

```
Rule
@name = MA51
IF material.essadura.@float < 5 + n1.n1.@float
THEN material.tpo.naceto is TRUE
THEN material.tpo.naceto is FALSE
THEN FORGET ("n*.n*.@f")
THEN IGNORE ($AllConcl, "n*.n*.@f")
endRule
```

```
Rule
@name = MA6
IF material.material.@string is "Al"
THEN alum.alum.alum is TRUE
ELSE IGNORE ($Rule, "MA7*")
endRule
```

```
Rule
@name = MA7
IF material.essadura.@float >= 7 + n2.n2.@float
THEN material.tpo.naceto is TRUE
THEN material.tpo.naceto is FALSE
THEN FORGET ("n*.n*.@f")
THEN IGNORE ($AllConcl, "n*.n*.@f")
endRule
```

```
Rule
@name = MA71
IF material.essadura.@float < 7 + n2.n2.@float
THEN material.tpo.naceto is TRUE
THEN material.tpo.naceto is FALSE
THEN FORGET ("n*.n*.@f")
THEN IGNORE ($AllConcl, "n*.n*.@f")
endRule
```

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Dissertação de Mestrado

PROJETO DE SISTEMA DE PROTEÇÃO DE
EDIFICAÇÕES CONTRA DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS ASSISTIDO POR COMPUTADOR

Autora : EDRIENE MARIA ORZIL COSTA

Orientadores: PROF. JOSÉ OSVALDO SALDANHA PAULINO

PROF. ANTÔNIO EMÍLIO ANGUETH DE ARAÚJO

Belo Horizonte - 1995

**"PROJETO DE SISTEMAS DE PROTEÇÃO DE EDIFICAÇÕES CONTRA DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS ASSISTIDO POR COMPUTADOR"**

Edriene Maria Orzil Costa

Dissertação de Mestrado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 18 de agosto de 1995.

Por:

Dr. José Osvaldo Saldanha Paulino - Orientador

Prof. PPGEE/UFMG - Orientador
Antônio Emílio Araújo - Ph.D.

Prof. UFMG
Afrânio Carvalho Aguiar - M. Sc.

Prof. DELT/UFMG
Constantino Seixas Filho - M.Sc.

*A meus pais, José e Mécia
e para Giovanni*

Agradecimentos

À Deus, luz constante a iluminar nossos caminhos;

Ao Prof. José Osvaldo Saldanha Paulino pela orientação irrepreensível e permanente incentivo;

Aos colegas e professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e em especial aos professores, Glássio Costa de Miranda, Antônio Emílio Angueth Araújo e Alessandro Fernandes Moreira;

A meus familiares e a Giovanni, pelo apoio em todos os momentos difíceis que juntos atravessamos;

À colega Maria Luisa Grossi Vieira pelo companheirismo nos estudos e solidariedade compartilhados;

À CAPES, FAPEMIG, TERMOTÉCNICA ENGENHARIA e ATAN SISTEMAS DE AUTOMAÇÃO, pelo apoio técnico e financeiro.

*“Sou um pouco de tudo que encontrei pelo caminho”
(Ulysses in Odisséia)*

Resumo

Atualmente, devido ao elevado número de descargas atmosféricas que ocorrem por ano, tem sido crescente o número de pessoas interessadas em proteger equipamentos e instalações, dos danos ocasionados pelas mesmas. Como suporte para elaborar sistemas eficientes de proteção contra descargas atmosféricas, os projetistas utilizam a Norma Brasileira de Proteção contra Descargas Atmosféricas. O texto da norma apresenta entretanto, diversas deficiências de redação, o que vem ocasionar uma séria dificuldade de interpretação do mesmo.

No sentido de auxiliar os projetistas nesta tarefa, procurou-se desenvolver neste trabalho uma ferramenta computacional, através da elaboração de um Sistema Especialista. O sistema está habilitado a fornecer uma orientação sobre a necessidade, ou não, de se proteger as edificações contra descargas atmosféricas indicando, em caso positivo, os elementos necessários a fim de que a proteção seja feita de maneira eficiente. Adicionalmente, caso desejado, também pode-se testar a viabilidade de utilização das próprias partes metálicas da edificação como elementos do sistema de proteção.

A fim de adequar o sistema às necessidades do usuário, procurou-se a colaboração dos mesmos, através do preenchimento de questionários com indagações a respeito do desempenho do programa. A constatação da viabilidade da utilização dos Sistemas Especialistas na área de projetos em sistemas de alta tensão, bem como no auxílio à interpretação de normas técnicas, são resultados deste trabalho.

Actually, there is a great incident of lightning in Brazil, so the number of people interested in protection of houses, buildings and equipments is increasing. This work is concerned with the development of an Expert System to help in designing protection systems against lightning. The database for system implementation is the Brazilian Technical Standard for Lightning Protection (NBR 5419/93), issued by ABNT, Brazilian Association for Technical Standards. The software is able to indicate if any edification needs protection and the necessary elements for efficient protection. Further, if desirable, the metallic parts of edification can be tried as a protection system element. In order to fit the system to the necessities of users, some data were collected through questionnaires about software performance. The software developed constitutes a precious tool for common people that desire to protect some structure and need assistance of an expert in lightning, not always available to give informations for them, also for the beginner and common users of the NBR 5419/93, that presents a quite technical and complicated language. The feasibility of Experts Systems application in the design area and assistance in technical standards interpretation is confirmed.

Abstract

Sumário

Capítulo 1 - Introdução	1
Capítulo 2 - A Descarga Atmosférica	
2.1 - Introdução	7
2.2 - O Fenômeno	9
2.3 - Norma Brasileira de Proteção contra Descargas Atmosféricas	19
Capítulo 3 - Sistemas Especialistas	
3.1 - Introdução	
3.1.1 - Inteligência Artificial - Sistemas Especialistas	38
3.2 - Desenvolvimento	46
3.3 - Estrutura	48
Capítulo 4 - Sistema Especialista para Detecção da Necessidade e Especificação de Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas	
4.1 - Desenvolvimento	62
4.2 - Exemplo Aplicativo	83
Capítulo 5 - Conclusão	85
Bibliografia	88
Anexos	93

Capítulo I

Introdução

Atualmente, as descargas atmosféricas e os efeitos decorrentes de sua incidência sobre as edificações têm sido objeto de vários estudos. São desenvolvidos diversos trabalhos no sentido de caracterizar melhor as descargas e desenvolver métodos de proteção mais eficientes contra as mesmas [1].

No Brasil, devido ao elevado número de descargas que ocorrem por ano, várias pessoas, animais, equipamentos eletro-eletrônicos, cabos de alta e baixa tensão (rede telefônica) e instalações em geral são atingidos, às vezes com consequências muito graves [2]. Mesmo antes de ocorrer a descarga já existe perigo, devido à indução elétrica provocada por nuvens carregadas que estejam sobre cabos metálicos esticados (como em cercas), o que ocasionará o aparecimento de tensões perigosas nos mesmos [2]. Na maioria das vezes os efeitos da descarga são indiretos, isto é, mesmo que o fenômeno tenha ocorrido a uma certa distância, há o aparecimento de tensões em fiações, equipamentos e em ferragens de edificações. Com isto será gerada nos equipamentos,

principalmente nos eletrônicos, uma tensão muito superior a especificada,

resultando na danificação dos mesmos [2].

A crescente informatização da sociedade com a disseminação do uso de computadores de pequeno e grande portes e uma diversidade de equipamentos eletrônicos em conjunto com os fatores citados previamente, têm levado a uma constante busca de proteção de equipamentos e instalações contra descargas atmosféricas. Os sistemas de proteção são normalizados internacionalmente pela International Electrotechnical Commission (IEC) e em cada país por entidades próprias como a Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT (Brasil), National Fire Protection Association, NFPA (Estados Unidos) e British Standard Institute, BSI (Inglaterra).

Com o intuito de orientar as pessoas no sentido de escolha do tipo de proteção mais adequado, de acordo com as características de cada caso, serão utilizados neste trabalho os recursos da Inteligência Artificial através de um Sistema Especialista. O Sistema Especialista pode resolver computacionalmente problemas que tipicamente iriam requerer os conhecimentos de um especialista na área de proteção contra descargas atmosféricas. Como um especialista humano, cujo comportamento o computador simula, o sistema deve estar habilitado a fornecer soluções

realísticas a partir de dados relativamente incompletos e a explicar como e criados através da estruturação de uma base de dados, que podem ser obtidos junto a especialistas na área ou através de pesquisas em publicações especializadas. A fim de expressar os fatos e conceitos relativos ao mundo real, de uma maneira clara e bem definida, é utilizada uma linguagem formal. A utilização da linguagem formal como um sistema descritivo permite que os dados relativos ao mundo real possam ser codificados em termos de um sistema de símbolos bem definido [3].

Como principal fonte para a base de dados do Sistema Especialista escolheu-se a NBR5419/93 da ABNT - Norma Brasileira de Proteção de Estruturas contra Descargas Atmosféricas. A norma contém diretrizes que fixam as condições exigíveis ao projeto, instalação e manutenção de Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas de determinadas estruturas, bem como de pessoas e instalações dentro do volume protegido. Também foi considerada a orientação de especialistas no assunto.

O assunto aqui abrangido distancia-se um pouco da tradicional abordagem das dissertações de mestrado; entretanto sua relevância como tal é confirmada mediante a constatação da possibilidade da reunião dos conceitos

de duas áreas complexas (Descargas Atmosféricas - Sistemas Especialistas),

de modo a alcançar um produto que servirá de modelo para futuros trabalhos

de teor semelhante.

É importante também aqui ressaltar, algumas dificuldades encontradas

no decorrer do trabalho. A primeira delas refere-se à interpretação da Norma

Brasileira de Proteção contra Descargas Atmosféricas que, além de adotar

uma linguagem excessivamente técnica, apresenta os dados de uma maneira

um tanto confusa e desorganizada. Outro obstáculo detectado foi a dificuldade

em se estabelecer um elo entre a área de Descargas Atmosféricas e a área de

Sistemas Especialistas: Áreas distintas e complexas no campo da engenharia

cujas particularidades não eram por mim dominadas. Desta maneira o trabalho

foi realizado baseando-se apenas nos conceitos estritamente necessários para

viabilizar os objetivos propostos.

Etapas do trabalho

A partir de março de 1994 começou-se a pesquisar um tipo de

programação que se adequasse da melhor maneira aos propósitos citados. O

software escolhido foi o Sistema Especialista Orientado a

Objetos - COMDALE/X.

Posteriormente, passou-se à fase de estudo e interpretação da Norma Brasileira de Proteção contra Descargas Atmosféricas e implementação dos dados. Nesta etapa foram detectados vários entraves ao prosseguimento do trabalho.

Uma das dificuldades encontradas foi com relação a versão do programa que se tinha acesso. Tratava-se de uma versão de estudante com recursos bastante limitados. Este problema foi contornado com a procura de caminhos alternativos dentro do software e otimização do trabalho. Posteriormente o programa foi implementado na versão profissional.

Outra dificuldade encontrada, como ressaltado anteriormente, foi a interpretação da NBR5419/93. Para suplantar este problema foi feita uma extensa pesquisa bibliográfica e procurou-se a orientação de pessoas que trabalham diretamente com a norma, em projetos de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas. A empresa consultada foi a TERMOTÉCNICA ENGENHARIA.

Solucionados os problemas, acredita-se ter chegado a um produto que cumpre os objetivos inicialmente propostos, fornecendo aos interessados em

geral, uma orientação sobre a necessidade ou não de se proteger edificações

contra descargas atmosféricas e , em caso positivo, indicando o tipo de

proteção mais adequado a ser utilizado.

Na parte dissertativa, discorre-se inicialmente sobre a descarga

atmosférica no que diz respeito às suas características físicas, teorias e a

filosofia de proteção apresentada pela Norma Brasileira de Proteção contra

Descargas Atmosféricas. No capítulo seguinte apresenta-se o item Inteligência

Artificial e Sistemas Especialistas com suas teorias e conceitos. Em seguida é

apresentado um exemplo de aplicação do programa implementado com

resultados e relatórios de usuários. Finalmente é apresentada a conclusão, onde

são feitas a discussão dos resultados e propostas de continuidade do trabalho.

Capítulo 2

A Descarga Atmosférica

2.1 - Introdução

A descarga atmosférica é um fenómeno natural que pode ocorrer entre nuvens, entre centros de cargas separados numa mesma nuvem, ou entre a nuvem e a terra [4]. A maioria das descargas ocorre entre ou dentro das nuvens, entretanto, aquelas que ocorrem entre a nuvem e a terra podem significar sérios riscos [5], sendo portanto, estudadas neste trabalho.

Dentre as nuvens, aquelas que representam fontes mais comuns de descargas atmosféricas são as nuvens de chuva, do tipo cumulonimbus. Devido à turbulência envolvido vento, água e gelo e às condições de temperatura e pressão presentes nas nuvens, ocorre uma eletrificação destas, o que se dá segundo um processo não totalmente conhecido, existindo várias teorias a respeito. As principais são as de G. C. Simpson, C. T. R. Wilson, W. A. Macky, Elster e Gettel [5]. Aproximadamente 95% das nuvens ficam carregadas da maneira ilustrada na figura 1 [5].

A grande maioria das correntes de descarga, aproximadamente 80 a 85%, são de polaridade negativa. Entretanto as descargas de polaridade positiva, apesar de ocorrerem em menor quantidade, apresentam valores de pico muito mais elevados, aproximadamente três vezes os valores detectados para descargas negativas [4].

A magnitude das correntes da descarga atmosférica pode variar numa faixa de 2kA (descarga de intensidade baixa), 30kA (descarga de média intensidade) e 160kA (descarga de alta intensidade) [4]. As descargas de alta corrente e curta duração (descargas explosivas) são altamente destrutivas, causando danos como queda de árvores, destruição de coberturas, etc. As descargas de baixa corrente e longa duração (descargas incendiárias), ao contrário, não causam este tipo de dano mas, são responsáveis por incêndios em construções de madeira e inflamáveis [5].

Com relação ao sentido de propagação das descargas entre a nuvem e a terra, observa-se que podem ocorrer canais de descarga que se formam a partir da nuvem em direção à terra e a partir da terra em direção à nuvem, os quais podem ser carregados por cargas positivas ou negativas. Os canais que iniciam-se no solo, surgem normalmente em estruturas muito altas ou em torres situadas em montanhas [4].

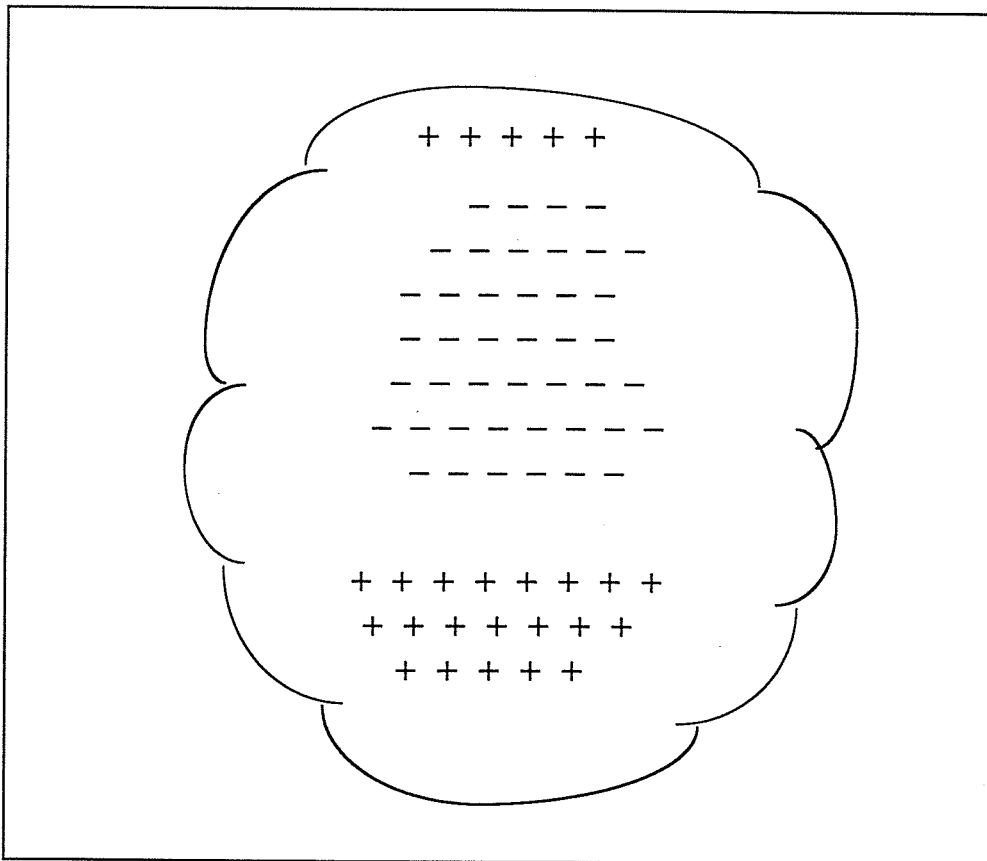
2.2 - O Fenômeno

O acúmulo de cargas nas nuvens, ou em porções destas, induz na terra cargas de mesma magnitude e polaridade oposta. À medida que cresce o número de cargas, o potencial entre nuvem e terra aumenta e portanto o gradiente de potencial no ar também sofre um acréscimo. Este gradiente de potencial não é uniformemente distribuído, sendo usualmente mais intenso no centro de cargas da nuvem [4, 6].

No momento em que a quantidade de carga acumulada na nuvem atinge um determinado valor, ocorre a quebra da rigidez dielétrica do ar na região inferior da nuvem, entre a região que concentra cargas negativas e a região abaixo, com pequena concentração de cargas positivas (figura 1) [7]. A ruptura da rigidez dielétrica do ar libera cargas elétricas negativas, inicialmente presas a partículas de gelo e água, dando possibilidade de movimento às mesmas [4]. Tem início então, a formação de um canal ionizado que se propaga em direção à terra, transportando cargas com ele e percorrendo o trajeto que oferecer menor resistência à sua passagem. O potencial na sua extremidade, ponto denominado "líder", atinge valores bastante elevados [6, 7] (figura 2A).

A carga acumulada no centro das nuvens serve como fonte de alimentação para o canal, mantendo o gradiente de potencial na sua extremidade acima do valor correspondente ao rompimento da rigidez dielétrica do ar e fazendo com que o líder continue a sua trajetória [6, 7] (figura 2B). Algumas vezes as cargas acumuladas no centro da nuvem não conseguem manter este gradiente, então o líder interrompe o seu trajeto, a carga é dissipada e o processo de formação da descarga é interrompido, mas,

Figura 1 - Modelo para a distribuição de cargas em uma nuvem de tempestade



Freqüentemente o líder se propaga até entrar em contato com a terra ou com

algum objeto sobre a mesma [6, 7].

A corrente que acompanha o líder não é alta, sendo provavelmente menor que 100A [6]. A velocidade média de propagação dos ramos de formação do canal de descarga é cerca de $1,5 \times 10^5$ m/s [6]. A diferença de potencial formada entre a nuvem e a terra pode variar de 5 a 20MV [6].

À medida que o líder aproxima-se da terra, o campo eletrostático aumenta e o gradiente de potencial na superfície da terra atinge valores elevados. Eventualmente pode até acontecer a formação de um canal a partir da terra (líder ascendente) que inicie a propagação em direção ao líder descendente. No momento em que ocorre o contato entre eles, ou entre o líder descendente e o solo ou algum objeto sobre o mesmo, visualiza-se um intenso e momentâneo efeito luminoso (figura 2C). Neste instante é verificada a ocorrência de elevados valores de corrente no canal ionizado, quando as cargas induzidas na superfície da terra encontram passagem para neutralizar as cargas depositadas no canal ionizado. A corrente cresce do zero ao seu valor de pico em poucos microssegundos e então decai lentamente a valores mais baixos [6].

A medida que a carga no centro da nuvem é neutralizada, seu potencial decresce, consequentemente uma outra diferença de potencial pode ser desenvolvida entre o lugar onde estavam as cargas originais e um outro centro de cargas (figura 2D). Como resultado, o outro centro de cargas pode descarregar dentro da região de cargas que deu início à formação do canal (figura 2E), fazendo com que sejam formadas descargas subsequentes em direção à terra, ao longo do canal ionizado originalmente formado, ocasionando outros picos de corrente [6] (figura 2F).

Muitas descargas apresentam a característica de ter mais de um pico de alta corrente. Tais descargas são denominadas descargas múltiplas ou repetitivas. Os picos separados são denominados componentes. Dados estatísticos a respeito da multiplicidade das descargas atmosféricas são apresentados na tabela 1 [5].

70% - 1 só componente
16% - 2 componentes em rápida sucessão
10% - 3 componentes em rápida sucessão
04% - 4 ou mais componentes em rápida sucessão

Tabela 1 - Descargas Múltiplas