

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA  
E TECNOLOGIA DE SÃO PAULO  
*CAMPUS SÃO PAULO*

LUCAS DE OLIVEIRA E SILVA PINTO

**AUTOMAÇÃO DO SISTEMA DE AJUSTE DA TENSÃO DE ENSAIO DIELÉTRICO  
SOB INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DAS CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS**

São Paulo

2014

LUCAS DE OLIVEIRA E SILVA PINTO

**AUTOMAÇÃO DO SISTEMA DE AJUSTE DA TENSÃO DE ENSAIO DIELÉTRICO  
SOB INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DAS CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS**

Dissertação apresentada ao  
Instituto Federal de São Paulo para  
obtenção do Título de Mestre em  
Automação e Controle de  
Processos

Área de Concentração:  
Engenharia de Automação e  
Controle de Processos

Orientador:  
Prof. Dr. Eduardo Alves da Costa

São Paulo

2014

P728a Pinto, Lucas de Oliveira e Silva.  
Automação do sistema de ajuste da tensão de ensaio dielétrico  
sob influência da variação das condições atmosféricas / Lucas de  
Oliveira e Silva Pinto. São Paulo: [s.n.], 2014.  
83 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Alves da Costa.

Dissertação (Mestrado Profissional em Automação e Controle de  
Processos) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de  
São Paulo, IFSP, 2014.

1. Ensaio dielétrico      2. Laboratório de alta tensão  
3. Painel elétrico      4. Automação      5. Condições atmosféricas  
I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo.  
II. Título

CDU 681.0



## ATA DE EXAME DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Nome do Programa: **Mestrado Profissional em Automação e Controle de Processos**

Nome do(a) Aluno(a) : Lucas de Oliveira e Silva Pinto

Nome do Orientador: Prof. Dr. Eduardo Alves da Costa

Nome do Co-orientador:

Título do Trabalho: "Automação do sistema de ajuste da tensão de ensaio dielétrico sob influência da variação das condições atmosféricas"

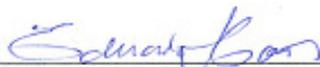
Abaixo o resultado de cada participante da Banca Examinadora

Nome completo dos Participantes Titulares da Banca	Sigla da Instituição	Aprovado / Não Aprovado
Prof. Dr. Eduardo Alves da Costa – Orientador	IFSP – SPO	APROVADO
Prof. Dr. Ênio Carlos Segatto – Membro Interno	IFSP – SPO	APROVADO
Dr. José Geraldo Barreto Monteiro de Andrade– Membro Externo	ABB	APROVADO
Nome completo dos Participantes Suplentes da Banca	Sigla da Instituição	Aprovado / Não Aprovado
Prof. Dr. Thomas Edson Filgueiras Filho – Membro Interno	IFSP - SPO	
Prof. Dra. Jussara Pimenta Matos – Membro Externo	IFSP – GRU	

Considerando-o:  APROVADO  
 NÃO APROVADO

Assinaturas

São Paulo, 27 de agosto de 2014

  
\_\_\_\_\_  
Presidente da Banca

  
\_\_\_\_\_  
Membro Interno

  
\_\_\_\_\_  
Membro Externo

Observações:

ENTREGAR uma versão revisada

À minha família

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador Dr. Eduardo Costa, pelos ensinamentos repassados e ajudas providenciais.

À minha mãe Fátima, pela educação a mim ministrada e total incentivo à continuidade dos meus estudos e ao meu pai Lucílius, pela paciência durante as longas horas de discussão sobre o tema do trabalho.

Ao meu irmão Jonas pelo auxílio nos assuntos técnicos.

À empresa ABB que disponibilizou todos os recursos necessários para realização deste trabalho.

Aos funcionários da ABB que auxiliaram e motivaram em todas as etapas do projeto.

## SUMÁRIO

**LISTA DE FIGURAS**

**LISTA DE TABELAS**

**LISTA DE ABREVIATURAS**

**LISTA DE SÍMBOLOS**

**RESUMO**

**ABSTRACT**

<b>CAPÍTULO 1- Introdução .....</b>	<b>16</b>
1.1- Objetivos do Trabalho .....	20
1.2- Justificativa .....	20
1.3- Contribuição do Trabalho .....	21
1.4- Metodologia .....	21
1.5- Sumário Estruturado .....	21
1.6- Conceitos Básicos .....	23
<b>CAPITULO 2- Revisão Bibliográfica .....</b>	<b>38</b>
<b>CAPITULO 3- O Ensaio Dielétrico.....</b>	<b>42</b>
3.1- Procedimento de ensaio: tensão aplicada .....	42
3.2- Condições normalizadas para realização dos testes dielétricos .....	42
3.3- Método para cálculo dos fatores de correção $K_t$ .....	43

<b>CAPITULO 4- Fator de correção <math>K_t</math></b> .....	46
4.1- Modelo do sistema para cálculo do fator de correção $K_t$ .....	46
4.2- Validação do modelo para cálculo do fator de correção $K_t$ .....	49
4.3- Aplicação do modelo na análise da influência da variação das condições atmosféricas no cálculo do fator de correção .....	50
<b>CAPÍTULO 5- Aplicação do modelo na construção do controlador automático de tensão de teste</b> .....	55
5.1- Estação de teste dielétrico em linha de montagem de painéis elétricos .....	55
5.2- Projeto de Controlador Automático de Tensão de Ensaio (CATE) .....	60
<b>CAPÍTULO 6- Conclusões</b> .....	69
6.1- Conclusões .....	69
6.2- Propostas para futuros trabalhos .....	71
<b>Referências bibliográficas</b> .....	72
<b>ANEXOS</b>	
Anexo A – Relatório de Teste 1VLR017155 .....	77
Anexo B – Valores mensais das condições atmosféricas .....	79

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama Unifilar Sistema Elétrico Média Tensão .....	17
Figura 2: Oscilografia da sobretensão em sistema trifásico com falha de uma fase para terra ....	18
Figura 3: Sobretensão temporária com sistema não aterrado .....	18
Figura 4: Sobretensão em sistema não aterrado com terra .....	19
Figura 5: Classes, formas de onda de sobretensão padrão e padrão de testes de tensão aplicada	24
Figura 6: Material isolante polarizado com campo elétrico.....	26
Figura 7: Formação de avalanche de elétrons.....	29
Figura 8: Curva de Paschen obtida para hélio, neônio, argônio, hidrogênio e nitrogênio.....	30
Figura 9: Fatores que influenciam na disrupção.....	31
Figura 10: Disrupção em sólidos .....	32
Figura 11: Diagnóstico dielétrico – arvorejamento .....	32
Figura 12: Distância de isolamento em ar e distância de escoamento.....	33
Figura 13: Gráfico da suportabilidade de Sf6 e ar em função da pressão absoluta .....	34
Figura 14: Descarga nos centelhadores.....	41
Figura 15: Valores dos expoentes $m$ e $w$ .....	43
Figura 16: $k$ em função da relação da umidade absoluta, $h$ , com a densidade relativa do ar, $\delta$ ...	44
Figura 17: Modelo do sistema no Simulink com os valores utilizado na validação segundo IEC 60060-1 .....	47
Figura 18: Diagrama de interação entre parâmetros.....	48
Figura 19: Variação mensal de $K_t$ em função da posição geográfica .....	51
Figura 20: Variação diária de $K_t$ .....	53
Figura 21: Variação $L$ .....	54
Figura 22: Painel elétrico trifásico.....	55
Figura 23: Linha de montagem de painéis elétricos da ABB .....	56
Figura 24: WHV- Estação de teste de tensão aplicada em linha de montagem de painéis elétricos .....	56
Figura 25: Ilustração da proposta de automação do processo de teste na WHV .....	58
Figura 26: Descrição de funcionamento do sistema CATE.....	60
Figura 27: Posição de um elemento piezo-resistivo em um diafragma de silício.....	62

Figura 28: Circuito equivalente simplificado do sensor capacitivo de umidade .....	63
Figura 29: Precisão do sensor à 25°C para medição da umidade relativa.....	64
Figura 30: Placa de aquisição <i>BeagleBone Weather Cape</i> .....	65
Figura 31: Curva característica Torque x Pulso.....	66
Figura 32: Representação do CATE .....	67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Constante e Rigidez dielétrica dos materiais .....	27
Tabela 2: Padronização no nível de isolamento .....	35
Tabela 3: Distâncias mínimas x tensão nominal da instalação .....	35
Tabela 4: Valores dos expoentes, $m$ para a correção da densidade do ar e $w$ para correção de umidade, em função do parâmetro $g$ .....	44
Tabela 5: valores de $k$ em função de $h$ e $\delta$ .....	45
Tabela 6: Condição atmosférica diária em São Paulo– Brasil (altitude 792m) .....	53
Tabela 7: Comparativo entre o processo atual e sistema proposto (CATE) .....	59
Tabela 8: Condição atmosférica anual em Brno – República Tcheca (altitude 241m) .....	79
Tabela 9: Condição atmosférica anual em Brno com temperatura máxima – República Tcheca (altitude 241m) .....	80
Tabela 10: Condição atmosférica anual em Brasília – Brasil (altitude 1160m) .....	81
Tabela 11: Condição atmosférica anual em Säntis – Suíça (altitude 2490m) .....	82
Tabela 12: Condição atmosférica fixa com variação da distância de isolamento $L$ em São Paulo – Brasil (altitude 792m) .....	83

## LISTA DE ABREVIATURAS

IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
CATE	Controlador Automático de Tensão de Ensaio
NR	Norma Regulamentadora
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CENDAT	Centro de Estudos em Descargas Atmosféricas e Alta Tensão
IEE/USP	Instituto de Eletrotécnica e Energia / Universidade de São Paulo
Sf6	Hexafluoreto de Enxofre
MMC	Método de Monte Carlo
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
CIGRÉ	<i>Conseil International des Grands Réseaux Électriques</i>
CESI	<i>Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano</i>
NCDC	<i>National Climatic Data Center</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
WHV	<i>Workstation High Voltage</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$K_t$	Fator de correção da tensão de ensaio
$P$	Probabilidade
$U_r$	Tensão de ensaio
$U_{50}$	Estimativa da tensão que não provoca disrupção em 50% das aplicações
$U_{90}$	Estimativa da tensão que não provoca disrupção em 90% das aplicações
$S$	Estimativa do desvio padrão
$E$	Campo elétrico
$D$	densidade de fluxo elétrico
$\epsilon$	Permissividade do meio
$K$	Constante dielétrica relativa
$\sigma$	Condutividade
$K_c$	Fator de coordenação
$U_0$	Tensão de referência do ensaio
$t_0$	Temperatura de referência
$b_0$	Pressão de referência
$h_0$	Umidade absoluta de referência
$t$	Temperatura de ensaio
$b$	Pressão de ensaio
$h$	Umidade absoluta de ensaio
$K_1$	Fator de correção da densidade do ar
$K_2$	Fator de correção da umidade
$L$	Comprimento de descarga
$m$	Expoente para a correção da densidade do ar

$w$       Expoente para correção de umidade

$U_s$      Tensão de ensaio

## RESUMO

Todos os equipamentos elétricos aplicados em sistemas de alta tensão são submetidos à testes dielétricos como rotina pelo fabricante e de acordo com as prescrições das normas *International Electrotechnical Commission* (IEC) 60694 e IEC 60060-1. Estas normas preveem a realização de testes dielétricos os quais consistem na aplicação de significativos gradientes de tensão sobre as partes isolantes do equipamento, no sentido de verificar a qualidade destes materiais e dos processos aplicados na fabricação. A execução destes testes deve ser realizada rigorosamente conforme procedimentos estabelecidos na norma do equipamento completamente montado como na condição de serviço e com as superfícies isolantes limpas. Estes procedimentos requerem ajustes nos valores da intensidade da tensão de ensaio, decorrentes da variação das condições atmosféricas do local de ensaio. Neste trabalho é apresentada a análise da influência das condições atmosféricas na tensão de ensaio dielétrico em equipamentos elétricos. Um sistema automático para ajuste e correção da tensão de ensaio é modelado, sendo apresentada uma aplicação industrial para este sistema. Este sistema consiste de sensores para medição das variáveis de entrada, um controlador de posição formado por um motor de passo acoplado a um variador de tensão para ajuste da variável de saída (tensão de ensaio) a ser aplicada sobre o objeto de teste (painel elétrico trifásico). O sistema de controle foi modelado considerando como variáveis de entrada as grandezas pressão, temperatura e umidade, as quais são utilizadas para cálculo do fator de correção  $K_t$  e atuando sobre um motor de passo do regulador de tensão e que ajusta linearmente a variável de saída (tensão de ensaio). O modelo utilizado permite a realização dos testes dielétricos com a aplicação rigorosa dos critérios da norma bem como a realização destes testes de forma uniforme. Com a implementação do controlador automático de tensão de ensaio (CATE) na linha de produção será possível reduzir significativamente os tempos de ensaio, assegurar a homogeneidade e qualidade dos resultados.

Palavras chave: ensaio dielétrico, laboratório de alta tensão, painel elétrico, automação, condições atmosféricas.

## ABSTRACT

All electrical equipment used in high voltage systems are undergoing routine dielectric tests by the manufacturer and accordance with International Electrotechnical Commission (IEC) 60694 and IEC 60060-1 standards. The standard requires the execution of tests which consist in applying significant voltage gradients on the insulating parts of the equipment in order to check the quality of materials and processes used in manufacturing. These tests should be performed strictly according to procedures established in the standard of equipment fully assembled condition as in service and the sealing surfaces clean. These procedures require adjustments in the values of the intensity of the test voltage, resulting from varying atmospheric conditions of the test site. In this work the analysis of the influence of atmospheric conditions on the dielectric test voltage electrical equipment is presented. An automatic system for adjustment and correction of the test voltage is modeled, and presented an industrial application for this system. This system consists of sensors for measurement of the input variables, one position controller based on a stepper motor coupled to a variable voltage adjustment of the output variable (test voltage) to be applied to the test object (three-phase electrical switchgear). The control system was modeled considering as input variables pressure, temperature and humidity which calculates a correction factor ( $K_i$ ) acting on step motor of voltage regulator which adjusting the output variable (test voltage). The modeling used allows dielectric tests in order to ensure the strict application of the criteria of the standard as well as conducting these tests safely and uniformly. With the implementation of the automatic control of test voltage system (CATE) on the production line will be possible to reducing test times, ensuring the consistency and quality of results .

Keywords: dielectric test, high voltage lab, switchgear, automation, atmospheric conditions.

## Capítulo 1- Introdução

Os equipamentos elétricos são frequentemente submetidos a sobretensões, as quais podem ser classificadas em função de suas formas de onda em: temporárias, de manobra ou atmosféricas. Para se avaliar o desempenho destes equipamentos às sobretensões é necessária a realização de testes dielétricos.

Neste trabalho será abordado especificamente as questões relativas as sobretensões temporárias. Por sobretensões temporárias, consideram-se aquelas produzidas durante alguma operação no sistema elétrico que cause uma elevação da tensão nominal (na frequência do sistema) e de relativa duração.

Desde os anos 30, a avaliação do desempenho das isolações frente às sobretensões temporárias é feita através do ensaio de tensão suportável a frequência industrial. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e a Comissão Eletrotécnica International NBR IEC 60060-1 definem os requisitos relativos a especificação e ensaios dos sistemas elétricos do ponto de vista de isolamento. O Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo (IEE/USP), através do Centro de Estudos em Descargas Atmosféricas e Alta Tensão (CENDAT), possui uma linha experimental para estudo das sobretensões. Em vários anos de coleta de dados, há um número significativo de registros de ocorrências de sobretensões nos equipamentos elétricos. Adicionalmente Piantini e Cooray (2003) apresentaram estudos a respeito de sobretensões desenvolvidos em equipamentos através de um modelo em escala reduzida. Medições de sobretensões em equipamentos têm sido também realizadas por outros grupos de pesquisa (MASTER , 1984; PIANTINI, 2008).

Diversos estudos teóricos e experimentais foram e continuam a ser realizados com o objetivo de se conhecer as características das sobretensões (FERNANDEZ, PIANTINI, JANISZEWSKI, 1998). Em geral estas sobretensões ocorrem em 60 Hz e tem duração inferior a um minuto.

Segundo Cerretti (2012) as causas mais comuns de ocorrência de sobretensões temporárias são rejeição de carga e curto-circuito. Sendo definidos como:

a) Rejeição de carga: Um sistema elétrico típico representado na Figura 1 (a) está trabalhando com determinada carga sob tensão nominal, com a tensão da fonte superior a nominal ajustada para compensar a respectiva queda de tensão entre carga e fonte. Em certo momento, pode ocorrer um desligamento de cargas e a tensão da fonte (superior a nominal) passa a ser aplicada sobre o sistema em vazio conforme Figura 1 (b). Neste momento deve existir a ação dos reguladores de tensão que reduzem a tensão da fonte para o nível nominal. Durante este período, pode-se afirmar que o sistema foi submetido a uma sobretensão temporária.

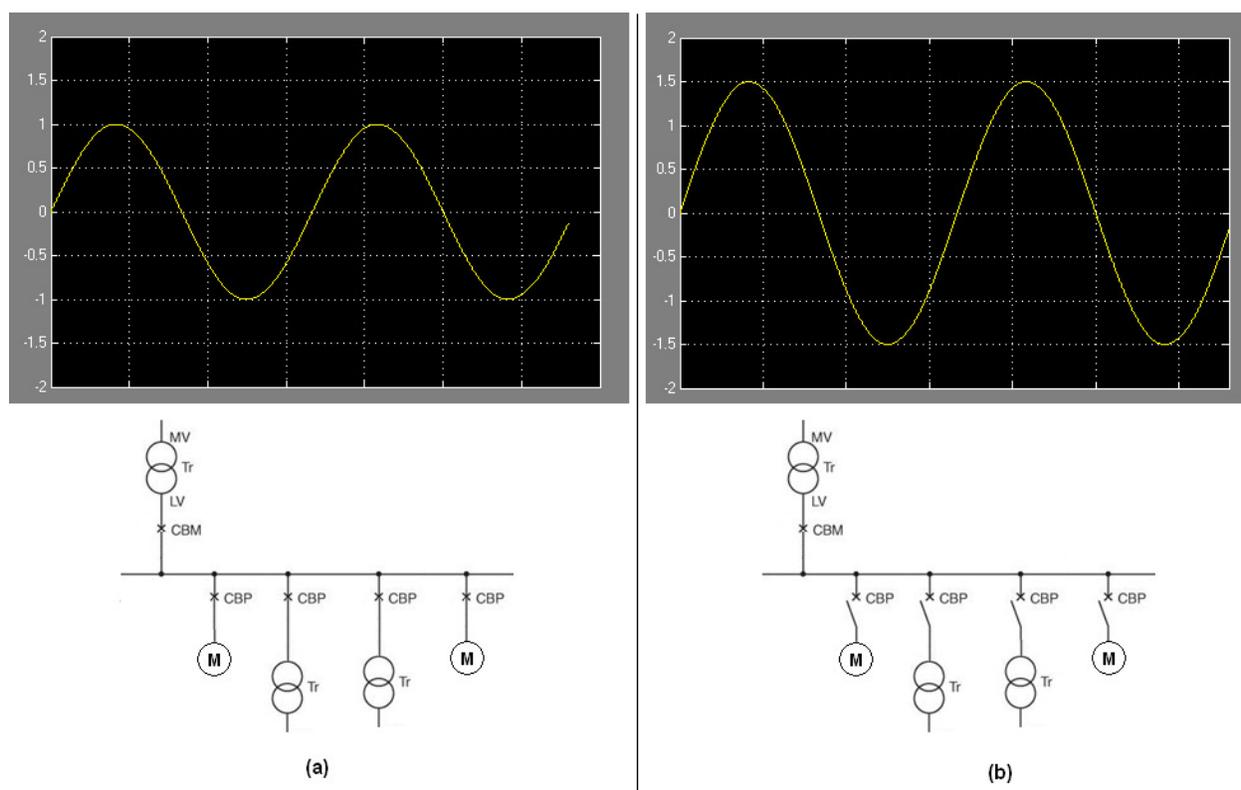


Figura 1: Diagrama Unifilar Sistema Elétrico Média Tensão

b) Curto-circuito: Na Figura 2 é apresentada a oscilografia de um caso de uma falha de uma fase para terra no sistema elétrico.

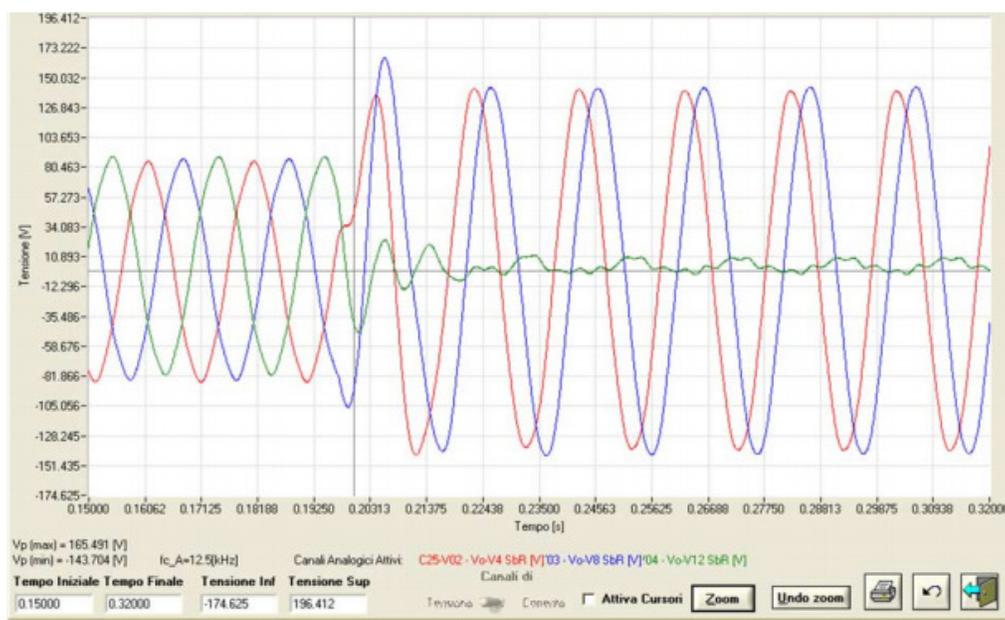


Figura 2: Oscilografia da sobretensão em sistema trifásico com falha de uma fase para terra

(Fonte: CERRETTI, 2012)

Dependendo da forma com que o sistema é aterrado, ocorre um deslocamento do ponto de neutro da rede. Desta forma as tensões fase para terra das fases não defeituosas são superiores a nominal. Os vetores de sobretensão devido falta à terra são ilustrados nas Figura 3 e Figura 4.

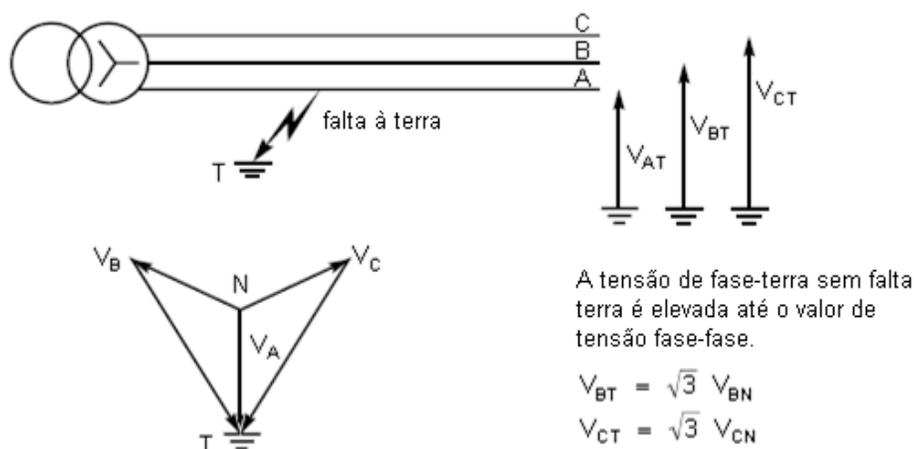


Figura 3: Sobretensão temporária com sistema não aterrado

(Fonte: FULCHIRON, 1995)

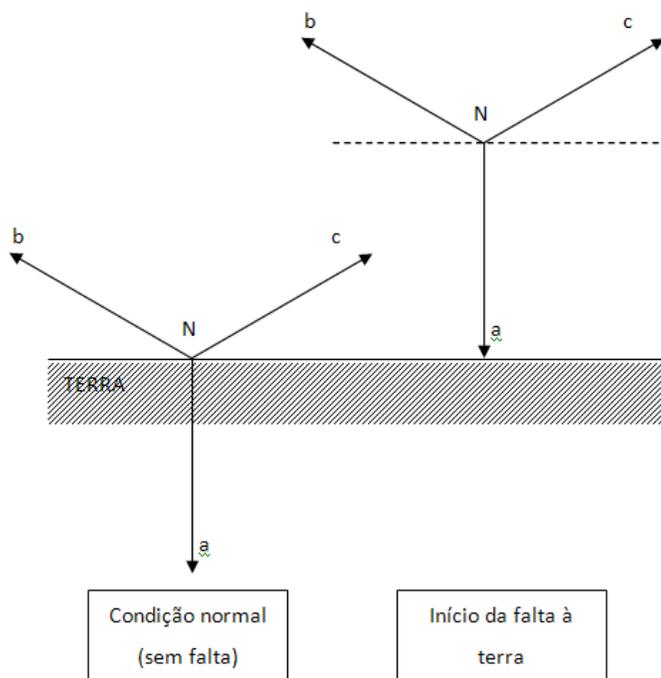


Figura 4: Sobretensão em sistema não aterrado com terra

(Fonte: FULCHIRON, 1995)

O conhecimento do sistema elétrico e a avaliação do comportamento das isolações quando submetidas a sobretensões é de fundamental importância para se estimar o desempenho dos equipamentos. O conhecimento do modo como os equipamentos, particularmente os isoladores, se comportam frente a existência de sobretensão é essencial para uma estimativa da avaliação do desempenho desses equipamentos. Conforme a NBR IEC 60694 os ensaios dielétricos são a maneira de garantir que os equipamentos suportam os efeitos das sobretensões durante sua vida útil.

## 1.1- Objetivos do Trabalho

O objetivo do trabalho foi apresentar o desenvolvimento de um sistema de ajuste automático da tensão de ensaio dielétrico, bem como analisar a influência das variações das condições atmosféricas sobre os valores de tensão utilizados nos ensaios dielétricos.

## 1.2- Justificativa

O que motivou este trabalho foi a análise e identificação das causas do elevado índice de reprovação de painéis elétricos trifásicos durante os ensaios dielétricos de rotina no período de janeiro à dezembro de 2011. Através da análise dos relatórios do departamento de controle de qualidade da empresa ABB percebeu-se que dos equipamentos reprovados, a grande maioria era aprovado posteriormente no ensaio dielétrico sem modificação de qualquer equipamento pertencente à estrutura do painel elétrico.

O departamento de engenharia identificou pelos registros estatísticos de falhas que uma quantidade significativa dos painéis produzidos eram reprovados no primeiro teste dielétrico.

Verificou-se pela análise dos registros que as unidades reprovadas no primeiro teste eram removidas da linha de produção e o teste era repetido em um turno posterior. Ao ser repetido o ensaio sobre a mesma unidade sem qualquer modificação o resultado era positivo.

Identificou-se também pelos registros que o valor da tensão de suportabilidade para o ensaio estabelecido conforme norma IEC 60060-1 era aplicado sem nenhuma correção. Ressalta-se que a norma apenas descreve o critério e condições de correção do valor de ensaio, porém não obriga a aplicação das correções, ficando a critério do fabricante e cliente estabelecerem a aplicação do fator de correção.

Após a análise de falhas, estabeleceu-se uma correlação entre as reprovações e mudanças das condições atmosféricas no local de teste em diferentes períodos do dia. Como ação corretiva passou-se a monitorar continuamente as condições atmosféricas no local do teste, calcular e aplicar um fator de correção na tensão de teste.

Após a adoção desta medida corretiva, a reprovação deixou de ser significativa.

### 1.3- Contribuição do trabalho

Com os resultados e as análises apresentadas neste trabalho e com a especificação do sistema de ajuste da tensão de ensaio dielétrico será possível a implementação do controlador automático de tensão de ensaio (CATE) na linha de produção, garantido assim que os critérios da norma sejam respeitados assegurando qualidade do processo.

### 1.4- Metodologia

Para análise da influência das condições atmosféricas na tensão de ensaio dielétrico foi elaborado um modelo matemático baseado nas condições normalizadas da IEC 60060-1 utilizando *toolbox* do Simulink (aplicativo do MATLAB®). Simulações foram realizadas, variando-se as condições atmosféricas e considerando localidades com características significativamente divergentes e relevantes ao estudo. Desta forma, foi possível verificar a sensibilidade das variações atmosféricas sobre o fator de correção da tensão de ensaio, bem como especificar os sensores e atuadores do projeto de automação do sistema de ajuste da tensão.

### 1.5- Sumário Estruturado

Este trabalho envolve o projeto de automação do sistema de ajuste de tensão de ensaio dielétrico (CATE) e o estudo da influência das condições atmosféricas em equipamentos elétricos.

No **capítulo 1** são apresentados os objetivos, as justificativas, as contribuições e a metodologia empregada neste projeto.

A revisão bibliográfica com a evolução histórica da aplicação da correção da tensão de ensaio em função das condições atmosféricas é apresentada no **capítulo 2**.

O procedimento de realização do ensaio dielétrico, bem como as condições normalizadas para realização dos testes e o método para cálculo dos fatores de correção, são apresentados no **capítulo 3**.

No **capítulo 4** é descrito o modelo utilizado na simulação e a validação do mesmo. Também é apresentada a análise da influência das variáveis atmosféricas no cálculo dos fatores de correção.

Uma aplicação prática do trabalho para automatização do controlador automático de tensão de ensaio é descrita no **capítulo 5**.

As considerações e conclusões do trabalho com relação aos resultados obtidos estão descritas no **capítulo 6**.

Finalmente, nos anexos estão apresentadas informações que complementam e esclarecem este projeto. No anexo A tem-se informações sobre o ensaio de tensão aplicada. No anexo B são apresentados os valores mensais das condições atmosféricas nos locais escolhidos como referência.

## 1.6- Conceitos Básicos

### 1.6.1- Sobretensões no sistema elétrico

#### 1.6.1.1 Origem e classificação das sobretensões

Na norma IEC 60071-1 (2006) as sobretensões são classificadas por parâmetros como intensidade, duração e forma de onda e de acordo com os efeitos que podem causar no isolamento e nos dispositivos de proteção.

As sobretensões dependendo destes parâmetros podem ter diversas origens:

- a) sobretensão permanente (na frequência do sistema): originada por mudança na condição normal de operação do sistema;
- b) Sobretensão temporária: pode ser originada por falta (curto-circuito), chaveamento (exemplo: rejeição de carga), condições de ressonância, não linearidades (ferro-ressonância) ou pela combinação destas;
- c) Sobretensão com frente de onda lenta: originada em faltas, operações de chaveamento ou surtos atmosféricos diretos em linhas;
- d) Sobretensões com frente de onda rápida: podem originar-se de operações e chaveamento, surtos atmosféricos ou faltas;
- e) Sobretensões com frente de onda muito rápidas: podem ser originadas por faltas ou chaveamentos em subestações isoladas a gás;
- f) Sobretensões combinadas: Podem ter qualquer origem como as indicadas. Ocorrem entre as fases de um sistema (fase-fase) ou entre as mesmas fases de partes de um sistema.

Em geral, todas as classes de sobretensão podem existir em todas as faixas de tensão nominal. Entretanto a experiência tem mostrado que certas sobretensões são de maior importância em determinadas faixas de tensão. Em qualquer caso, deve ser notado que o conhecimento destas sobretensões é obtido pela análise de modelos adequados do sistema (IEC 60071-1, 2006).

### 1.6.1.2- Determinação das sobretensões

As sobretensões podem ser determinadas em amplitude, forma e duração. Uma análise do sistema deve ser realizada de forma a localizar e identificar as possíveis sobretensões.

Para cada classe de tensão, esta análise pode ser realizada levando em consideração as características do isolamento e o diferente comportamento de acordo com as características padronizadas nas respectivas normas.

A Figura 5 indica um resumo das principais sobretensões e respectivas características.

Classe	Baixa Frequência		Transitório		
	Contínuo	Temporário	Lento	Rápido	Ultra-rápido
Formas de Onda de Sobretensão					
Intervalo das Formas de Onda de Sobretensão	$f = 50 \text{ Hz}$ or $60 \text{ Hz}$ $T_1 \geq 3 \text{ 600 s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,02 \text{ s} \leq T_1 \leq 3 \text{ 600 s}$	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5 \text{ 000 } \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$T_1 \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$
Formas de Onda padrão					a
	$f = 50 \text{ Hz}$ or $60 \text{ Hz}$ $T_1^a$	$48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_1 = 60 \text{ s}$	$T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2 \text{ 500 } \mu\text{s}$	$T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	
Ensaio de Tensão Conforme Norma	a	Ensaio de Tensão Aplicada	Ensaio de Chaveamento	Ensaio de Impulso	a

<sup>a</sup> Especificado de acordo com comitê relevante

Figura 5: Classes, formas de onda de sobretensão padrão e padrão de testes de tensão aplicada

(Fonte: IEC 60071-1, 2006)

Sendo IEC 60071-1 (2006), uma sobretensão representativa pode ser caracterizada também por:

- a) Valor máximo assumido;
- b) Conjunto de valores de pico;
- c) Conjunto estatístico de valores de pico.

#### 1.6.1.3- Probabilidade de descarga elétrica

Nenhum método até o presente é disponibilizado para determinação da probabilidade de sobretensão e descarga disruptiva de um equipamento com isolamento não auto-recuperável. Todavia é assumido que a probabilidade de suportabilidade do isolamento varia de 0 a 100% do valor definido como tensão suportável. Para um isolamento auto-recuperável, a característica de suportar uma sobretensão pode ser descrita em termos estatísticos. O método para determinar a curva de probabilidade é indicado na IEC 60060-1.

##### 1.6.1.3.1- Comportamento estatístico das descargas disruptivas

A probabilidade  $P$  de uma descarga disruptiva durante um procedimento de ensaio específico, depende apenas da tensão de ensaio  $U_r$ . O comportamento do objeto sob ensaio pode ser caracterizado por uma função  $P(U)$  determinada por processos de desenvolvimento da descarga. Na prática, esta função probabilidade de descarga, pode ser representada matematicamente por uma função teórica de distribuição de probabilidade, caracterizada por pelo menos dois parâmetros. Por exemplo:  $U_{50}$  e  $S$ .  $U_{50}$  é a estimativa da tensão de suportabilidade de 50% para os quais  $P(U) = 0,5$  e  $S$  é a estimativa do desvio padrão.

A função  $P(U)$  e os parâmetros  $U_{50}$  e  $S$  podem ser estimados a partir de ensaios com um número suficiente de aplicação de tensão, desde que o comportamento do objeto sob ensaio permaneça constante (IEC 60060-1, 2010).

## 1.6.2- Coordenação do Isolamento

### 1.6.2.1- Conceitos básicos

Dielétrico é um material com comportamento isolante, que pode ser polarizado por um campo elétrico  $E$  aplicado. Quando um dielétrico é imerso em um campo elétrico, cargas elétricas não fluem através do material como acontece em um condutor, mas apenas deslocam-se de suas posições de equilíbrio média causando a polarização dielétrica (LUNA, 2006).

Devido a polarização dielétrica, as cargas positivas são deslocadas na direção do campo e as cargas negativas na direção oposta (Figura 6). Isto cria um campo elétrico interno que reduz o campo total no dielétrico.

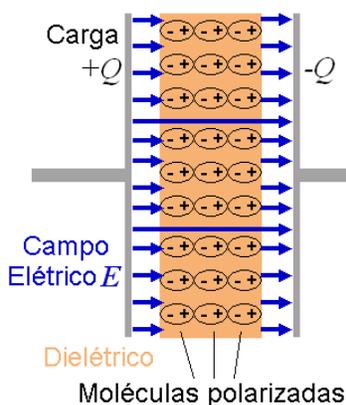


Figura 6: Material isolante polarizado com campo elétrico

(Fonte: BASSI, 2013)

Normalmente um material dielétrico se torna condutor quando é ultrapassado seu campo de ruptura na geometria associada. Esta intensidade máxima do campo elétrico  $E_{\max}$  (V/m) é chamada de rigidez dielétrica (ALONSO e FINN, 1972).

Elevando-se o campo elétrico aplicado sobre o dielétrico, o material converte-se em um condutor, porém muitas vezes indevidamente.

A constante dielétrica (permissividade dielétrica) relaciona fluxo e campo elétrico  $D = \epsilon \cdot E$  (ALONSO e FINN, 1972).

K (constante dielétrica relativa) é a relação entre a constante do material e a do vácuo ( $\epsilon_0 = 1$ )

A rigidez dielétrica é a tensão (obtida com procedimento determinado) que causa a ruptura ou perfuração do dielétrico em uma dada unidade dimensional, Tabela 1 apresenta valores de rigidez dielétrica para alguns materiais.

Tabela 1: Constante e Rigidez dielétrica dos materiais

(Fonte: LUNA, 2006)

Material	Constante dielétrica K (para o vácuo, K = unidade)	Rigidez dielétrica (kV/cm)
Ar (1 atm)	1,00054	30
Poliestireno	2,6	240
Papel	3,5	160
Óleo de transformador	4,5	120
Pirex	4,7	140
Mica	5,4	600
Porcelana	6,5	120

Segundo Alonso e Finn (1972) condutividade ( $\sigma$ ) é condutância entre fases opostas de um cubo de aresta unitária (S/cm) e resistividade  $\rho$  é resistência entre as faces opostas de um cubo de aresta unitária ( $\Omega.m$ ).

Rigidez dielétrica (V/mm) é a relação entre a tensão que causa ruptura de um material isolante e a espessura da amostra considerada. Dependendo assim do tipo de tensão, da velocidade da aplicação da tensão, geometria dos eletrodos, espessura da amostra, temperatura e fatores externos.

Rigidez dielétrica intrínseca é o maior valor de rigidez dielétrica que caracteriza um material para uma dada temperatura, em campo praticamente uniforme, que elimine qualquer forma de perturbação, ou outra descarga antes da ruptura. Onde, isolante é o material; isolação é a propriedade ou qualidade e isolamento é um número.

### 1.6.2.2-Disrupção

#### 1.6.2.2.1-Disrupção em gases

Os gases não estão livres de partículas carregadas e elétrons livres causados por irradiações ou emissões de campos. Elétrons podem ser emitidos a partir de eletrodos para campos acima de 100 a 1000 kV/cm (FULCHIRON, 1995).

A ionização é o processo pelo qual um elétron é removido a partir de um átomo, deixando-o com carga líquida positiva (íon positivo). Uma vez que um elétron na órbita mais exterior está sujeita a menor força de atração do núcleo, é o mais fácil de ser removido por qualquer processo de colisão. A energia necessária, para remover um elétron mais exterior a partir de seu estado normal, em que o átomo de uma distância para além do núcleo, é chamado de primeira energia de ionização (FULCHIRON, 1995).

Segundo Bassi (2013) a disrupção (curto-circuito entre eletrodos) de um gás é provocada por subsequentes processos de ionização. Os mecanismos de ionização são:

- a) Colisão simples e direta entre partículas;
- b) Excitação (molécula excitada por um impacto libera fóton que por sua vez excita outra molécula e provoca ionização);
- c) Impacto de dois elétrons (uma molécula previamente impactada pode ser ionizada por outro elétron com menor energia);
- d) Foto ionização;
- e) Acoplamento de elétron (formando íon negativo);
- f) Desprendimento de elétron (formando íon positivo).

#### 1.6.2.2.1.1- Formação de descargas: Pré descarga – Região (3)

Segundo Fulchiron (1995) o mecanismo de avalanche, baseia-se na geração de sucessivas avalanches secundárias para a produção de descarga. Suponha que um elétron livre exista (causado por algum efeito externo, como radioatividade ou radiação cósmica) em um gás sob um campo elétrico. Se a intensidade do campo for suficientemente elevada, então é provável que



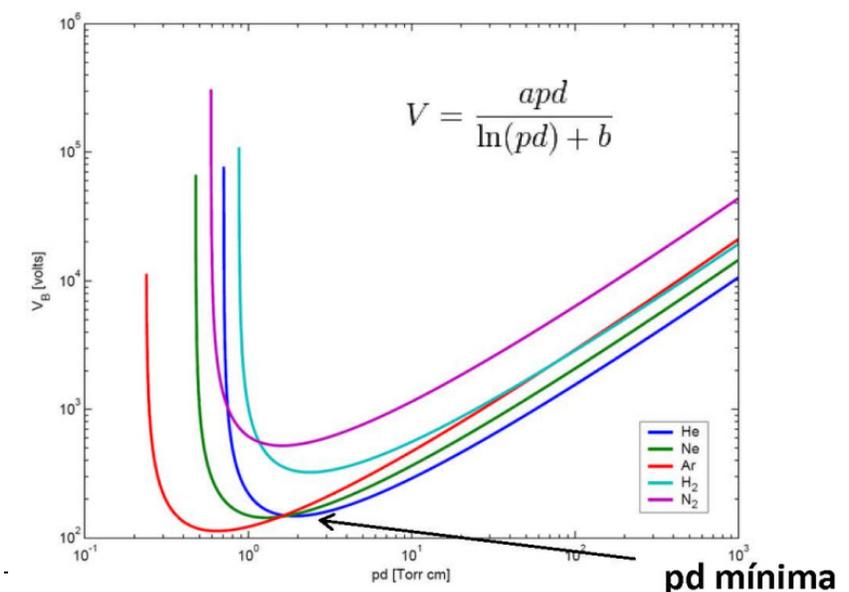


Figura 8: Curva de Paschen obtida para hélio, neônio, argônio, hidrogênio e nitrogênio

(Fonte: BASSI, 2013)

Para baixas pressões a rigidez dielétrica é elevada porque há um pequeno número de partículas a serem ionizadas e é preciso que as poucas colisões eventualmente existentes causem ionização. Já para altas pressões a rigidez dielétrica é elevada porque o percurso médio livre é pequeno e as partículas devem ser muito aceleradas para produzirem choques ionizantes (LUNA, 2006).

Segundo Fulchiron (1995) e Figura 9, os fatores com maior influência na disrupção e consequentemente a suportabilidade são: temperatura, umidade, pressão atmosférica, forma dos eletrodos e tipo da tensão (impulso, CA, CC). O fator com menor influência é a rugosidade do eletrodo. Material utilizado no eletrodo não causa influência.

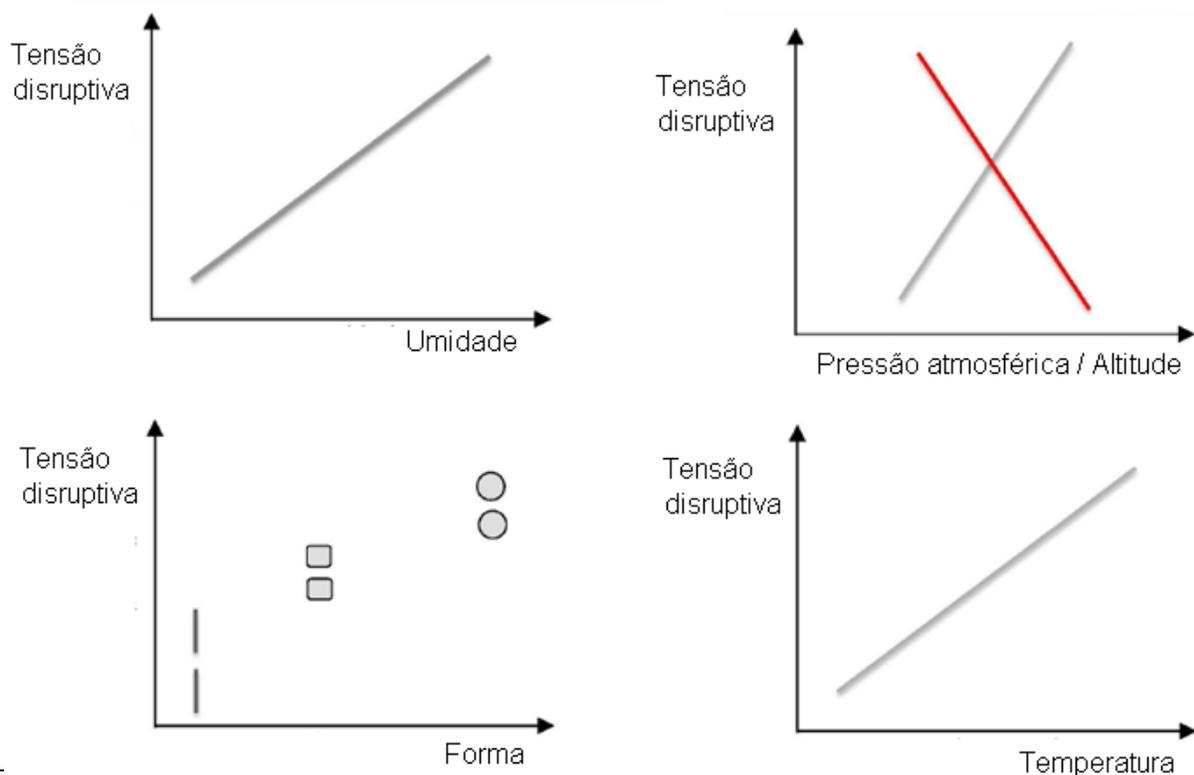


Figura 9: Fatores que influenciam na disrupção

(Fonte: BASSI, 2013)

#### 1.6.2.2.2- Disrupção em sólidos

Um bom dielétrico sólido deve ter baixa perda dielétrica, alta resistência mecânica, deve estar livre de inclusões gasosas e de umidade e ser resistente a deterioração térmica, química e ambiental (LUNA, 2006).

Em dielétricos sólidos, altamente purificados e livres de imperfeições, a rigidez dielétrica intrínseca é muito alta podendo atingir 10MV/cm. A Figura 10 mostra que os dielétricos sólidos usualmente falham sob condições bem abaixo da rigidez intrínseca devido a vários mecanismos e respectivas escalas de tempo.

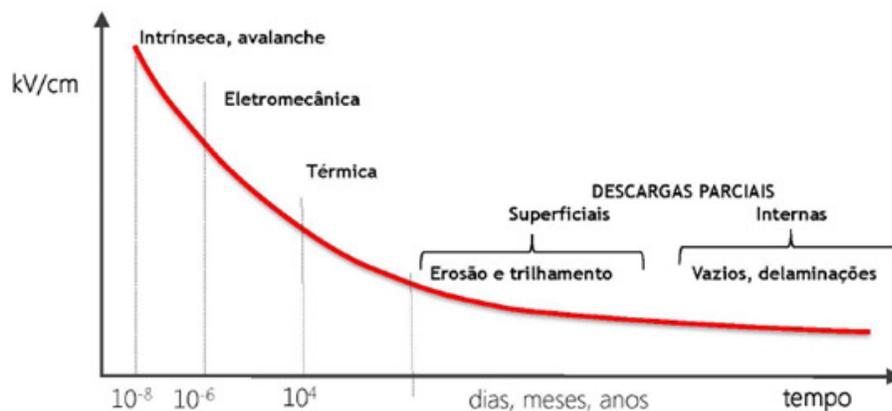


Figura 10: Disrupção em sólidos

(Fonte: BASSI, 2013)

#### 1.6.2.2.2.1- Disrupção de sólidos na prática

Os equipamentos elétricos sofrem na prática, falhas de mais longa duração devido à utilização e aos impactos que ocorrem ao longo da vida operativa. Algumas falhas são causadas devido à formação de trilhamento do material em suas superfícies, criando caminhos de condução de correntes (BASSI, 2013).

O fenômeno das descargas parciais pela ação do campo dentro do material é o principal processo de degradação e de disrupção após um dado tempo de utilização. Provocam arvorejamento (Figura 11), reações químicas causadas por formação de ozônio e ácidos, erosão, corrosão e conseqüentemente descarga completa através do isolante.

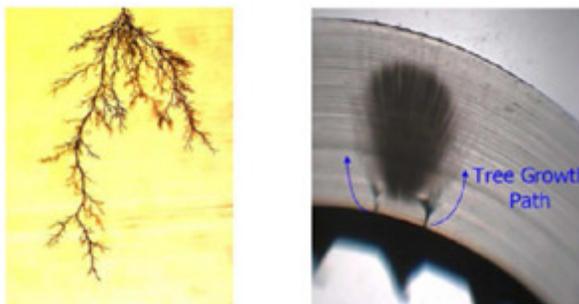


Figura 11: Diagnóstico dielétrico – arvorejamento

(Fonte: BASSI, 2013)

#### 1.6.2.2.2- Distância de isolamento

Segundo Fulchiron (1995) a distância de isolamento aborda dois itens:

- a) Espaçamentos em ar e gás: é o caminho mais curto entre duas partes condutoras ou terra;
- b) Distância de escoamento em isolamento sólido: é a menor distância entre duas partes condutoras ou terra, mas seguindo a superfície do isolante.

Estas duas características são apresentadas na Figura 12 e estão diretamente relacionadas com suportabilidade a sobretensão, mas não tem valores de isolamento similares.

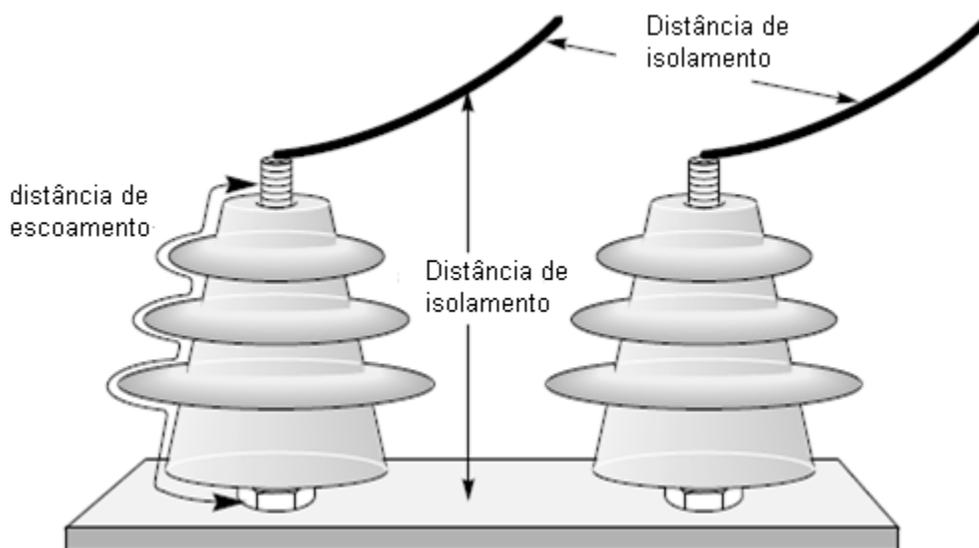


Figura 12: Distância de isolamento em ar e distância de escoamento

(Fonte: FULCHIRON, 1995)

A suportabilidade do isolamento vai depender do tipo de sobretensão, duração e forma de onda aplicada. Além disto, a suportabilidade do isolamento relativo à distância de escoamento é sujeita variações devido ao envelhecimento ou contaminação superficial (FULCHIRON, 1995).

Segundo Luna (2006), os principais fatores que influenciam na suportabilidade do isolamento são:

- a) Condições ambientais (umidade, poluição, radiação de UV);
- b) Esforço elétrico permanente (valor do campo elétrico);
- c) Variação da pressão atmosférica;
- d) Variação da temperatura.

#### 1.6.2.2.3- Suportabilidade a sobretensões temporárias do isolamento em gases

Em condições de operação normais, a tensão da rede pode variar e apresentar sobretensões temporárias (duração entre alguns segundos a horas) dependendo do modo de operação, aterramento e sistema de proteção (FULCHIRON, 1995).

A suportabilidade destes sistemas pode ser determinada pelo teste de tensão suportável de curta duração na frequência industrial (um minuto), a comparação de suportabilidade à sobretensão em diferentes gases é demonstrada na Figura 13.

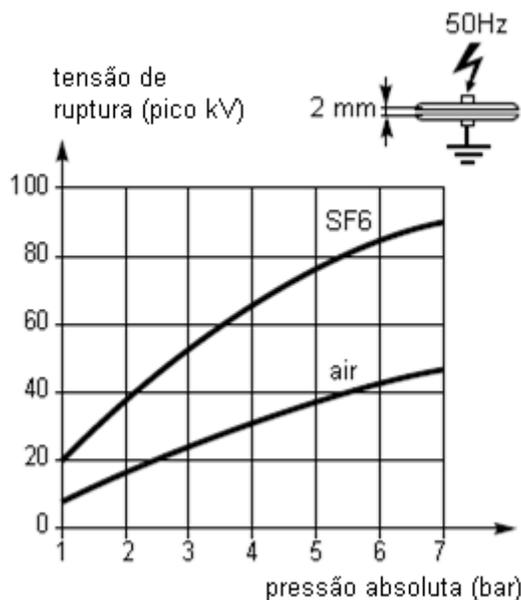


Figura 13: Gráfico da suportabilidade de Sf6 e ar em função da pressão absoluta

(Fonte: FULCHIRON, 1995)

### 1.6.2.3- Suportabilidade do isolamento em ar

A norma IEC 60694 estabelece a Tabela 2 para suportabilidade do isolamento para os seguintes valores de tensão, dependendo da classe de isolamento.

Tabela 2: Padronização no nível de isolação

(Fonte: IEC 60694, 2006)

Máxima tensão suportada pelo equipamento (kV rms)	Padronização da tensão aplicada na frequência industrial (kV rms)	Padronização da tensão de impulso (kV rms)
3,6	10	20
7,2	20	40
12	28	60
17,5	38	95
24	50	125

A norma IEC NBR 14039 (2005) estabelece a Tabela 3 com as seguintes distâncias de isolamento para instalações isoladas em ar.

Tabela 3: Distâncias mínimas x tensão nominal da instalação

(Fonte: ABNT NBR 14039, 2005)

Tensão nominal da instalação kV	Tensão de ensaio à frequência industrial (valor eficaz) kV	Tensão suportável nominal de impulso atmosférico (valor de pico) kV	Distância mínima fase/terra e fase/fase
			Interno (mm)
4,16	19	60	90
13,8	34	95	160
23,1	50	125	220

#### 1.6.2.4- Coordenação do isolamento

A determinação da tensão suportável para coordenação de isolamento consiste em determinar o menor valor de tensão suportável do isolamento que atenda ao esforço aplicado pela representativa sobretensão sob condição de serviço (IEC 60071-1, 2006).

Dois métodos para coordenação do isolamento estão em uso: um método estatístico e um método determinístico. Muitas aplicações entretanto consideram uma combinação dos métodos.

##### 1.6.2.4.1- Método determinístico

O método determinístico é aplicado quando não há informações estatísticas disponíveis obtidas por teste relativas à possível expectativa de taxa de falhas do equipamento em serviço. O método é aplicado (IEC 60071-2, 1996):

- a) Quando o isolamento é caracterizado por uma tensão suportável ( $P_w=100\%$ ). O valor é selecionado como igual ao valor suportável para coordenação do isolamento obtido pela multiplicação do valor da sobretensão representativa (assumida como máxima) e por uma fator de coordenação  $K_c$ , escolhido em função dos efeitos das incertezas dos dois valores (tensão suportável do equipamento e sobretensão representativa);
- b) Quando o isolamento é caracterizado por um valor estatístico ( $P_w= 90\%$ ),  $K_c$  deve levar em conta também a diferença desta tensão e o valor assumido como tensão suportável.

Com este método, nenhuma referência é feita a possível taxa de falha do equipamento em serviço. Segundo IEC 60071-2 (1996) exemplos típicos são:

- a) Coordenação do isolamento quando este é protegido por pára-raios;
- b) Proteção por pára-raios contra surtos atmosféricos, quando experiência com equipamento similar é disponível.

#### 1.6.2.4.2- Método estatístico

O método estatístico é baseado na frequência de ocorrência de uma sobretensão de origem específica. A distribuição probabilística da sobretensão está relacionada com a origem e a probabilidade de descarga (IEC 60071-2, 1996).

Alternativamente, o risco de falha pode ser determinado combinando a sobretensão e probabilidade de descarga, calculando-se simultaneamente, descarga a descarga, a natureza estatística da sobretensão e procedimentos estatísticos como método de Monte Carlo (MMC). Repetindo o cálculo para diferentes tipos de isolamento e para diferentes estados do sistema elétrico, a taxa de falhas devido a isolamento pode ser obtida.

Conforme a IEC 60071-2 (1996) a aplicação de método estatístico para a coordenação do isolamento dá a possibilidade de estimar a frequência de falha diretamente como uma função do sistema. A princípio, a otimização do isolamento poderia ser possível, se relacionarmos os custos das falhas aos diferentes tipos de falhas.

Na prática, é muito difícil avaliar as consequências de uma falha de isolamento para diferentes estados de operação do sistema, e os consequentes custos relacionados. Desta forma, é usualmente conveniente sobre-dimensionar o isolamento ao invés de aperfeiçoá-lo. O projeto do isolamento do sistema é então baseado em comparação dos riscos correspondentes a diferentes alternativas de projeto.

#### 1.6.2.5- Coordenação do isolamento relativa a sobretensão permanente e temporária (na frequência industrial)

Conforme a (IEC 60071-1, 2006) a tensão de isolamento para operação permanente do sistema é igual ou maior que a maior tensão fase – fase do sistema. Este valor é assumido como a tensão representativa com duração igual a da vida em serviço do sistema.

Pelo método determinístico, a tensão de isolamento temporária é igual a sobretensão temporária representativa. Quando um método estatístico é aplicado, a sobretensão temporária representativa é dada por uma amplitude/duração da distribuição de frequência característica, e o isolamento deve atender ao critério utilizado. A amplitude da sobretensão deve ser igual a sobretensão tensão suportável (um minuto) amplitude / duração do isolamento (IEC 60071-2, 1996).

## Capítulo 2- Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é apresentada a evolução histórica e aplicação da correção do valor da tensão de ensaio em função das condições atmosféricas.

Segundo Hileman (1999) foi proposto por Witzke e Bliss em 1950 a avaliação da suportabilidade das isolações frente à sobretensões e posteriormente por outros pesquisadores (JONES, 1954) e (DARVENIZA, VLASTOS, 1988), estas foram as primeiras tentativa de prever a disrupção a partir de uma determinada sobretensão. Os autores não fazem menção das condições atmosféricas no local do ensaio.

Chowdhuri em duas publicações de 1994 do “*Institute of Electrical and Electronics Engineers*” (IEEE) realizou uma revisão bibliográfica das pesquisas sobre sobretensões, onde foram relatados estudos realizados desde 1934.

Ainda em 1934, na Inglaterra, Allibone e Perry publicaram um estudo semelhante com centelhadores esfera-plano, ponta-plano e em isoladores. Foram realizados ensaios dielétricos, onde foi registrado o valor mínimo da tensão disruptiva. Que corresponde à tensão  $U_{90}$ , ou seja, à tensão que não provoca disrupção em 90% das aplicações. A montagem dos centelhadores foi vertical e a distância entre eletrodos variou de 25,4 mm a 1270 mm. Notaram que aparece uma distorção na curva de mínima tensão disruptiva do centelhador. Concluíram que essa distorção representa a transição dessa condição para o estado onde a disrupção começa a progressão a partir da superfície da chapa aterrada. Também foram realizados ensaios em isoladores. Os autores não fazem menção das condições atmosféricas no local do ensaio.

Em 1937, dois trabalhos (JACOTTET, ALLIBONE) compararam os resultados de ensaios de tensão disruptiva realizados em vários laboratórios dos Estados Unidos e da Europa. Jacottet comparou os níveis de tensão crítica de descarga disruptiva. A tensão  $U_{50}$  corresponde ao valor com 50% de probabilidade de não ocasionar descarga disruptiva na isolação. Não foi possível identificar se as técnicas de medição utilizadas pelos diversos laboratórios podem ter causado diferenças entre os resultados. No segundo trabalho de 1937, Allibone realizou ensaios com a finalidade de determinar a mínima tensão disruptiva. A distância do centelhador variou de 50 mm a 1200 mm. Os ensaios foram realizados por Jacottet na Europa e comparados com os

dos Estados Unidos. Os resultados foram muito semelhantes. Os resultados dos ensaios foram corrigidos para a umidade padrão da época,  $11\text{g/m}^3$  ou 64% a  $20^\circ\text{C}$ . O autor ainda testou isoladores, sendo que os resultados dos ensaios nos isoladores não foram corrigidos para as condições atmosféricas.

Hagenguth (1941) estudou as características das descargas disruptivas em centelhadores ponta-ponta, centelhadores esfera-esfera, isoladores e buchas. Concluiu que a tensão disruptiva de uma configuração de eletrodos com campo elétrico não uniforme não pode ser representada com exatidão suficiente pela curva tensão-tempo, mas sim pela área tensão-tempo. O autor representou em um gráfico tensão de ruptura x tempo até ocorrer a descarga. Neste trabalho, os valores obtidos nos ensaios com centelhadores não foram corrigidos para as condições atmosféricas padronizadas.

Na primeira publicação da IEC 60060-1 que ocorreu em 1962 onde contempla técnicas para ensaio dielétrico em alta tensão já se relatava fatores de correção de acordo com as variações das condições atmosféricas.

Linck (1965) realizou ensaios com objetivo de determinar a curva  $U \times t$ , em um centelhador ponta-ponta com distância entre eletrodos de 508 mm. Os resultados foram corrigidos para as condições atmosféricas padronizadas.

Kuffel e Abdullah em 1966 relataram um aumento na tensão disruptiva em centelhadores ponta-ponta com distância entre eletrodos de 100 mm a 300 mm, observando que a partir desse valor a tensão disruptiva diminui. Os resultados não foram corrigidos para as condições atmosféricas padronizadas.

Allibone e Dring (1975) estudaram a tensão disruptiva de isoladores de 33 kV, centelhadores ponta-ponta e ponta-plano. Eles notaram que a tensão disruptiva para diferentes centelhadores mudava de uma maneira complexa. Para centelhadores com distâncias entre eletrodos inferiores a 400 mm, ponta-ponta,  $U_{50}$  primeiro aumenta e depois decresce. Para centelhadores com distâncias entre eletrodos maiores e para centelhadores ponta-plano,  $U_{50}$  diminui levemente e depois cresce. Em relação aos ensaios com isoladores, os resultados mostraram que o comportamento é similar aos centelhadores ponta-plano. Os valores de tensão foram corrigidos para as condições atmosféricas padronizadas.

Antes dessa época, a partir de 1956, vários pesquisadores começaram a se preocupar com sobretensões que podem ser causadas por algumas operações de manobra. Em 1966, Wiesinger testou centelhadores ponta-ponta, ponta-esfera e esfera-esfera com distâncias entre eletrodos de 30 mm a 100 mm.

Hileman (1999) indica que segundo Pigni *et al.* (1989) a curva  $U \times t$  é a curva que relaciona a tensão disruptiva e o tempo até a descarga de um objeto ensaiado. A curva  $U \times t$  é obtida mantendo-se a forma de onda constante e variando-se a amplitude. Uma série de ensaios em centelhadores longos, ponta-plano e ponta-ponta de isoladores com o objetivo de fazer uma verificação sistemática na precisão dos modelos semi-empíricos através de ensaios laboratoriais. Os ensaios realizados foram de tensão crítica de descarga disruptiva a 50 % e obtenção da curva tensão de disrupção x tempo até a disrupção.

Em 1990, (MILLER *et al.*) usaram tensões com tempos variáveis para realizar ensaios em vários equipamentos, tais como terminações de cabos, isoladores, pára-raios e cabos. Os resultados foram corrigidos para as condições atmosféricas padronizadas.

Também em 1990, Grzybowski e Jacob ensaiaram isoladores. Foram realizados ensaios de tensão disruptiva, e determinação da característica  $U \times t$  a seco e sob chuva (para algumas configurações). Os dados obtidos nos ensaios foram corrigidos para as condições atmosféricas padronizadas.

O Grupo de Trabalho 33 do Comitê de Estudos 07 do *Conseil International des Grands Réseaux Électriques* (CIGRÉ) publicou em 1992 um guia para avaliação dos esforços dielétricos em centelhadores a ar. Foram revisados os métodos disponíveis para determinação das características tensão-tempo de centelhadores.

Em 1999 Carrus *et al.* realizaram ensaios em centelhadores ponta-ponta e ponta-plano, com espaçamentos de 100 mm e 200 mm, e em isoladores com a finalidade de simular o efeito das sobretensões. Os ensaios realizados foram de determinação da tensão disruptiva com probabilidade de 50 % de ocorrência, e de determinação da curva  $U \times t$ , este último só para centelhadores ponta-ponta com distâncias entre eletrodos de 100 mm, 150 mm e 200 mm. Os valores foram corrigidos somente para a densidade do ar.

Algumas descargas nos centelhadores foram fotografadas e pode ser visualizada conforme Figura 14.



Figura 14: Descarga nos centelhadores

(Fonte: BASSI, 2013)

Em 2010, Ancajima *et al.*, apresentaram os resultados de ensaios experimentais realizados em isoladores. As curvas  $U \times t$  obtidas foram mostradas. O modelo proposto por Chowdhuri, Mishra e Mcconnell (1997) foi aplicado de forma a reproduzir as curvas  $U \times t$ . A viabilidade de aplicação do modelo para os isoladores testados foi discutida e a precisão na sua reprodução foi avaliada. Foi demonstrado que o modelo de Chowdhuri (1997), calibrado com uma seleção adequada dos parâmetros, utilizando os dados de tensão disruptiva, é capaz de estimar a resposta dos isoladores com uma exatidão satisfatória.

Segundo IEC 60060-1 (2010), a descarga disruptiva da isolação externa depende das condições atmosféricas. Usualmente, a tensão de descarga disruptiva para uma dada distância no ar cresce com a densidade ou umidade do ar. Entretanto, quando a umidade relativa excede cerca de 80%, o comportamento da tensão disruptiva se torna irregular, em especial quando a descarga ocorre ao longo da superfície isolante.

Nota-se que os pesquisadores utilizaram fatores de correção na tensão de teste para compensar os efeitos da variação da temperatura, umidade e pressão.

## Capítulo 3- O Ensaio Dielétrico

### 3.1- Procedimento de ensaio: tensão aplicada

Segundo as normas IEC 60694 e 60600-1 o ensaio de tensão aplicada é realizada conforme os seguintes procedimentos:

- a) A tensão de ensaio deve ser aplicada ao objeto sob ensaio a partir de um valor suficientemente baixo para evitar qualquer efeito de sobretensão devido a transitório de manobra. Recomenda-se que a tensão seja elevada lentamente para permitir a leitura dos instrumentos de medição, mas não tão lentamente a ponto de causar o prolongamento desnecessário da solicitação ao objeto de ensaio em valores próximos à tensão de ensaio  $U_s$ . Estes requisitos são em geral satisfeitos se a taxa de elevação, acima de 75% da tensão  $U_s$ , for cerca de 2% de  $U_s$  por segundo;
- b) A tensão deve ser mantida pelo tempo especificado, e em seguida reduzida pela descarga da capacitância do circuito, incluindo a do objeto sob ensaio, através de um resistor adequado;
- c) A duração do ensaio deve ser especificada pela norma pertinente, levando-se em consideração que o tempo para se atingir a distribuição de tensão em regime permanente depende das resistências e capacitâncias dos componentes do objeto de ensaio. Quando não especificado em contrário, a duração do ensaio após atingir o valor de tensão de ensaio, deve ser de 60 segundos.

Os requisitos de ensaio são satisfeitos se nenhuma descarga disruptiva ocorrer no objeto sob ensaio.

### 3.2- Condições normalizadas para realização dos testes dielétricos

Para realização dos ensaios de dielétrico a norma IEC 60060-1 (2010) prevê valores padronizados para as condições atmosféricas: temperatura ( $t_0$ ) 20 °C, pressão ( $b_0$ ) 101,3 kPa e umidade absoluta ( $h_0$ ) 11 g/m<sup>3</sup>.

### 3.3- Método para cálculo de fatores de correção $K_t$

Quando as condições atmosféricas diferem das padronizadas, o fator de correção  $K_t$  deve ser aplicado sobre o valor final da tensão de ensaio. Com a aplicação do fator de correção, a tensão de descarga disruptiva medida em dadas condições de ensaio temperatura  $t$ , pressão  $b$  e umidade absoluta  $h$  pode ser convertida ao valor que teria sido obtido sob as condições atmosféricas de referência ( $t_0$ ,  $b_0$ ,  $h_0$ ).

O fator de correção  $K_t$  é determinado utilizando o seguinte procedimento:

$$K_t = K_1 K_2 \quad (1)$$

Onde  $K_1$  é o fator de correção da densidade do ar, expresso como:  $K_1 = \delta^m$ , onde  $\delta = \frac{b}{b_0} \left( \frac{273+t_0}{273+t} \right)$ . Já o expoente  $m$  é obtido pela Figura 15 (IEC 60060-1, 2010) em função do parâmetro  $g$ .

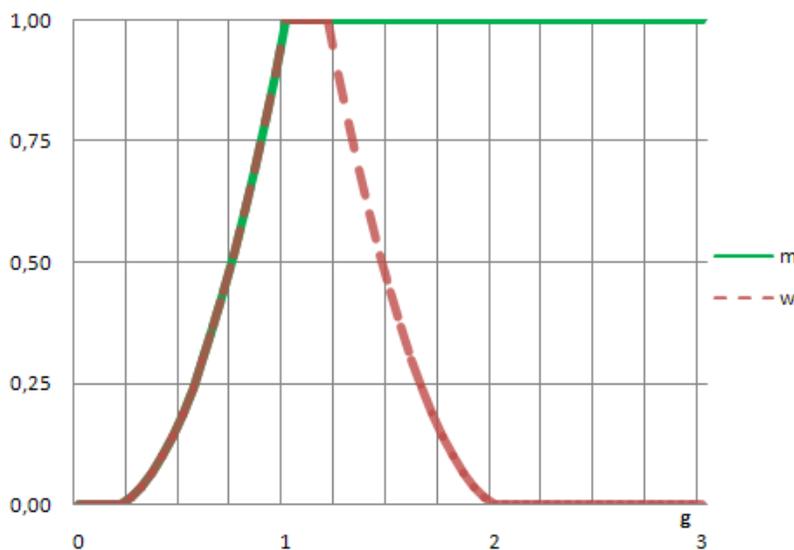


Figura 15: Valores dos expoentes  $m$  e  $w$

(Fonte: IEC 60060-1, 2010)

É conveniente para que no processo de automação e cálculo computacional do fator de correção que a curva apresentada na Figura 15 seja obtida através de expressão matemática apresentada na Tabela 4 (IEC 60060-1, 2010).

Tabela 4: Valores dos expoentes,  $m$  para a correção da densidade do ar e  $w$  para correção de umidade, em função do parâmetro  $g$

(Fonte: IEC 60060-1, 2010)

$g$	$m$	$w$
<0,2	0	0
0,2 a 1,0	$g(g-0,2)/0,8$	$g(g-0,2)/0,8$
1,0 a 1,2	1,0	1,0
1,2 a 2,0	1,0	$(2,2-g)(2,0-g)/0,8$
>2,0	1,0	0

Por fim, o parâmetro  $g$  deve ser calculado por meio da seguinte equação:  $g = \frac{U_s}{500} L \delta k$ .

Onde o valor da tensão  $U_s$  é obtida através da tensão de referência do ensaio  $U_0$  pelo produto da constante de valor 1,1. A distância mínima de descarga para um determinado projeto deve ser fornecida em L (metros). Parâmetro  $k$  deve ser obtido através da Figura 16 (IEC 60060-1, 2010).

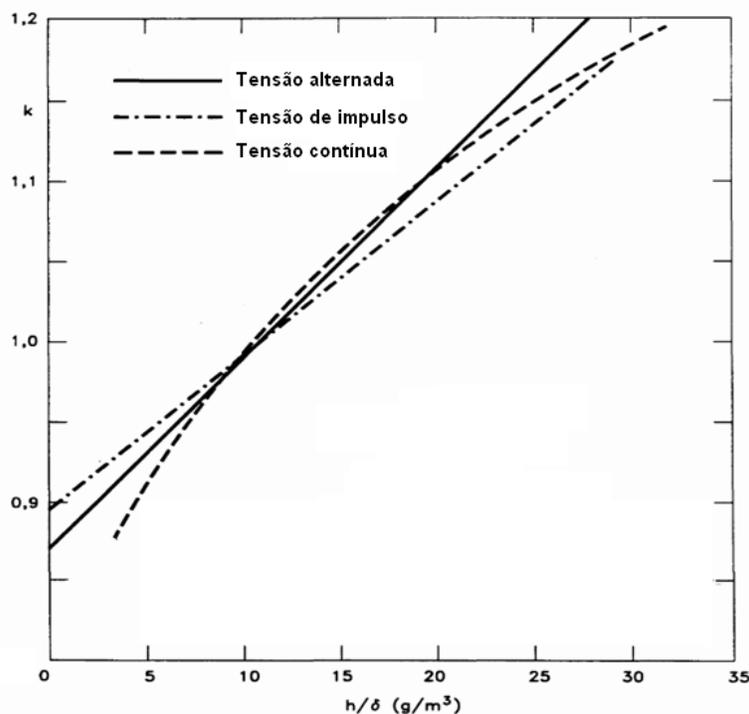


Figura 16:  $k$  em função da relação da umidade absoluta,  $h$ , com a densidade relativa do ar,  $\delta$

(Fonte: IEC 60060-1, 2010)

Assim como para os parâmetros  $m$  e  $w$ , é também conveniente que a curva apresentada na Figura 16 seja obtida através de expressão matemática apresentada na Tabela 5 (IEC 60060-1, 2010).

Tabela 5: valores de  $k$  em função de  $h$  e  $\delta$

(Fonte: IEC 60060-1, 2010)

Tensão	$k$	Intervalo umidade $g/m^3$
Impulso	$1+0,010 (h/\delta -11)$	$1 \leq h/\delta < 15$
Alternada	$1+0,012 (h/\delta -11)$	$1 \leq h/\delta < 15$
Contínua	$1+0,014 (h/\delta -11)$	$1 \leq h/\delta < 13$

Para se concluir o procedimento para obtenção do fator de correção  $K_t$ , deve-se obter também o fator de correção da umidade dado por:  $K_2 = k^w$ . Conforme já apresentado, parâmetro  $k$  deve ser obtido através da Figura 16 (IEC 60060-1, 2010) e o expoente  $w$  obtido pela Figura 15 (IEC 60060-1, 2010) em função do parâmetro  $g$ .

## Capítulo 4- Fator de correção $K_t$

### 4.1- Modelo do sistema para cálculo do fator de correção $K_t$

Como verificado nos capítulos anteriores, o ensaio dielétrico é fundamental para verificação das características da isolação. Desta forma é importante que o ensaio seja realizado de acordo com os procedimentos normalizados. Um fator determinante na validação do resultado dos ensaios é a aplicação correta do fator de correção atmosférico. Com este propósito, um modelo foi construído utilizando *toolbox* do Simulink um aplicativo do MATLAB® para cálculo automático deste fator, conforme a seguir:

As variáveis que representam condições atmosféricas reais são nomeadas por pressão B1 (mmHg), temperatura T (°C) e umidade H (g/m<sup>3</sup>). Comprimento de descarga L (m) e a tensão inicial  $U_0$  (V).

Com isto, a simulação se inicia calculando as variáveis  $\delta$  e  $k$  obtendo assim, a variável  $g$ . Após isto, este sinal alimenta as equações com as curvas  $m$  e  $w$ . Com estes últimos valores é possível calcular os fatores  $K_1$  e  $K_2$ , onde o produto dos mesmos resulta em  $K_t$ , fator de correção de tensão.

Este modelo é indicado a seguir em forma de diagrama na Figura 17.

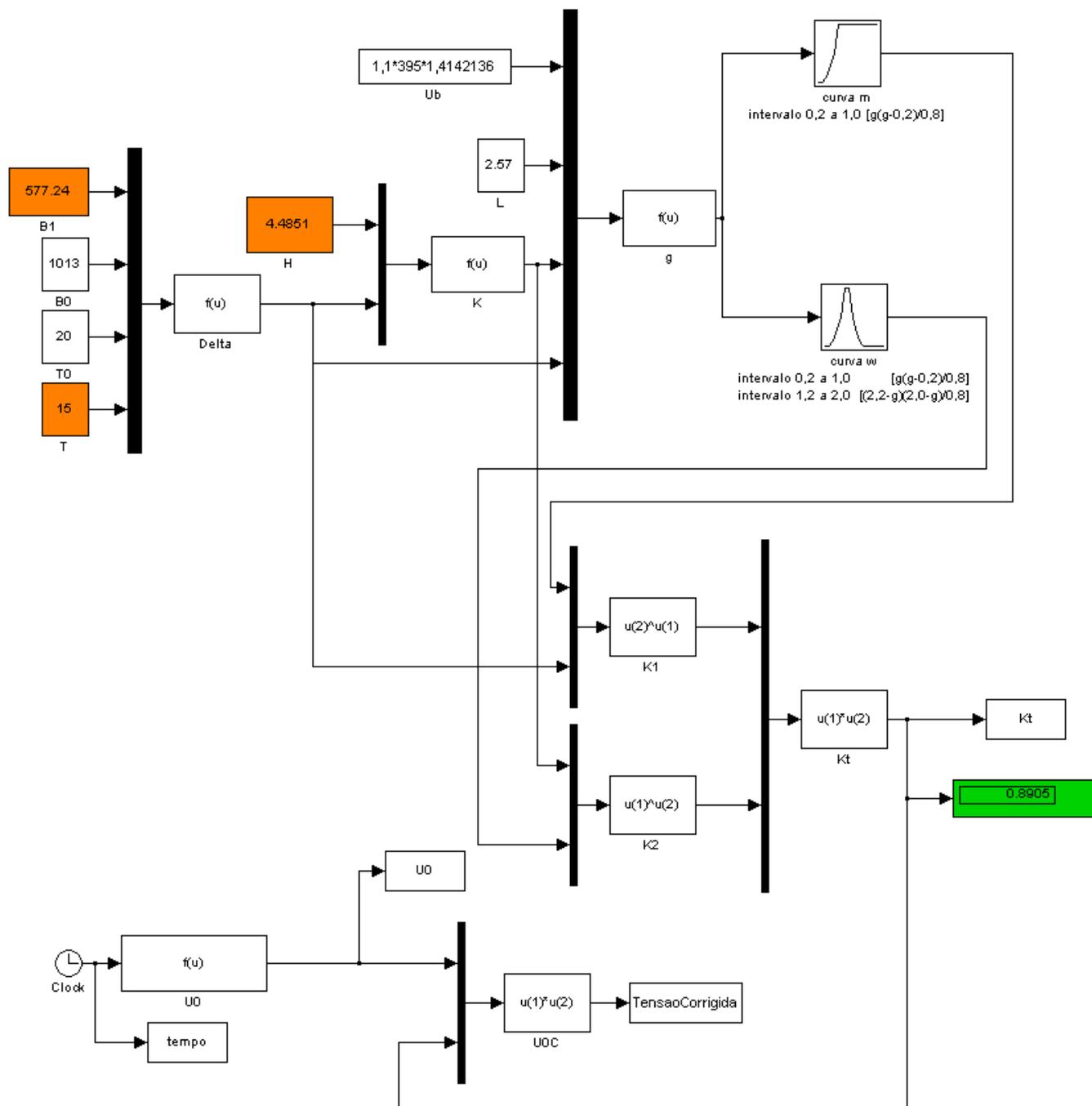


Figura 17: Modelo do sistema no Simulink com os valores utilizado na validação segundo IEC

60060-1

Através da Figura 18 é possível verificar de forma gráfica as interdependências entre os parâmetros do fator de correção  $K_t$ .

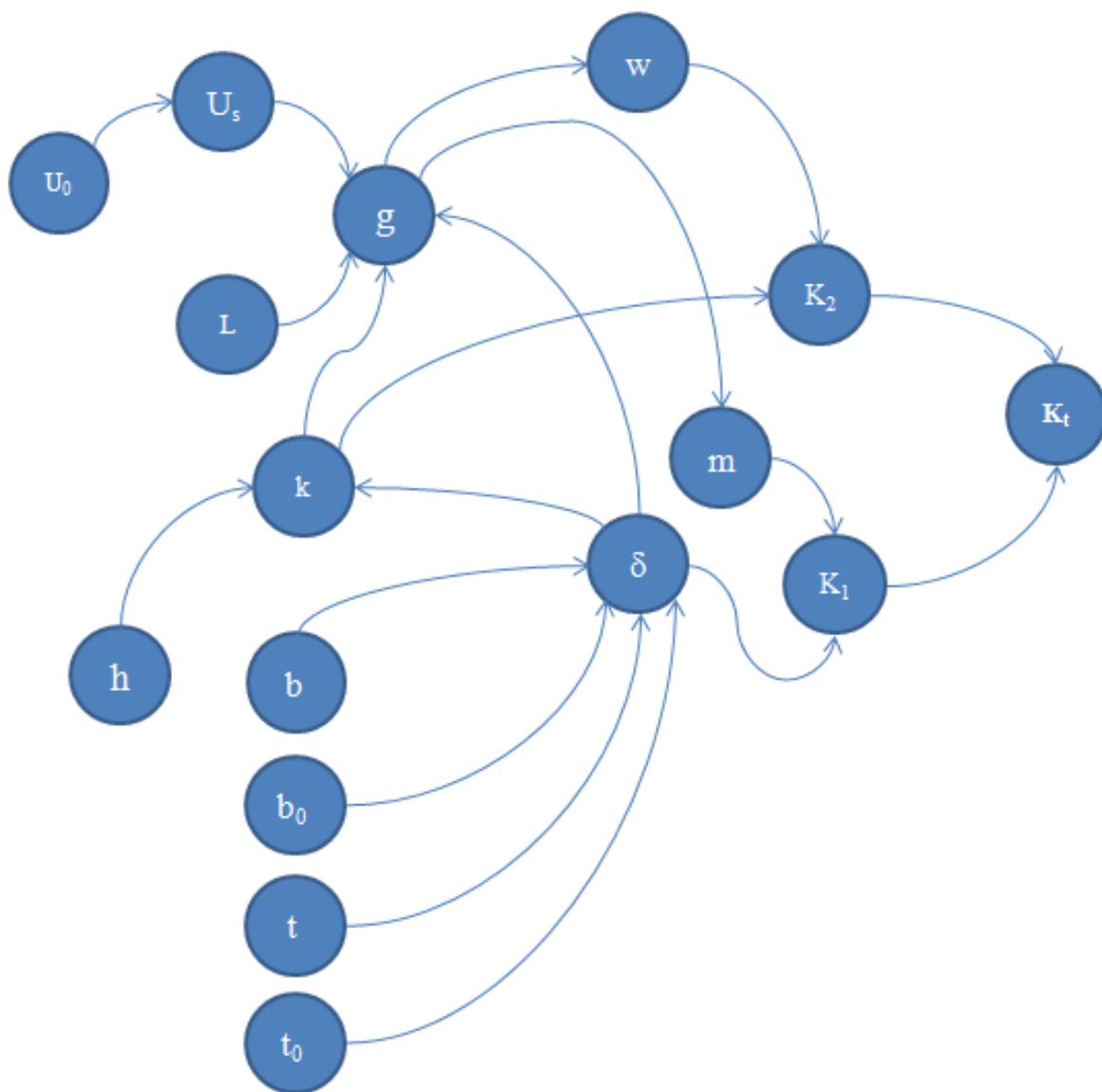


Figura 18: Diagrama de interação entre parâmetros

#### 4.2- Validação do modelo para cálculo do fator de correção $K_t$

Para verificar a funcionalidade do modelo proposto e validar os resultados obtidos, uma simulação foi executada utilizando-se os mesmos parâmetros do ensaio apresentado no Anexo A de tensão aplicada realizado em 2010 no laboratório de alta tensão na cidade de Brno – República Tcheca e inspecionado pela certificadora *Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano* (CESI). Os resultados do modelo proposto neste trabalho foram comparados com os valores obtidos durante o ensaio do Anexo A e se mostraram consistentes. O fator de correção  $K_t$  deveria ser 0,994 no dia 3 de agosto de 2010 quando pressão 995 hPa, temperatura 26,2 °C, umidade relativa 13,24 g/m<sup>3</sup> e comprimento de descarga 0,100 metros e no dia 4 de agosto  $K_t$  igual a 0,980 para pressão 997 hPa, temperatura 24,9 °C e umidade relativa 11,63 g/m<sup>3</sup>. Ao utilizar o modelo proposto os valores de  $K_t$  obtidos foram 0,9937 e 0,9797 respectivamente, com erro menor que 0,1%.

Como referência para este trabalho, adotando-se valores de ensaio para equipamentos com suportabilidade ao isolamento à tensão aplicada de 50 kV. Após a aplicação dos fatores se obtêm 49,700 kV e 49,685 kV. Apresentado assim um erro de 15 Volts em 50.000 Volts.

Também foi realizada uma segunda validação do modelo utilizando a Tabela E.2 da IEC 60060-1. Neste exemplo citado na IEC os parâmetros de cálculo são os seguintes: o fator de correção  $K_t$  deverá ser 0,8849 quando a altitude for 2240 metros, pressão 769,6 hPa, temperatura 15 °C, umidade relativa 35% e comprimento de descarga 2.57 metros. Os valores obtidos aplicando o modelo tiveram boa aderência comparados com os resultados da IEC. O  $K_t$  obtido foi 0,8905 apresentando uma diferença de 0,0056, ou seja, inferior a 0,5 %.

Podemos assim considerar que o modelo desenvolvido pode ser aplicado para estudo da influência da variação das condições atmosféricas no fator de correção da tensão de ensaio dielétrico.

### **4.3- Aplicação do modelo na análise da influência da variação das condições atmosféricas no cálculo do fator de correção**

Considerando-se que o modelo apresentado mostrou ser consistente, simulações foram realizadas variando-se as grandezas de entrada (umidade, temperatura e pressão) e verificando-se a sensibilidade do fator de correção (tensão de ensaio) em relação à variação destas grandezas.

#### 4.3.1- Análise da variação anual das condições atmosféricas em diferentes locais de ensaio.

Procurou-se verificar a tendência de variação do fator de correção em função da variação das condições atmosféricas durante o período de um ano, em diferentes localidades, caracterizadas por condições atmosféricas divergentes. Para isto as localidades escolhidas foram: Brno – República Tcheca onde a principal característica é a presença de temperaturas extremamente baixas ; Brasília – Brasil caracterizada por umidade baixa, ou seja ambiente seco ; Sântis – Suíça onde apresenta pressão atmosférica baixa devido a elevada altitude. A cidade de São Paulo foi escolhida para análise de variação das condições atmosféricas durante o período de um dia, visto a forte variação diária das condições atmosféricas nesta localidade.

##### 4.3.1.1- Fonte de dados

Para que o estudo de sensibilidade do fator de correção  $K_t$  fosse realizado, foi necessária obtenção das condições atmosféricas anuais das cidades de interesse citados no item anterior. Sendo assim foi utilizado como fonte de dados um instituto do governo dos Estados Unidos: *National Climatic Data Center* (NCDC) que é mantido pelo *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Os dados das condições das cidades de Brno, Brasília e Sântis são apresentados no Anexo B através da Tabela 8, Tabela 9, Tabela 10 e Tabela 11 respectivamente.

#### 4.3.2- Resultado da análise da influência da localização geográfica do local de teste e respectivas condições atmosféricas na tensão de ensaio

Para as considerações abaixo, adota-se como referência para o valor de suportabilidade do isolamento, um painel elétrico trifásico de média tensão, na classe de tensão 24 kV que conforme norma IEC 60694-1 estabelece que o valor de tensão durante o ensaio de tensão aplicada deve ser de 50 kV.

Utilizando-se dos dados das tabelas do Anexo B e aplicando-se o modelo teórico para cálculo de  $K_t$  foi possível a construção do gráfico de variação mensal do fator de correção  $K_t$  apresentado na Figura 19.

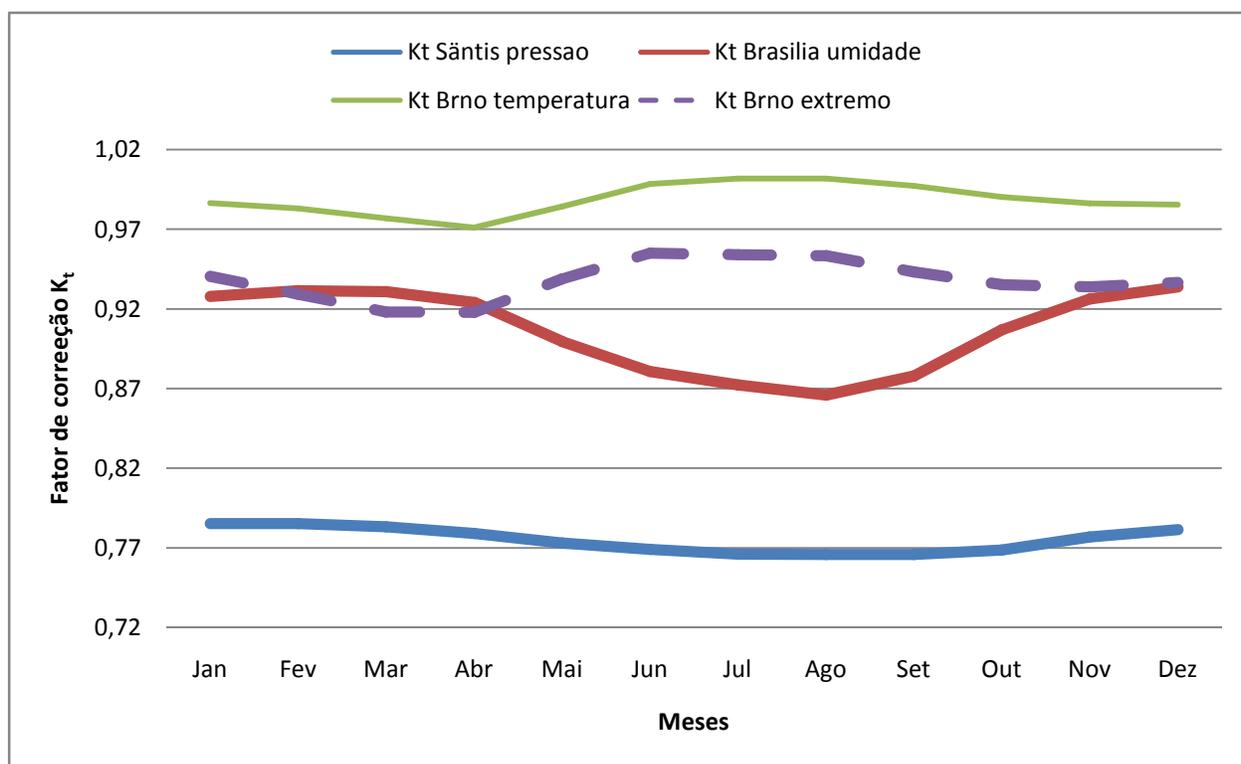


Figura 19: Variação mensal de  $K_t$  em função da posição geográfica

Analisando-se o gráfico da Figura 19 conclui-se:

- Sensibilidade à pressão: analisando as três cidades escolhidas pode-se perceber que a influência da pressão é significativa. Sântis está a 2490 metros de altitude e pressão média anual de 564 mmHg já Brno à 241 metros e pressão média anual de 762,88 mmHg, conforme Tabela 8 e Tabela 11 obtém-se fator de correção  $K_t$  de 0,7737 contra

0,9841. Sendo assim caso o ensaio fosse realizado em Brno a tensão deveria ser ajustada para 49,20 kV ( $K_t=0,9841$ ). Se o mesmo ensaio fosse repetido em Sântis a tensão corrigida seria reduzida para 38,68 kV ( $K_t=0,7737$ ) representando uma redução de 23 % no valor final da tensão de ensaio. Os resultados indicam que quanto maior a altitude do local de teste, a tensão de ensaio deve ser reduzida;

b) Sensibilidade à umidade relativa: observando os valores de umidade relativa dos meses de Julho, Agosto e Setembro contidos na Tabela 10 relativo à Brasília, têm-se os menores valores de  $K_t$  durante o ano. Sendo assim, se o ensaio for realizado em Dezembro a tensão de ensaio deverá ser de 46,69 kV ( $K_t=0,9338$ ). O mesmo ensaio repetido em Agosto terá a tensão corrigida para 43,29 kV ( $K_t=0,8659$ ) representando uma redução de 13,5 % no valor final da tensão de ensaio. Nota-se assim que à medida que umidade relativa é reduzida (ar mais seco) a tensão de ensaio também será reduzida;

c) Sensibilidade à temperatura: verifica-se através das Tabela 8 e Tabela 9 que a influência da temperatura não é tão significativa quanto às demais grandezas, entretanto a tensão de teste é ligeiramente menor com a redução de temperatura.

É possível que a variação da temperatura também influencie na umidade relativa do ar. Desta forma é difícil desassociar a variação das duas grandezas e realizar uma análise individualizada.

#### 4.3.3- Análise da variação diária das condições atmosféricas na mesma localização.

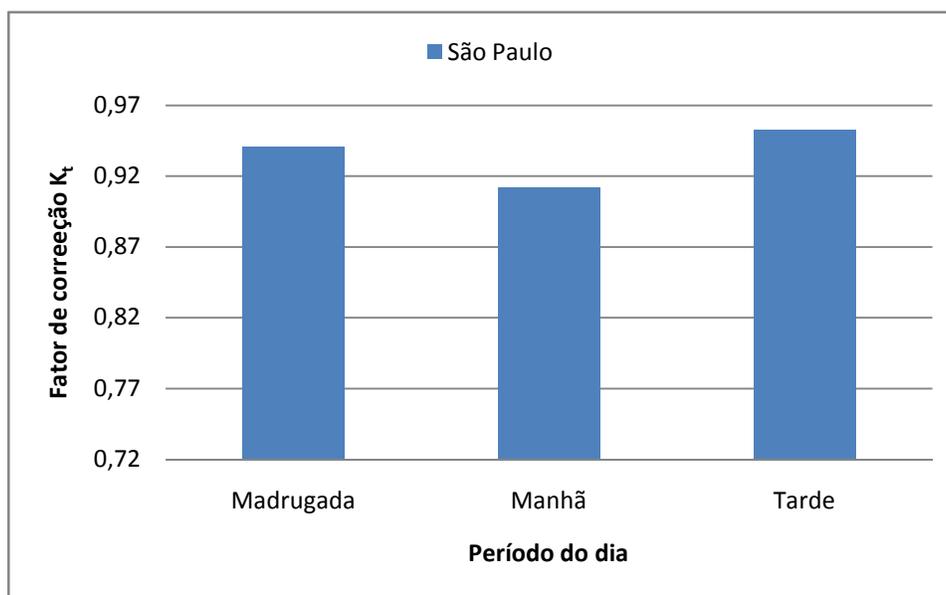
Procurou-se verificar a influência das condições atmosféricas durante o período de um dia sobre o fator de correção da tensão de ensaio dielétrico. A localidade utilizada como referência foi a cidade de São Paulo que como apresentado na Tabela 6 ocorrem baixas temperaturas e maior umidade na parte da manhã e elevadas temperaturas no período da tarde.

Tabela 6: Condição atmosférica diária em São Paulo– Brasil (altitude 792m)

(Fonte: <http://www.tempoagora.com.br/previsaodotempo.html/brasil/SaoPaulo-SP/>, acessado em 9 setembro 2013)

Período	$K_t$	Temperatura Bulbo Seco (°C)	Umidade Relativa (%)	Pressão ao nível do mar (mmHg)
Madrugada	0,9407	14	92	692.60
Manhã	0,9121	20	72	692.60
Tarde	0,9528	28	56	692.60

Os resultados são apresentados na Figura 20 e indicam uma variação de aproximadamente 4% no fator de correção ao longo do dia, com tendência a um aumento da tensão de ensaio no período da tarde, causado pelo aumento da temperatura e queda da umidade.

Figura 20: Variação diária de  $K_t$

#### 4.3.4- Análise da influência da variação da distância de isolamento L no fator de correção

Outra variável do projeto de isolamento que influencia no cálculo do fator de correção é a distância de isolamento. Por razões econômicas, existe uma tendência na compactação de equipamentos e conseqüentemente, atualmente, as distâncias de isolamento são menores para um mesmo nível de tensão.

Utilizando-se do modelo, pode-se estender a análise de sensibilidade para verificar a influência da variação da distância de isolamento sobre o cálculo do fator  $K_t$  e conseqüentemente sobre a tensão de ensaio dielétrico.

Para esta verificação, varia-se a distância de isolamento L mantendo-se constantes as demais variáveis em uma mesma localidade.

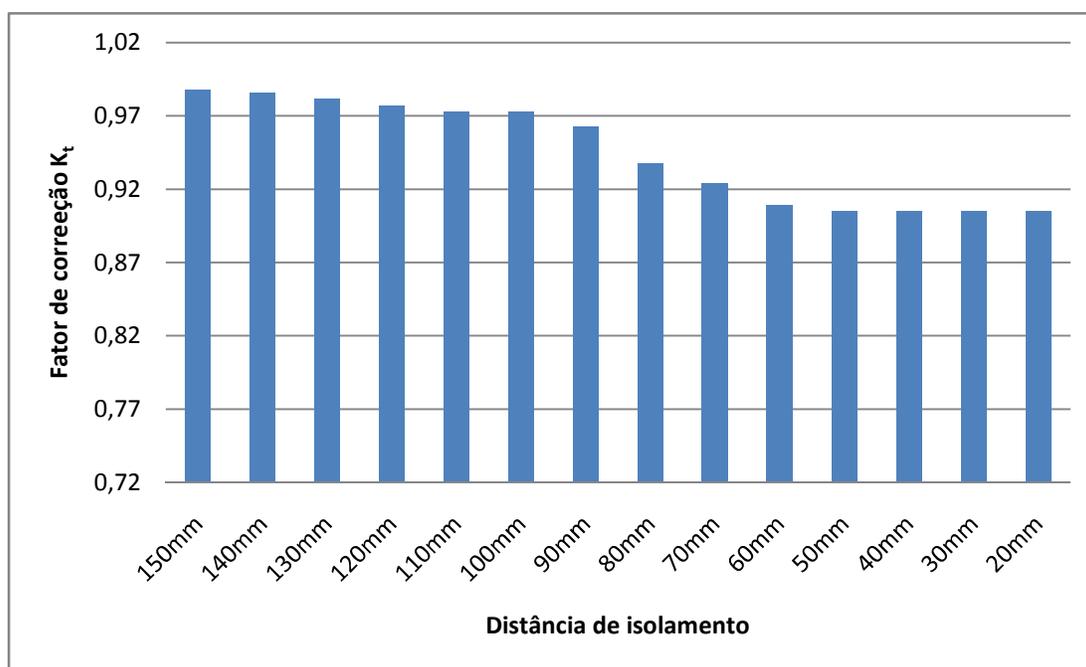


Figura 21: Variação L

Nota-se pelos resultados apresentados através da Figura 21, que à medida que as distâncias de isolamento são reduzidas, também os valores de tensão de teste devem ser reduzidos. Conseqüentemente o resultado da compactação de equipamentos implica em uma suportabilidade inferior à sobretensões.

## Capítulo 5- Aplicação do modelo na construção do controlador automático de tensão de teste

### 5.1- Estação de teste dielétrico em linha de montagem de painéis elétricos

A empresa multinacional ABB possui uma fábrica instalada na cidade de Guarulhos – São Paulo, onde produz painéis elétricos de média tensão para sistemas industriais em uma linha de montagem semi-automática.

Um painel elétrico trifásico (Figura 22) é um equipamento constituído basicamente por um invólucro metálico onde são montados barramentos de cobre sustentados por isoladores, transformadores de medição isolados em resina e elementos de manobra tais como chaves ou disjuntores. Estes equipamentos são utilizados para distribuição de energia nos níveis de tensão de 12 e 24 kV. Durante a vida útil, estes painéis estarão permanentemente energizados e serão submetidos aos esforços elétricos encontrados em todos sistemas de distribuição de energia tais como curto-circuitos e sobretensões.

As normas NBR IEC 62271-200, 60694 e 60060-1 determinam as condições de projeto, construção e testes para fabricação destes equipamentos.



Figura 22: Painel elétrico trifásico

(Fonte: Catálogo do Produto Unigear ZS1.2, 2008)

A capacidade de produção é cerca de 2.000 unidades/ano deste tipo de produto em uma linha de montagem semi-automática conforme Figura 23.



Figura 23: Linha de montagem de painéis elétricos da ABB

Na última etapa de fabricação (Figura 24), os painéis elétricos passam por uma estação de trabalho denominada *Workstation High Voltage* (WHV) onde são realizados os testes dielétricos.



Figura 24: WHV- Estação de teste de tensão aplicada em linha de montagem de painéis elétricos

Atualmente na estação WHV o teste de tensão aplicada é realizado manualmente. A porta da WHV é aberta para a entrada da unidade em teste através do movimento do equipamento sobre piso rolante. Verificam-se as características do painel (número de série, configuração mecânica e classe de aplicação). Na sequência o operador entra na estação de teste para conectar a fonte de teste ao barramento do painel e realizar o aterramento da estrutura metálica. Após esta atividade o operador retira-se da WHV, as portas são fechadas, a área é isolada e aciona-se o sistema de alarme e sinalização.

O fator de correção da condição atmosférica é calculado pelo operador através da aplicação das condições atmosféricas em uma planilha com as expressões e gráficos que calculam valor da tensão de teste. Após o cálculo obtém-se o valor de tensão de ensaio corrigido. O processo é iniciado com o ajuste da tensão regulada manualmente através de um variador de tensão e verificando o valor da tensão em um voltímetro. As normas IEC 60694 e 60600-1 recomendam que a tensão de ensaio deve ser aplicada ao objeto sob ensaio a partir de um valor suficientemente baixo para evitar qualquer efeito de sobretensão devido a transitório de manobra e que a tensão seja elevada lentamente para permitir a leitura dos instrumentos de medição, mas não tão lentamente a ponto de causar o prolongamento desnecessário da solicitação ao objeto de ensaio em valores próximos à tensão de ensaio  $U_s$ . Estes requisitos são em geral satisfeitos se a taxa de elevação, acima de 75% da tensão  $U_s$ , for cerca de 2% de  $U_s$  por segundo.

Após atingir o valor de tensão de ensaio corrigido, o operador mantém a tensão aplicada por 60 segundos, controlando o tempo por um cronômetro. Depois de decorrido o tempo de teste, o operador desliga o circuito, abre a porta da WHV e desconecta as ligações do painel ao equipamento de teste. Os requisitos de ensaio são satisfeitos se nenhuma descarga disruptiva ocorrer no objeto sob ensaio.

Após esta operação, o operador remove o painel da WHV liberando o espaço para o painel seguinte. Os resultados do teste são anotados para emissão de relatório preenchido manualmente. Em caso de reprovação, o painel é removido da linha para verificação e possível substituição de componentes para posterior repetição do ensaio.

No sentido de automatizar o processo de ensaio, um controlador de ajuste automático de tensão de ensaio denominado CATE foi proposto.

Com a utilização do CATE como apresentado neste trabalho, as operações manuais anteriormente descritas, passarão a ser executadas de forma automática.

O fluxo de operação automática proposto pode ser visualizado através da Figura 25.

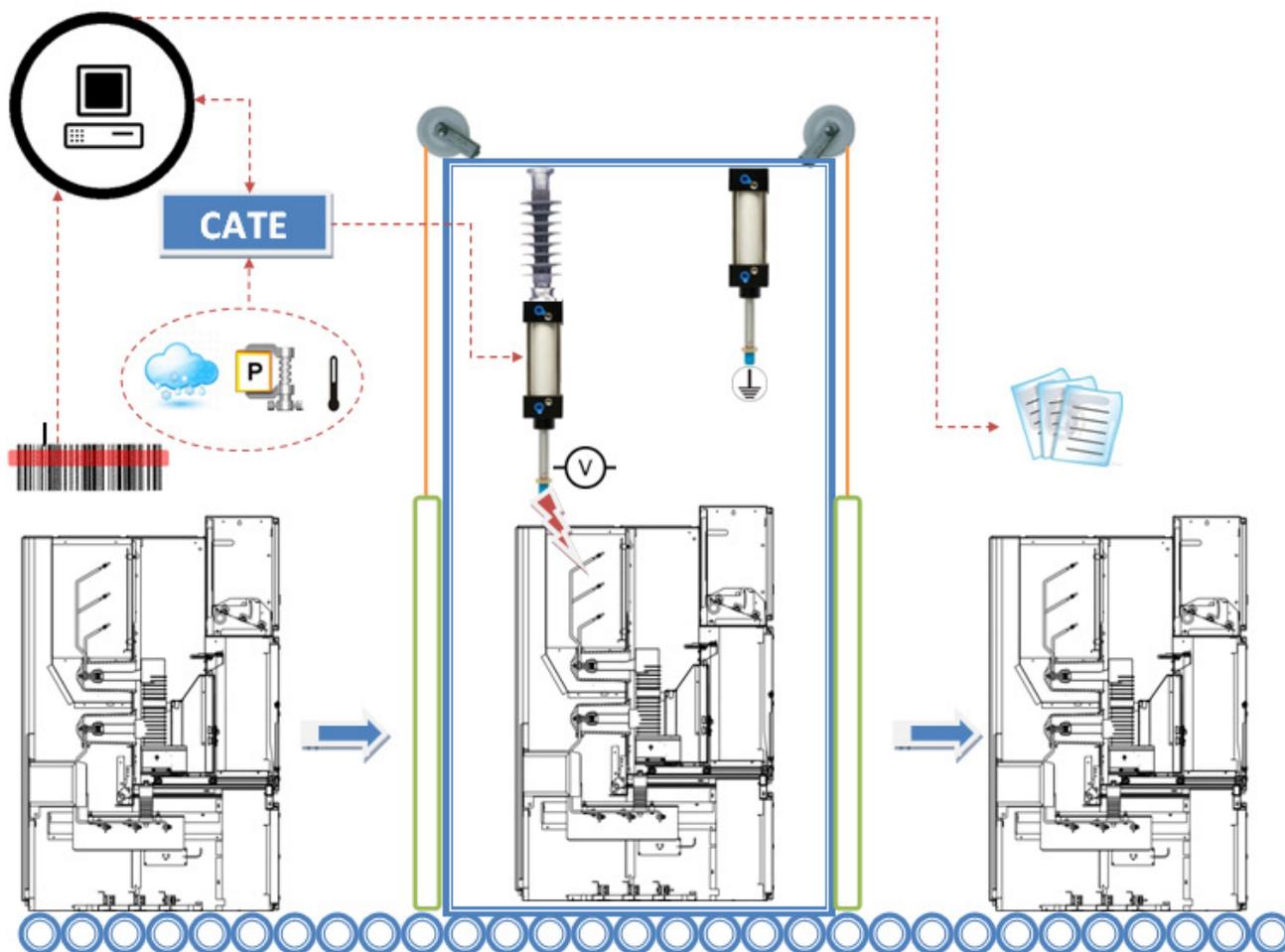


Figura 25: Ilustração da proposta de automação do processo de teste na WHV

Um computador central armazenará as características técnicas do painel elétrico, que serão vinculadas ao código de barras fixado na estrutura do equipamento.

Após a leitura do número de série do equipamento o CATE se comunicará com o computador central. As informações das condições atmosféricas instantes antes da realização do ensaio serão armazenadas em um banco de dados do computador central e o valor do fator de correção ( $K_t$ ) será calculado.

Com o equipamento já devidamente acomodado dentro da WHV, o CATE iniciará o procedimento de teste atuando sobre o motor de passo e regulando a tensão conforme procedimento da norma.

Ao término do ensaio o computador central realizará a emissão do relatório de ensaio, contendo as principais características técnicas do painel testado bem como os dados adquiridos e a informação de aprovação ou reprovação do equipamento.

Na Tabela 7, é apresentado uma comparação das etapas do processo atual de ensaio e o sistema de controle automático de tensão de ensaio proposto.

Tabela 7: Comparativo entre o processo atual e sistema proposto (CATE)

	<b>Processo atual</b>	<b>CATE</b>
Características do Painel	Preenchimento de formulário manual	Através de código de barras
Fator de correção ( $K_t$ )	Leitura dos instrumentos com interação do operador em planilha Excel	Cálculo em tempo real através da leitura dos sensores
Procedimento de teste	Fonte regulada manualmente, bem como leitura da tensão e controle da duração do ensaio	Controlador automático de teste atuando sobre o motor de passo e regulando a tensão com uma taxa controlada
Relatório final	Preenchimento manual	Computador central armazenará as características técnicas do painel testado bem como os dados adquiridos

## 5.2- Projeto de Controlador Automático de Tensão de Ensaio (CATE)

### 5.2.1- Descrição do funcionamento

Na atual estação WHV, o procedimento de teste é realizado manualmente. Isto significa que o operador deve escolher o valor de tensão a ser aplicada, calcular o fator de correção e ajustar este valor no dispositivo de teste.

Com o CATE, o cálculo do fator de correção será realizado automaticamente e o dispositivo aplicará o valor de tensão corrigido sobre o equipamento. Através da Figura 26 é possível verificar o funcionamento do dispositivo CATE e como o processo de correção automática irá operar. Este equipamento, além de permitir um ajuste adequado da tensão de teste, evitará possíveis falhas do operador e reduzirá o tempo de teste.

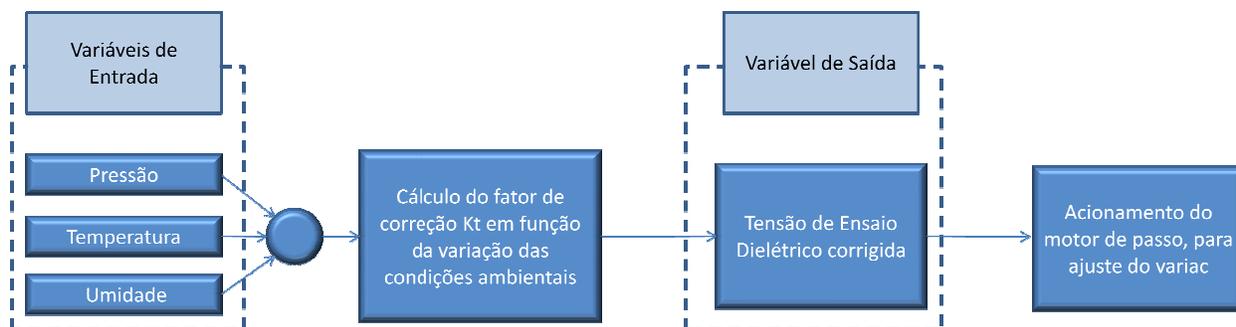


Figura 26: Descrição de funcionamento do sistema CATE

As grandezas de entrada serão medidas por sensores e o sistema calculará o fator de correção  $K_t$  e ajustará o valor de tensão de teste utilizando-se de um variador de tensão que será controlado por um motor de passo.

### 5.2.2- Descrição dos componentes do CATE

Os componentes que constituirão o CATE serão os sensores de pressão piezo-resistivo, os sensores capacitivos de umidade e temperatura, além do controlador variável de tensão, motor de passo e módulo de potência para acionamento do mesmo.

A aquisição das informações, cálculos e acionamento dos componentes serão realizadas por um microcontrolador.

Uma descrição detalhada dos componentes citados é apresentada a seguir.

#### 5.2.2.1- Sensor de pressão piezo-resistivo

Segundo Fraden (2010) para fazer um sensor de pressão, dois componentes essenciais são requeridos. Eles são a membrana de área  $A$  e um sensor que responda a força aplicada  $F$ . Ambos os componentes podem ser fabricados com silício. Um sensor de pressão com diafragma de silício consiste de um filme fino de material elástico e um medidor piezo-resistivo. Devido às características elásticas do cristal de silício nenhuma histerese ocorre mesmo sobre forte pressão estática.

O fator de medição do silício é muitas vezes superior ao de um fino condutor metálico. É comum fabricar o medidor de pressão conectado como uma ponte de Wheatstone. A escala de saída de tal circuito é da ordem de centena de milivolts. Desta forma um sinal condicionador é requerido para trazer a saída para um formato aceitável. Resistores de silício exibem uma boa sensibilidade a temperatura. Desta forma, o piezo-resistor deve ser termo-compensado ou o sinal condicionador deve ser termo-compensado. Quando um esforço é aplicado em um resistor semi-condutor tendo resistência inicial  $R$ , o efeito piezo-resistivo resulta em uma variação na resistência  $\Delta R$  conforme equação (2) (FRADEN, 2010).

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_1 \sigma_1 + \pi_t \sigma_t \quad (2)$$

Onde  $\pi_1$  e  $\pi_t$  são os coeficientes piezo-resistivos na direção longitudinal e transversal. Esforços nestas duas direções são designados por  $\sigma_1$  e  $\sigma_t$ . Os coeficientes- $\pi$  dependem da orientação dos resistores no cristal de silício. Assim, para um diafragma quadrado a orientação da superfície será conforme Figura 27.

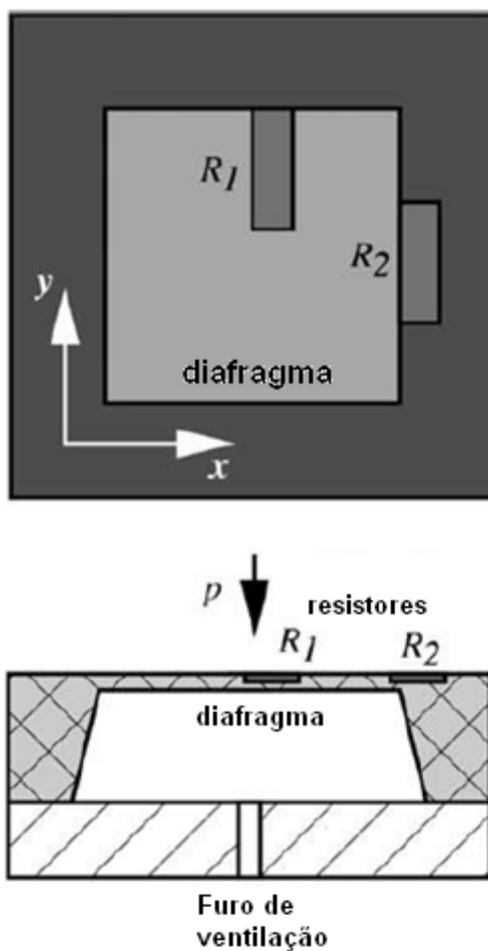


Figura 27: Posição de um elemento piezo-resistivo em um diafragma de silício

(Fonte: Handbook of Modern Sensors, 2010)

Uma modificação na resistividade é proporcional ao esforço aplicado e conseqüentemente a pressão aplicada (FRADEN, 2010).

No projeto do CATE será adotado o modelo comercial BMP085 do fabricante BOSCH com faixa de operação: 300 hPa à 1100 hPa com uma precisão de  $\pm 1,5$  hPa e resolução 0,01 hPa.

### 5.2.2.2- Sensor capacitivo de umidade

Um capacitor a ar pode servir como sensor de umidade relativa porque mudanças na composição do ar modifica a permissividade de acordo com a seguinte equação (FRADEN, 2010):

$$k = 1 + \frac{211}{T} \left( P + \frac{48P_s}{T} H \right) 10^{-6} \quad (3)$$

Onde T é a temperatura absoluta (Kelvin), P é a pressão da mistura de ar em mmHg, P<sub>s</sub> é a pressão de vapor de água saturada na temperatura T em mmHg e H é a umidade relativa em %.

Segundo Fraden (2010), a equação ( $EW = 10^{0.66077+7.5\frac{t}{237+t}}$ ) mostra que a constante dielétrica da mistura de ar e portanto a capacitância, é proporcional a umidade relativa. Ao invés de ar, o espaço entre placas pode ser preenchido por material isolante cuja constante dielétrica varia significativamente com a umidade.

Um circuito elétrico equivalente de dielétrico composto por polímero *hydrophilic* (filme fino de 8 a 12 microns) feito de celulose é mostrado na Figura 28. Cada elemento do circuito representa um transmissor RC. Quando a umidade relativa aumenta, a resistência superficial diminui e a capacitância equivalente entre terminal 1 e 2 aumenta. A capacitância é dependente da frequência. Para baixa umidade a faixa de medição é perto de 100 Hz e para elevadas umidades entre 1 e 10 kHz (FRADEN, 2010).

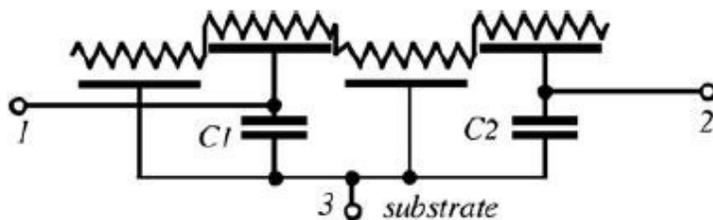


Figura 28: Circuito equivalente simplificado do sensor capacitivo de umidade

(Fonte: Handbook of Modern Sensors, 2010)

Será adotado o modelo comercial SHT21 do fabricante Sensirion com faixa de operação 0% à 100% com precisão conforme Figura 29.

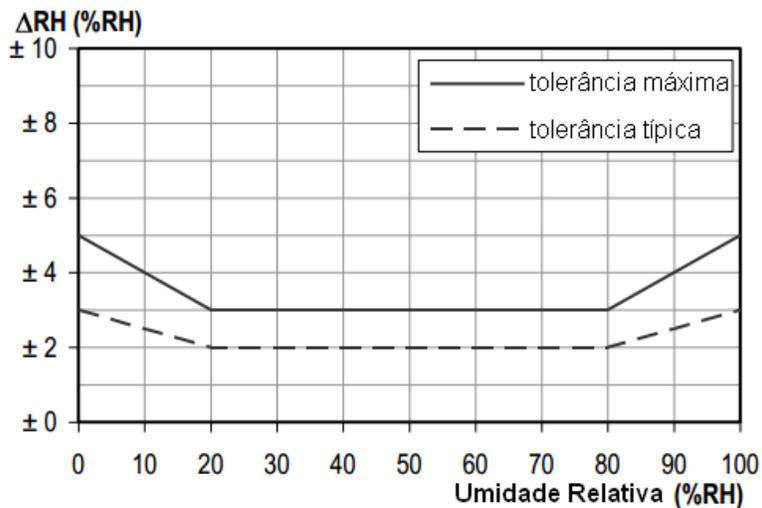


Figura 29: Precisão do sensor à 25°C para medição da umidade relativa

(Fonte: Datasheet Sensirion; 2011)

Como o próprio sensor SHT21 dispõe também de medição de temperatura, com faixa de operação -40 °C à 125 °C e precisão 0,01 °C os valores serão obtidos através do mesmo.

### 5.2.2.3- Placa de aquisição *BeagleBone Weather Cape*

Será utilizada a placa *Weather Cape* do fabricante BeagleBone (Figura 30), como dispositivo para aquisição das condições atmosféricas. Esta placa utiliza os sensores BMP085, SHT21 e barramento I2C para comunicação entre equipamentos com os valores de temperatura, pressão e umidade medidos.



Figura 30: Placa de aquisição *BeagleBone Weather Cape*  
(Fonte: Manual de Referência do Sistema – BeagleBone; 2012)

Como valores de saída na porta serial são obtidos:

*l luxl\_input: 27*

*l hlmiidityl\_input: 38143*

*l temp1\_input: 26927*

*l pressure0\_input: 101264*

*temp0\_inpu.t: 270*

Sendo interpretados como 27 lux, 38.143 % umidade, 26.927 °C e 1013 millibar e 27.0 °C do segundo sensor (que não está sendo utilizado para temperatura).

#### 5.2.2.4- Controlador variável de tensão e motor de passo

O variador de tensão alternada é um transformador variável cuja relação graus por tensão de saída é conhecido. Será utilizado o modelo Série 1000/1200 do fabricante Staco Energy, com intervalo de tensão de saída 120 V – 60 Hz.

Para variar automaticamente a tensão, um motor de passo será acoplado diretamente ao eixo do variador, sendo possível assim controlar os graus de variação que correspondem à tensão de saída.

O motor de passo que será utilizado é da série PK245 cujo fabricante é Vexta. Este motor possui um giro de 0.9 grau por passo e curva característica conforme Figura 31. Cada giro do motor de passo corresponderá a 0,033 Volts na saída do variador.

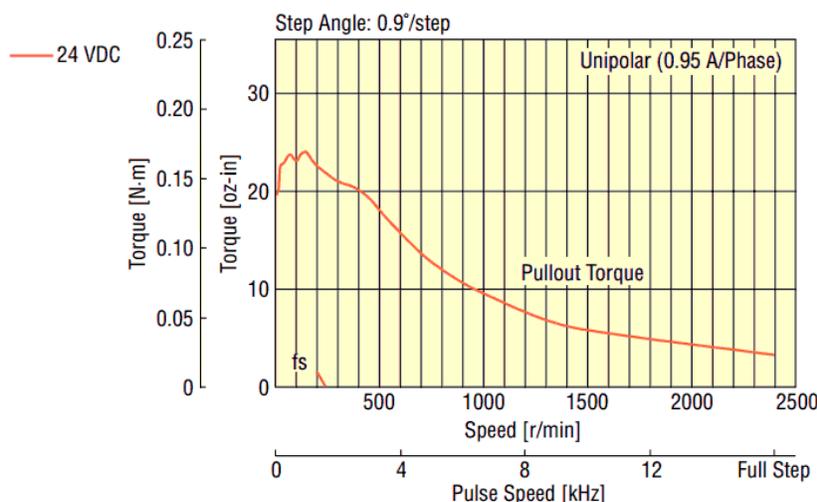


Figura 31: Curva característica Torque x Pulso

Fonte: Catálogo Vexta, Série PK245

O acionamento do motor de passo será realizado através do módulo de potência DQ420MA da Wantai Motor.

#### 5.2.2.5- Microcontrolador MSP430

Todas as informações obtidas pelos sensores, cálculo do fator de correção  $K_t$  e ajuste da tensão através do variador de tensão com o acionamento do motor de passo será concentrada em um microcontrolador fabricado pela Texas Instruments série MSP430FG4618.

Com este microcontrolador será possível a comunicação serial I2C com a placa de aquisição dos sinais dos sensores, binárias de entrada e saída para acionamento do módulo de potência que controlará o motor de passo e drive integrado para exibição dos valores em um display de até 160 segmentos.

### 5.2.3- Diagrama elétrico do controlador automático de tensão de teste

O esquema elétrico do CATE é indicado na Figura 32.

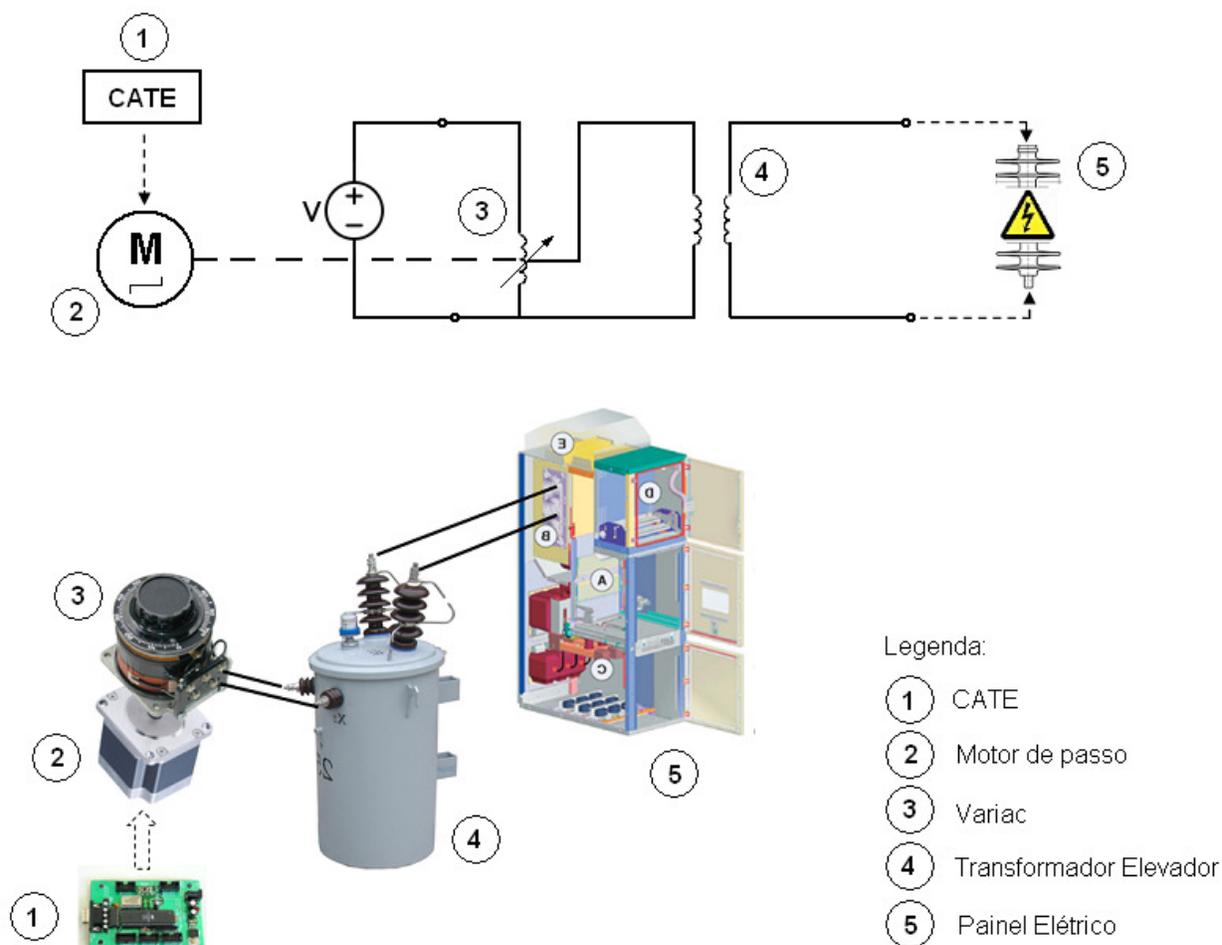


Figura 32: Representação do CATE

Com este equipamento será possível automatizar o processo de teste dielétrico. Logo que o operador acionar o CATE este irá obter as condições atmosféricas, realizar o cálculo do fator de correção  $K_t$ , ajustar a tensão de teste para o valor corrigido e aplicar esta tensão sobre o painel respeitando a taxa de elevação por tempo determinado. A título de exemplo é indicado a seguir a sequência do teste dielétrico para um painel trifásico de classe de isolamento 24 kV, onde a tensão de ensaio sem correção seria 50kV. Apenas para exemplificação é adotado  $K_t = 0,85$ . Sendo assim, o novo valor de tensão de ensaio que deverá ser considerado pelo CATE será 42,5 kV.

Conforme procedimento de teste, a taxa de elevação por segundo deverá ser 2 % da tensão final de ensaio. Para este caso, o crescimento da tensão será de 850 Volts. Como a relação do transformador de potência escolhido é de 1:500 cada giro de 0,9 graus do variador de tensão representará 16,5 Volts; sendo assim, 51 passos no motor serão necessários para obter esta taxa de crescimento. Esta variação é plenamente realizável visto que o motor escolhido atinge uma taxa superior a 3000 graus por segundo para um torque de 0,15 Nm.

Com a taxa de crescimento citada, após 50 segundos será atingida a tensão final de ensaio. Deste ponto em diante o CATE deverá manter o valor de tensão por 60 segundos. Após este período o sistema de potência será desligado.

## Capítulo 6- Conclusões

### 6.1- Conclusões

Neste trabalho foi apresentado inicialmente o conceito de sobretensão e sua influência sobre o projeto e especificação dos equipamentos elétricos. No sentido de comprovar a adequabilidade da isolação dos equipamentos aos esforços de sobretensão encontrados durante sua vida útil, as normas recomendam a aplicação de testes dielétricos.

Para a realização dos testes devem ser seguidos procedimentos estabelecidos nas normas pertinentes. Os valores destes testes são influenciados por condições atmosféricas e as mesmas normas estabelecem fatores para correção que variam em função destas grandezas.

O objetivo do trabalho foi verificar a influência da variação das condições atmosféricas sobre a suportabilidade dielétrica dos equipamentos elétricos, elaborar um modelo para calcular o fator de correção da tensão e projetar um sistema para ajuste automático da tensão de ensaio (CATE).

Com o CATE será possível o ajuste da tensão de ensaio dielétrico dentro dos limites determinados em norma e corrigidos de acordo com a influência dos fatores externos como umidade, pressão e temperatura ambiente, como planejado. Além disto, as características técnicas do painel elétrico serão armazenadas e apresentadas de forma automática com a emissão do relatório de ensaio. Isto possibilitará a redução dos tempos de ensaio e assegurará a homogeneidade e qualidade dos resultados.

O modelo de cálculo do fator de correção  $K_t$  apresentado mostrou-se consistente e eficiente e foi validado comparando-se os resultados das simulações com os resultados de um ensaio realizado em laboratório oficial.

Utilizando-se do modelo, foram realizadas simulações em diferentes localidades e com diferentes condições atmosféricas. Os resultados destas simulações mostraram que a influência da variação destas condições sobre o fator de correção ou sobre o valor de tensão de teste dielétrico é significativa.

Considerando-se que o valor de sobretensão depende exclusivamente do sistema elétrico, recomenda-se especificar o nível de suportabilidade dielétrica dos equipamentos, considerando-se também as variações das condições atmosféricas do local da aplicação. Equipamentos

elétricos em ambientes onde as características do ambiente (umidade, temperatura, pressão) diferem das normalizadas podem ter suas características alteradas, quando referidas a um mesmo nível de sobretensão.

## **6.2- Propostas para futuros trabalhos**

Neste trabalho foi analisada a influência dos fatores atmosféricos na tensão de ensaio dielétrico e apresentado o projeto do sistema de ajuste da tensão de ensaio, para que seja possível a montagem do controlador automático de tensão de ensaio (CATE) na linha de produção.

Segundo Bérroual e Bourbakeur (1991) superfícies poluídas afetam diretamente na condutividade alterando assim o limite de ruptura do dielétrico. Uma proposta para pesquisa futura é a análise da influência da poluição sobre a capacidade de isolamento dos equipamentos.

### Referências Bibliográficas

- \_\_\_\_\_ NBR IEC 60694 - Especificações comuns para normas de equipamentos de manobra de alta-tensão e mecanismos de comando, 1ª edição, 2006.
- ALLIBONE, T. E. International comparison of impulse-voltage tests. IEE Journal (G.B.), v. 81, p. 741-750, 1937.
- ALLIBONE, T. E.; DRING, D. Influence of the wavefront of impulse voltages on the sparkover of rod gaps and insulators. IEE Proceedings, v. 122, p. 235-238, 1975.
- ALLIBONE, T. E.; PERRY, F. R. Cathode-Ray Oscillographic studies of surge phenomena. IEE Journal (G.B.), v. 75, p. 670-688, 1934.
- ALONSO, M. ; FINN E. J. Física um curso universitário – Volume 2: Campos e Ondas, 1972.
- ANCAJIMA, A., Behavior of MV Insulators Under Lightning-Induced Overvoltages: Experimental Results and Reproduction of Volt-Time Characteristics by Disruptive Effect Models. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 25, n.1, Jan., 2010.
- BASSI, W. Avaliação de Equipamentos de Alta Tensão através de Ensaio Elétricos – IEE/USP, 2013.
- BeagleBone Weather Cape. System Reference Manual, Rev. A, 2012.

BÉROUAL, A. ; BOUBAKEUR, A. Influence of Barriers on the Lightning and Switching Impulse strength of Mena Air Gaps in Point/Plane Arrangements. IEEE Transactions on Electrical insulation V. 26 N. Dec., 1991.

CARRUS, A. et al. Short tail lightning impulse behavior of medium voltage line insulation. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 14, n. 1, p. 218-226, 1999.

CERRETTI, A. et al. Ground Fault Temporary Overvoltages in MV Networks: Evaluation and Experimental Tests. IEEE Trans. on Power Delivery, v. 27, n. 3, Jul. 2012.

CHOWDHURI, P. et al. Bibliography of research on nonstandard lightning voltage waves. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 9, n. 4, p.1982-1990, 1994.

CHOWDHURI, P. et al. Review of research on nonstandard lightning voltages waves. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 9, n. 4, p.1972-1981, 1994.

CHOWDHURI, P.; MISHRA, A. K.; MCCONNELL, B. W. Volt-time characteristics of short air gaps under nonstandard lightning voltages waves. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 12, n. 1, p. 470-476, 1997.

CONSEIL INTERNATIONAL DES GRANDS RÉSEAUX ÉLECTRIQUES - CIGRÉ.  
Guidelines for the evaluation of the dielectric strength of external insulation – Working Group 07 of Study Committee 33, 1992.

COORAY, V. The Lightning Flash, The Institution of Electrical Engineers (IET) – Power and Energy Series 34, Chapter 3 & 4 – Mechanism of Electrical discharges / lightning flash, 2003.

DARVENIZA, M.; VLASTOS, A. E. The Generalized integration method for predicting impulse Volt-time characteristics for non-standard wave shapes - a theoretical basis. IEEE Transactions on Electrical insulation, v. 23, n.3, p.373-381, 1988.

FERNANDEZ, M. I.; RAKOV, V. A; UMAN, M. A. Transient currents and voltages in a power distribution system due to natural lightning. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 24., 1998, Birmingham. Stafford University, 1998, p.622-629.

FRADEN, J. Handbook of Modern Sensors , 4ª edição, 2010.

FULCHIRON, D. Cahier Technique Merlin Gerin. Overvoltages and insulation coordination in MV and HV. n°151 – Schneider Electric, 1995.

GRZYBOWSKI, S.; JACOB, P. B. The steep - front, short duration pulse characteristics of distribution insulators with wood. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 5, p. 1608-1616, 1990.

HAGENGUTH, J. H. Volt-time areas of impulse spark-over. Transactions AIEE, v. 60, p. 803-810, 1941.

HILEMAN, R. A. Insulation Coordination for Power Systems, 1ª edição, 1999.

IEC 60071-1: Insulation co-ordination - Part 1: Definitions, principles and rules, 2006.

IEC 60071-2: Insulation co-ordination - Part 2: Application guide, 1996.

IEC NBR 14039: Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV, 2005.

IEC60060-1: High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements., 2010.

JACOTTET, P. Impulse breakdown tests on rod gaps. *Elektrotechnische Zeitschrift*, v. 58, p. 628-631, 1937.

JONES, A. R. Evaluation of the integration method for analysis of nonstandard surge voltages. *AIEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, n.13, p.984-990, 1954.

KUFFEL, E.; ABDULLAH, M. Corona and breakdown-voltage characteristics in sphere-plane and rod-rod gaps under impulse voltages of various wavefront durations. *IEE Proceedings*, v.133, p. 1113-1119, 1966.

LINCK, H. Protective characteristics of a 20-inch rod gap. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-84, p.177-181, 1965.

LUNA, A. M. *Materiais de Engenharia Elétrica – Volume 1: Revisão das Propriedades dos Materiais – Estudo dos Dielétricos*, 2006.

MASTER, M. J. et al. Lightning induced voltages on power lines: experiment. *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, v.103, n.9, p. 2519-2529, Sep. 1984.

MILLER, D. B. et al. The effects of steep-front, short duration impulses on power distribution components. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 5, p. 708-715, 1990.

Modern Control Technology: Components and Systems, kilian, 2nd Ed. – CHAPTER 6.

PIANTINI, A. ; JANISZEWSKI, J. M. Induced voltages on distribution lines due to lightning discharges on nearby metallic structures. IEEE Transactions on Magnetics, v.34, n.5, o. 2799-2802, 1998.

PIANTINI, A. et al. A system for simultaneous measurements of lightning induced voltages on lines with and without arresters. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 27.,2004, Avignon. ICLP 2004. Proceedings.. SEE, 2003. p.297-302.

PIANTINI, A. Lightning protection of overhead power distribution lines. (Invites lecture). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 29., 2008, Uppsala University, 2008, p.323-328.

PIGINI, A.; et al. Performance of large air gaps under lightning overvoltages: experimental study and analysis of accuracy predetermination methods. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 4, n. 2, p.1379-1392, 1989.

WIESINGER, J. The influence of the front duration of impulse voltage on the sparkover characteristics of spark. Bull. SEV, v. 57, p. 243-246, 1966.

WITZKE, R. L.; BLISS T. J. Surge protection of cable connected equipment. TRANSACTIONS AIEE., v.69, Pt I, p. 527-542, 1950.

## ANEXOS

## ANEXO A – Relatório de Teste 1VLR017155



Technical Laboratory

TEST REPORT No. 1VLR017155  
issued by a Technical laboratory in accordance with IEC 17025

Page 1 of 20

**Test Object:** Metal-enclosed, air-insulated switchgear UNIGEAR type ZS1 with vacuum circuit-breaker type VD4/P 24.12.25, earthing-switch type EK6-2406-210 and current transformers type TPU 63.13 (P=210)

**Type:** UNIGEAR type ZS1

**Ratings:**

Rated voltage	24 kV
Rated current of busbar	1250 A
Rated current of feeder	1250 A
Rated frequency	50 Hz
Rated short time withstand current	25 kA / 3s
Rated peak withstand current	63 kA peak
Max. ambient air temperature	40 °C
Internal-arc classification	AFLR
Degree of protection class	IP4x
Temperature class of insulation	

**Manufacturer:** ABB s.r.o. , PPMV Brno



**Kind of test:** Part of type test – Lightning impulse voltage tests (dry)  
– Power - frequency voltage tests (dry)  
– Partial discharge tests (dry)

**Test Specification** IEC 62271-200 , Ed. 1.0 , 2003-11 , IEC 62271-1 , Ed. 1.0 , 2007-10  
IEC 62271-100 , 2006 , IEC 62271-102 , 2003

Tests were carried-out at present of CESI inspector  
Mr. Giovanni Aldrovandi

**LSC classification:** LSC2B

**Test Results :** The metal-enclosed switchgear passed the tests

**Date of test :** 3.- 4. August 2010



13.09.2010

**Date of issue:**

Vít Badin , Jan Svindrych

**Testing engineer:**

Zdeněk Pelánek

**Testing laboratory manager:**

These test results concern exclusively to the object tested. This test report is issued by Technical Laboratory that is member of CTIA (Association of Czech Testing Rooms and Laboratories) with right to use cancellation No. 026. The report shall not be reproduced except in full without the written approval of the Technical Laboratory ABB s.r.o. , PPMV Brno. Technical laboratory Vídeňská 117 CZ 619 00 Brno Fax: +420 5 4715 2302 Phone: +420 4715 2447

Headquarters:  
ABB s.r.o.  
Sokolovská 84-86  
186 00 Prague 8  
Czech Republic

Mail Address:  
ABB s.r.o.  
Vídenská 117  
619 00 Brno  
Czech Republic

Phone: + 420 5 4715 2469  
Fax: + 420 5 4715 2950



### 3.4 Ambient Air Conditions during dielectric tests:

Date of test : 3. August 2010

Test		Power frequency
Ambient air conditions	Temperature (°C)	26,2
	Pressure (hPa)	995
	Air humidity (g/m <sup>3</sup> )	13,24
Correction factors		k <sub>1</sub> : 0,962
		k <sub>2</sub> : 1,033
		K <sub>t</sub> : 0,994
Rated test voltage		50 / 60 kV
Calculated reduced test voltage		49,7 / 59,6 kV
Applied test voltage during tests		50 / 60 kV

Date of test : 4. August 2010

Test		Power frequency
Ambient air conditions	Temperature (°C)	24,9
	Pressure (hPa)	997
	Air humidity (g/m <sup>3</sup> )	11,63
Correction factors		k <sub>1</sub> : 0,968
		k <sub>2</sub> : 1,012
		K <sub>t</sub> : 0,980
Rated test voltage		50 / 60 kV
Calculated reduced test voltage		49,0 / 58,8 kV
Applied test voltage during tests		50 / 60 kV

## ANEXO B – Valores mensais das condições atmosféricas

Tabela 8: Condição atmosférica anual em Brno – República Tcheca (altitude 241m)

(Fonte: <ftp://dossier.ogp.noaa.gov/GCOS/WMO-Normals/RA-VI/CZ/11723.TXT>, acessado em março 2013)

Período	$K_t$	Temperatura Bulbo Seco (°C)	Umidade Relativa (%)	Pressão atmosférica (mmHg)
Jan	0,9865	-2,5	84	764,99
Fev	0,9831	-0,3	81	763,63
Mar	0,9769	3,8	73	762,58
Abr	0,9712	9,0	65	760,48
Mai	0,9844	13,9	67	761,31
Jun	0,9985	17,0	69	761,46
Jul	1,002	18,5	67	762,06
Ago	1,002	18,1	68	762,13
Set	0,9973	14,3	73	763,78
Out	0,9904	9,1	78	764,91
Nov	0,9863	3,5	84	763,71
Dez	0,9855	-0,6	85	763,78
Anual	0,9841	8,7	75	762,88

Tabela 9: Condição atmosférica anual em Brno com temperatura máxima – República Tcheca (altitude 241m)

(Fonte: <ftp://dossier.ogp.noaa.gov/GCOS/WMO-Normals/RA-VI/CZ/11723.TXT>, acessado em março 2013)

Período	$K_t$	Máxima Temperatura Bulbo Seco (°C)	Umidade Relativa (%)	Pressão atmosférica (mmHg)
Jan	0,9405	12,2	84	764,99
Fev	0,9293	17,6	81	763,63
Mar	0,9181	24,3	73	762,58
Abr	0,9179	28,0	65	760,48
Mai	0,9389	29,7	67	761,31
Jun	0,9551	32,0	69	761,46
Jul	0,9540	35,1	67	762,06
Ago	0,9534	34,9	68	762,13
Set	0,9433	32,0	73	763,78
Out	0,9353	26,5	78	764,91
Nov	0,9338	20,1	84	763,71
Dez	0,9366	14,4	85	763,78
Anual	0,9085	35,1	75	762,88

Tabela 10: Condição atmosférica anual em Brasília – Brasil (altitude 1160m)

(Fonte: <ftp://dossier.ogp.noaa.gov/GCOS/WMO-Normals/RA-III/BZ/83377.TXT>, acessado em março 2013)

Período	$K_t$	Temperatura Bulbo Seco (°C)	Umidade Relativa (%)	Pressão atmosférica (mmHg)
Jan	0,9278	21,6	76	664,48
Fev	0,9315	21,8	77	664,48
Mar	0,9308	22,0	76	664,48
Abr	0,9240	21,4	75	664,48
Mai	0,8996	20,2	68	664,48
Jun	0,8807	19,1	61	664,48
Jul	0,8723	19,1	56	664,48
Ago	0,8659	21,2	49	664,48
Set	0,8779	22,5	53	664,48
Out	0,9070	22,1	66	664,48
Nov	0,9262	21,7	75	664,48
Dez	0,9338	21,5	79	664,48
Anual	0,9035	21,2	67	664,48

Tabela 11: Condição atmosférica anual em Säntis – Suíça (altitude 2490m)

(Fonte: <ftp://dossier.ogp.noaa.gov/GCOS/WMO-Normals/RA-VI/SW/06680.TXT>, acessado em março 2013)

Período	$K_t$	Temperatura Bulbo Seco (°C)	Umidade Relativa (%)	Pressão atmosférica(mmHg)
Jan	0,7853	-8,3	72	564
Fev	0,7852	-8,3	71	564
Mar	0,7833	-7,1	76	564
Abr	0,7790	-4,5	81	564
Mai	0,7730	-0,5	82	564
Jun	0,7690	2,8	83	564
Jul	0,7661	5,1	81	564
Ago	0,7659	5,0	80	564
Set	0,7659	3,6	74	564
Out	0,7686	1,0	66	564
Nov	0,7769	-4,0	70	564
Dez	0,7814	-6,5	68	564
Anual	0,7737	-1,7	75	564

Tabela 12: Condição atmosférica fixa com variação da distância de isolamento L em São Paulo – Brasil (altitude 792m)

(Fonte: <ftp://dossier.ogp.noaa.gov/GCOS/WMO-Normals/RA-III/BZ/83781.TXT>, acessado em março 2013)

L (m)	Kt	Temperatura Bulbo Seco (°C)	Umidade Relativa (%)	Pressão atmosférica (mmHg)
0,150	0,9876	22	80	692,60
0,140	0,9858	22	80	692,60
0,130	0,9816	22	80	692,60
0,120	0,9767	22	80	692,60
0,110	0,9728	22	80	692,60
0,100	0,9728	22	80	692,60
0,090	0,9629	22	80	692,60
0,080	0,9373	22	80	692,60
0,070	0,9237	22	80	692,60
0,060	0,9087	22	80	692,60
0,050	0,9049	22	80	692,60
0,040	0,9049	22	80	692,60
0,030	0,9049	22	80	692,60
0,020	0,9049	22	80	692,60