

ALERTA DE INCIDÊNCIAS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS UTILIZANDO LÓGICA FUZZY

Adriel Yoshio S. Igarashi¹, Gideon Villar Leandro² e Eduardo Alvim Leite¹

1 Instituto Tecnológico SIMEPAR – Centro Politécnico da UFPR – Curitiba – PR – Brasil

2 Universidade Federal do Paraná – Centro Politécnico da UFPR – Curitiba – PR – Brasil

e-mail: adriel@simepar.br, gede@eletrica.ufpr.br, alvim@simepar.br

Resumo – Este artigo tem por objetivo a aplicação de lógica Fuzzy no problema de alerta de incidência de descargas elétricas atmosféricas para uma determinada região, pois, a ocorrência destes eventos ocasiona prejuízos tanto econômico quanto de vidas humanas e, em determinados locais, como refinarias de petróleo, o alerta antecipado de descargas pode evitar catástrofes. Mediante a essa situação, este estudo visa implementar uma gestão de alertas para evacuação baseada exclusivamente em lógica Fuzzy utilizando para tal o valor do campo elétrico atmosférico e informações pluviométricas no local de interesse. Além disso, é feita a comparação entre o método proposto e o simples método de alerta baseado exclusivamente em limites de campo elétrico para entrada e saída do mesmo. Os resultados obtidos mostram a viabilidade da metodologia proposta para a determinação de horas de alerta.

Palavras-chave – Fuzzy, campo elétrico, descargas elétricas atmosféricas, alertas.

1 Introdução

As descargas elétricas, também chamadas de raios, são um dos fenômenos naturais dos mais antigos conhecidos pelo homem. Esse fenômeno ocorre devido à existência de cargas opostas presentes na atmosfera e também no solo. Uma carga elétrica localizada no espaço produz um campo elétrico cujo comportamento físico é descrito pela teoria eletrostática. O acúmulo de cargas ocasiona um aumento no potencial elétrico e, por consequência, um aumento na intensidade do campo elétrico. Com o aumento da intensidade do campo elétrico o ar perde progressivamente sua capacidade dielétrica e, através da ionização do ar, permite a ocorrência de descargas atmosféricas [1].

Por se tratar de um fenômeno de grande intensidade e de alto risco tanto para vidas humanas quanto para o setor econômico, causando perdas anuais de cerca de 1 bilhão de Reais a economia brasileira e aproximadamente 70 mortos por ano, tornou-se de grande importância a criação de uma metodologia que permitisse a previsão desses eventos gerando, assim, um alerta de possibilidade de descargas em um determinado local [2][3].

Da teoria eletromagnética tem-se que, toda carga elétrica produz um campo elétrico que é atuante sobre outra carga, podendo ser de mesma polaridade ou não. A ação dessas cargas produzirá uma força de atração ou repulsão entre elas. Para o caso em estudo, na iminência do fenômeno de descarga elétrica, essa força é suficiente para o rompimento do dielétrico do ar atmosférico criando, assim, um arco de transferência de cargas elétricas opostas. Nesse instante, há uma brusca variação no campo elétrico atmosférico que pode ser detectada através de equipamentos destinados para esta finalidade [1][3].

Da mesma forma que as descargas são detectadas, existe a possibilidade de se prever esses acontecimentos devido ao acúmulo de cargas nas nuvens e no solo e, conseqüentemente, com o aumento do campo elétrico atmosférico. Logo, é possível antecipar os eventos de incidências de descargas atmosféricas mediante observação do campo elétrico que, na maioria dos casos, segue algumas características [4][5].

Trabalhos publicados na comunidade científica indicam que alguns pesquisadores estudaram o comportamento do campo elétrico e basearam seus estudos na identificação de uma magnitude de campo elétrico de tal modo a que se possa dizer se há riscos de descargas elétricas atmosféricas no local de abrangência do sensor de campo elétrico [3][7]. Contudo, ainda não existe um consenso sobre o valor limite de campo elétrico para uma descarga elétrica atmosférica, estima-se entre 1000 V/m, onde já existirá a presença de cargas elétrica na atmosférica, e 2500 V/m em que o alerta deverá ser efetivo.

Ainda na tentativa de se estabelecer relações entre campo elétrico e as diversas possibilidades de alerta, fez-se o estudo de correlação de dados de campo elétrico e a probabilidade de ocorrências de descargas elétricas [6]. Neste trabalho realizou-se estudos sobre a distância de sensibilidade do equipamento frente a descargas elétricas ocorridas em sua vizinhança. Analisou-se ainda o comportamento do campo elétrico anteriormente à primeira descarga, chegando-se a conclusão de que existe um comportamento padrão do campo para tal caso. Além das relações estabelecidas anteriormente, o mesmo trabalho realizou estudos sobre a eficácia de alertas baseados em limiares de campo elétrico, ou seja, alertas que se ativam quando o campo elétrico ultrapassar um determinado limite pré-estabelecido.

Neste trabalho, a abordagem se dará não somente através de informações sobre limiares de campo elétrico, como em [6], mais também levando-se em consideração diversos fatores como a média do campo nos últimos instantes, o desvio padrão e a derivada de uma seqüência de valores a fim de utilizá-los como entrada para o sistema Fuzzy, ou, em português, sistema nebuloso. Através dessas características visa-se obter do sistema Fuzzy um conjunto de informações que venham a auxiliar no

processo de decisão de alerta e que atenda a alguns requisitos, tais como, tempo de antecedência suficiente para a remoção e abrigo das pessoas em zonas de risco e o aumento da eficiência dos alertas.

Este artigo está dividido nos seguintes tópicos: No tópico 2 tem-se a descrição do problema, neste item é abordado a descrição dos equipamentos utilizados, as características dos dados e o sistema estudado. No tópico 3 são apresentadas as ferramentas matemáticas utilizadas, neste item é feita uma breve descrição de algumas ferramentas matemáticas utilizadas nesta pesquisa. No tópico 4 é descrita a metodologia utilizada, neste item os procedimentos e tratamento dos dados que foram utilizados nesta pesquisa são explanados. No tópico 5 os resultados obtidos com a metodologia proposta são apresentados e são comparados com dados obtidos por outra metodologia utilizada. Finalmente, no tópico 6 são feitas as considerações finais.

2 Descrição do problema

O problema que será abordado neste artigo é baseado no comportamento da componente vertical do campo elétrico atmosférico e, para tal, faz-se necessária a compreensão da maneira com a qual os dados são obtidos. A seguir será brevemente descrito o princípio de funcionamento do equipamento destinado a obtenção dos dados relativos a componente vertical do campo elétrico atmosférico, comumente denominado de *Field Mill*.

O *Field Mill* é um equipamento destinado a mensurar a intensidade da componente vertical do campo elétrico atmosférico de forma instantânea. O princípio de funcionamento é baseado no processo de carga e descarga de placas paralelas, ou seja, princípio análogo ao comportamento de um capacitor. A Figura 1 mostra as partes fundamentais de um *Field Mill*, ou seja; um motor, que é responsável pela abertura do obturador; um sensor de placas achatadas, responsável pela concentração de cargas; e um amplificador de sinal [8].

O processo de estimação da intensidade do campo elétrico vertical atmosférico pode ser observado ainda pela Figura 1 (a) em que tem-se o campo elétrico atmosférico incidindo diretamente sobre o sensor de placas achatadas, fazendo com que as cargas provenientes da ligação do equipamento com a terra se concentrem na região do sensor. Logo após, conforme visto na Figura 1 (b), o obturador se fecha fazendo com que o campo elétrico atmosférico não mais incida sobre o sensor. Conseqüentemente, as cargas que antes se encontravam no sensor retornarão para a posição de origem, ou seja, a terra. Neste trajeto, as cargas induzirão uma corrente que será proporcional ao valor do campo elétrico atmosférico, cabendo ao amplificador traduzi-la para o seu valor real mensurado na unidade de Volts por metro.

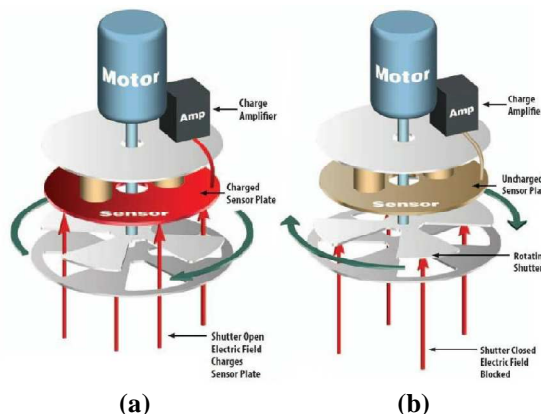


Figura 1 - Princípio de funcionamento de um Field Mill com placas carregadas (a) e descarregadas (b).
Fonte: Mission Instruments Co [8].

Ainda neste estudo utilizou-se informações sobre as descargas elétricas incidentes no local de interesse através da Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT) a fim de se avaliar a eficiência da metodologia empregada e dos resultados obtidos em relação aos interesses perseguidos nessa pesquisa, ou seja, a proteção através do prévio alerta, para uma determinada região, da possibilidade de ocorrências de descargas elétricas atmosféricas em uma determinada área que, neste caso, adotou-se 5km ao redor do equipamento. A escolha dessa distância foi baseada devido ao limite de sensibilidade do equipamento [6] [9].

A Figura 2 mostra o comportamento do campo elétrico que foi observado no curso desta pesquisa frente a situações de grande intensidade de cargas elétricas presentes na atmosfera. Ainda nota-se, da figura, a presença de descargas elétricas situadas a menos de 5km do local da zona de interesse na proteção.

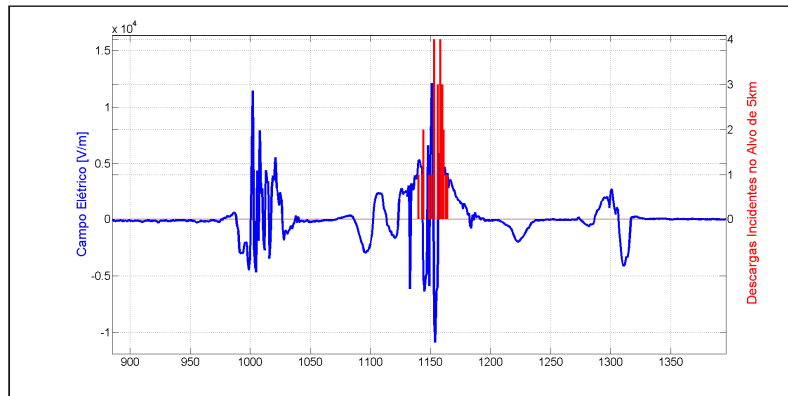


Figura 2 - Variação do campo elétrico atmosférico observado frente a variação do potencial elétrico presente na atmosfera (em azul) e as incidências de descargas elétrica na zona de interesse (em vermelho).

3 Ferramentas matemáticas utilizadas

Este artigo utiliza como ferramenta matemática a teoria dos conjuntos nebulosos inicialmente idealizados por Lotfi Zadeh em 1965 e que, a partir de 1978 com o desenvolvimento da teoria das possibilidades, tornou-se viável a comparação com a teoria das probabilidades [10][12].

A lógica Fuzzy ou, lógica nebulosa, propõe um cálculo matemático para traduzir e processar o conhecimento subjetivo de um especialista, ou seja, uma maneira de manipular o conhecimento com um determinado nível de incerteza. Em lógica nebulosa o grau de pertinência, ou seja, a referência para se determinar o quanto é possível que um determinado valor ou elemento pertençam a um determinado grupo, é calculado através de uma função que retornará valores compreendidos, normalmente, entre 0 e 1 indicando, assim, a possibilidade do valor ou elemento pertencer a um determinado grupo. A lógica nebulosa diferencia-se da lógica convencional por apresentar uma possibilidade que pode variar entre 0 e 1, em que o valor 0 representa a ausência de semelhanças e 1 a total semelhança. Na teoria clássica de conjuntos, o grau de pertinência é binário, ou seja, pertence ou não pertence ao conjunto [11].

Como se sabe, a lógica nebulosa tem como principal característica a transmissão de conhecimentos subjetivos para o problema analisado. Esta transmissão de conhecimentos é feita através de regras que são denominadas de regras Fuzzy e implementadas através de termos condicionais da seguinte forma: SE <premissa> ENTÃO <consequente>. Estas regras são facilmente entendidas por serem estruturadas próximas à linguagem usada pelos especialistas. Pode-se dizer, então, que as regras Fuzzy manipulam os termos lingüísticos [13].

A seguir, a Figura 3, mostra com clareza as etapas de um processo nebuloso.

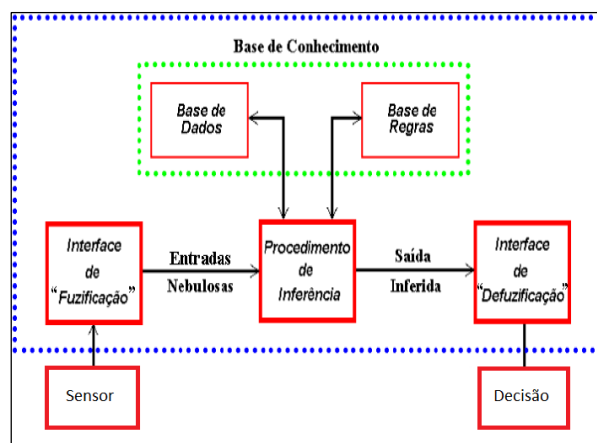


Figura 3 - Etapas de um processo nebuloso, adaptado para a aplicação deste trabalho.
Fonte: Adaptada de [13]

A primeira etapa dentro do processo de utilização de lógicas nebulosas é o que denomina-se de "Fuzificação". Nesta etapa os valores provenientes de um ou mais equipamentos ou sensores, são devidamente transformados de variáveis numéricas (valores *Crisp*) em variáveis naturais. Logo, o processo de Fuzificação incumbe-se de definir, através de conhecimentos subjetivos, as características e significados dos valores numéricos de entrada, assim, cada valor ou intervalo numérico terá seu correspondente em termo de variáveis lingüísticas[13].

Após o processo de Fuzificação, dá-se início ao assim denominado Processo de Inferência. A característica principal desse processo é a utilização propriamente dita do conhecimento subjetivo do especialista feito através de uma base de dados e que, através desse conhecimento, formulará diversas regras condicionais do tipo Se-Então que serão associadas às entradas fuzificadas. O processo de inferência ainda estende-se ao uso de operações de implicação que, dentre as quais, a utilizada neste trabalho foi a operação de Mandani [14].

O processo inverso ao da Fuzificação recebe o nome de Defuzificação e é nesse processo em que ocorre a transformação das variáveis lingüísticas - qualitativas - para variáveis naturais, ou seja, quantitativas e, para tal, diversos métodos podem ser empregados tal como o método do bissetor de área [15].

Outras ferramentas ainda foram utilizadas nesse estudo a fim de se complementar o conjunto de dados que servirão de entrada para o processo nebuloso, dentre elas cabe destacar a média aritmética simples, o desvio padrão e algumas abordagens de processamento de sinais, tais como, operações com atraso e deslocamento de vetores.

4 Metodologia utilizada

A metodologia empregada nesse estudo pode ser dividida em duas etapas. A primeira etapa consistiu na preparação dos dados de campo elétrico que foram empregados no processo Fuzzy. Já a segunda etapa foi destinada a concepção do sistema nebuloso.

4.1 Análise e preparação dos dados de campo elétrico

Os dados provenientes do sensor de campo elétrico foram tratados de maneira a se obter o valor máximo, em módulo, do campo elétrico dentro do intervalo de 1 minuto. Assim, ao invés de uma taxa de amostragem de um valor a cada segundo, passou-se a trabalhar com apenas um valor por minuto.

As informações sobre o campo elétrico atmosférico, advindas do Field Mill (modelo CS110 desenvolvido e fabricado pela Campbell Scientific) possuem uma taxa de amostragem de uma amostra por minuto, estas foram trabalhadas a fim de se obter quatro informações sobre tais dados. São elas: O valor máximo em módulo do campo elétrico nos 10 minutos anteriores; a média aritmética simples e o desvio padrão dos últimos 5 valores; e a derivada da variância do valor atual com o décimo valor anterior.

O valor máximo do campo elétrico nos 10 minutos anteriores pode ser definido da seguinte maneira:

$$E_{max10} = \max(|E(t-9)|, |E(t-8)|, \dots, |E(t-2)|, |E(t-1)|, |E(t)|) \quad (1)$$

A média e o desvio são dados pelas equações (2) e (3) respectivamente.

$$\mu_{E5} = \frac{1}{5} \sum_{i=0}^4 E(t-i) \quad (2)$$

$$\sigma_{E5} = \sqrt{\frac{1}{4} \sum_{i=0}^4 (E(t-i) - \mu_{E5})^2} \quad (3)$$

Através do quociente de Newton, a derivada de uma seqüência de valores discretos é dada pela simples diferença entre dois valores discretos que, neste caso, é expresso pela equação (4).

$$\sigma_{E10}' = \frac{E(t-9) - E(t)}{10} \quad (4)$$

Além das equações anteriores, que foram utilizadas como entrada da lógica nebulosa, utilizou-se também os dados de campo elétrico para a gestão de alertas baseada na simples heurística de limiar de entrada de saída e de tempo de permanência determinado. Esse alerta pode ser definido da seguinte maneira:

$$\text{Estado de alerta} = \begin{cases} 1, & E_{max30} \geq |CE_{limite}| \\ 0, & E_{max30} < 0 \end{cases} \quad (5)$$

Conclui-se, a partir da equação (5), que a condição de alerta é dependente do valor máximo do campo elétrico nos 30 minutos anteriores, expressão que é regida semelhantemente a já mencionada equação (1). O limite do campo elétrico máximo dentro do vetor de 30 minutos foi estabelecido em 2000 V/m, valor condizente com o encontrado em [3][7].

4.2 Concepção do sistema nebuloso

O sistema nebuloso concebido nesse trabalho seguiu o procedimento mencionado anteriormente e mostrado na Figura 3. Os dados reais, provenientes do sensor de campo elétrico, foram convertidos em variáveis de estudo segundo as equações (1) (2) (3) e (4). Além disso, utilizou-se também dados relativos a precipitação acumulada num intervalo de 15 minutos. Como consequência, o gestor de alertas nebuloso terá então 5 entradas "Crisp". Tais entradas são mostradas na Figura 4 abaixo:

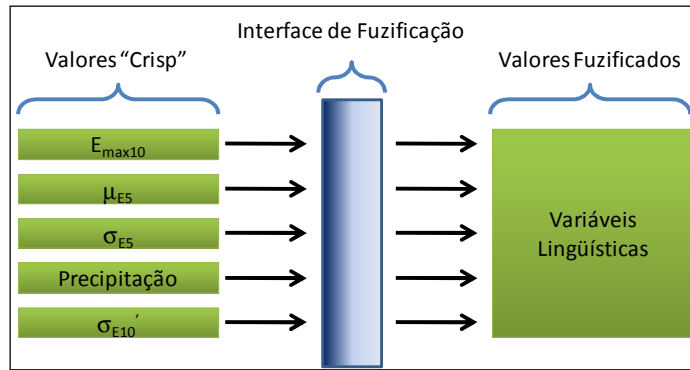


Figura 4 - Processo de Fuzificação das variáveis de entrada

O processo de fuzificação foi feito com base no conhecimento subjetivo do processo e, para tal, utilizou-se as funções de pertinência devidamente ajustadas para cada caso. As funções podem ser vistas na Figura 5.

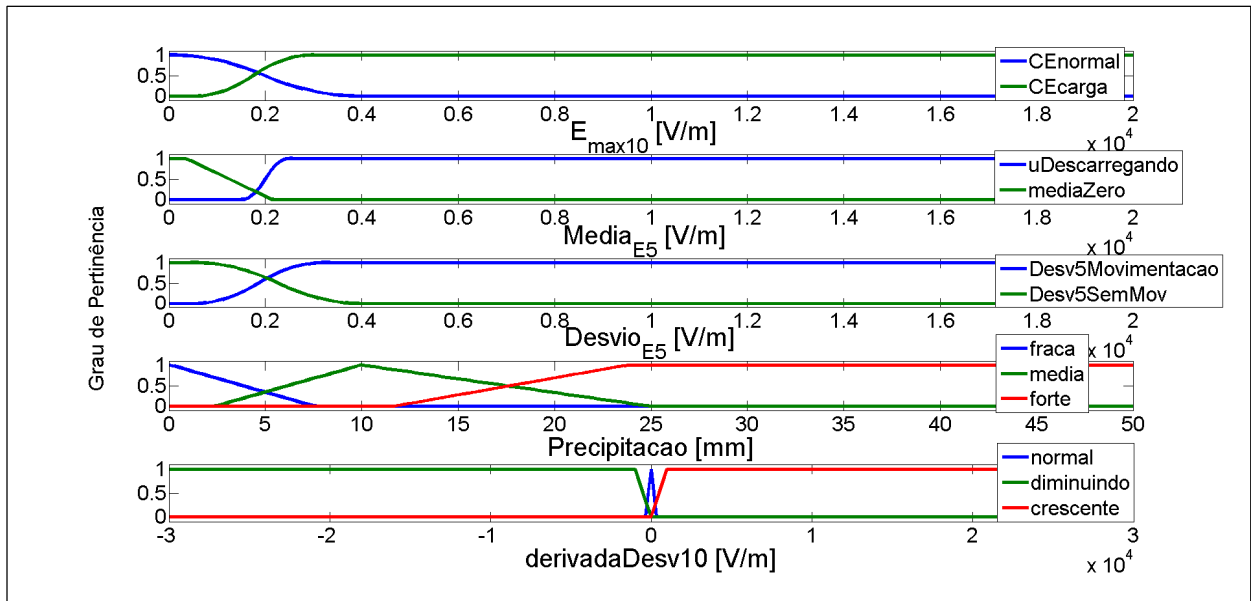


Figura 5 - Funções de pertinências utilizadas para transformações dos dados "Crisp" em variáveis linguísticas.

Da análise da Figura 5 tem-se que os valores derivados do campo elétrico variam entre 0 e 20000 V/m (com exceção da derivada do desvio em 10 minutos que compreende-se entre 0 e 30000 V/m), esse intervalo é coerente com os valores reais de campo elétrico atmosférico observados. Além disso, observa-se que as inferências das funções de pertinências estão concentradas na região entre 0 e 4000 V/m.

As funções de pertinência para a saída da lógica nebulosa são mostradas na Figura 6. Nela é possível observar que a saída foi dividida em 5 níveis de alerta: Baixo; Médio-Baixo; Médio; Médio-Alto e; Alto.

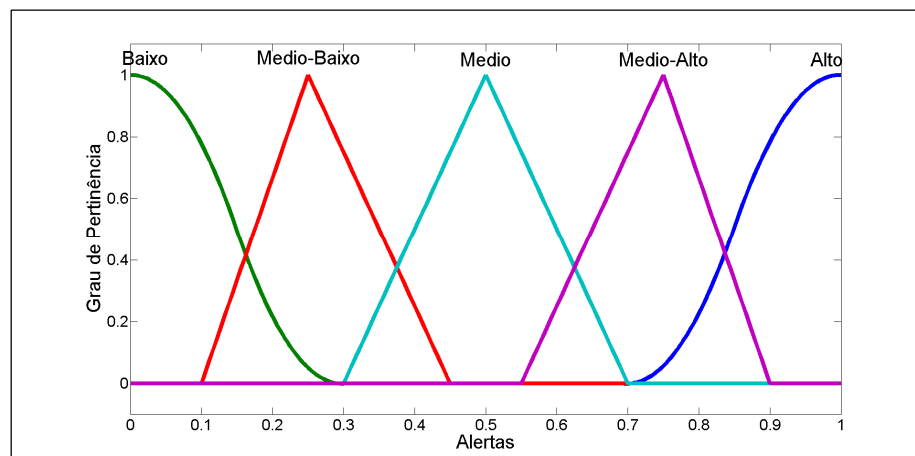


Figura 6 - Funções de pertinência de saída da lógica nebulosa.

O procedimento de inferência foi baseado no modelo clássico de Mandani. As regras utilizadas para a gerência do método são expostas a seguir pela Tabela 1:

Tabela 1 - Conjunto de regras de inferência

| | | |
|--|---|-------------------------------------|
| Se (Média _{E5} é mediaZero) | E (Desvio _{E5} é Desv5Movimentacao) | ENTAO (Alerta é Medio-Alto) |
| Se (Desvio _{E5} é Desv5Movimentacao) | E (Precipitacao é media) | ENTAO (Alerta é Medio-Alto) |
| Se (Desvio _{E5} é Desv5Movimentacao) | E (Precipitacao é forte) | ENTAO (Alerta é Baixo) |
| Se (Desvio _{E5} é Desv5SemMov) | E (Precipitacao é fraca) | ENTAO (Alerta é Baixo) |
| Se (Desvio _{E5} é Desv5SemMov) | E (Precipitacao é media) | ENTAO (Alerta é Medio-Baixo) |
| Se (Desvio _{E5} é Desv5Movimentacao) | | ENTAO (Alerta é Medio) |
| Se (E _{max10} é CEcarga) | E (Precipitacao é media) | ENTAO (Alerta é Medio) |
| Se (E _{max10} é CEcarga) | E (Precipitacao é forte) | ENTAO (Alerta é Medio-Alto) |
| Se (E _{max10} é CEnormal) | E (Precipitacao é fraca) | ENTAO (Alerta é Baixo) |
| Se (E _{max10} é CEnormal) | E (derivadaDesv10 é normal) | ENTAO (Alerta é Baixo) |
| Se (E _{max10} é CEcarga) | E (derivadaDesv10 é diminuindo) | ENTAO (Alerta é Medio-Baixo) |
| Se (Desvio _{E5} é Desv5SemMov) | E (derivadaDesv10 é crescente) | ENTAO (Alerta é Medio-Baixo) |

O processo de defuzzificação foi realizado através do método bisetor de área. A escolha desse método deu-se através de observações realizadas.

Seguindo o processo esquematizado pela Figura 3 chega-se a fase do processo de decisão de alertas. Nessa etapa é estabelecido um limite de entrada e permanência com base nos valores de saída da lógica nebulosa. Neste caso, a saída representa a probabilidade de ocorrência de descargas elétricas atmosféricas em um diâmetro de 10km. O melhor tempo de permanência mínimo para o alerta foi observado em 10 minutos e o limiar de ativação do alerta ficou estabelecido em 0,45.

5 Resultados obtidos

A seguir serão mostrados os resultados comparativos entre o modelo de gestão de alertas utilizando a lógica nebulosa e o modelo clássico de gestão de alerta baseado exclusivamente no limite de campo elétrico.

A situação de campo elétrico estudado nessa comparação será o ocorrido conforme a Figura 2, nela observa-se a variação do campo elétrico com e sem a ocorrência de descargas elétricas, além disso, em uma imagem mais detalhada, observa-se que para o mesmo intervalo de observação ocorreram precipitações atmosféricas. A Figura 7 abaixo faz uma composição entre esses dados.

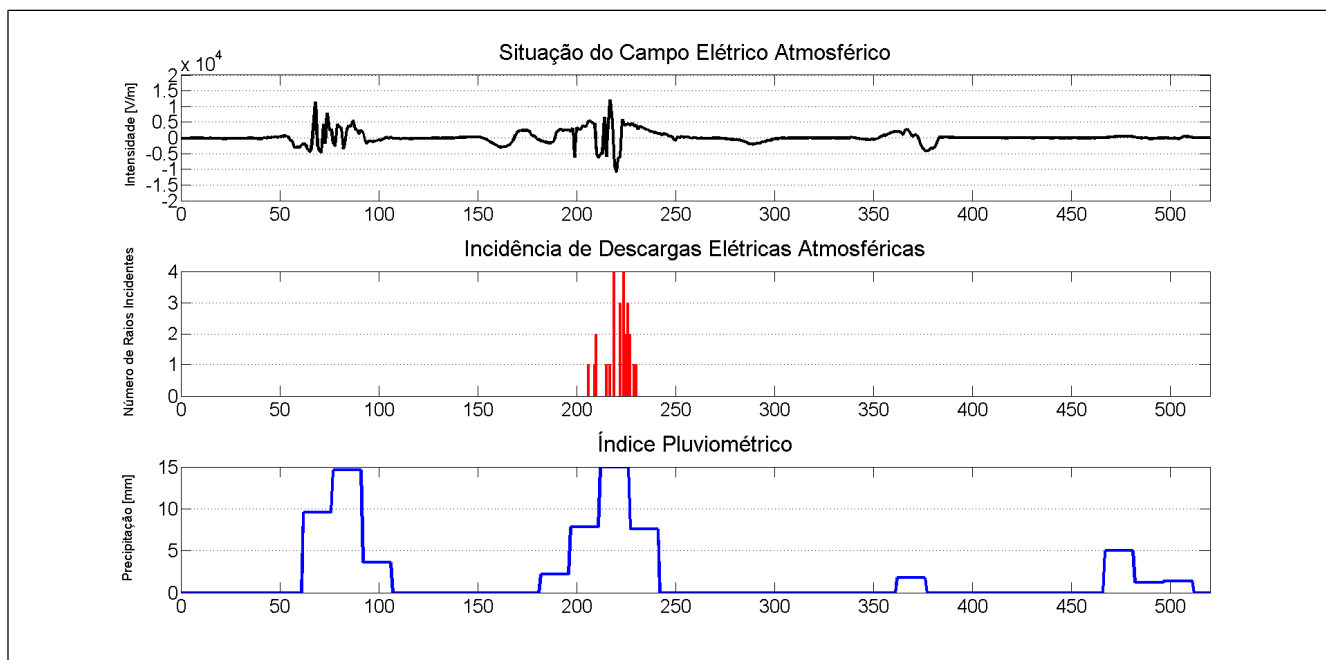


Figura 7 - Situações meteorológicas.

Ainda analisando a Figura 7, acima, vê-se a complexidade para a determinação de um estado efetivo de alerta, em que o alerta possa ser ativado com antecedência razoável e sem falsos alertas, ou seja, situações nas quais houve alerta mais não houveram descargas elétrica atmosféricas. Observa-se que existiram situações em que o campo elétrico apresentou grandes variações em curto espaço de tempo e com picos de até 5000 V/m, porém, sem descargas elétricas. Ao mesmo tempo, observa-se precipitação no local, porém, isso não significa que a ocorrência de precipitação exclui a possibilidade de incidência de descargas atmosféricas, ainda, dessa análise, também não se observa relação entre precipitação e movimentação de campo elétrico.

A saída da gestão de alertas Fuzzy é mostrada na Figura 8, abaixo, juntamente com a situação de campo elétrico e a incidência de descargas elétricas atmosféricas.

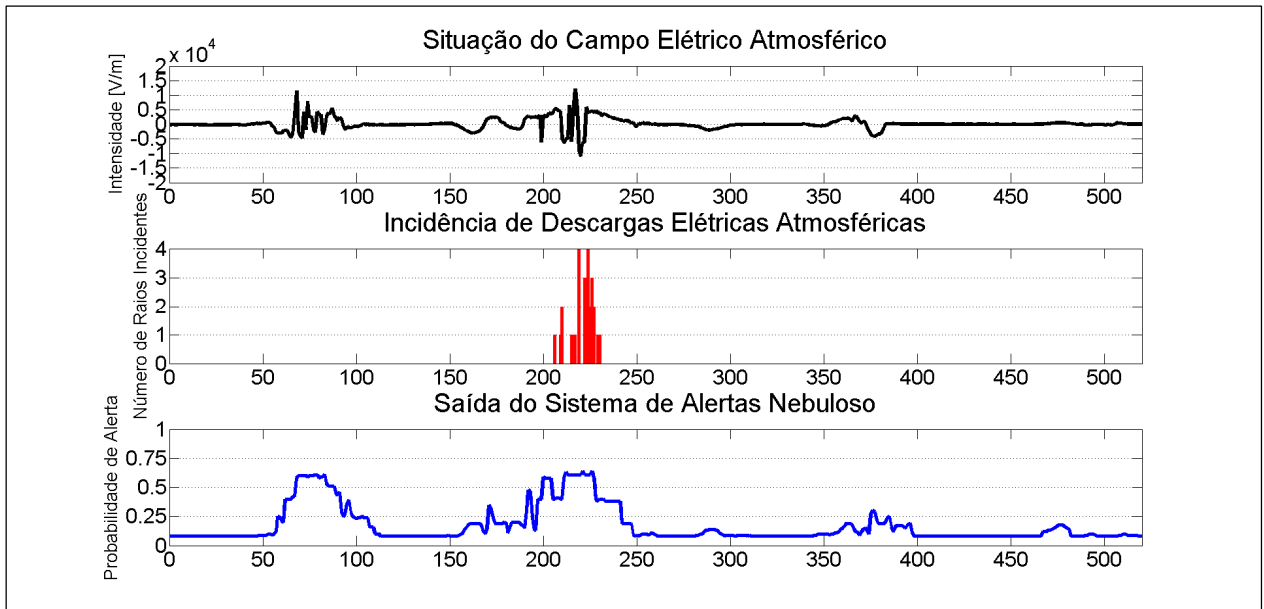


Figura 8 - Análise da saída defuzificada.

Como era esperado, a saída defuzificada apresentou variações, inclusive durante a ocorrência de descargas elétricas atmosféricas. Essa questão é facilmente resolvida com a inclusão do já mencionado processo decisório. A seguir, na Figura 9, será mostrada a saída do processo decisório conforme explicitado no item 3.2. Ainda nesta imagem, é possível fazer a comparação do método utilizando a lógica nebulosa com a simples heurística baseada no limite de campo elétrico.

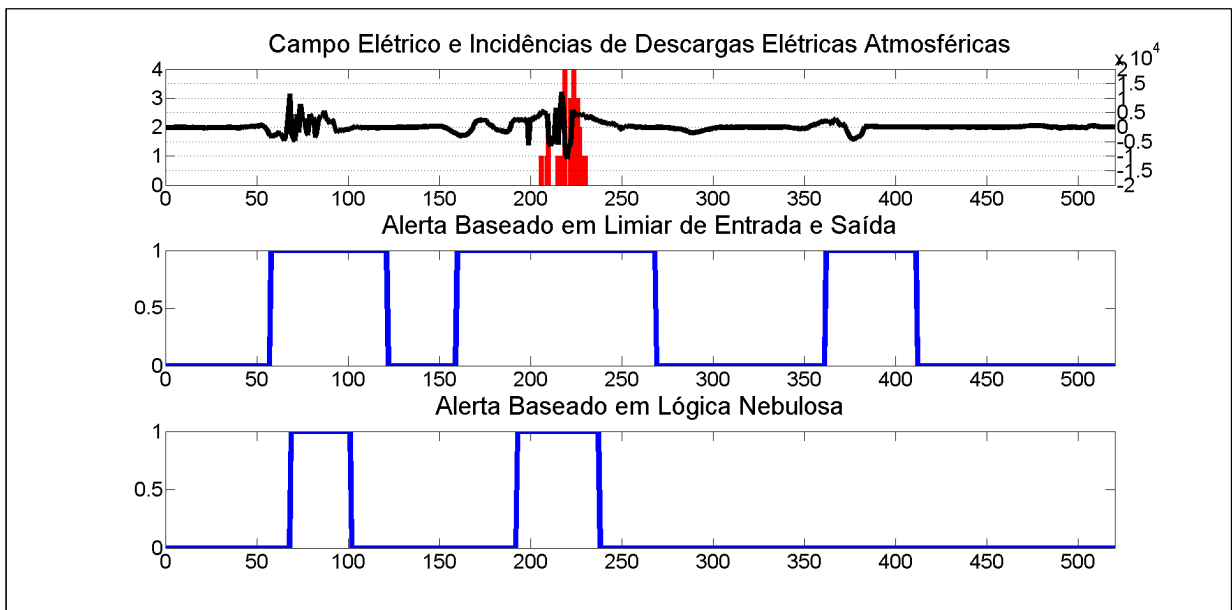


Figura 9 - Comparação entre o método clássico e a abordagem nebulosa.

É nítida, a partir da Figura 9, que a eficiência do método utilizando lógica nebulosa é mais vantajosa para os casos de alertas sem incidência de descargas atmosféricas. Contudo, observa-se uma redução quanto ao tempo de antecedência em relação a primeira ocorrência de descarga elétrica. Essas informações comparativas são encontradas na Tabela 2, abaixo.

Tabela 2 - Comparativo entre os métodos utilizados

| Método | Horas em Alerta | Tempo de Antecedência |
|-------------------------|----------------------|-----------------------|
| Baseado em limiares | 3 horas e 42 minutos | 46 minutos |
| Baseado lógica nebulosa | 1 hora e 18 minutos | 13 minutos |

5 Considerações Finais

A utilização de lógicas nebulosas para a gestão de alertas de descargas elétricas atmosféricas, objeto de estudo deste trabalho, mostrou-se bastante interessante quanto a diminuição de horas em alerta. A diminuição de horas em alerta gera economia aos interessados em um sistema de alerta eficiente, pois, essa redução irá diminuir a relação homem-hora parado, ou seja, a quantidade de horas em que um trabalhador ficará impedido de exercer suas atividades. Observando os resultados vê-se que a quantidade de horas em alerta ficou aproximadamente três vezes menor quando comparada ao método baseado em limiares de campo elétrico. Porém, o tempo de antecedência ficou prejudicado, chegando a ser aproximadamente 3,5 vezes menor que o tempo de antecedência utilizando o método baseado em limiares de campo elétrico. O tempo de antecedência ideal seria de 30 minutos pois é o tempo suficiente para a evacuação do local, contudo, mesmo com o tempo de antecedência baixo, não houveram incidências de descargas atmosféricas sem prévio alerta.

A implementação da lógica nebulosa, para este caso, mostrou-se ser simples. Contudo, ainda restam áreas de otimização a serem estudadas, é o caso do uso de algoritmos genéticos e também a possibilidade de utilização de redes neuro-fuzzy. Além disso, ainda estuda-se o ingresso de novas variáveis de entrada, tais como a ocorrência de descargas elétricas atmosféricas que estejam incidindo ao redor da região de interesse e, também, a utilização de dados probabilísticos provenientes de redes neurais treinadas exclusivamente com dados de descargas ocorridas nos últimos 10 anos.

6 Referências

- [1] D. R. Macgorman, W.D. Rust, The Electrical Nature of Storms, New York, **Oxford University Press**, (1998).
- [2] J. Montanya, J. Bergas, B. Hermoso, Electrical field measurements at ground level as a basis for lightning hazard warning, **Journal of Electrostatics**, 60 (2004), 241-246.
- [3] M. J. Murphy, R. L. Holle, N. W. S. Demetriades, Cloud-to-ground lightning warnings using electric field mill and lightning observations, **20th International Lightning Detection Conference**, Tucson, Arizona, USA, (2008).
- [4] R.H. Golde, Lightning, Physics of lightning. **Academic press**, Vol.1, 80-90. (1977).
- [5] D. J. Malan, Physics of Lightning, **Universities Press Ltd.**, London. 87-90 (1963).
- [6] A. Y. S. Igarashi, E. A. Leite, P. Tesson, Analyse de la corrélation entre les données de champs électriques et la probabilité d'occurrence de décharges atmosphériques, **PFE - IPB - Enseirb-Matmecca**, Bordeaux, France (2009)
- [7] W.H. Beasley, M.L. Megan, G.B Leon, R. M. Edward, R. Jabrzemski, J.W. Conway, M.D. Eillts., On the need for electric field meters to support critical lightning hazard warning decision processes. **Conference on Meteorological Applications of Lightning Data**. P1-13 (2005).
- [8] Mission Instruments, Electric Field Mill Operation, <http://www.missioninstrument.com>, disponível on-line.
- [9] M. Lacerda, R. Jaques, C. A. M. Rodriguez, E. M. Anselmo, C. L. Fritzen, J. C. Paro, W. A. Fernandes, W. M. Dias, Estrutura elétrica de uma tempestade sobre a cidade de São Paulo, **XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia**, (2010).
- [10] L. A. Zadeh. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, n. 3, p. 338-353, (1965.)
- [11] T. Kohagura, Lógica Fuzzy e suas aplicações, **Universiade Estadual de Londrina**, Trabalho de conclusão de curso, Departamento de computação (2007).
- [12] L. A. Zadeh., Ks. Fu, K. Tanaka, M. Shimura, Fuzzy sets and their applications to cognitive and decision processes. **Academic Press, Inc**. New York San Francisco London, (1975).
- [13] S. Sandri, C. Correa, Lógica Nebulosa, **V Escola de Redes Neurais, Promoção: Conselho Nacional de Redes Neurais**, c073 - c090, (1999).
- [14] E.H. Mamdani, Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant. **IEEE (Control and Science)**, 121 (1974), 1585-1588.
- [15] E. H. Mamdani. Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers. **Int. J. Man-Mach. Stud.**, 8:669 – 678, (1976)