas de Proteção nas Instalações de uma Usina Eólica

### **7. Proteção de Sistemas Elétricos e de Controle**

- 7.1 Aspectos Gerais
- 7.2 Mecanismos de Acoplamento e Métodos de Atenuação
- 7.3 Técnicas de Blindagem
- 7.4 Cabos de Controle, Força, Serviços Auxiliares, Comunicações
- 7.5 Transferência de Surtos entre Primário e Secundário dos Transformadores Elevadores

### **8. Aterramento, Ligações à Terra e Equipotencialização**

- 8.1 Comportamento de Sistemas de Aterramento para 60 Hz e Fenômenos Transitórios
- 8.2 Transferência de Potenciais

### **9. Dispositivos de Proteção Contra Surtos**

- 9.1 Evolução da Tecnologia de Protetores Contra Surtos
- 9.2 Protetores de Surto de Corrente
- 9.3 Protetores de Surto de Tensão
- 9.4 Coordenação de Protetores de Surto

### **10. Critérios de Projeto para Equipamentos e Sistemas**

- 10.1 Introdução
- 10.2 Avaliação de Risco, Níveis de Proteção, Zonas de Proteção
- 10.3 Aterramento e Equipotencialização
- 10.4 Portas de Entrada e Saída
- 10.5 Filtragem
- 10.6 Técnicas de Blindagem

## 11. Segurança – Proteção Pessoal

## 12. Considerações Econômicas

### 2.2 AVALIAÇÃO DE SUPRESSORES DE SURTO

Foi realizada uma avaliação de supressores de surto comerciais, considerando sua filosofia de aplicação, o comportamento para vários tipos de instalação e de aterramento, o levantamento de parâmetros de protetores convencionais e com disparo eletrônico (tecnologia AEC – *Active Energy Control*). Uma análise destes dispositivos, com relação à sua capacidade de descarga e nível de proteção, foi necessária para avaliar as possibilidades de otimizar a proteção dos inversores aplicados no circuito de saída em BT dos geradores eólicos.

#### 2.2.1 EVOLUÇÃO DO USO DE SUPRESSORES DE SURTO E COORDENAÇÃO

Uma variedade de supressores é encontrada em catálogos de diversos fabricantes. A escolha é feita normalmente em função do ponto de instalação e capacidade de descarga. Assim, por exemplo, os supressores do tipo centelhador possuem características para drenar descargas de até 100 kA. Entretanto, apresentam tensão residual (tensão que aparece entre os terminais do supressor durante sua operação, que define seu nível de proteção) maior que a dos supressores do tipo Varistor, cujo tempo de resposta é menor, situando-se na faixa de 20 a 100 ns, contra centenas de ns apresentadas pelos centelhadores usuais (Ref. 8). Para combinar as características dos centelhadores e varistores, costuma ser indicado, para aplicações industriais, o uso de um sistema coordenado, híbrido, do tipo centelhador-indutor-varistor, conforme Figura 1.

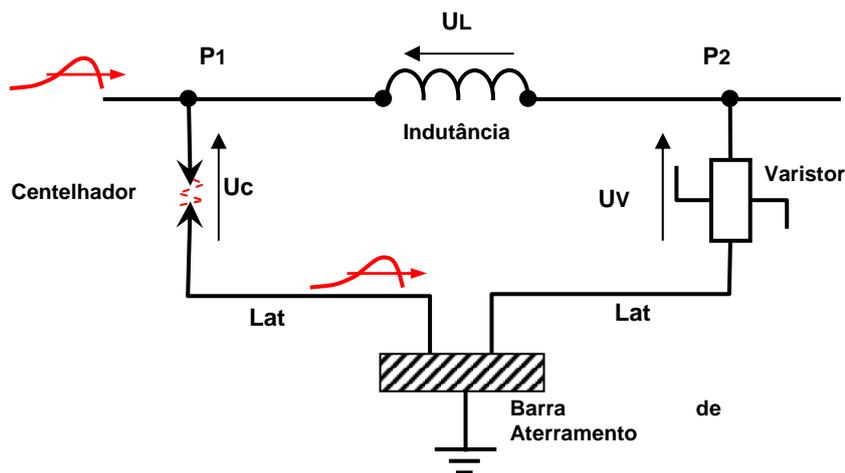


FIGURA 1 – Diagrama de aplicação de supressores contra descargas atmosféricas e sobretensões

O diagrama acima mostra o aparecimento de uma tensão  $U_c$  nos terminais do centelhador quando uma descarga de corrente atmosférica, incidente no ponto P1, provoca sua operação. Além da tensão  $U_c$ , que depende das propriedades e da distância do arco elétrico que se estabelece na câmara de extinção do centelhador, existe uma indutância de aterramento,  $Lat$ , devida aos condutores existentes entre a linha e a barra de aterramento. Parte da tensão  $U_c$  aparece entre os terminais do varistor ( $U_v$ ), ficando a diferença entre as tensões  $U_c$  e  $U_v$  aplicada em  $UL$ . Esta queda indutiva pode estar no trecho de linha entre os supressores ou num indutor especial, aplicado quando o trecho da linha é pequeno (inferior a 10 metros). Desta forma, a tensão residual do centelhador, da ordem de 4 kV, não aparece diretamente nos equipamentos ligados no ponto P2 da linha por que o Varistor opera de modo a reduzir seu valor. O Varistor, então, tem por finalidade atenuar a sobretensão resultante da operação do Centelhador, que drena para a terra a maior parte da corrente de descarga.

Recentemente têm aparecido no mercado centelhadores com capacidade de drenar correntes da ordem de 50 kA (energia específica de 300 kJ/Ω) e tensão residual baixa (na faixa de 0,9 a 1,5 kV). Dispositivos eletrônicos de disparo são empregados para obter este comportamento, antecipando a operação do centelhador. Algumas unidades, modelo AEC, foram ensaiados no Lactec (Ref. 9). Também são encontrados modelos de varistores para altas correntes de descarga, porém com energia específica menor à dos centelhadores (da aprox. 36 kJ/Ω).

### 2.2.2 LIMITAÇÕES NA APLICAÇÃO DESTES DISPOSITIVOS

Uma das limitações na aplicação destes dispositivos é o valor da tensão que aparece nos condutores empregados para ligar os supressores de surto à terra. Esta tensão se soma à tensão residual que aparece nos terminais dos supressores durante sua operação, elevando a solitação nos equipamentos ligados após o ponto P2 (Ref. 9). Outro dos aspectos limitadores é a distância e a posição relativa entre os supressores (e sua fiação) e os componentes eletrônicos sensíveis, uma vez que o efeito de indução eletromagnética ( $d\phi/dt$ ) durante sua operação é forte nas imediações do protetor.

### 2.3 ATERRAMENTO DE GERADORES EÓLICOS

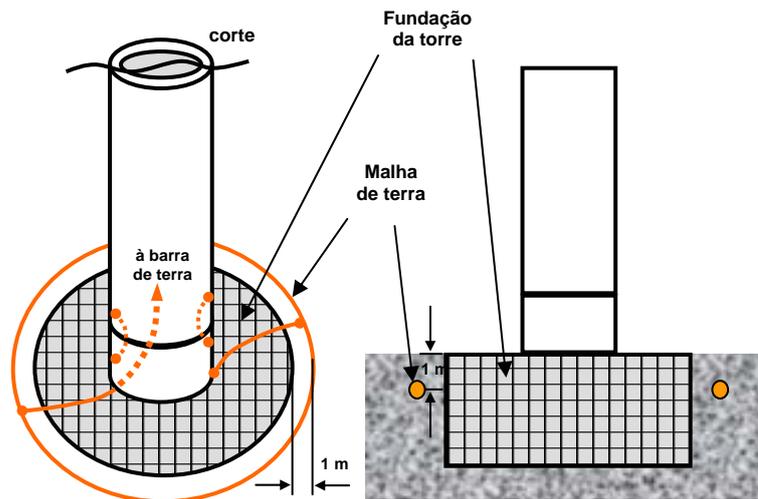


FIGURA 2 – Exemplo de malha de terra de gerador eólico. Cortesia CBEE.

Para minimizar alguns problemas relacionados com a elevação de potenciais de terra, a barra de referência dos equipamentos do gerador costuma ser interligada à malha da torre conforme ilustra a figura 2 (gerador de FN).

### 2.4 AVALIAÇÃO DE PÁRA-RAIOS DA USINA DE TAÍBA

Durante as visitas às usinas eólicas do nordeste foram observadas condições de avaria em pára-raios de distribuição de 15 kV (operação do desligador). Duas unidades, fabricadas em 2002, retiradas da Usina de Taíba, foram encaminhadas ao LACTEC para ensaios e análise. Uma delas (n° de série 31187), visualmente avariada no terminal de alta tensão e com o desligador operado por sobrecorrente; a segunda (n° de série 31189), com problemas de corrosão avançada, no terminal de alta tensão. Os serviços realizados são detalhados a seguir.

#### 2.4.1 ENSAIOS REALIZADOS (resultados detalhados na referência 9)

Foram realizados os ensaios de perdas dielétricas e correntes de fuga AC com 2,5 e 10 kV e medida da resistência de isolamento, com 3 e 5 kV DC. Também foi medida a tensão de referência para 1 mA de pico. Estes ensaios foram repetidos na unidade 31189 após ensaio de estanqueidade à imersão em água deionizada a 98 °C, durante 42 horas, conforme IEC 60099-4/91.

Também foi efetuada uma avaliação termográfica. Para isto, os 2 pára-raios foram montados em base comum e submetidos à tensão de 8 kV. Após 2 horas de energização, o pára-raios n° 31187 estabilizou com 25 °C de elevação, sobre ambiente próximo (de 14 °C).

#### 2.4.2 INSPEÇÃO INTERNA

Foi efetuada a desmontagem do pára-raios n° 31187 para inspeção interna e avaliação dos componentes, mostrando aspectos do processo de corrosão da tampa superior (Figura 3b) e degradação de outros componentes (Figura 3c). A vista superior do pára-raios n° 31189 é mostrada na Figura 3a.



FIGURA 3a – PR 31189, vista de topo



FIGURA 3b – PR 31187, vista de topo



FIGURA 3c – PR 31187, componentes internos

### 2.4.3 CONCLUSÕES, ESPECIFICAÇÃO E CUIDADOS

As unidades ensaiadas indicam a necessidade de especificação especial para os pára-raios de distribuição usados em usinas do litoral. Para minimizar a corrosão salina, a especificação deve contemplar os seguintes requisitos:

- Os pára-raios, de óxido metálico (ZnO), sem centelhador, devem ter invólucro polimérico. Isto (comum nos modelos atuais) minimiza os problemas de vedação típicos da interface porcelana-cimentação-metal dos pára-raios clássicos, com invólucro cerâmico.
- O metal empregado nas tampas e terminais deve ser de aço inoxidável, com formato adequado para inibir o acúmulo de umidade. Notar que o formato da tampa superior das amostras avaliadas era inadequado, permitindo o acúmulo da água, além de ser de alumínio, com espessura fina.
- Detalhes sobre a forma mais eficiente de instalação destes pára-raios, aplicados aos transformadores de distribuição dos geradores eólicos, bem como as justificativas técnicas para otimizar seu uso, farão parte do guia de compatibilidade, objeto do presente projeto. Alguns aspectos práticos já foram discutidos com o pessoal técnico da *Wobben*. Basicamente, sugere-se a instalação de base metálica no tanque do transformador protegido, de modo que os pára-raios sejam montados próximos às buchas de alta tensão. Uma análise teórica será feita no guia, para mostrar que o nível de proteção dos pára-raios assim instalados é melhorado, otimizando a proteção do transformador quando eles operam por descarga direta ou indireta na rede de alta tensão.

É importante lembrar que o item 2.4 ilustra de forma clara a necessidade de integrar informações referentes à proteção e manutenção de componentes relacionados com a proteção de usinas eólicas contra descargas atmosféricas (objetivo central do guia em elaboração). Muitos detalhes são do conhecimento de especialistas em sistemas de distribuição, fabricantes de pára-raios, pessoal de operação e manutenção das concessionárias que operam no litoral, laboratórios de testes, etc, porém, a informação objetiva para evitar este tipo de problema ainda não está contida nas normas brasileiras sobre pára-raios de distribuição.

### 2.5 PROTEÇÃO CONTRA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

O volume a ser protegido numa instalação deve ser dividido em Zonas de Proteção de Descargas Atmosféricas - LPZ (*Lightning Protection Zone*) em função das diferentes severidades de LEMP (*Lightning Electromagnetic Pulse*) para designar pontos de conexão nas zonas de fronteira.

As zonas serão caracterizadas por mudanças significativas de condições eletromagnéticas em seus limites.

### 2.5.1 DEFINIÇÕES DAS ZONAS DE PROTEÇÃO

**LPZ 0A:** Zona onde os componentes são sujeitos a descargas diretas até valores da corrente de descarga plena. O campo eletromagnético que aqui ocorre não é atenuado.

**LPZ 0B:** Zona onde os componentes não são sujeitos a descargas diretas, mas o campo eletromagnético que ocorre não é atenuado.

**LPZ 1:** Zona onde os componentes não são sujeitos a descargas diretas e onde as correntes sobre todas as partes condutivas nesta zona são reduzidas comparadas com as LPZ 0A e LPZ 0B. Nesta zona o campo eletromagnético pode estar também atenuado, dependendo das providências tomadas com a blindagem

**Zonas subseqüentes** (LPZ 2, etc). Se uma redução ulterior das correntes conduzidas e ou do campo magnético é requerida, zonas subseqüentes deverão ser introduzidas. Os requisitos para essas zonas deverão ser selecionados de acordo com as zonas ambientais requeridas do sistema a ser protegido.

Em resumo, zonas identificadas com números maiores, têm parâmetros de solicitações eletromagnéticas menores.

Nas fronteiras das zonas individuais, uma conexão de todas as penetrações metálicas deverá ser providenciada e medidas de blindagem deverão ser instaladas.

Nota: As conexões nas fronteiras entre LPZ 0A, LPZ 0B e LPZ 1 são definidas em 3.1 da IEC 1024-1. Os campos eletromagnéticos no interior da estrutura são influenciados por aberturas tais como janelas, por correntes em condutores metálicos (por exemplo, barras, blindagens de cabos e tubos) e pelo roteamento de condutores.

O princípio da divisão de um volume a ser protegido em diferentes LPZs, para o caso de uma usina eólica é mostrado na figura 4. Esta figura apresenta detalhes das zonas de proteção de uma instalação típica de usina eólica. Em cada um destas zonas e suas regiões de fronteira são empregados dispositivos de proteção com características específicas, de acordo com a classificação mostrada em 2.5.2.

O processo completo da descarga atmosférica está sendo compreendido gradualmente. Basicamente sabe-se que estas podem ser de polaridade positiva ou negativa e que são compostas por várias descargas: a primeira, várias subseqüentes e uma de longa duração. Alguns parâmetros têm sido estabelecidos como referência e permitem definir um nível de proteção para especificar as proteções da instalação. A Tabela 1 mostra os parâmetros atualmente padronizados para primeira descarga, conforme IEC 1312-1.

TABELA 1 – Parâmetros da primeira descarga de corrente da descarga atmosférica

Parâmetros de Corrente	Nível de Proteção		
	I	II	III – IV
Corrente de pico $I$ (kA)	200	150	100
Tempo de frente $T_1$ ( $\mu$ s)	10	10	10
Tempo até o meio valor $T_2$ ( $\mu$ s)	350	350	350
Carga da descarga de curta duração $Q_s$ <sup>1)</sup> (C)	100	75	50
Energia específica $W/R$ <sup>2)</sup> (MJ/ $\Omega$ )	10	5,6	2,5
1) Uma vez que parte substancial da carga total $Q_s$ está contida na primeira descarga, considera-se que a carga de todas as descargas de curta duração está contida nos valores dados.			
2) Como parte substancial da energia específica $W/R$ está contida na primeira descarga, considera-se que a energia específica de todas as descargas de curta duração está contida nos valores dados.			

### 2.5.2 CLASSIFICAÇÃO DOS DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO CONTRA SURTO – SPDs

Os dispositivos para proteção contra surtos, SPDs, são classificados pela IEC 61643-1 em 3 tipos ou classes diferentes, definidas a seguir. O modo de aplicação dos SPDs pertencentes a cada uma destas classes será melhor detalhado no guia de compatibilidade em desenvolvimento.

- Classe I

SPDs para proteção contra descargas atmosféricas. Estes dispositivos são testados por impulso de corrente padronizado com forma de onda 10/350  $\mu$ s.

- Classe II

SPDs instalados para proteção contra surtos em instalações de consumidores de uma área de distribuição. Estes dispositivos são testados por impulso de corrente padronizado com forma de onda 8/20  $\mu$ s.

- Classe III

SPDs instalados para proteção contra surtos em instalações com alimentação externa ou circuitos com ramais longos. São testados por impulso de corrente padronizado com forma de onda 8/20  $\mu$ s e/ou impulso padronizado de tensão com forma de onda 1,2/50  $\mu$ s.

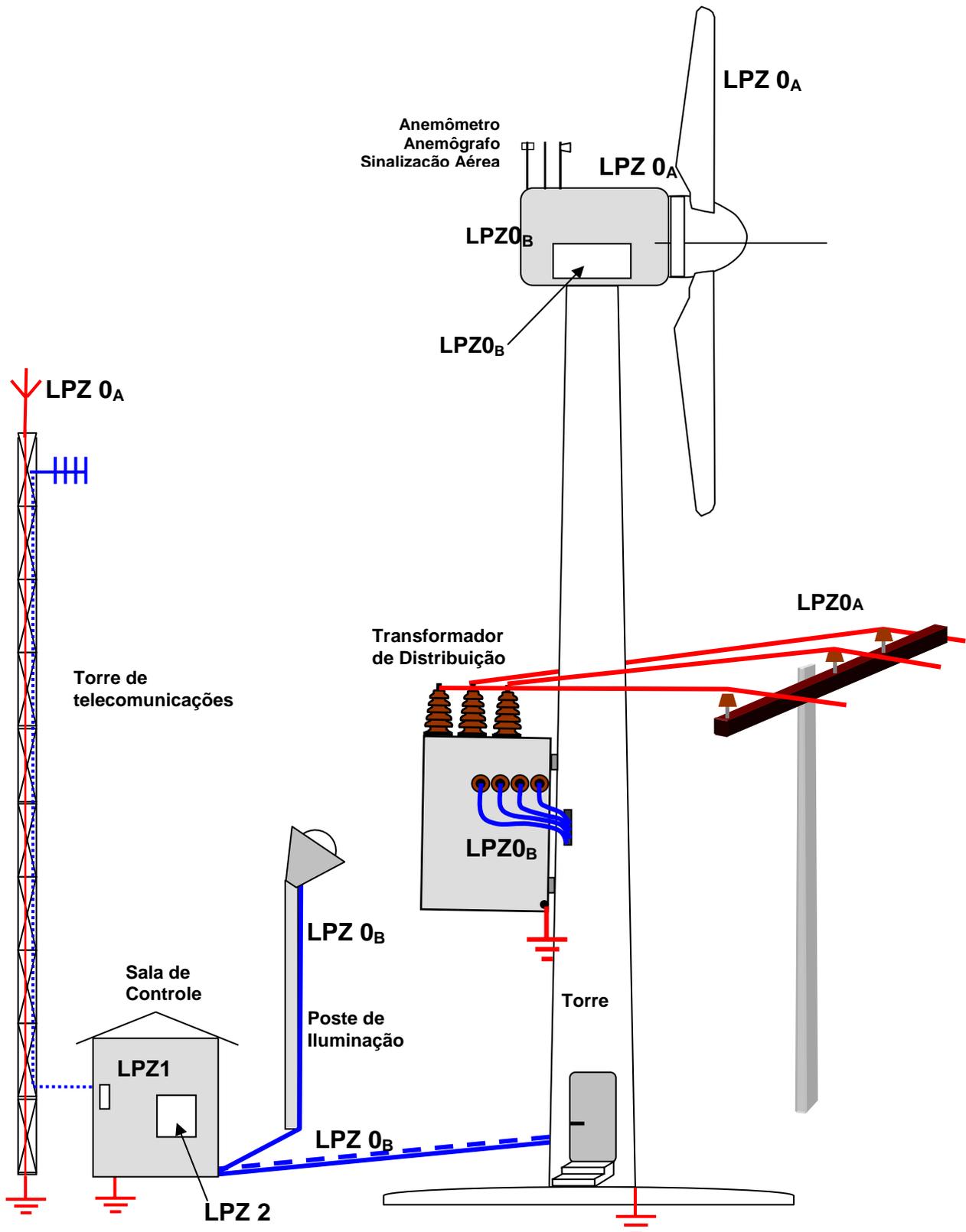


FIGURA 4 – Aplicação da filosofia de proteção por zonas para uma usina eólica com um gerador

### 3. CONCLUSÕES

#### 3.1 LEVANTAMENTO DE DADOS NO CAMPO E NO LABORATÓRIO

O levantamento de dados de campo iniciado nas usinas eólicas operando no Brasil permitiu obter informações importantes referentes à proteção destas instalações contra descargas atmosféricas que levarão ao detalhamento de itens como o da especificação e instalação de pára-raios e de supressores de surto para corrente e tensão. O caso dos pára-raios para ambientes de alta salinidade é um exemplo.

Os ensaios realizados no Lactec, descritos no item 2, permitiram avaliar tecnologias recentes aplicadas a supressores de surto bem como suas limitações em função do modo de instalação. Algumas das informações obtidas não aparecem com clareza em catálogos de fabricantes e serão incluídas no guia em desenvolvimento.

#### 3.2 DESENVOLVIMENTO DO GUIA DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA PARA USINAS EÓLICAS

A análise dos dados apresentados neste relatório permite concluir que é muito importante que o Guia de Compatibilidade proposto neste projeto inclua detalhes complementares aos habitualmente explicitados nas normas atuais sobre proteção de grandes instalações contra descargas atmosféricas.

Para ilustrar isto, pode-se citar o modo de montagem dos pára-raios que protegem os transformadores para minimizar a tensão aplicada ao enrolamento de alta tensão do transformador durante a operação dos pára-raios.

É importante lembrar que, mesmo não havendo descargas diretas nos transformadores montados normalmente nas torres das respectivas máquinas, os pára-raios podem operar por sobretensões originadas por descargas indiretas próximas. Portanto, estas medidas, bem como medidas complementares, como o uso de blindagem entre os enrolamentos de alta e baixa tensão destes equipamentos podem também ser recomendadas na especificação nos casos em que as avarias em estes equipamentos (ou em componentes ligados aos circuitos de baixa tensão) estejam relacionadas com a transferência de surto do enrolamento de alta tensão para o de baixa tensão. Sabe-se que esta transferência, em condições limites é predominantemente capacitiva, podendo ser prevista a partir dos parâmetros medidos nos ensaios do transformador, na fábrica ou no campo, e motivou o detalhamento de um capítulo especial para o Guia proposto. (Ver item 7.5 do Sumário apresentado em 2.1).

### 4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) Grupo de Trabalho 36.04 do Cigré - Compatibilidade Eletromagnética em Usinas e Subestações. Guia sobre CEM em Usinas e Subestações. Dezembro, 1997.

(2) IEC TS 1312-1-2-3-4. *Protection Against Lightning Electromagnetic Impulse. General Principles (1995) - Shielding of structures, bonding inside structures and earthing (1999) - Requirements of surge protective devices (2000) - Protection of equipment in existing structures (1998).*

(3) IEC 61024-1/1-1/1-2. *Protection of Structures Against Lightning. General Principles - Selection of protection, levels for lightning protection systems - Design, installation, maintenance and inspection of lightning protection systems.* (1990)

(4) IEC TR 61400-24, Ed 1.0. *Wind turbine generator systems - part 24: Lightning protection*, 2002.

(5) *Fritzemeier, Bernd; Schimanski, Joachim; Wetter, Martin. Lightning and surge voltage protection in wind-powered systems, with particular reference to requirements for lightning arresters for 400/690 V systems. 8° Energy Forum of the University of Applied Sciences, Kiel, 2001.*

(6) *Sorensen, T.; Brask, M.H.; Grabau P.; Olsen, K.; Olsen, M.L. Lightning damages to power generating wind turbines. 24° ICLP, International Conference on Lightning Protection, Birmingham, 1998.*

(7) *McNiff, Brian. Wind Turbine Lightning Protection Project 1999-2001. NREL/SR-500-31115 Subcontractor Report, Colorado, 2002.*

(8) *Phoenix Contact. "Surge Voltage Protection – Trabtech". Germany, 2003*

(9) *Gamboa, L., R.; Ragaglio, M, A.; Zanin, W. "Desenvolvimento de Guia de Compatibilidade para aplicação em Usinas Eólicas". Relatório anual de projeto. Curitiba, 2004.*