

Alci Antônio Haas

**UM MODELO *FUZZY* PARA ESTIMAR A DURABILIDADE
DOS TRANSFORMADORES DE ALTA TENSÃO DOS ENERGIZADORES DE CERCA**

Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em sistemas e processos industriais – mestrado, área de controle e otimização de processos industriais, universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em sistemas e processos industriais.

Orientador: Prof. Dr. Jacques Schreiber.

Co-orientador: Prof. Dr. Rolf Fredi Molz.

Santa Cruz do Sul, agosto de 2010

COMISSÃO EXAMINADORA

Titulares

Prof. Dr. Jacques Nelson Corleta Schreiber – Orientador

Prof. Dr. Rolf Fredi Molz – Co-orientador

Prof^a. Dra. Rejane Frozza – UNISC

Prof. Dr. João Baptista dos Santos Martins – UFSM

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida e pelas bênçãos recebidas.

Aos meus pais, Rosa e Léo, por tudo que fizeram por mim.

Agradeço à minha esposa Daniele, pelo apoio e pela compreensão nas horas que não pude dar-lhe a devida atenção.

Aos meus irmãos pela amizade sincera e eterna.

Ao meu orientador, prof. Dr. Jacques Schreiber, pela ajuda e disponibilidade.

Ao meu co-orientador, prof. Dr. Rolf Fredi Molz, pela colaboração.

Agradeço à empresa ZEBU SISTEMAS ELETRÔNICOS, em especial ao diretor Sr. José e sua sócia Elaine, pelo apoio recebido.

Aos colegas de serviço pela compreensão nas minhas ausências.

Aos colegas de mestrado pela amizade e troca de conhecimento.

Agradeço à coordenação do programa de pós-graduação em sistemas e processos Industriais, pelos serviços prestados.

Agradeço a todos os professores do mestrado em sistemas e processos industriais, que de uma ou de outra forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

Às secretárias, Janaina e Aline, pela presteza e atenção.

Agradeço a todos que torceram para que eu concluísse este mestrado.

RESUMO

A utilização de cercas elétricas para contenção de animais é amplamente utilizada na agropecuária moderna. O energizador de cerca, aparelho que emite pulsos de alta tensão na cerca, constitui o principal componente da cerca elétrica. Neste trabalho foi desenvolvido um modelo estatístico, para estimar a durabilidade do transformador de AT (alta tensão) de um aparelho energizador de cerca, levando em conta as condições de uso e as características físicas do local da instalação. Para modelar o sistema de cerca eletrificada foi utilizada lógica *fuzzy*. O método de inferência *fuzzy* utilizado foi o modelo de MAMDANI e na *defuzzificação* foi utilizado o método do centro de gravidade (COG). O modelo foi implementado num simulador a ser utilizado no controle de qualidade de uma empresa fabricante de energizadores de cerca. O simulador apresenta uma estimativa para a durabilidade do transformador de alta tensão para as regiões de interesse da empresa, sendo que cada região tem suas características em relação à resistividade do solo, fator que influencia diretamente na qualidade do aterramento elétrico, que é componente fundamental para o bom funcionamento de um sistema de cerca eletrificada.

Palavras-chave: Cerca elétrica, energizador de cerca, eletrificador de cerca, transformador de alta tensão, aterramento elétrico, resistividade elétrica do solo, lógica *fuzzy*.

ABSTRACT

Electric fences to deter animals from crossing a boundary are widely used in the modern farming. The fence charger, device that releases an electrical pulse along a connected bare wire, it's the main component of an electric fence. In this work an statistic model was developed to estimate the durability of a fence chargers high voltage transformer, considering the conditions of the use and the physical characteristics of the installation place. fuzzy logic was used to modeling the electric fence system. In this work was used the MAMDANI's inference model and in the defuzzification module was used the center-of-gravity method. The fuzzy model was implemented in a simulator to be used in the quality control process by an electric fence energizer manufacturer. The simulator presents an estimate value for the durability of the fence chargers high voltage transformer for the company's interest regions, why each region has its soil electrical resistivity's characteristics, what influences directly the grounding quality, that's a basic component for the correct working of an electric fence system.

Keywords: Electric fence, electric fence energizer, fence charger, high-voltage transformer, grounding, soil electrical resistivity, fuzzy logic.

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO	UNIDADE
TR	Transformador	
AT	Alta tensão	
TR-AT	Transformador de alta tensão	
ABNT	Associação brasileira de normas técnicas	
USDA	United States department of agriculture	
TSK	Takagi-Sugeno-Kang	
COG	Centro de gravidade	
CM	Centro de massa	
FOM	Primeiro dos máximos	
LOM	Último dos máximos	
MOM	Média dos máximos	
HD	<i>Defuzzificação</i> por altura	
COLA	Centro de maior área	
COM	Centro de máximo	
V	Tensão elétrica	volt (V)
I	Corrente elétrica	ampère (A)
R	Resistência elétrica	ohm (Ω)
C	Capacitância elétrica	farad (F)
L	Indutância elétrica	henry (H)
X	Reatância elétrica	ohm (Ω)
Z	Impedância elétrica	ohm (Ω)
G	Condutância elétrica	siemens (S)
σ	Condutividade elétrica	siemens/metro (S/m)
P	Resistividade elétrica	ohm x m (Ω m)
P	Potência elétrica	watt (W)
Ep	Energia potencial elétrica	joule (J)
C1	Capacitância do capacitor C1	farad (F)
i1	Corrente do circuito de carga	ampère (A)
Vc1	Tensão de pico no capacitor C1	volt (V)

W_{c1}	Energia armazenada no capacitor C1	joule (J)
R_1	Resistência em série do circuito de carga	ohm (Ω)
t	Tempo	segundo (s)
$i_p(t)$	Corrente do primário do TR-AT	ampère (A)
$i_s(t)$	Corrente do secundário do TR-AT	ampère (A)
V_{in}	Tensão de alimentação do circuito	volt (V)
S	Chave do circuito gerador de pulsos	
Z_c	Impedância da cerca	ohm (Ω)
Z_{AE}	Impedância do aterramento da cerca	ohm (Ω)
Z_L	Impedância da carga	ohm (Ω)
Z_{AL}	Impedância do aterramento da carga	ohm (Ω)
ρ	Resistividade elétrica do material	ohm x m (Ωm)
R	Resistência elétrica do material	ohm (Ω)
A	Área da seção da caixa	metro Quadrado (m^2)
L	Comprimento da caixa	metro (m)
V	Tensão da bateria	volt (V)
I	Corrente elétrica medida no amperímetro	ampère (A)
σ	Condutividade elétrica do material	siemens/metro (S/m)
G	Condutância elétrica do material	siemens (S)
ρ_n	Resistividade da camada n	ohm x metro (Ωm)
h_n	Profundidade da camada n	metro (m)
d_n	Espessura da camada n	metro (m)
P	Resistividade do solo	ohm x metro (Ωm)
a	Espaçamento das hastes	metro (m)
P	Profundidade das hastes	metro (m)
R	Resistência elétrica do aterramento	ohm (Ω)
ρ_a	Resistividade aparente do aterramento	ohm x metro (Ωm)
L	Comprimento da haste	metro (m)
d	Diâmetro da haste	metro (m)
R_h	Resistência da haste "h" considerando a interferên	ohm (Ω)

	das demais hastes	
n	Número de hastes em paralelo	
R_{hh}	Resistência individual da haste “h”	ohm (Ω)
R_{hm}	Acréscimo da resistência da haste “h” devido a interferência de haste “m”	ohm (Ω)
b_{hm}	Parâmetro das resistências mútuas	metro (m)
e_{hm}	Espaçamento entre as hastes “h” e “m”	metro (m)
L	comprimento da haste	metro (m)
R_{eq}	Resistência equivalente sistema de aterramento	ohm (Ω)
A	Sistema de aterramento a ser medido	
B	Haste auxiliar	
p	Haste de potencial	
x	Distância da haste p em relação a A	metro (m)
E_g	Fonte de tensão alternada	
R	Resistência elétrica do fio condutor	ohm (Ω)
L	Indutância por metro de um condutor	henry/metro (H/m)
C	Capacitância da linha	farad (F)
G	Condutância <i>shunt</i>	siemens (S)
R_{boi}	Resistência elétrica do animal	ohm (Ω)
$R_{aterr.boi}$	Resistência elétrica do aterramento do animal	ohm (Ω)
$Z_{aterr.energ.}$	Impedância do aterramento do energizador	ohm (Ω)
R_{cerca}	Resistência elétrica da cerca	ohm (Ω)
R_{terra}	Resistência elétrica do aterramento	ohm (Ω)
A	Conjunto <i>fuzzy</i>	
\bar{A}	Complemento de um conjunto <i>fuzzy</i>	
X_A	Função característica de um subconjunto A	
μ	Grau de pertinência	
$\mu_A(x)$	Função de pertinência	
U	União	

\cap	Interseção
σ_k	Dispersão
m	Modal
x_i	Entradas do sistema <i>fuzzy</i>
A_j	Termos primários das variáveis de entrada
y_i	Saídas do sistema <i>fuzzy</i>
B_m	Termos primários das variáveis de saída
$D^{(k)}$	Coeficiente de disparo
K	Índice dos conjuntos <i>fuzzy</i>
\hat{y}	Saída do modelo TSK
b_{inf}	Saída do método FOM
b_{sup}	Saída do método LOM
b_{med}	Saída do método MOM
b_2^*	Saída do método COG
$\mu_{B_i}(b)$	Área da função de pertinência
B	Posição do centróide da função de pertinência
b^*	Saída do método HD
MB	Rótulo <i>fuzzy</i> muito bom
B	Rótulo <i>fuzzy</i> bom
MDB	Rótulo <i>fuzzy</i> médio bom
MD	Rótulo <i>fuzzy</i> médio
MDR	Rótulo <i>fuzzy</i> médio ruim
R	Rótulo <i>fuzzy</i> ruim
MR	Rótulo <i>fuzzy</i> muito ruim
P	Rótulo <i>fuzzy</i> péssimo
AR	Textura arenosa
MD	Textura média
AG	Textura argilosa
MAG	Textura muito argilosa

SL	Salino	
NSL	Não salino	
MBa	Rótulo <i>fuzzy</i> muito baixa	
Ba	Rótulo <i>fuzzy</i> baixa	
MDa	Rótulo <i>fuzzy</i> média	
Aa	Rótulo <i>fuzzy</i> alta	
MAa	Rótulo <i>fuzzy</i> muito alta	
IB	Rótulo <i>fuzzy</i> isolamento bom	
IMB	Rótulo <i>fuzzy</i> isolamento muito bom	
R_t	Resistência elétrica do aterramento	ohm (Ω)
Dtr	Durabilidade do TR-AT	
CM	Centro de massa do rótulo <i>fuzzy</i>	
A	Área do rótulo <i>fuzzy</i>	
X	Posição do centróide do rótulo <i>fuzzy</i>	
K	Número de rótulos	
μ_p	Grau de pertinência da figura	
A_t	Área do triângulo	
H	Altura do triângulo	
B	Base do triângulo	
Cm_t	Centro de massa do triângulo	
A_1	Área do retângulo	
Cm_1	Centro de massa do retângulo	
A_2	Área do triângulo retângulo	
Cm_2	Centro de massa do triângulo retângulo	
A	Área total da figura	
Cm	Centro de massa total da figura	
H	Altura do trapézio	
BM	Base maior	
Bm	Base menor	
$\Delta X'$	Deslocamento no eixo X	

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Principais componentes de uma cerca elétrica.	28
Figura 2: Divisão do circuito elétrico do energizador.	29
Figura 3: Estágio de carga do capacitor.	30
Figura 4: Estágio de descarga do capacitor.	30
Figura 5: Corte transversal de um TR-AT.	32
Figura 6: Caixa para medição de resistividade elétrica.	33
Figura 7: Variação da resistividade do solo em função da temperatura.	38
Figura 8: Solo estratificado.	40
Figura 9: Quatro hastes alinhadas cravadas no solo.	41
Figura 10: Imagem do ponto 1 e 4.	42
Figura 11: Aterramento com hastes em linha.	44
Figura 12: Uma haste cravada no solo.	44
Figura 13: Zonas de interferência nas linhas equipotenciais de duas hastes.	45
Figura 14: Parâmetros das interferências mútuas entre duas hastes.	46
Figura 15: Esquema do método volt-amperímetro.	48
Figura 16: Medição com terrômetro.	49
Figura 17: Componentes de uma cerca elétrica modelada por parâmetros concentrados.	52
Figura 18: Circuito simplificado de uma cerca elétrica.	53
Figura 19: Comparação entre um sistema convencional e <i>fuzzy</i>	56
Figura 20: Representação gráfica de um conjunto <i>fuzzy</i> com grau de pertinência 0,7.	57
Figura 21: Esquema geral de um sistema <i>fuzzy</i>	58
Figura 22: Representação gráfica da função triangular tipo lambda.	60
Figura 23: Representação gráfica das funções trapezoidais dos tipos Z, PI e S.	60
Figura 24: Representação gráfica da função gaussiana.	61
Figura 25: Representação gráfica da função conjunto unitário.	62
Figura 26: Conjunto <i>fuzzy</i> em universo discretizado.	63
Figura 27: Diagrama típico de um modelo de inferência de Mamdani.	66
Figura 28: Processo de inferência max-min do Mamdani.	67
Figura 29: Processo de inferência do modelo de Larsen.	69

Figura 30: Processo de inferência TSK.....	70
Figura 31: Processo de inferência do modelo de Tsukamoto.....	71
Figura 32: Defuzzificação pelo método COG.	73
Figura 33: Defuzzificação pelo método FOM.	74
Figura 34: Defuzzificação pelo método LOM.....	75
Figura 35: Defuzzificação pelo método MOM.....	76
Figura 36: Defuzzificação pelo método HD.	77
Figura 37: Defuzzificação pelo método COLA.....	77
Figura 38: Defuzzificação pelo método COM.	78
Figura 39: Estimativa da resistividade média do solo nos Estados Unidos.....	83
Figura 40: Representação gráfica dos conjuntos <i>fuzzy</i> para a resistividade do solo	84
Figura 41: Mapa de solos do Brasil	86
Figura 42: Média da umidade do solo entre 1997 e 2004 entre 500 e 1500 mm de profundidade.	88
Figura 43: Representação dos conjuntos <i>fuzzy</i> para a resistência do aterramento	91
Figura 44: Representação dos conjuntos <i>fuzzy</i> para a relação entre a carga e a potência	93
Figura 45: Representação dos conjuntos <i>fuzzy</i> para a durabilidade do TR-AT.....	95
Figura 46: Representação do rótulo <i>fuzzy</i> P	97
Figura 47: Representação do rótulo <i>fuzzy</i> MR	100
Figura 48: Representação do rótulo <i>fuzzy</i> MB	101
Figura 49: Representação do rótulo <i>fuzzy</i> B(0.7) e MB(0.3)	103
Figura 50: Interface visual do <i>software</i>	105
Figura 51: Campo de seleção do modelo.....	106
Figura 52: Campo de seleção da região	106
Figura 53: Campo de seleção do aterramento	107
Figura 54: Campo de seleção da carga	108
Figura 55: Botão simular	108
Figura 56: Simulação da situação de instalação número 1.	116
Figura 57: Simulação da situação de instalação número 5.	116
Figura 58: Simulação da situação de instalação número 10.	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tensão de pico mínima recomendada para os impulsos na cerca.....	27
Tabela 2 – Número de fios eletrificados e altura em relação ao solo, de acordo com o tipo de animal.	32
Tabela 3 – Fatores que afetam a resistividade elétrica do solo.....	35
Tabela 4 – Tipo de solo e respectiva resistividade elétrica.	36
Tabela 5 – Resistividade de diferentes tipos de solo com concentração de umidade...	36
Tabela 6 – Variação da resistividade elétrica com a temperatura para um solo arenoso.	38
Tabela 7 – Influência da composição química na resistividade do solo.	39
Tabela 8 – Tensão de saída para eletrificadores de diferentes potências para diferentes cargas ligadas.....	51
Tabela 9 – Representação tabular do conceito temperatura alta (TA).....	62
Tabela 10 – Regras <i>fuzzy</i> para resistividade do solo.	89
Tabela 11 – Conjuntos <i>fuzzy</i> para relação do número e dimensão das hastes.	91
Tabela 12 – Regras <i>fuzzy</i> para resistência do aterramento.	92
Tabela 13 – Regras <i>fuzzy</i> para relação entre a carga e a potência.	94
Tabela 14 – Regras <i>fuzzy</i> para a durabilidade do TR-AT.	96
Tabela 15 – Características da instalação dos energizadores utilizados nos testes de durabilidade do TR-AT.	114
Tabela 16 – Valores <i>fuzzy</i> das características da instalação dos energizadores utilizados nos testes de durabilidade do TR-AT.	114
Tabela 17 – Resultados obtidos após 18 meses de testes.	115
Tabela 18 – Comparação dos resultados simulados com os resultados dos testes. ..	117

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resumo das quatro etapas de inferência <i>fuzzy</i>	82
Quadro 2 – Valores médios dos conjuntos <i>fuzzy</i> para a resistividade do solo.....	84
Quadro 3 – Conjuntos <i>fuzzy</i> para a textura do solo	87
Quadro 4 – Conjuntos <i>fuzzy</i> para a salinidade do solo	87
Quadro 5 – Conjuntos <i>fuzzy</i> para a umidade do solo.....	89
Quadro 6 – Regras de inferência <i>fuzzy</i> para a resistividade do solo.....	89
Quadro 7 – Valores dos conjuntos <i>fuzzy</i> para a resistência do aterramento	90
Quadro 8 – Regras de inferência <i>fuzzy</i> para a resistência do aterramento.....	92
Quadro 9 – Valores dos conjuntos <i>fuzzy</i> para a relação entre a potência e a carga ligada no energizador	93
Quadro 10 – Valores dos conjuntos <i>fuzzy</i> para potência do energizador	94
Quadro 11 – Valores dos conjuntos <i>fuzzy</i> para a carga ligada	94
Quadro 12 – Regras de inferência <i>fuzzy</i> para a relação carga e potência.....	94
Quadro 13 – Regras de inferência <i>fuzzy</i> para a durabilidade do TR-AT	95
Quadro 14 – Regras de inferência <i>fuzzy</i> para a isolação do TR-AT	96
Quadro 15 – Regras de inferência <i>fuzzy</i> para a durabilidade do TR-AT	96
Quadro 16 – Procedimentos executados pelo comando simular do <i>software</i>	109
Quadro 17 – Regras <i>fuzzy</i> da primeira etapa de inferência	109
Quadro 18 – Regras <i>fuzzy</i> da segunda etapa de inferência	110
Quadro 19 – Regras <i>fuzzy</i> da terceira etapa de inferência	111
Quadro 20 – Estrutura de repetição que identifica os rótulos <i>fuzzy</i> presentes nas saídas da segunda etapa de inferência.....	111
Quadro 21 – Regras <i>fuzzy</i> da última etapa de inferência.....	112
Quadro 22 – Estrutura de repetição que identifica os rótulos <i>fuzzy</i> presentes nas saídas da última etapa de inferência	112
Quadro 23 – Estrutura de <i>defuzzificação</i> pelo método COG.....	113
Quadro 24 – Regras <i>fuzzy</i> para a durabilidade do TR-AT	115
Quadro 25 – Resultados da simulação	117

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	TRABALHOS RELACIONADOS	19
3	SISTEMA DE CERCA ELÉTRICA	24
3.1	Definições de alguns termos relevantes relacionados com eletricidade.....	24
3.2	Cerca elétrica	26
3.2.1	Princípio de funcionamento	26
3.2.2	Componentes de uma cerca elétrica	27
3.2.3	Energizador de cerca elétrica	28
3.2.3.1	Transformador de alta tensão	31
3.2.4	Construção de uma cerca elétrica	32
3.3	Resistividade e condutividade elétrica do solo	33
3.3.1	Fatores que influenciam na resistividade do solo.....	35
3.3.1.1	Influência do tipo de solo.....	35
3.3.1.2	Influência da umidade	36
3.3.1.3	Influência da temperatura.....	37
3.3.1.4	Influência da salinidade	39
3.3.1.5	Influência da estratificação	40
3.3.2	Medição da resistividade elétrica do solo	41
3.4	Resistência elétrica de aterramento	43
3.4.1	Sistema de aterramento com uma haste vertical	44
3.4.2	Interligação de hastes alinhadas em paralelo	45
3.4.3	Medição da resistência de aterramento.....	47
3.4.3.1	Método volt-amperímetro	47
3.4.3.2	Medição usando um terrômetro.....	49
3.5	Relação carga potência.....	50
3.6	Durabilidade do transformador de alta tensão.....	51

3.7	Considerações finais	54
4	LÓGICA FUZZY.....	55
4.1	Noções de lógica <i>fuzzy</i>	55
4.2	Funções de pertinência	59
4.3	Operações com conjuntos <i>fuzzy</i>	63
4.4	Regras de produção <i>fuzzy</i>	64
4.5	<i>Fuzzificação</i>	65
4.6	Inferência <i>fuzzy</i>	65
4.6.1	Modelo de Mamdani	66
4.6.2	Modelo de Larsen.....	69
4.6.3	Modelo Takagi-Sugeno-Kang (TSK).....	69
4.6.4	Modelo de Tsukamoto	71
4.7	Composição	72
4.8	Métodos de <i>defuzzificação</i>	72
4.8.1	Centro de massa (COG – <i>Center of gravity</i>).	72
4.8.2	Métodos dos máximos.....	74
4.8.2.1	Menor dos máximos (FOM – <i>First of maximum</i>).....	74
4.8.2.2	Maior dos máximos (LOM – <i>Last of maximum</i>).	75
4.8.2.3	Média dos máximos (MOM – <i>Mean of maxima</i>).	75
4.8.3	<i>Defuzzificação</i> por altura (HD – <i>Height defuzzification</i>).....	76
4.8.4	Centro de maior área (COLA – <i>Center of largest area</i>).	77
4.8.5	Centro de máximo (COM – <i>Center of maximum</i>).	78
4.9	Considerações finais	78
5	MODELO FUZZY PROPOSTO.....	79
5.1	Metodologia.....	79
5.1.1	Classificação da pesquisa	79
5.1.2	Processo de inferência <i>fuzzy</i> do sistema modelado.....	80
5.1.3	Primeira etapa do processo de inferência <i>fuzzy</i>	83
5.1.4	Segunda etapa do processo de inferência <i>fuzzy</i>	90
5.1.5	Terceira etapa do processo de inferência <i>fuzzy</i>	92

5.1.6	Quarta etapa do processo de inferência <i>fuzzy</i>	95
5.1.7	Processo de <i>defuzzificação</i>	96
5.1.8	Descrição do <i>software</i>	105
5.1.9	Validação do método.....	113
6	CONCLUSÕES	118
	REFERÊNCIAS	120

1 INTRODUÇÃO

A agropecuária para ser competitiva, assim como toda atividade rural, necessita de novas tecnologias e novos equipamentos que proporcionam praticidade e redução de custos. Neste contexto, a cerca elétrica reduz o custo e o tempo de confecção da cerca, facilitando o “pastejo” rotativo que, aliado às novas técnicas de manejo e novas variedades de pastagens, é responsável por grande parcela do crescimento da agropecuária moderna.

O energizador de cerca, equipamento que emite pulsos de alta tensão na cerca, é o componente principal de um sistema de cerca elétrica. As empresas nacionais que fabricam energizadores procuram acompanhar as novas tecnologias e para competir com os produtos estrangeiros precisam encontrar soluções de baixo custo, dentro das normas de segurança, sem abrir mão da qualidade dos seus produtos.

A empresa fabricante de eletrificadores de cerca ZEBU SISTEMAS ELETRÔNICOS, parceira deste trabalho, motivou o estudo referente à durabilidade dos transformadores de alta tensão dos energizadores de cerca, tendo em vista que os dados coletados ao longo dos anos apontam problemas em situações de falta de aterramento, e na ausência de uma carga mínima para o energizador.

A durabilidade do transformador de alta tensão é o problema estudado neste trabalho. O objetivo deste estudo é o desenvolvimento de um modelo aproximado que possa ser utilizado para simular as características de uma cerca elétrica, e apresentar uma estimativa para a durabilidade do transformador de alta tensão do energizador de cerca. O modelo proposto utiliza lógica *fuzzy* para descrever as diversas situações de instalação de cercas elétricas.

A seguir, no capítulo 2, será apresentada uma revisão da literatura referente aos assuntos relacionados com o tema deste trabalho. No capítulo 3 são apresentadas algumas definições sobre eletricidade e são descritos os componentes de um sistema de cerca elétrica. O capítulo 4 trata sobre lógica *fuzzy*. No capítulo 5 é detalhada a metodologia aplicada na elaboração dos conjuntos *fuzzy* e no desenvolvimento do *software* e a validação do método proposto. O presente trabalho é finalizado com o capítulo 6, que apresenta as conclusões do trabalho.

2 TRABALHOS RELACIONADOS

Neste capítulo será feita uma revisão da literatura referente a cercas elétricas, condutividade elétrica do solo, aterramento elétrico e lógica *fuzzy*.

As publicações referentes a sistemas de cerca elétrica concentram seus estudos em métodos de projeto, modelagem do sistema de cerca elétrica, sistemas de proteção do energizador de cerca, monitoramento de falhas do sistema e no ruído gerado pelo sistema e sua interferência causada em sistemas de telecomunicação.

A modelagem de um sistema de cerca elétrica foi apresentada por MARTINO, em sua dissertação de mestrado **Estudo e implementação de um energizador de cerca elétrica**. MARTINO propôs um método de projeto do circuito de potência do energizador de cerca, tendo em vista que muitos fabricantes ainda desenvolvem seus projetos de forma empírica. Em seu estudo MARTINO apresenta um modelo equivalente de um sistema de cerca elétrica fundamentado na teoria de linhas de transmissão, na teoria de transitórios e ondas viajantes e também, um novo arranjo para um dispositivo de proteção contra descargas atmosféricas para o energizador de cerca (MARTINO, 2005). THRIMAWITHANA e MADAWALA, em seus artigos "**Pulse propagation along single wire electric fences**" e "**Pulse propagation along multi wire electric fences**", apresentam uma técnica semi-analítica para prever as características de propagação dos transientes dos pulsos de alta tensão ao longo de uma cerca elétrica. A técnica modela uma cerca elétrica no domínio da frequência, para facilitar uma solução analítica para a propagação dos pulsos de alta tensão ao longo da cerca elétrica (THRIMAWITHANA e MADAWALA, 2007).

VINCENT et al, no manual "**The mitigation of radio noise from external sources**", faz uma análise da rádiointerferência em equipamentos de comunicação causada por fontes de ruído externas, dentre elas, os impulsos de alta tensão que propagam-se pela cerca elétrica (VINCENT et al, 2007).

Atualmente, equipamentos mais sofisticados, utilizam técnicas de comunicação sem fio para interface com o usuário e para monitoramento de falhas. GÓMEZ POO, em sua dissertação de mestrado "**Electric fence line to PC wireless radio frequency communications interface**", apresenta um sistema de comunicação sem fio para

monitorar as condições físicas de uma cerca elétrica através de um computador pessoal. Em seu trabalho GÓMEZ POO utilizou um equipamento comercial que emprega um sistema por controle remoto e rede de sensores para monitorar o funcionamento da cerca elétrica, o foco do trabalho foi o desenvolvimento de um link de rádio frequência entre a placa lógica do equipamento em um computador pessoal (POO, 2006).

O aterramento elétrico é um tema comumente pesquisado, porém as pesquisas geralmente são direcionadas visando o aterramento como um sistema de proteção, o que não é a principal finalidade no sistema de cerca elétrica, no qual o aterramento é parte fundamental do circuito. O ministério da agricultura, alimentos e pesca da província de British Columbia, CA, no folheto “**Grounding systems for electric fencing**”, apresenta e descreve o funcionamento dos dois métodos de aterramento mais utilizados em sistemas de cercas elétricas, o sistema de aterramento com retorno pela terra e o sistema de aterramento com um fio de retorno, e descreve um procedimento de teste do sistema de aterramento (BCMAFF, 1996).

Atualmente, os estudos envolvendo aterramento elétrico, concentram-se na análise das respostas aos impulsos de alta tensão. LORENTZOU e HATZIARGYRIOU, no artigo “**Transmission line modeling of grounding electrodes and calculation of their effective length under impulse excitation**”, apresentam um modelo para os eletrodos de aterramento baseado na análise de transientes. Apresentam uma metodologia de fácil aplicação para o cálculo da distribuição da tensão e da corrente ao longo do eletrodo de aterramento, baseada num modelo de linha de transmissão por parâmetros distribuídos. Neste artigo são calculadas as respostas ao impulso, mostrando o limite do comprimento do eletrodo que realmente contribui para a queda de potencial, este limite é o comprimento efetivo do eletrodo (LORENTZOU e HATZIARGYRIOU, 2005).

A qualidade do sistema de aterramento é fundamental, tanto para sistemas de proteção em instalações elétricas como num sistema de cerca elétrica. A resistividade elétrica do solo é o fator limitante da qualidade do aterramento. KINDERMANN E CAMPAGNOLO, no livro **Aterramento elétrico**, definem os principais fatores que influenciam na resistividade elétrica do solo, dentre eles: tipo de solo, teor de umidade,

temperatura e salinidade. As combinações dos fatores acima citados resultam em solos com características e valores de resistividade elétrica distintas e os solos, na sua maioria, não são homogêneos, e sim, formados por várias camadas com características e resistividades diferentes (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 2002). Também, VISACRO FILHO, em seu livro **Aterramentos elétricos: Conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento**, define os parâmetros que exercem maior influência sobre o valor da resistividade do solo, tais como: tipo do solo, umidade do solo, estrutura geológica, concentração e tipos de sais dissolvidos na água, granulometria do solo, compactidade do solo, temperatura do solo (VISACRO FILHO, 2002).

A resistividade elétrica do solo e o seu inverso, que é a condutividade elétrica, são temas bastante pesquisados atualmente, pois exercem influência direta sobre várias características do solo. FRASSON, PEREIRA e MOLIN, no artigo **confrontação de mapas de condutividade elétrica do solo com mapas pedológicos e sua aplicação na definição de unidades de gerenciamento para agricultura de precisão**, correlacionaram visualmente mapas de condutividade elétrica do solo com mapas pedológicos e avaliaram o comportamento da condutividade elétrica do solo na classificação pedológica, através de uma análise estatística descritiva (FRASSON, PEREIRA e MOLIN, 2004). MACHADO et al, no artigo **Mapeamento da condutividade elétrica e relação com os teores de argila de um latossolo vermelho sob plantio direto de grãos no Paraná**, avaliou a variabilidade espacial da condutividade elétrica de um latossolo vermelho e relacionou os valores de condutividade elétrica com a variação dos teores de argila do solo, obtendo correlações positivas entre a condutividade e a textura do solo, onde solos com altos teores de argila apresentaram condutividade elétrica maior do que os solos com textura mais arenosa (MACHADO et al, 2004). FAULIN, MOLIN e MAGALHÃES, no artigo **Variabilidade espacial do teor de água e sua influência na condutividade elétrica do solo**, apresentam os resultados de duas áreas experimentais, onde monitoraram o teor de água, a condutividade elétrica do solo e o teor de argila, obtendo a correlação entre o teor de água e a condutividade elétrica e a argila, utilizando regressão linear para os dados interpolados. Numa das áreas, onde o teor de argila era maior, a variabilidade espacial

da condutividade elétrica mostrou ser dependente dos teores de água e conseqüentemente da argila (FAULIN, MOLIN e MAGALHÃES, 2005).

Atualmente, é comum a utilização de sistemas *fuzzy* para descrever o comportamento de variáveis, que dependem de fatores difíceis de serem previstos com precisão, a exemplo de fenômenos naturais, características físicas e químicas.

CASTRO e MOLIN, no artigo **Definição de unidades de gerenciamento do solo através da sua condutividade elétrica e variáveis físico-uímicas utilizando classificação *fuzzy***, apresentaram os resultados do monitoramento da condutividade elétrica do solo de uma área de 35,8 ha, onde, analisaram o comportamento de sua variabilidade espacial e confrontaram com a variabilidade espacial de características físico-químicas do solo, analisaram a correlação dessas variáveis com os valores da condutividade elétrica obtidos, definiram as unidades de gerenciamento do solo utilizando a condutividade elétrica e as demais variáveis físico-químicas, através da técnica de agrupamento *fuzzy*. Os resultados obtidos comprovaram a elevada correlação da condutividade elétrica com o conteúdo de argila do solo (CASTRO e MOLIN, 2004). Também FAN e WANG, no artigo “**Application of fuzzy modeling to identify the soil resistivity of dynamic grounding system**”, propõe uma aproximação para a resistividade do solo baseada em modelagem *fuzzy*. Nesta aproximação o modelo *fuzzy* de Takagi-Sugeno é empregado para apropriar o processo não-linear do sistema (FAN e WANG, 2008).

A utilização de sistemas *fuzzy* em sistemas elétricos de potência foi apresentada por BARBOSA et al, no artigo **Lógica *fuzzy* aplicada na proteção de transformadores**. Neste artigo foi apresentado um método de proteção diferencial de transformadores de potência baseado em lógica *fuzzy* (BARBOSA et al, 2006). Também TELLES, em sua dissertação de mestrado **Sistema especialista *fuzzy* para diagnóstico de transformadores de potência**, apresentou o desenvolvimento de um sistema especialista *fuzzy* como proposta de solução computacional para automatizar o processo de análise e diagnóstico dos transformadores de potência (TELLES, 2005).

Os trabalhos acima descritos trazem importantes contribuições para o modelo *fuzzy* proposto. Os trabalhos referentes a sistemas de cerca elétrica apresentam

modelos elétricos para o sistema. Neste trabalho é proposto um modelo estatístico baseado em lógica *fuzzy*, focado na durabilidade do transformador de alta tensão.

Os trabalhos sobre condutividade elétrica e aterramento elétrico, mostram a correlação entre a textura do solo, a salinidade e a umidade do solo com a condutividade elétrica, dados fundamentais na elaboração dos conjuntos *fuzzy* para a resistividade elétrica do solo. No trabalho de Frasson, Pereira e Molin (2004), é apresentada a confrontação entre mapas pedológicos do solo com mapas de condutividade elétrica. Esta solução foi adotada neste trabalho. Na ausência de um mapa de condutividade elétrica dos solos do Brasil, os valores *fuzzy* para a resistividade elétrica do solo foram definidos a partir da confrontação de um mapa de umidade média dos solos, com o mapa pedológico de classificação dos solos do Brasil, do qual são utilizados os dados referentes à textura do solo e a salinidade.

Os trabalhos de lógica *fuzzy* mostram as vantagens dessa técnica na modelagem de sistemas que apresentam variações com fenômenos físicos e químicos, tais como, a resistividade elétrica do solo.

No próximo capítulo será descrito um sistema de cerca elétrica, com todos os componentes e as variáveis que influenciam no funcionamento do sistema.

3 SISTEMA DE CERCA ELÉTRICA

Neste capítulo serão apresentadas algumas definições relevantes sobre eletricidade, as características das cercas elétricas, as definições de resistividade elétrica do solo e as características dos sistemas de aterramento elétrico.

3.1 Definições de alguns termos relevantes relacionados com eletricidade

Tensão elétrica (V): É a diferença da concentração de elétrons entre dois pontos de um circuito elétrico. É também conhecida como diferença de potencial elétrico e sua unidade é o volt (V). Um volt é a tensão necessária para fazer circular uma corrente elétrica de um ampère (A) por um resistor de um ohm (Ω).

Corrente elétrica (i): É o deslocamento de elétrons livres num circuito elétrico. Também é conhecida por intensidade de corrente elétrica e sua unidade é o ampère (A).

Resistência elétrica (R): É a oposição ao fluxo de corrente através de um componente conhecido por resistor. A unidade é o ohm (Ω).

Capacitância elétrica (C): É a grandeza elétrica de um capacitor que determina a quantidade de carga que pode ser armazenada por unidade de tensão aplicada ao componente. Sua unidade é o farad (F).

Indutância elétrica (L): É a característica de um circuito elétrico que se opõe a variações na corrente elétrica do circuito. A sua unidade é o henry (H).

Reatância elétrica (X): É a resistência oferecida à passagem de corrente alternada devido à capacitância ou indutância num circuito. A unidade é o ohm (Ω). A reatância (X) é a parte imaginária da impedância. Se $X < 0$ a reatância é capacitiva e se $X > 0$ a reatância é indutiva.

Impedância elétrica (Z): É a oposição total que um circuito oferece à passagem de uma corrente elétrica variável no tempo. A unidade é o ohm (Ω). É expressa como um número complexo, possui uma parte real, equivalente à resistência elétrica (R), e uma parte imaginária (j), dada pela reatância elétrica (X). A fórmula da impedância elétrica é mostrada pela expressão 1.

$$Z = R + jX \quad (1)$$

Se $X = 0$, a impedância é igual à resistência ôhmica e o circuito é dito como puramente resistivo.

Condutância elétrica (G): É o recíproco da resistência elétrica. É a habilidade que um determinado material tem para conduzir eletricidade. A unidade é o Siemens (S).

Condutividade elétrica (σ): É a medida da facilidade com que uma corrente elétrica flui através de um material. A unidade é Siemens/metro (S/m).

Resistividade elétrica (ρ): É a medida da dificuldade com que uma corrente elétrica flui através de um material. A unidade é Ohm x m (Ωm).

Potência elétrica (P): A potência instantânea desenvolvida por um dispositivo elétrico de dois terminais é o produto da diferença de potencial elétrico entre os terminais e a corrente elétrica que passa através do dispositivo. A unidade é expressa em watts (W).

Energia potencial elétrica (Ep): É a forma de energia que uma partícula, ou um objeto, eletrizado adquire quando colocado na presença de um campo elétrico. A energia potencial elétrica é expressa em joules (J). A relação entre o quilowatt-hora (kWh), a unidade comumente utilizada na medição do consumo de energia elétrica, e o joule (J), é:

$$1\text{kWh} = 3.600.000 \text{ J.}$$

3.2 Cerca elétrica

A utilização da cerca elétrica como meio de contenção de animais teve início na década de trinta na Nova Zelândia. O engenheiro eletricitista Bill Gallagher, para solucionar um problema causado por um cavalo que costumava coçar-se no seu automóvel, inventou um sistema que ocasionava choques ao cavalo toda vez que ele sacudia a carroceria do automóvel. A solução do problema do cavalo fez com que Mr. Gallagher percebesse que tinha criado uma barreira psicológica para o animal e aprimorando a sua invenção acabou aplicando a idéia na contenção de animais, criando as cercas elétricas (PY, 1998).

No final da década de trinta, além da Nova Zelândia, também nos Estados Unidos foram desenvolvidos sistemas de cerca elétrica, difundindo-se para vários países na década de quarenta. Os energizadores eram de pouca potência e tinham problemas de elevada impedância na cerca, conseqüentemente o alcance era pouco, e as peças mecânicas utilizadas no chaveamento do circuito gerador dos pulsos tinham pouca durabilidade.

Nos anos sessenta o pesquisador neozelandês Doug Phillips desenvolveu um sistema baseado na descarga de um capacitor, marcando o início dos energizadores de baixa impedância (PY, 1998). Este sistema trouxe inúmeras vantagens em relação aos anteriores, possibilitou o uso de energizadores de altas potências, sem comprometer os níveis de segurança do sistema, em cercas de grandes extensões.

Os energizadores fabricados atualmente são de baixa impedância e utilizam semicondutores nos circuitos geradores de pulsos.

3.2.1 Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento de uma cerca elétrica é de formar uma barreira psicológica para o animal, uma vez que a dor ao receber um choque elétrico provindo de um arame eletrificado motiva o animal a evitar a aproximação da cerca. A proposta de uma barreira psicológica representa uma redução de custos de material e de mão

de obra na confecção e manutenção da cerca, quando comparada com uma barreira física, ou seja, uma cerca convencional.

Na tabela 1 são apresentadas as tensões de pico na cerca elétrica recomendadas para diferentes espécies de animais.

Tabela 1 – Tensão de pico mínima recomendada para os impulsos na cerca.

Animal	Tensão de Pico do impulso na cerca (V)
Cavalos	2000 – 3000
Vacas	2000 – 3000
Touros	3000 – 4000
Ovelhas / Cabras	4000 – 5000
Animais de Estimação	1000 – 2000
Suíños	2000
Lobos / Predadores	4000 – 5000
Cervos	4000 – 5000
Cães	700 – 1000

Fonte: DARE PRODUCTS, adaptado pelo autor.

3.2.2 Componentes de uma cerca elétrica

Uma cerca elétrica é constituída em quatro partes principais: Energizador, fio vivo (fios da cerca), isolamento (isoladores) e aterramento.

O energizador é a principal parte do sistema de cerca elétrica, é ele que condiciona a energia que é liberada para a eletrificação dos fios da cerca. O funcionamento deste componente é descrito na seção 3.2.3 (p.28).

O fio vivo, ou simplesmente fio eletrificado, é o meio condutor da corrente elétrica ao longo da cerca. Este condutor é conectado ao terminal positivo da saída de alta tensão do energizador.

Os isoladores tem a função de formar uma barreira isolante entre o fio vivo e o solo. Sem um isolamento adequado entre o fio eletrificado e a terra, as fugas de energia ocasionam a redução da tensão elétrica entre o fio e a terra, diminuindo o efeito de um eventual choque ao animal, caso este entre em contato com o fio energizado.

O aterramento elétrico é um importante componente da cerca elétrica, pois serve de meio condutor entre o terminal negativo da saída do energizador e o solo. Quanto menor a resistência elétrica do aterramento, maior será o fluxo de corrente ao longo da cerca, resultando num choque mais eficiente. O sistema de aterramento é descrito na seção 3.4 (p.43).

Outros componentes fazem parte de um sistema de cerca elétrica. Os mourões, ou postes, têm a função de sustentar os fios energizados. As catracas servem para esticar os arames eletrificados.

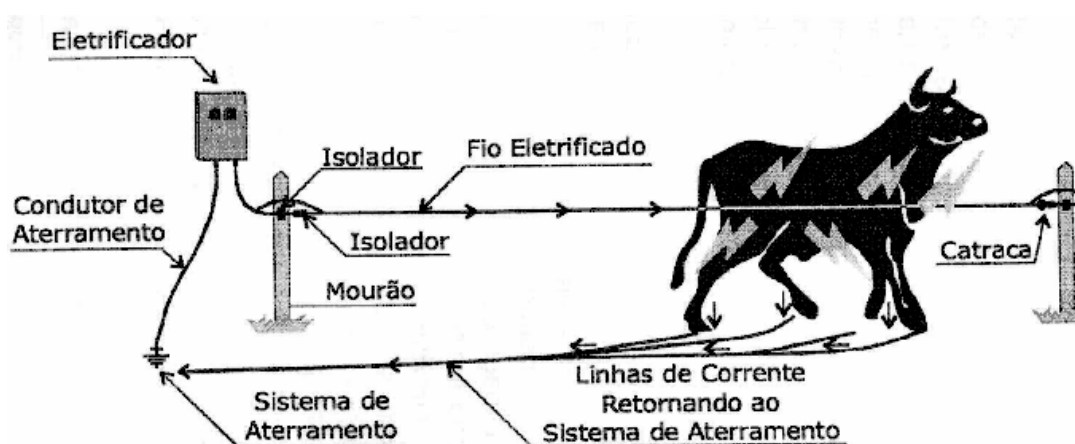


Figura 1: Principais componentes de uma cerca elétrica.

Fonte: MACIEL E LOPES, 2000

A figura 1 apresenta os principais componentes de uma cerca elétrica e mostra o fluxo de corrente elétrica ao longo do sistema de cerca eletrificada. A energia liberada pelo energizador é uma energia na forma de impulsos, ou seja, a duração da corrente elétrica é muito curta, na ordem de microssegundos e os intervalos entre pulsos são de aproximadamente 1,2 segundos, o que garante os níveis de segurança do sistema.

3.2.3 Energizador de cerca elétrica

O energizador, ou eletrificador de cerca como também é chamado, é o principal componente da cerca elétrica. A função do energizador é controlar a energia fornecida para a cerca. A energia que alimenta o eletrificador, que pode ser na forma de corrente alternada provinda diretamente da rede elétrica ou na forma de corrente contínua quando alimentado por baterias e ou painéis solares, é condicionada pelo energizador para fornecer impulsos de tensão e corrente controlada com intervalos entre pulsos e

duração de impulsos dentro dos limites de segurança exigidos pelas normas internacionais.

O circuito elétrico do energizador de cerca pode ser dividido em duas partes principais: circuito de alimentação e circuito de geração de pulsos, conforme ilustra a figura 2.

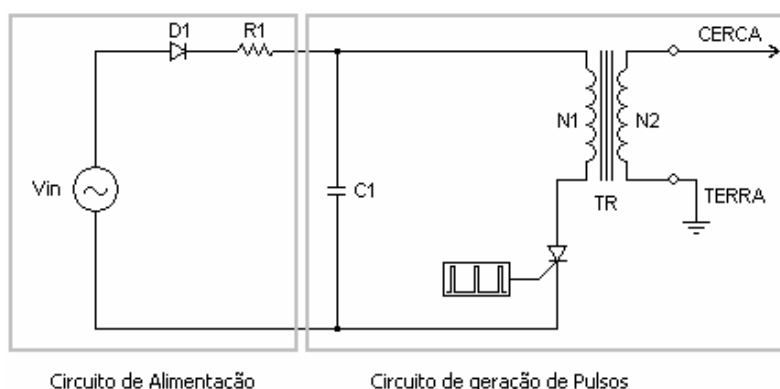


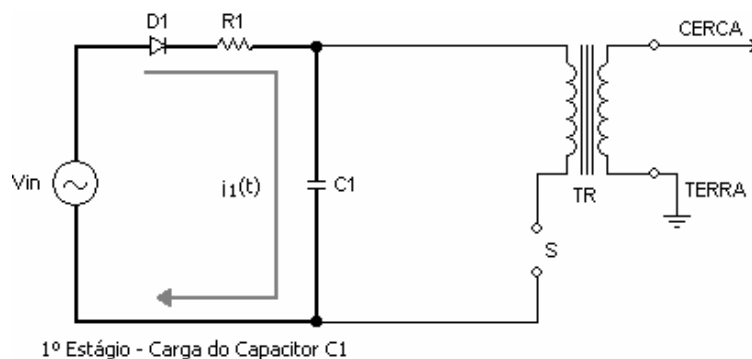
Figura 2: Divisão do circuito elétrico do energizador.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O circuito de alimentação condiciona a energia fornecida por uma fonte, para a carga do capacitor $C1$. Quando a fonte de energia é a rede elétrica, o sinal está na forma de corrente alternada. Neste caso, dobradores de tensão capacitivos podem ser utilizados para elevar e retificar a tensão. Quando a fonte é de corrente contínua, por exemplo, uma bateria de 12V, o sinal é condicionado por um conversor C-C elevador de tensão.

O circuito de geração de pulsos é formado pela associação de um capacitor, de um transformador elevador de tensão, de uma chave estática e de um circuito de controle para comandar o chaveamento.

O funcionamento do energizador pode ser dividido em dois estágios. O primeiro estágio, ilustrado na figura 3, é estágio da carga do capacitor $C1$.



1º Estágio - Carga do Capacitor C1

Figura 3: Estágio de carga do capacitor.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A energia armazenada no capacitor é dada pela expressão 2.

$$W_c = \frac{V_c^2 \times C}{2} \quad (2)$$

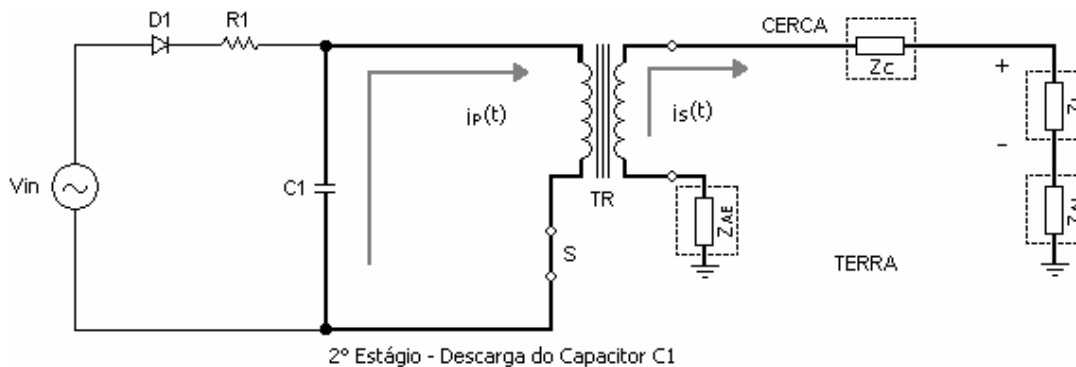
Onde:

W_c é a energia armazenada no capacitor C_1 , dada em Joules (J).

V_c é tensão no capacitor C_1 , dada em Volts (V).

C é a capacitância do capacitor C_1 , dada em Farads (F).

A figura 4 mostra o segundo estágio do circuito, o estágio da descarga do capacitor C_1 . Toda energia acumulada no capacitor durante o estágio de carga é liberada em frações de segundos, a corrente elétrica percorre o enrolamento primário do transformador de AT (TR) ocasionando a indução da corrente elétrica para o enrolamento secundário e conseqüentemente para a cerca viva.



2º Estágio - Descarga do Capacitor C1

Figura 4: Estágio de descarga do capacitor.

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.3.1 Transformador de alta tensão

O transformador de AT, que será um dos tópicos a ser avaliado neste estudo, tem a função de elevar a tensão elétrica e isolar galvanicamente o circuito do energizador da cerca eletrificada, é portanto indispensável para garantir o isolamento entre a rede elétrica e a cerca energizada.

A utilização do transformador além da isolação, traz outra vantagem que é a possibilidade de trabalhar-se com níveis de tensão mais baixos no circuito. Em geral, os equipamentos trabalham com tensões de 300 a 800 V na carga do capacitor C1 da figura 3, esta tensão é elevada, pelo transformador, para níveis de 6 kV a 9 kV na saída do transformador de AT.

A construção do transformador de AT, ilustrado na figura 5, carece de alguns cuidados especiais na hora da bobinagem. O enrolamento do primário deve ser bem isolado do enrolamento secundário. O secundário, por possuir um grande número de condutores, é separado em várias camadas bem isoladas umas das outras e do núcleo. A qualidade dos materiais utilizados na isolação é fundamental para evitar fugas de alta tensão. O núcleo do transformador é de ferro laminado para evitar o aquecimento devido às correntes parasitas.

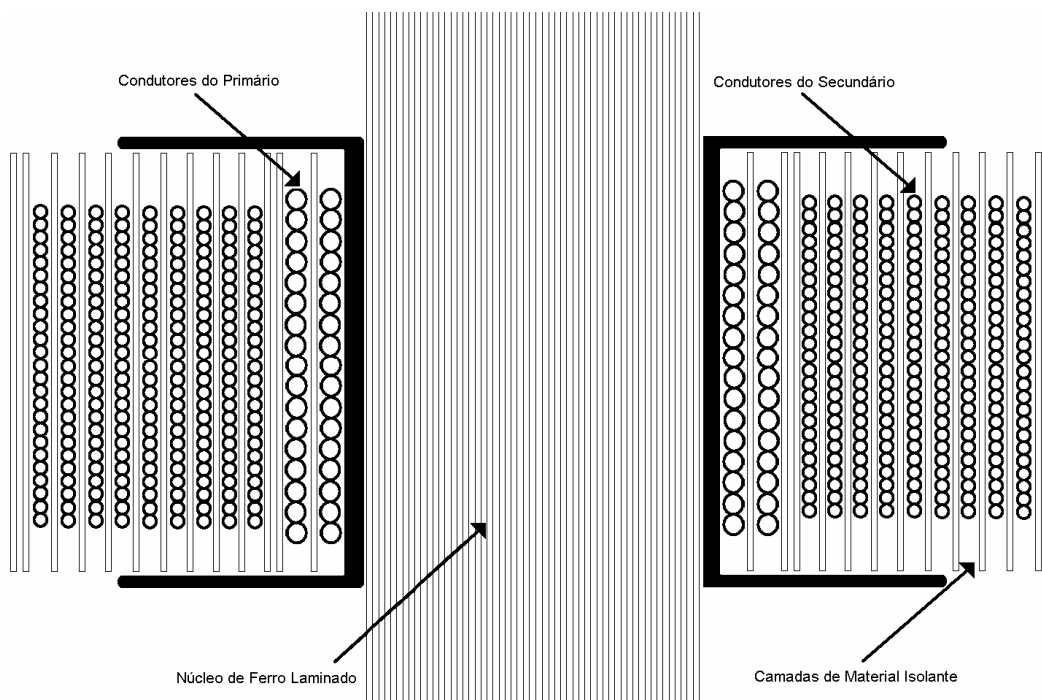


Figura 5: Corte transversal de um TR-AT.

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.4 Construção de uma cerca elétrica

Um sistema de cerca elétrica pode ser construído de várias formas. O sistema mais simples, também o mais utilizado, é formado por apenas um fio energizado. Da mesma forma, o sistema pode ser construído por mais de um fio eletrificado, ambos em paralelo e separados de acordo com o tamanho dos animais cercados. Um outro sistema, indicado para regiões com solo de baixa condutividade elétrica, é um sistema formado por um ou mais fios aterrados, em paralelo com os fios energizados. A cerca elétrica também pode ser utilizada aproveitando-se a estrutura de cercas convencionais e móveis, formando uma barreira psicológica entre a cerca convencional e os animais.

Na tabela 2, são indicadas as quantidades de fios eletrificados e as alturas dos fios da cerca para diferentes tipos de animais.

Tabela 2 – Número de fios eletrificados e altura em relação ao solo, de acordo com o tipo de animal.

Animal	Nº de fios	Altura dos fios da cerca
--------	------------	--------------------------

	eletrificados	em relação ao solo (cm)
Bovinos, bubalinos e equídeos adultos.	1	90
Bovinos, bubalinos e equídeos com crias	2	45 e 90
Gado zebuíno	2	70 e 110
Ovinos e caprinos	2	30 e 60

Fonte: MACIEL E LOPES, 2000

Todo sistema de cerca elétrica deve ser construído de acordo com os critérios de segurança, geralmente, informados nos manuais dos eletrificadores de cerca.

3.3 Resistividade e condutividade elétrica do solo

A resistividade elétrica de um material é, basicamente, a medida da dificuldade com que uma corrente elétrica flui através desse material. Pode ser definida como a resistência elétrica medida entre duas faces opostas de um cubo, de composição homogênea, com um metro de aresta (McNEILL, 1980).

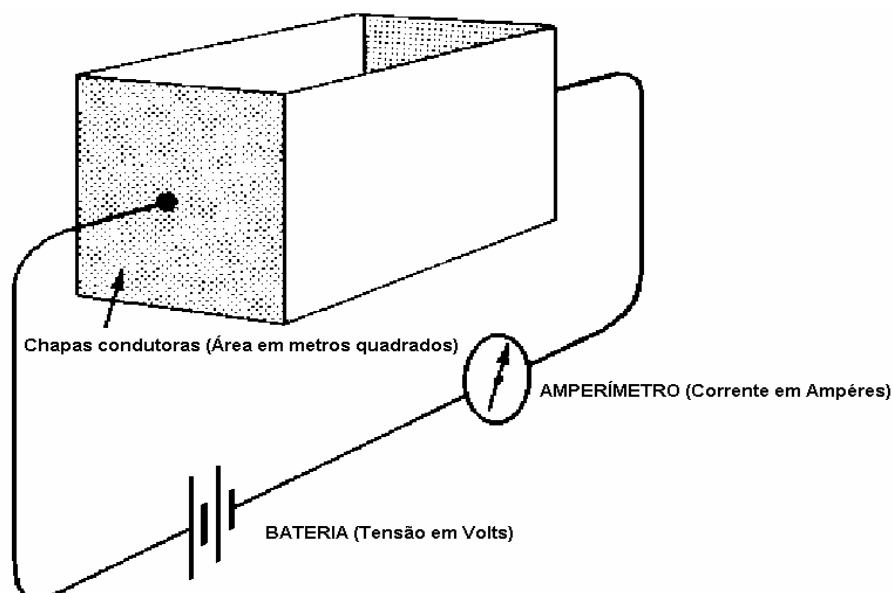


Figura 6: Caixa para medição de resistividade elétrica.

Fonte: McNEILL, 1980, adaptado pelo autor.

A resistividade elétrica do material contido na caixa da figura 6 é dada pela expressão 3.

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad \text{onde,} \quad R = \frac{V}{I} \quad (3)$$

Onde:

ρ é resistividade elétrica do material, dada em ohms por metro ($\Omega \cdot m$).

R é a resistência elétrica do material, dada em ohms (Ω).

A é a área da seção da caixa, dada em metros quadrados (m^2).

L é o comprimento da caixa, dado em metros (m).

V é a tensão da bateria, dada em volts (V).

I é a corrente elétrica medida pelo amperímetro, dada em ampéres (A).

Considerando o cubo da figura 6, com comprimento “L” igual a 1 metro e faces condutoras opostas com arestas “A” de 1 metro quadrado de área, pela expressão 3 obtém-se que a resistividade elétrica do material contido na caixa de medição é igual à resistência elétrica “R” do material, dada pela razão entre a tensão da bateria e a corrente elétrica medida pelo amperímetro, multiplicada por 1 metro. A unidade da resistividade elétrica do material é dada em ohms multiplicado por metro ($\Omega \cdot m$).

A condutividade elétrica de um material é o recíproco da resistividade elétrica, ou seja, é a medida da facilidade com que uma corrente elétrica flui através desse material (McNEILL, 1980).

A condutividade elétrica do material contido na caixa da figura 6 é dada pela expressão 4.

$$\sigma = \frac{GL}{A} \quad \text{onde,} \quad G = \frac{I}{V} \quad (4)$$

Onde:

σ é a condutividade elétrica do material, dada em Siemens dividido por metro (S/m).

G é a condutância elétrica do material, dada em Siemens (S).

A é a área da seção da caixa, dada em metros quadrados (m²).

L é o comprimento da caixa, dado em metros (m).

V é a tensão da bateria, dada em volts (V).

I é a corrente elétrica medida pelo amperímetro, dada em ampéres (A).

Por analogia pode-se reescrever as expressões 3 e 4, obtendo a expressão 5 que relaciona a resistividade elétrica e a condutividade elétrica de um material.

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad \text{ou} \quad \sigma = \frac{1}{\rho} \quad (5)$$

3.3.1 Fatores que influenciam na resistividade do solo

A resistividade elétrica do solo depende principalmente da textura, da umidade e da salinidade do solo. Solos com textura arenosa tendem a ter resistividade elétrica maior do que solos argilosos e solos com pouca umidade também apresentam resistividades maiores do que solos úmidos, o aumento da salinidade do solo diminui a resistividade elétrica do solo. A tabela 3 mostra a faixa de variação da resistividade elétrica do solo para alguns fatores.

Tabela 3 – Fatores que afetam a resistividade elétrica do solo.

FATOR	FAIXA DE RESISTIVIDADE ($\Omega.m$)
Composição geológica	5 a 20.000
Umidade	42 a 10.000
Salinidade	1 a 107
Temperatura	72 a 3.300

Fonte: VISACRO FILHO, 2002

3.3.1.1 Influência do tipo de solo

A composição geológica de um tipo de solo é um fator determinante para a resistividade elétrica. A tabela 4 mostra a variação da resistividade elétrica para solos de naturezas distintas.

Tabela 4 – Tipo de solo e respectiva resistividade elétrica.

TIPO DE SOLO	RESISTIVIDADE ($\Omega.m$)
Lama	5 a 100
Húmus	10 a 150
Terra de jardim com 50% de umidade	140
Terra de jardim com 20% de umidade	480
Argila seca	1.500 a 5.000
Argila com 20% de umidade	330
Argila com 40% de umidade	80
Argila compactada	100 a 200
Areia argilosa	50 a 500
Areia molhada	1.300
Areia seca	3.000 a 8.000
Solo pedregoso nu	1.500 a 3.000
Calcário compacto	1.000 a 5.000
Granito	1.500 a 10.000

Fontes: VISACRO FILHO, 2002 e KINDERMANN E CAMPAGNOLO, 2002, adaptado pelo autor.

3.3.1.2 Influência da umidade

A umidade do solo é outro fator determinante, a variação da umidade provoca grandes alterações na resistividade elétrica do solo. A umidade do solo faz com que os sais presentes no solo dissolvam-se formando um meio eletrolítico favorável à passagem da corrente iônica, diminuindo a resistividade elétrica do solo (KINDERMANN E CAMPAGNOLO, 2002).

A tabela 5 mostra a variação da resistividade elétrica com a umidade de um solo argiloso e de areia.

Tabela 5 – Resistividade de diferentes tipos de solo com concentração de umidade.

ÍNDICE DE UMIDADE	RESISTIVIDADE	RESISTIVIDADE
--------------------------	----------------------	----------------------

(% por peso)	($\Omega.m$) (Argila com Areia)	($\Omega.m$) (Areia)
0,0	10.000.000	-
2,5	1.500	3000000
5,0	430	50000
10,0	185	2100
15,0	105	630
20,0	63	290
30,0	42	-

Fonte: AS/NZS, 2007

3.3.1.3 Influência da temperatura

A variação da temperatura ocasiona grandes alterações na resistividade elétrica do solo, principalmente, com temperaturas acima de 50°C e temperaturas abaixo de 0°C, quando a água passa para o estado sólido. Nas variações de temperatura entre 10°C e 40°C, a variação na resistividade elétrica do solo não é muito significativa.

A figura 7 mostra a performance de um determinado solo submetido a uma variação da temperatura.

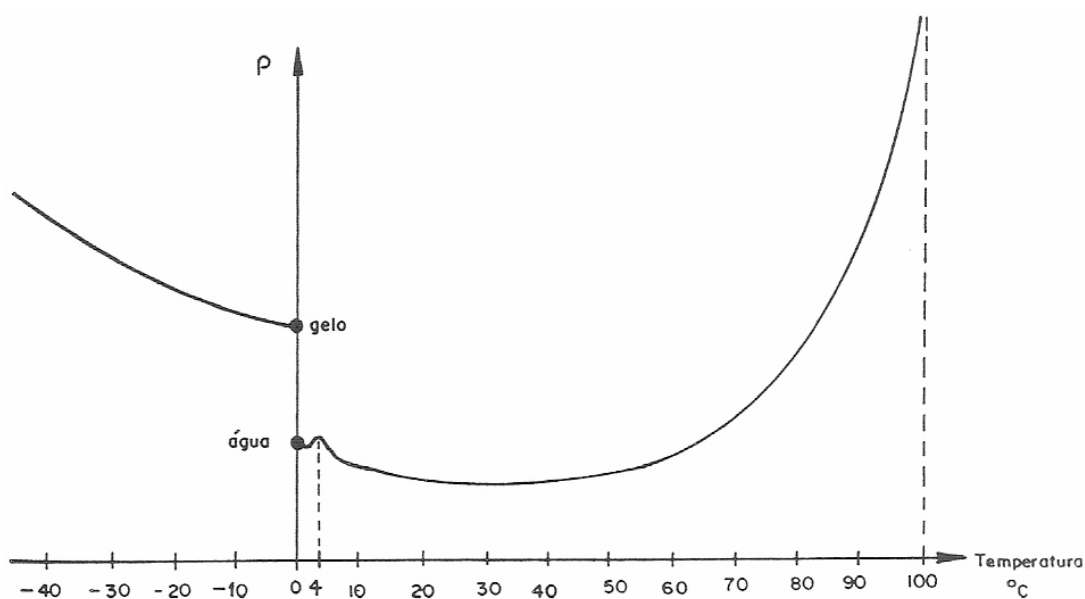


Figura 7: Variação da resistividade do solo em função da temperatura

Fonte: KINDERMANN E CAMPAGNOLO, 2002

Analisando o gráfico da figura 7 observa-se que, a partir da resistividade elétrica mínima, com o decréscimo da temperatura o valor da resistividade aumenta, ocasionado pela dispersão nas ligações iônicas entre os grânulos da terra no solo provocada pela contração e aglutinação da água. Observa-se, também, que no ponto de temperatura de 0°C (água) a curva sofre descontinuidade, e o valor da resistividade no ponto 0°C (gelo) aumenta, devido ao fato de ocorrer uma mudança brusca no estado da ligação entre os grânulos que formam a concentração eletrolítica. Com o decréscimo na temperatura, a partir de 0°C (gelo), há um aumento de resistividade devido à concentração no estado molecular, tornando o solo mais seco. No outro extremo, com temperaturas próximas a 100°C, a vaporização deixa o solo mais seco, com a formação de bolhas internas, dificultando a condução de corrente elétrica, ocasionando um aumento da resistividade elétrica (KINDERMANN E CAMPAGNOLO, 2002).

A tabela 6 apresenta os valores da resistividade elétrica, de um determinado tipo de solo, para alguns valores de temperatura.

Tabela 6 – Variação da resistividade elétrica com a temperatura para um solo arenoso.

TEMPERATURA (°C)	RESISTIVIDADE (Ω.m) (Solo Arenoso)
20	72
10	99
0 (água)	138
0 (gelo)	300
-5	790
-15	3.300

Fonte: MEGGER, 2005, adaptado pelo autor.

Os valores da resistividade elétrica do solo, apresentados na tabela 6 e no gráfico da figura 7, mostram que na faixa de temperaturas entre 10°C e 40°C, os

valores da resistividade elétrica do solo não sofrem grandes variações, o que é uma informação relevante para este trabalho, pois as regiões de interesse neste estudo, apresentam poucos dias por ano com temperaturas fora desta faixa de valores.

3.3.1.4 Influência da salinidade

Em alguns casos, a alteração da composição química do solo ocasiona alterações na resistividade elétrica do solo. No caso de sais solúveis, a dissolução desses sais, pela umidade presente no solo, resulta na diminuição da resistividade elétrica do solo (VISACRO FILHO, 2002).

Para classificar os solos quanto à salinidade, a classificação brasileira de solos considera três classes de condutividade elétrica. Os solos são classificados em sálicos, salinos e não salinos.

Solos com condutividade elétrica acima de 7 dS/m na temperatura de 25°C, são considerados sálicos (U.S.D.A., 1954).

Solos com condutividade elétrica entre 4 e 7 dS/m são considerados salinos (U.S.D.A., 1951).

Os solos com condutividade elétrica inferior a 4 dS/m são considerados não salinos.

Convertendo os valores da condutividade elétrica para resistividade elétrica, pela expressão 5 (p.34), obtém-se:

Solos sálicos com resistividade elétrica abaixo de 1,4285 Ω .m.

Solos salinos com resistividade elétrica entre 2,5 e 1,4285 Ω .m.

Solos não salinos com resistividade elétrica superior a 2,5 Ω .m.

A tabela 7 apresenta a influência da presença de sais na resistividade do solo.

Tabela 7 – Influência da composição química na resistividade do solo.

% SAIS	RESISTIVIDADE (Ω .m)
0,0	10.700
0,1	1.800
1,0	460
5,0	169
10,0	130

20,0	100
------	-----

Fonte: VISACRO FILHO, 2002

Os valores da tabela 7 mostram que a resistividade elétrica atinge valores elevados na ausência de sais, o que na prática ocorre somente em formações rochosas específicas, conforme ilustrado na tabela 4 (p.35), pois os solos cultiváveis são, geralmente, formados por uma combinação de diferentes minerais.

3.3.1.5 Influência da estratificação

Os solos, na sua maioria, não são homogêneos, são formados por camadas de resistividades elétricas diferentes. Devido à formação geológica, essas camadas geralmente são horizontais e paralelas à superfície, salvo em alguns casos, devidos a falhas geológicas, em que elas apresentam-se inclinadas e até verticais (KINDERMANN E CAMPAGNOLO, 2002).

A estratificação do solo é a divisão do solo em camadas, determinando-se a resistividade elétrica e a profundidades de cada camada. A figura 8 mostra as camadas de um solo estratificado.

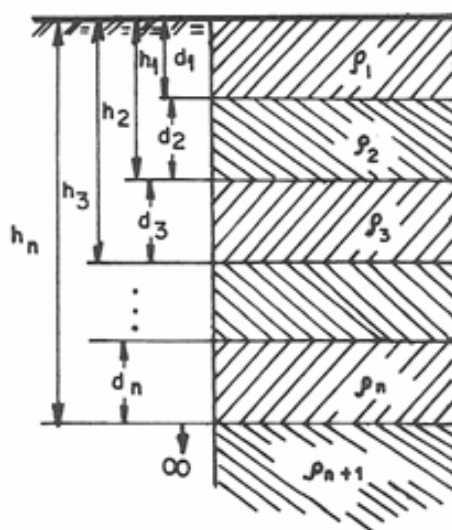


Figura 8: Solo estratificado

Fonte: KINDERMANN E CAMPAGNOLO, 2002

Onde:

$\rho_n \Rightarrow$ É a resistividade da camada **n**.

$h_n \Rightarrow$ É a profundidade da camada **n**.

$d_n \Rightarrow$ É a espessura da camada n .

As camadas do solo apresentam resistividade elétrica diferenciada devido a fatores como: sedimentação, erosão, diferença de idade, sendo que um estrato superposto a outro, é mais novo que ele.

3.3.2 Medição da resistividade elétrica do solo

Para a medição da resistividade elétrica do solo, pode-se empregar diversos métodos, entre os quais:

- Método de Wenner.
- Método de Lee.
- Método de Schlumberger.

Neste trabalho será utilizado o método de Wenner, também conhecido como método dos quatro pontos, que é o método adotado pelas normas brasileiras (ABNT, 1981).

O método de Wenner usa quatro pontos alinhados, a mesma profundidade (p) e separados pela mesma distância (a), conforme ilustra a figura 9 (KINDERMANN E CAMPAGNOLO, 2002).

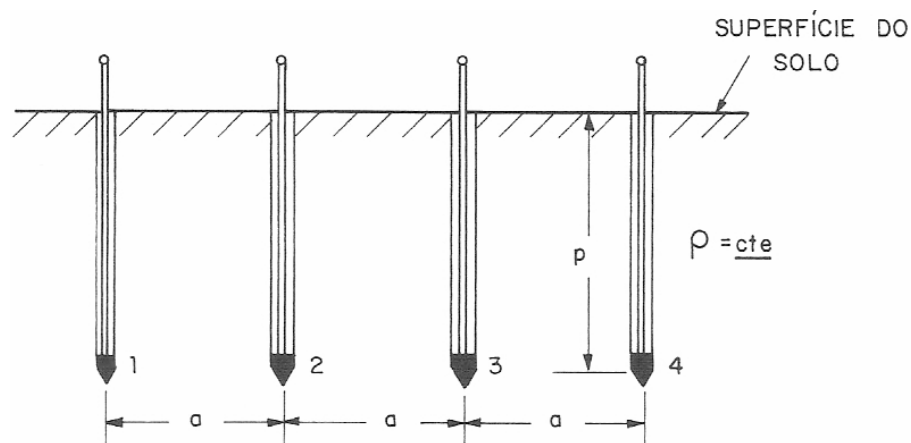


Figura 9: Quatro hastes alinhadas cravadas no solo.

Fonte: KINDERMANN E CAMPAGNOLO, 2002

O método considera que a resistividade elétrica do solo (ρ) é constante na camada a ser medida.

Uma corrente elétrica é injetada no solo pela haste **1** e é coletada pela haste **4**. A diferença de potencial gerada pela circulação da corrente elétrica é detectada entre os terminais **2** e **3** da figura 9. Utilizando o método das imagens, que implica na conversão de um campo elétrico em outro equivalente mais fácil de calcular, gera-se a figura 10 e obtém-se os potenciais nos pontos **2** e **3** (KINDERMANN E CAMPAGNOLO, 2002).

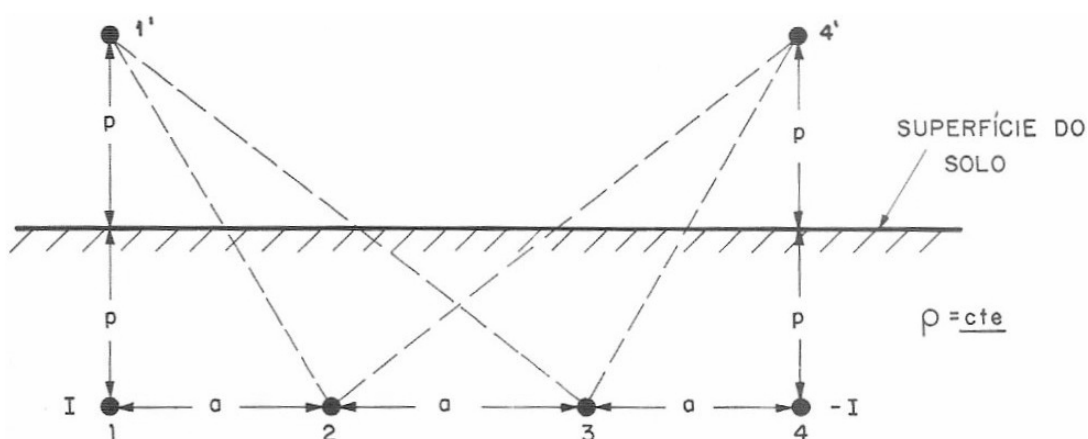


Figura 10: Imagem do ponto 1 e 4.

Fonte: KINDERMANN E CAMPAGNOLO, 2002

O potencial no ponto **2** é dado pela expressão 6:

$$V_2 = \frac{\rho I}{4\pi} \left[\frac{1}{a} + \frac{1}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right] \quad (6)$$

O potencial no ponto **3** é dado pela Expressão 7:

$$V_3 = \frac{\rho I}{4\pi} \left[\frac{1}{2a} + \frac{1}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} - \frac{1}{a} - \frac{1}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} \right] \quad (7)$$

A diferença de potencial nos pontos **2** e **3** é dada pela expressão 8:

$$V_{23} = V_2 - V_3 = \frac{\rho I}{4\pi} \left[\frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right] \quad (8)$$

Fazendo a divisão da diferença de potencial nos pontos **2** e **3** pela corrente elétrica **I**, obtém-se a resistência elétrica **R** do solo, para uma profundidade aceitável de penetração da corrente **I**. Isolando a variável ρ obtém-se a resistividade elétrica do solo, mostrada pela expressão 9 (KINDERMANN E CAMPAGNOLO, 2002).

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2a}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}}} \quad [\Omega \cdot m] \quad (9)$$

Onde:

$\rho \Rightarrow$ Resistividade do solo [$\Omega \cdot m$]

$a \Rightarrow$ Espaçamento das hastes [m]

$p \Rightarrow$ Profundidade das hastes [m]

A expressão 9 é conhecida como fórmula de Palmer, e é usada pelo método de Wenner. Recomenda-se *diâmetro da haste* $\leq 0,1 a$.

Para grandes afastamentos entre as hastes, $a > 20p$, a expressão 9 se reduz à expressão 10 (KINDERMANN E CAMPAGNOLO, 2002).

$$\rho = 2\pi a R \quad [\Omega \cdot m] \quad (10)$$

3.4 Resistência elétrica de aterramento

Segundo Maciel e Lopes (2000), o sistema de aterramento é um dos principais componentes da cerca elétrica. Numa cerca elétrica, como foi ilustrado na figura 1 (p.28), as linhas de corrente que percorrem os fios eletrificados e atravessam o corpo do animal no momento em que ele toca o fio energizado, retornam pela terra até o sistema de aterramento, dessa forma, quanto menor for a resistência do aterramento maior será a intensidade da corrente que percorre o sistema da cerca elétrica (relação explicada pela lei de Ohm) e conseqüentemente maior é a intensidade do choque elétrico sofrido pelo animal.

O valor da resistência elétrica do aterramento é dependente da resistividade elétrica do solo, ou da condutividade elétrica, e da configuração do sistema de aterramento, ou seja, o número, as dimensões e a orientação das hastes de cobre.

A figura 11 mostra uma configuração de um sistema de aterramento com hastes em linha, que é a configuração mais utilizada em sistemas de cerca elétrica.

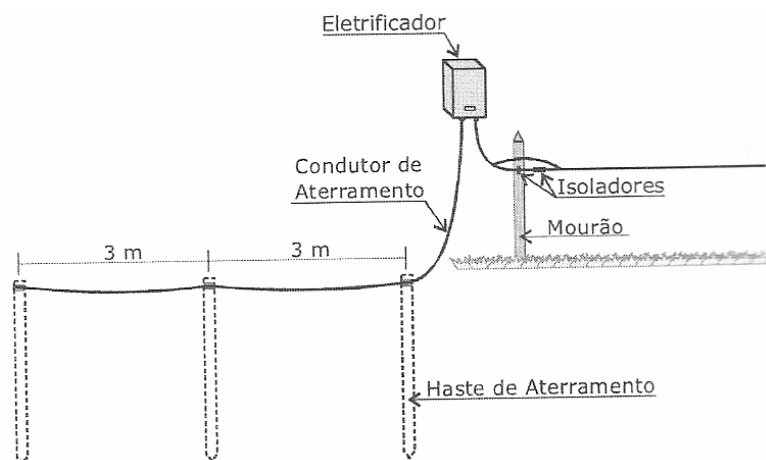


Figura 11: Aterramento com hastes em linha.

Fonte: MACIEL E LOPES, 2000

3.4.1 Sistema de aterramento com uma haste vertical

O sistema de aterramento mais simples é constituído por uma haste cravada verticalmente no solo, a figura 12 mostra esta configuração indicando as variáveis que influenciam na resistência elétrica do aterramento.

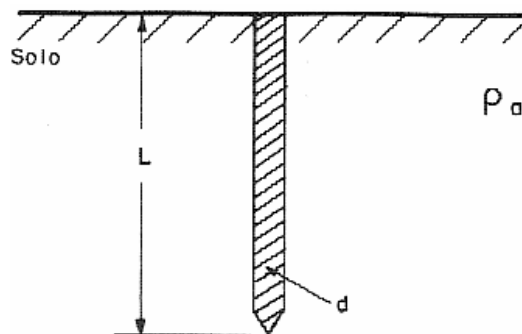


Figura 12: Uma haste cravada no solo.

Fonte: KINDERMANN E CAMPAGNOLO, 2002

A resistência elétrica do aterramento para a configuração da figura 12 é determinada pela expressão 11.

$$R = \frac{\rho_a}{2\pi L} \ln\left(\frac{4L}{d}\right) [\Omega] \quad (11)$$

Onde:

$\rho_a \Rightarrow$ Resistividade aparente [$\Omega \cdot m$]

$L \Rightarrow$ Comprimento da haste [m]

$d \Rightarrow$ Diâmetro do círculo equivalente à área da seção transversal da haste [m]

Esta configuração de aterramento é indicada para instalações em locais com solos de boa condutividade elétrica e que não sofrem consideráveis alterações por causa de períodos de estiagem.

3.4.2 Interligação de hastes alinhadas em paralelo

Quando a resistividade do solo é muito alta, o aumento nas dimensões de uma única haste pode não ser suficiente para reduzir a resistência do aterramento aos níveis desejados, nestes casos, é recomendada a interligação de hastes em paralelo, pois, o valor da resistência do aterramento é reduzida consideravelmente. Segundo Kindermann e Campagnolo (2002), “[...] O cálculo da resistência de hastes paralelas interligadas não segue a lei simples do paralelismo de resistências elétricas. Isto é devido às interferências nas zonas de atuação das superfícies equipotenciais.” A figura 13 mostra a zona de interferência nas linhas equipotenciais de duas hastes em paralelo.

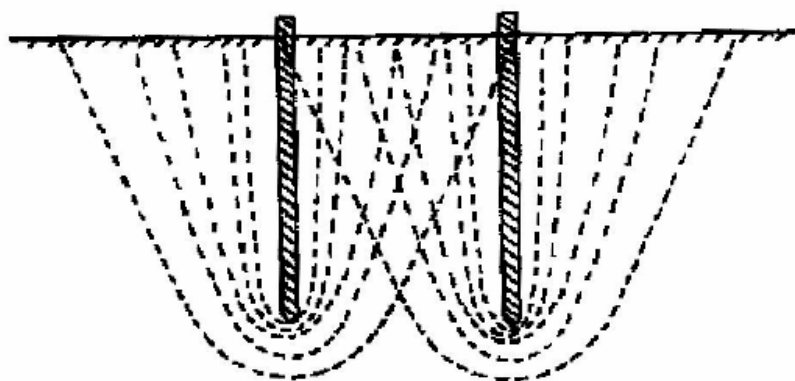


Figura 13: Zonas de interferência nas linhas equipotenciais de duas hastes.

Fonte: KINDERMANN E CAMPAGNOLO, 2002

Para calcular a resistência equivalente de um sistema de aterramento formado por hastes em paralelo, é necessário levar em conta o acréscimo de resistência ocasionado pela interferência mútua entre as hastes. A resistência de cada haste do sistema de aterramento pode ser calculada pela expressão 12 (KINDERMANN E CAMPAGNOLO, 2002).

$$R_h = R_{hh} + \sum_{m=1, m \neq h}^n R_{hm} \quad (12)$$

Onde:

$R_h \Rightarrow$ Resistência da haste "h" considerando a interferência das demais hastes do sistema

$n \Rightarrow$ Número de hastes em paralelo

$R_{hh} \Rightarrow$ Resistência individual da haste "h" calculada pela expressão 11

$R_{hm} \Rightarrow$ Acréscimo de resistência na haste "h" devido à interferência mútua da haste "m", dada pela expressão 13.

$$R_{hm} = \frac{\rho a}{4\pi L} \ln \left[\frac{(b_{hm} + L)^2 - e_{hm}^2}{e_{hm}^2 - (b_{hm} - L)^2} \right] \quad (13)$$

$e_{hm} \Rightarrow$ Espaçamento entre a haste "h" e a haste "m", dado em metros

$L \Rightarrow$ Comprimento da haste em metros

A figura 14 mostra a representação de b_{hm} , o valor depende do comprimento das hastes e da distância entre elas, pode ser calculado pela expressão 14.

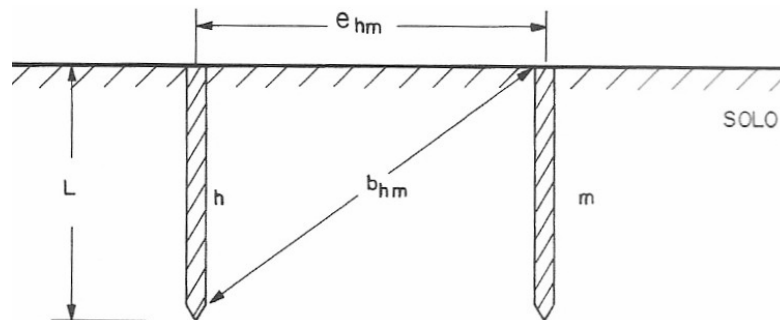


Figura 14: Parâmetros das interferências mútuas entre duas hastes.

Fonte: KINDERMANN E CAMPAGNOLO, 2002

$$b_{hm} = \sqrt{L^2 + e_{hm}^2} \quad (14)$$

Calculando a resistência de cada haste do sistema pela expressão 10, obtêm-se os valores da resistência de cada haste:

$$\begin{aligned}
 R_1 &= R_{11} + R_{12} + R_{13} + \dots + R_{1n} \\
 R_2 &= R_{21} + R_{22} + R_{23} + \dots + R_{2n} \\
 &\vdots \\
 R_n &= R_{n1} + R_{n2} + R_{n3} + \dots + R_{nn}
 \end{aligned}$$

A resistência equivalente do sistema de aterramento é dada pela expressão 15.

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}} \quad (15)$$

3.4.3 Medição da resistência de aterramento

A medição da resistência elétrica de um sistema de aterramento pode ser feita pelo clássico método volt-amperímetro ou, de maneira mais simples, utilizando-se um terrômetro.

3.4.3.1 Método volt-amperímetro

O método volt-amperímetro é efetuado por um voltímetro e um amperímetro dispostos conforme a figura 15.

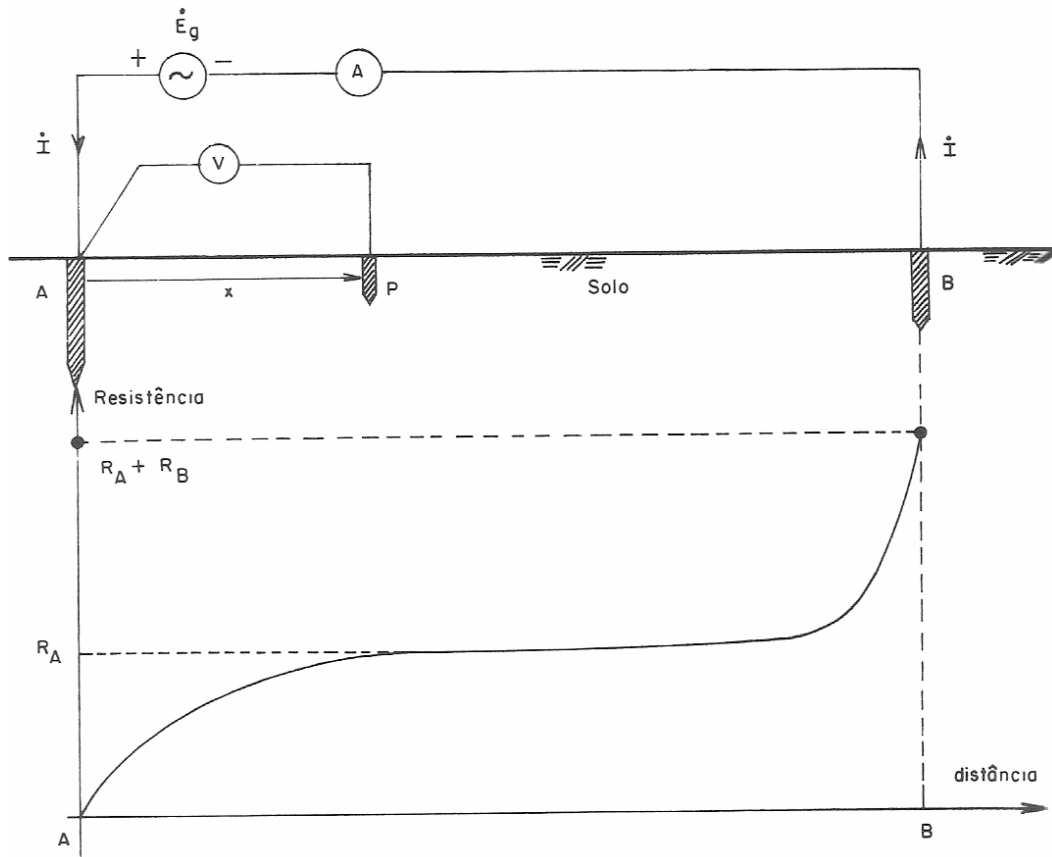


Figura 15: Esquema do método volt-amperímetro.

Fonte: KINDERMANN E CAMPAGNOLO, 2002

Onde:

- $A \Rightarrow$ É o sistema de aterramento a ser medido.
- $B \Rightarrow$ É a haste auxiliar para possibilitar o retorno da corrente I .
- $p \Rightarrow$ É a haste de potencial que é deslocada de A até B .
- $x \Rightarrow$ É a distância da haste p em relação a A .
- $E_g \Rightarrow$ É uma fonte de tensão alternada.
- $I \Rightarrow$ É a Corrente elétrica dada em ampéres.
- $V \Rightarrow$ É a tensão dada em volts.

A corrente elétrica I fornecida pela fonte E_g circula entre as hastes A e B e não é alterada pelo deslocamento da haste p . A cada posição x é lida a tensão do voltímetro e calculada a resistência pela Expressão 16 (KINDERMANN E CAMPAGNOLO, 2002).

$$R_{(x)} = \frac{V_{(x)}}{I} \quad (16)$$

A curva do gráfico da figura 14 é formada a partir dos valores obtidos pela expressão 10 (p.42) para cada posição x .

Após um certo afastamento da haste p , em relação ao ponto A , a resistência de terra fica constante, independente da distância x . Neste ponto a tensão lida no voltímetro não é alterada mediante um aumento da distância x , o valor desta tensão é definida como tensão patamar (V_{patamar}) e a resistência do terra nesse ponto é dada pela expressão 17 (KINDERMANN E CAMPAGNOLO, 2002).

$$R_A = \frac{V_{\text{patamar}}}{I} \quad (17)$$

Para medir a resistência de terra R_A basta deslocar a haste p até atingir a região do patamar e com o valor lido no voltímetro, calcular o valor de R_A pela expressão 17, caso a região de patamar não seja atingida, é necessário aumentar o espaçamento entre as haste A e B (KINDERMANN E CAMPAGNOLO, 2002).

3.4.3.2 Medição usando um terrômetro

A figura 16 ilustra um esquema de medição de resistência de terra utilizando-se um terrômetro.

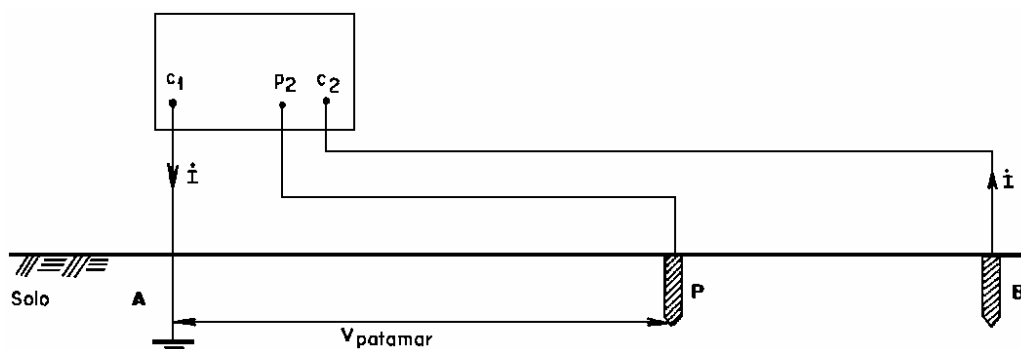


Figura 16: Medição com terrômetro.

Fonte: KINDERMANN E CAMPAGNOLO, 2002, adaptado pelo autor.

A corrente elétrica I é injetada no solo pelo terrômetro no terminal C_1 , e retorna ao aparelho pelo terminal C_2 , através da haste auxiliar B . A circulação de corrente no solo gera uma diferença de potencial entre o aterramento e as hastes auxiliares

cravadas no solo. A diferença de potencial entre o ponto **A** e o ponto **p** é medida e processada pelo aparelho, e o resultado, correspondente à operação da expressão 16 (p.48), é mostrado no display do aparelho, e corresponde ao valor da resistência do aterramento (KINDERMANN E CAMPAGNOLO, 2002).

3.5 Relação carga potência

A relação entre a potência do energizador e a carga ligada, ou seja, o comprimento da cerca, pode ser avaliada pela expressão da potência elétrica, que relaciona a tensão com a corrente elétrica. A potência instantânea é dada pela expressão 18.

$$P = V * I \text{ [Watts]} \quad (18)$$

Onde:

$P \Rightarrow$ Potência em watts [W]

$V \Rightarrow$ Tensão em volts [V]

$I \Rightarrow$ Corrente elétrica em ampéres [A]

A corrente elétrica ao longo de uma cerca elétrica é proporcional à quantidade de fios ligados. As “fugas” de corrente elétrica ocorrem ao longo de toda a cerca elétrica e são influenciadas pela umidade do ar, pela qualidade dos isoladores utilizados para firmar os fios nos postes e pela proximidade da vegetação dos fios energizados.

Considerando a expressão 18, e a potência “ P ” do energizador constante, um aumento de carga ligada no energizador, ou seja, uma cerca com maior comprimento, representa um fluxo de corrente maior no circuito e conseqüentemente uma diminuição no valor da tensão “ V ” no transformador de AT. Um eletrificador de Alta Potência quando alimenta uma carga pequena, ou seja, uma cerca de pequenas dimensões, a tensão no TR de AT fica próxima da tensão à vazio, ou seja, sem carga, que é a situação mais desfavorável possível para o TR de AT, já que a tensão neste caso é máxima, o que significa que a possibilidade de “fugas” de alta tensão entre as espiras do enrolamento secundário é maior.

Tabela 8 – Tensão de saída para eletrificadores de diferentes potências para diferentes cargas ligadas.

MODELO	TENSÃO DE SAÍDA NO TR-AT		
	Sem carga	Carga de 500 Ω	Carga de 100 Ω
1,5J	8,5Kv	4,6kV	1,8kV
3J	8,5kV	5,6kV	2,4kV
6J	8,5Kv	6,5kV	3,2kV
12J	8Kv	7kV	4,2kV

Fonte: Stafix electric fencing manual (1998). Adaptado pelo autor.

A tabela 8 mostra a queda de tensão na saída dos eletrificadores com o aumento de carga ligada. Esta queda de tensão é menos significativa em eletrificadores de alta potência.

3.6 Durabilidade do transformador de alta tensão

De acordo com os dados da empresa, a durabilidade do transformador de AT do energizador depende, basicamente, de três fatores:

- A qualidade dos materiais e da forma como é fabricado.
- Dimensionamento da cerca, que deve ser compatível com a potência do energizador.
- A qualidade do aterramento elétrico.

O primeiro fator é de conhecimento do fabricante e, portanto, pode ser tratado de acordo com as técnicas utilizadas na empresa. A espessura da camada isolante dos condutores dos enrolamentos e a isolação do material utilizado para isolar as camadas do TR-AT é fundamental para garantir uma boa isolação, bem como os cuidados na fabricação, respeitando as distâncias entre os condutores e o núcleo do TR-AT que devem ser suficientes para garantir que não ocorra ruptura do dielétrico do ar, ocasionando faiscamento entre os condutores e o núcleo.

Os dois últimos fatores são aleatórios, o controle destes fatores não está ao alcance do fabricante, necessitando então ser tratado por meio de estimativas.

O dimensionamento da cerca, exemplificado na figura 1 (p.28), tem influência direta na tensão da saída do TR-AT, dada pela expressão da potência elétrica que relaciona a tensão com a corrente elétrica. A utilização do equipamento correto para cada tamanho de cerca elétrica é importante, não só para o bom funcionamento como para a durabilidade do equipamento.

A qualidade do aterramento tem grande importância, tanto para um bom funcionamento como para a durabilidade do eletrificador, uma vez que, diferente da maioria das instalações elétricas onde o aterramento tem a finalidade de servir de proteção, na cerca elétrica, o sistema de aterramento é parte fundamental do circuito elétrico, pois tem influência direta na intensidade da corrente que circula pelo circuito e conseqüentemente, interfere na tensão da saída do TR-AT que é inversamente proporcional à corrente do circuito quando a potência é considerada constante.

Segundo MARTINO (2005) e THRIMAWITHANA e MADAWALA (2007), a cerca elétrica pode ser modelada por analogia com uma linha de transmissão, com perdas pelo efeito capacitivo da linha, perdas por contato com vegetação e por fugas nas conexões e isoladores. A figura 17 mostra o circuito de uma cerca elétrica modelada por parâmetros concentrados, que são modelos matemáticos, causais, dinâmicos e determinísticos, onde as variações espaciais são desprezadas e as propriedades do sistema são consideradas homogêneas. Nesses modelos assume-se que as variáveis do sistema modelado, sofrem alteração em função de apenas uma variável independente, por exemplo, a variável tempo.

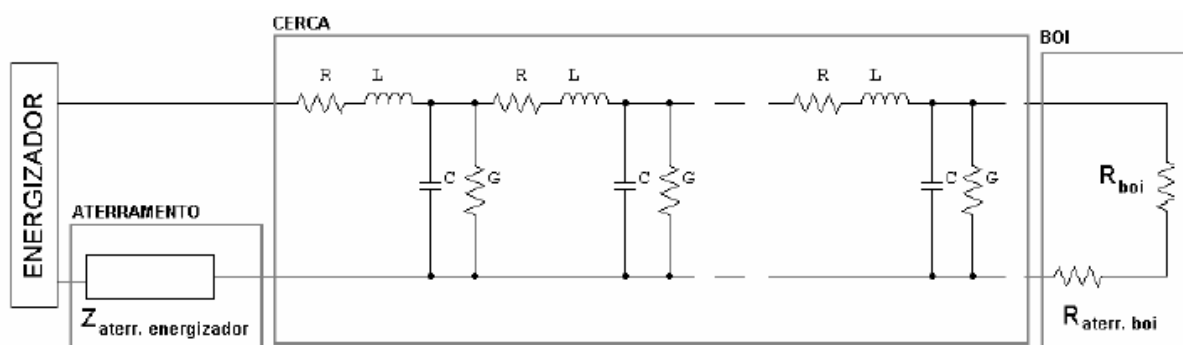


Figura 17: Componentes de uma cerca elétrica modelada por parâmetros concentrados

Fonte: MARTINO, 2005

Onde:

$R \Rightarrow$ Resistência elétrica do fio condutor [Ω]

$L \Rightarrow$ Indutância por metro de um condutor sobre um terra perfeito [H/m]

$C \Rightarrow$ Capacitância da linha sobre um terra perfeito [F]

$G \Rightarrow$ Condutância “shunt” [S]

$R_{boi} \Rightarrow$ Resistência elétrica do animal [Ω]

$R_{aterr.boi} \Rightarrow$ Resistência elétrica do aterramento do animal [Ω]

$Z_{aterr.energizador} \Rightarrow$ Impedância do aterramento do energizador [Ω]

A figura 18 mostra um circuito simplificado para uma cerca elétrica.

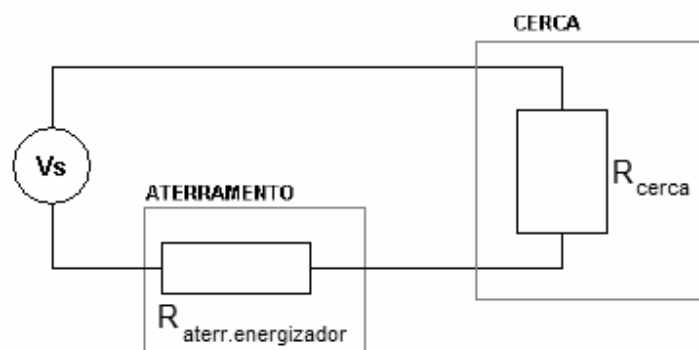


Figura 18: Circuito simplificado de uma cerca elétrica.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 8, para um eletrificador que fornece uma energia de 6 joules, apresenta uma tensão de 3,2kV na saída do TR-AT com uma carga de 100 Ω e uma tensão de 6,5kV para uma carga de 500 Ω . Tomando como exemplo duas situações de aterramento possíveis:

a - Um aterramento bom com uma resistência de 10 Ω .

$$R_{cerca} + R_{terra} = 100\Omega$$

$$R_{cerca} + 10\Omega = 100\Omega$$

$$R_{cerca} = 90\Omega$$

Pela tabela 8, para $R_{cerca} + R_{terra} = 100\Omega$ tem-se que V_s é igual a 3,2kV.

b - Um aterramento ruim com uma resistência de 410Ω .

$$R_{\text{cerca}} + R_{\text{terra}} = 500\Omega$$

$$R_{\text{cerca}} + 410\Omega = 500\Omega$$

$$R_{\text{cerca}} = 90\Omega$$

Pela tabela 8, para $R_{\text{cerca}} + R_{\text{terra}} = 500\Omega$ tem-se que V_s é igual a $6,5kV$.

Os exemplos acima mostram que a redução da resistência elétrica de um aterramento contribui para a redução da tensão no secundário do TR-AT. A resistência do aterramento elétrico é uma barreira para o fluxo de corrente no circuito. Quanto menor o fluxo de corrente na cerca, maior a tensão na saída do TR-AT. Se diminuir a resistência de aterramento, aumenta o fluxo de corrente e conseqüentemente reduz a tensão no TR-AT.

3.7 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentadas as principais características e componentes das cercas elétricas e as características de um sistema de aterramento elétrico.

O conteúdo apresentado neste capítulo é relevante para a modelagem do sistema de cerca elétrica. Os dados referentes aos fatores que influenciam a resistividade elétrica do solo são fundamentais, para definir os conjuntos *fuzzy* para o aterramento elétrico. Os valores da queda de tensão na saída dos eletrificadores, com o aumento de carga ligada, servem de base para a definição dos conjuntos *fuzzy* para a relação entre a carga e a potência. A seção que descreve as características dos transformadores de AT do energizador e os fatores que influenciam na sua durabilidade, tem importante contribuição na definição dos conjuntos *fuzzy* para a durabilidade do TR de AT.

No próximo capítulo serão apresentados os conceitos de lógica *fuzzy*.

4 LÓGICA FUZZY

Neste capítulo são abordados os principais conceitos da lógica *fuzzy*, que tem sua base fundamentada nos conjuntos *fuzzy* (*fuzzy sets*) e operações difusas. Este capítulo fornece a base de conhecimento necessária para a elaboração dos conjuntos *fuzzy* e das regras de inferência *fuzzy* utilizadas neste trabalho.

4.1 Noções de lógica *fuzzy*

A teoria dos conjuntos *fuzzy* foi introduzida por Zadeh (1965) para tratar da informação vaga, imprecisa, cujas fronteiras não estão claras. Esta teoria está baseada no conceito de pertinência. Na teoria clássica dos conjuntos, também conhecidos por conjuntos *crisp*, cada elemento pertence ou não pertence ao conjunto, não tem meio termo. Nos conjuntos *fuzzy*, um elemento pode pertencer parcialmente a um conjunto com um grau de associação que pode variar de “0” até “1”, representando a possibilidade do elemento ser membro do conjunto. Dessa maneira, é possível descrever, de forma qualitativa, o grau de compatibilidade do elemento com o conceito representado pelo conjunto (NICOLETTI e CAMARGO, 2004).

A lógica *fuzzy* pode ser vista como uma extensão da lógica booleana (WEBER e KLEIN, 2003). A lógica booleana suporta apenas os valores “0” e “1”, logo para qualquer valor de entrada, o valor da saída pode pertencer somente aos conjuntos “verdadeiro (1)” ou “falso (0)”. Na lógica *fuzzy* a saída pode assumir qualquer valor entre 0 e 1.

A representação dos padrões das cores, mostrada na figura 19, é um exemplo ilustrativo de aplicação da lógica *fuzzy*.

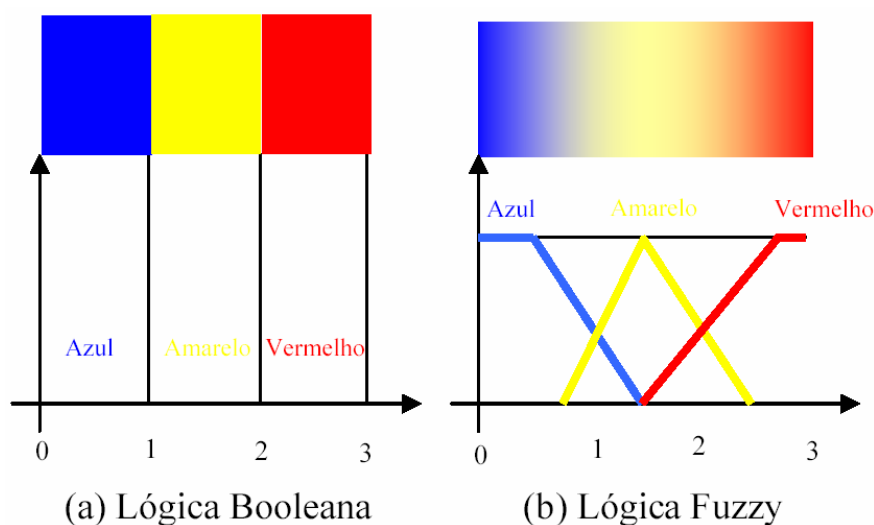


Figura 19: Comparação entre um sistema convencional e *fuzzy*.

Fonte: REIS (2002), citado por FERNANDES (2005, p.33).

O gráfico (a) da figura 19 mostra as fronteiras entre as cores bem definidas, por exemplo, a tonalidade é amarela (100%) ou não é amarela (0%), ou é vermelha (100%) ou não é vermelha (0%). Já no gráfico (b), as fronteiras entre as cores azul, amarela e vermelha não estão bem definidas, por exemplo, a tonalidade alaranjada pode ser definida como uma combinação entre as cores amarela e vermelha, com um grau de pertinência 0,6 na função que representa o conjunto vermelho, ou seja, 60% vermelha. O eixo y da figura 19 (b) representa o grau de pertinência dos conjuntos *fuzzy*, normalizado entre 0 e 1.

Neste momento, convém introduzir o conceito de grau de pertinência. O grau de pertinência de uma variável define o “quanto” a variável pertence a um determinado conjunto. Pela lógica booleana existem apenas dois graus de pertinência, 0% e 100%. Pela lógica *fuzzy* o grau de pertinência pode assumir qualquer valor na faixa entre 0% e 100%. Pela descrição formal representada pela expressão 19, se A é um conjunto *fuzzy*, a sua função de pertinência μ_A estabelece para cada X um grau de pertinência ao conjunto expressado por:

$$\mu_A(x) : U \rightarrow [0,1] \quad (19)$$

ou seja, o grau de pertinência de cada elemento X, pode assumir qualquer valor entre 0 e 1.

A figura 20 mostra a representação gráfica de um conjunto *fuzzy* com grau de pertinência “ μ ”.

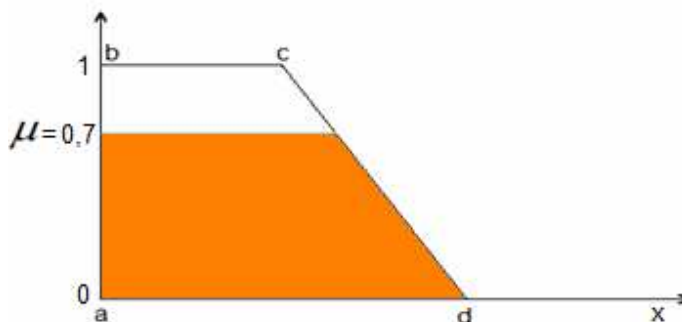


Figura 20: Representação gráfica de um conjunto *fuzzy* com grau de pertinência 0,7.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para descrever conhecimento, a lógica *fuzzy* utiliza elementos simbólicos denominados variáveis linguísticas, ao invés de variáveis numéricas (WEBER e KLEIN, 2003). “Uma variável linguística é definida como uma entidade utilizada para representar de modo impreciso e, portanto, linguístico, um conceito ou uma variável de um problema” (REZENDE et al, 2005). Por exemplo, uma variável linguística “temperatura”, admite como valores, expressões linguísticas tais como, “baixa”, “média”, “alta”, “muito alta”, dentre outras.

“Os termos linguísticos associam-se em conjuntos *fuzzy* ou funções de pertinência, relacionando os termos linguísticos a graus de pertinência e assim possibilitando um significado numérico” (WEBER e KLEIN, 2003).

A teoria introduzida por Zadeh (1965), com a intenção de tratar matematicamente certos termos linguísticos subjetivos, como “quase”, “próximo de”, “muito”, dentre outros, foi o primeiro passo para tratar computacionalmente conceitos vagos e informações imprecisas, a exemplo do pensamento humano (BARROS e BASSANEZI, 2006).

O termo lógica *fuzzy* é utilizado para descrever a computação baseada em regras *fuzzy* com base em implicações lógicas (FERNANDES, 2005).

Pela definição, regras *fuzzy* são estruturas de representação que definem o comportamento entre variáveis *fuzzy*, ou também, o conjunto de relações condicionais

do sistema *fuzzy*. As regras *fuzzy* podem ser extraídas de dados numéricos ou fornecidas por especialistas da área da aplicação (WEBER e KLEIN, 2003).

As regras *fuzzy* geralmente são regras condicionais do tipo se ... então (*if ... then*). Por exemplo, uma regra *fuzzy* para um padrão de cores poderia ser:

Se tonalidade amarela = “média baixa” **e** tonalidade vermelha = “média alta” **então** cor = “alaranjada”

Na figura 21 é mostrado um esquema geral de um sistema especialista *fuzzy*, composto por variáveis de entrada, conjuntos para as variáveis de saída e por regras que associam as entradas para resultar em conjuntos para a saída (WEBER e KLEIN, 2003).

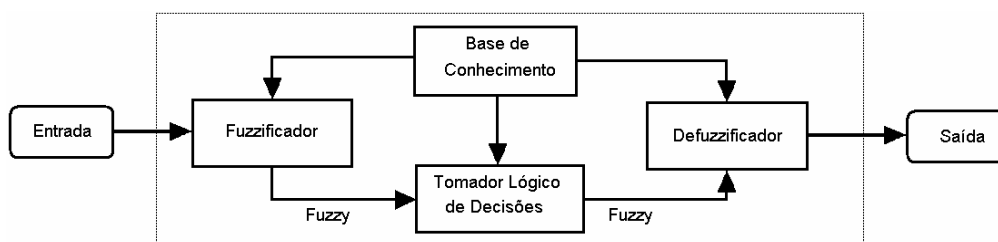


Figura 21: Esquema geral de um sistema *fuzzy*.

Fonte: PATYRA e MLYNEK, 1996, adaptado pelo autor.

Segundo Weber e Klein (2003), um sistema especialista *fuzzy*, é composto pelos seguintes elementos:

- Entrada: são os dados numéricos que servem de base para a tomada das decisões pelo sistema.
- *Fuzzificador*: converte os valores numéricos dos dados da entrada em informações *fuzzy*.
- Sistema *fuzzy*: é composto pela base de conhecimento, ou seja, as regras *fuzzy*, e pelo tomador lógico de decisões, integrado pelos mecanismos de inferência *fuzzy* e pelas funções de aglutinação.
- *Defuzzificador*: converte a saída *fuzzy* do sistema em valores numéricos.

Segundo Lin & Lee (1996) citado por Delgado (2002), a utilização de sistemas *fuzzy* é indicado nas seguintes situações:

- Quando o modelo matemático é de difícil codificação ou não existe.

- Quando o modelo matemático é complexo demais para ser avaliado rapidamente em tempo real, ou requer muita memória computacional para ser implementado.
- Quando as variáveis envolvidas no fenômeno em estudo são contínuas.
- Quando há muito ruído no ambiente e/ou os sensores disponíveis são de pouca precisão.
- Quando o processo envolve um especialista, preparado para especificar os parâmetros do conjunto de regras de inferência a ser utilizado pelo sistema *fuzzy*.

4.2 Funções de pertinência

“São as funções que definem o grau de pertinência (μ) de um determinado valor a cada termo linguístico. As funções de pertinência fazem o papel das curvas de possibilidades na teoria clássica da lógica *fuzzy*” (WEBER e KLEIN, 2003).

Os conjuntos *fuzzy* podem ser definidos considerando um conjunto universo finito ou infinito. As funções de pertinência que definem conjuntos *fuzzy* podem ser representadas de várias maneiras, as representações mais utilizadas são a gráfica, a tabular e a analítica (NICOLETTI e CAMARGO, 2004).

Os formatos das funções de pertinência mais utilizados são:

- Triangular: parâmetros a , b , c com $a \leq b \leq c$, onde a e c determinam o intervalo dentro do qual a função de pertinência assume valores diferentes de zero, e b é o ponto onde a função de pertinência é máxima. O parâmetro m é a projeção de b sobre o eixo x .

A representação analítica da função triangular representada pela função de pertinência é dada pela expressão 20.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a} & \text{se } a < x \leq m \\ \frac{b-x}{b-m} & \text{se } m < x \leq b \\ 0 & \text{se } x > b \end{cases} \quad (20)$$

A figura 22 mostra a representação gráfica da função triangular.

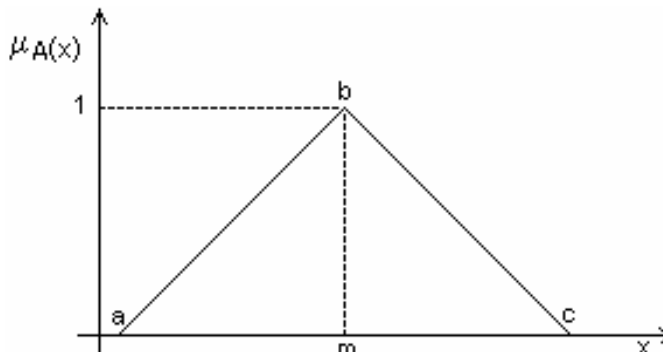


Figura 22: Representação gráfica da função triangular tipo lambda.

Fonte: Elaborado pelo autor.

• **Trapezoidal**: parâmetros a, b, c, d com $a \leq b, c \leq d$ e $b < c$, onde a e d determinam o intervalo dentro do qual a função de pertinência assume valores diferentes de zero, e b e c determinam o intervalo onde função de pertinência é igual a um. Os parâmetros m e n são as projeções de b e c , respectivamente, sobre o eixo x .

A representação analítica da função trapezoidal representada pela função de pertinência é dada pela expressão 21.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a} & \text{se } a < x \leq m \\ 1 & \text{se } m < x \leq n \\ \frac{b-x}{b-n} & \text{se } n < x \leq b \\ 0 & \text{se } x > b \end{cases} \quad (21)$$

A figura 23 mostra a representação gráfica das funções trapezoidais dos tipos Z, PI e S.

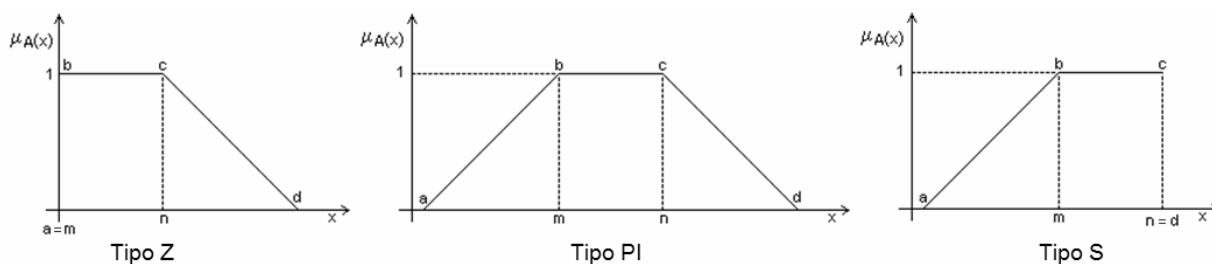


Figura 23: Representação gráfica das funções trapezoidais dos tipos Z, PI e S.

Fonte: Elaborado pelo autor.

- Gaussiana: parâmetros m , σ_k com $\sigma_k > 0$.

A representação analítica da função gaussiana representada pela função de pertinência é dada pela expressão 22.

$$\mu_A(x) = \exp^{-\sigma_k(x-m)^2} \quad (22)$$

onde:

m é o valor modal.

σ_k é a dispersão.

A figura 24 mostra a representação gráfica da função gaussiana.

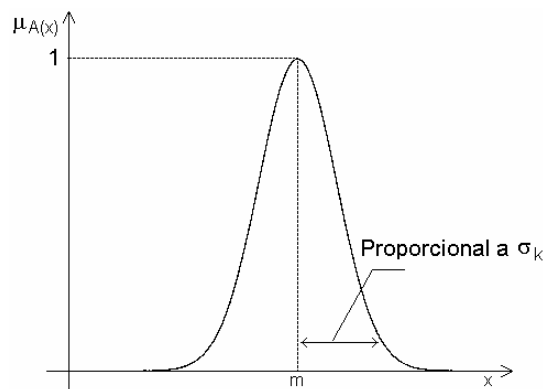


Figura 24: Representação gráfica da função gaussiana.

Fonte: Elaborado pelo autor.

- Conjunto Unitário: parâmetros m e h , onde m é o único valor de x para o qual o grau de pertinência h é diferente de zero.

A representação analítica da função conjunto unitário, representada pela função de pertinência, é dada pela expressão 23.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} h & \text{se } x = m \\ 0 & \text{se } x \neq m \end{cases} \quad (23)$$

A figura 25 mostra a representação gráfica da função conjunto unitário.

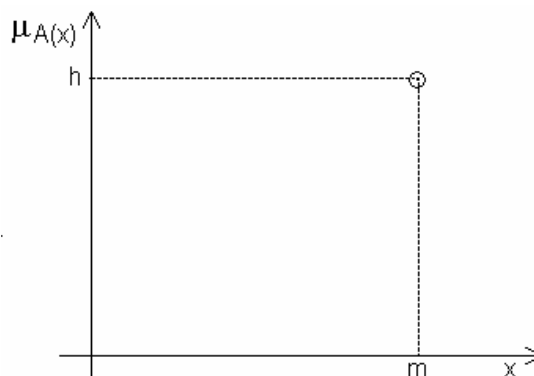


Figura 25: Representação gráfica da função conjunto unitário.

Fonte: Elaborado pelo autor.

- Conjunto em universo discreto: para representar conjuntos universos finitos pode-se utilizar a representação tabular. A tabela deve listar todos os elementos do conjunto e seus respectivos graus de pertinência (NICOLETTI e CAMARGO, 2004).

Na tabela 9 é apresentado um exemplo de representação tabular, para o conceito temperatura alta (TA), para um conjunto *fuzzy* discreto.

Tabela 9 – Representação tabular do conceito temperatura alta (TA).

$x \in TD$	$\mu_{TA}(x)$
0	0
5	0
10	0
15	0
20	0.34
25	0.67
30	1
35	1
40	1

Fonte: NICOLETTI e CAMARGO (2004). Adaptado pelo autor.

A figura 26 mostra a representação gráfica do conjunto *fuzzy* para o conceito temperatura alta (TA), apresentado na tabela 9.

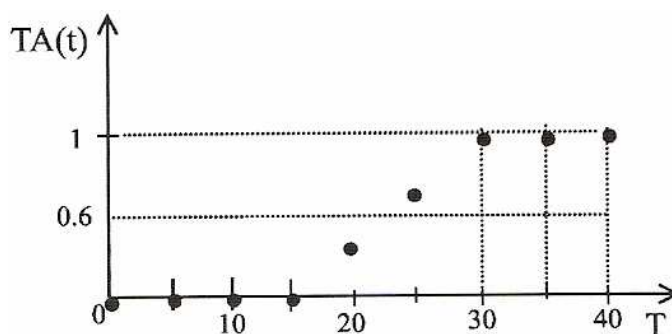


Figura 26: Conjunto *fuzzy* em universo discretizado.

Fonte: NICOLETTI e CAMARGO, 2004.

A escolha do tipo de funções de pertinência que melhor representam os conjuntos *fuzzy* da aplicação, depende do conceito que se deseja representar e do contexto em que serão utilizadas (SILVA et al, 2010).

Segundo Weber e Klein (2003), as funções de pertinência mais utilizadas são as trapezoidais e as triangulares. Estas funções são mais simples, em termos computacionais, porém eficientes na maioria das aplicações e são de fácil interpretação.

A principal característica que diferencia as funções de pertinência do tipo trapezoidal das triangulares, é que elas permitem a representação de um conjunto de valores com grau de pertinência igual a 1, enquanto as triangulares representam um único valor com grau de pertinência máximo. Esta característica é relevante quando deseja-se representar um conceito vago e impreciso.

4.3 Operações com conjuntos *fuzzy*

- Complemento (negação): “O complemento de um conjunto *fuzzy* em relação a um universo de discurso, caracteriza-se por ser um conjunto de todos os elementos do universo de discurso que não pertencem ao conjunto especificado” (WEBER e KLEIN, 2003). Pela definição formal da teoria dos conjuntos *fuzzy*, dado um conjunto *fuzzy* A , o complemento de A , denotado por \bar{A} é um conjunto *fuzzy* dado pela expressão 24.

$$\bar{A} = 1 - \mu_A(u) \quad (24)$$

Na álgebra booleana, o complemento de um conjunto *fuzzy* corresponde à operação “NOT” (WEBER e KLEIN, 2003).

- Interseção (t-norma): A interseção de dois conjuntos *fuzzy* resulta num conjunto formado pela parte comum aos dois conjuntos *fuzzy*. A função de pertinência resultante corresponde ao menor valor de pertinência aos dois conjuntos específicos (WEBER e KLEIN, 2003). Pela definição formal, dados dois conjuntos *fuzzy* A e B definidos em um conjunto universo U, a interseção de A e B, denotada por $A \cap B$ é um conjunto *fuzzy* dado pela expressão 25.

$$A \cap B = \min\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \quad (25)$$

Na álgebra booleana, a interseção de dois conjuntos *fuzzy* corresponde à operação “AND”. O conceito de interseção geralmente é modelado através do emprego da operação da t-norma de Zadeh, expressa pelo operador min (WEBER e KLEIN, 2003).

- União (t-conorma): A união de dois conjuntos *fuzzy* resulta num conjunto que contém ambos os conjuntos *fuzzy*. A função de pertinência resultante corresponde ao maior valor de pertinência, aos dois conjuntos específicos (WEBER e KLEIN, 2003). Pela definição formal, dados dois conjuntos *fuzzy* A e B definidos em um conjunto universo U, a união de A e B, denotada por $A \cup B$ é um conjunto *fuzzy* dado pela expressão 26.

$$A \cup B = \max\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \quad (26)$$

Na álgebra booleana, a união de dois conjuntos *fuzzy* corresponde à operação “OR”. O conceito de união geralmente é modelado através do emprego da operação da t-conorma de Zadeh, expressa pelo operador max (WEBER e KLEIN, 2003).

4.4 Regras de produção *fuzzy*

Um modelo matemático de um sistema pode ser substituído por um conjunto de regras que descrevem o seu comportamento. Em sistemas *fuzzy* as regras representam o comportamento do sistema, uma vez conhecidos os valores das

variáveis linguísticas, as regras fuzzy definidas são responsáveis pela determinação da ação a ser tomada (WEBER e KLEIN, 2003).

As regras de produção *fuzzy* normalmente são formadas por duas partes principais: O antecedente e o conseqüente, e são representadas na forma de se ... então (*if ... then*), representação comumente usada em linguagens de programação, conforme mostra a expressão 27.

If <antecedente> ***then*** <conseqüente> (27)

O antecedente representa a condição que, quando satisfeita, determina o processamento do conseqüente da regra, este processo denomina-se disparo da regra.

O conseqüente representa o conjunto de ações ou diagnósticos que são gerados com o disparo da regra (REZENDE et al, 2005).

4.5 Fuzzificação

O processo de *fuzzificação* é a transformação dos dados de entrada de um sistema em conjuntos *fuzzy* correspondentes, com seus respectivos domínios. Neste processo justifica-se a importância de um especialista do fenômeno, ou sistema, a ser modelado, para formular as funções de pertinência para cada conjunto *fuzzy* envolvido no processo (BARROS e BASSANEZI, 2006).

4.6 Inferência fuzzy

A inferência *fuzzy* é responsável pela “tradução” matemática das proposições *fuzzy*, por meio de técnicas da lógica *fuzzy*. Neste módulo, define-se quais as normas e regras de inferência serão utilizadas na obtenção da relação *fuzzy* que modela a base de regras (BARROS e BASSANEZI, 2006).

Existem vários modelos de sistemas de inferência *fuzzy*, na maioria dos modelos o antecedente é formado por proposições linguísticas e o conseqüente é apresentado de forma distinta, alguns modelos utilizam conjuntos *fuzzy* também no conseqüente e outros modelos, apresentam o conseqüente das regras *fuzzy* por funções relacionadas com as entradas. Alguns modelos serão descritos a seguir, dos quais o modelo de Mamdani e o modelo de Takagi-Sugeno-Kang são os mais utilizados (FERNANDES, 2005).

4.6.1 Modelo de Mamdani

A primeira aplicação prática da lógica *fuzzy* foi proposta por Mamdani (1974). O modelo proposto caracteriza-se por utilizar relações *fuzzy* tanto nos antecedentes como nos consequentes das regras de inferência. A expressão 28 mostra um exemplo de uma regra *fuzzy* do modelo de Mamdani.

se temperatura = “aumentando” **e** pressão = “muito alta” **então** perigo de explosão = “grande” (28)

A expressão 28 apresenta as expressões linguísticas “aumentando” e “muito alta” no antecedente e a expressão linguística “grande” no consequente da regra *fuzzy*.

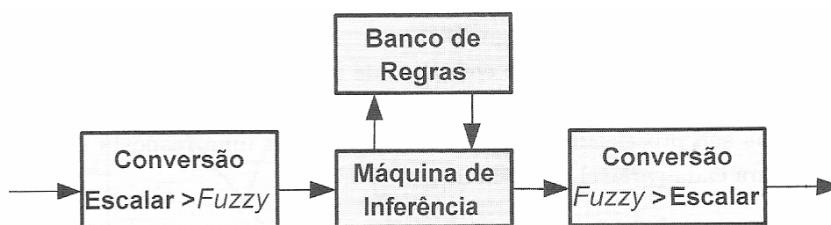


Figura 27: Diagrama típico de um modelo de inferência de Mamdani.

Fonte: REZENDE et al, 2005

Na figura 27 é apresentado um diagrama de blocos de um modelo de Mamdani, os valores numéricos das entradas são transformados em conjuntos *fuzzy*, a máquina de inferência recebe estes valores *fuzzy* e processa as regras da base de conhecimento gerando um conjunto *fuzzy* de saída, a partir das regras disparadas, que é convertido para um valor escalar através de um processo de *defuzzificação* (REZENDE et al, 2005).

Da mesma forma que Zadeh, o modelo de Mamdani utiliza operadores de máximo e de mínimo no processamento das regras de inferência.

A figura 28 mostra o processo de inferência max-min de Mamdani.

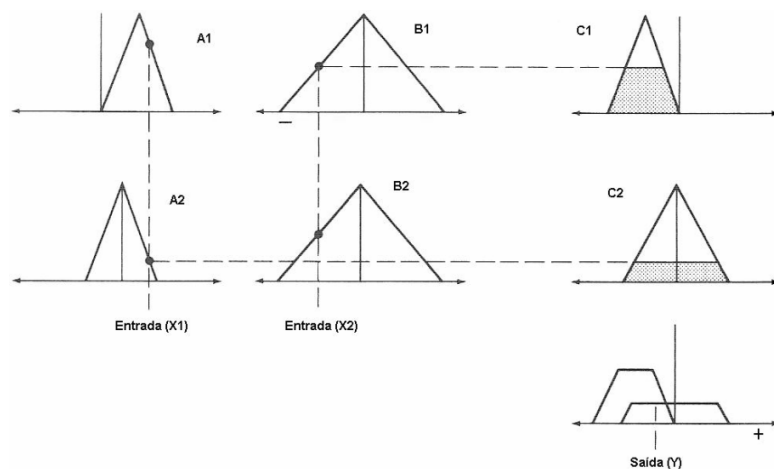


Figura 28: Processo de inferência max-min do Mamdani.

Fonte: KOSKO, 1992. Adaptado pelo autor.

A inferência máx-min utiliza as operações de união e de interseção entre conjuntos. A expressão 29 mostra um exemplo com duas regras de Mamdani.

$$\text{se } x_1 = A_1 \text{ e } x_2 = B_1 \text{ então } y_1 = C_1 ; \text{ se } x_1 = A_2 \text{ e } x_2 = B_2 \text{ então } y_2 = C_2 \quad (29)$$

Onde:

x_1, x_2 são as entradas do sistema.

A_1, A_2, B_1, B_2 são termos primários definidos nas partições *fuzzy* das variáveis de entrada (conjuntos *fuzzy* dos antecedentes das regras).

y_1 e y_2 são variáveis de saída.

C_1, C_2 são termos primários definidos nas partições *fuzzy* das variáveis de saída (conjuntos *fuzzy* dos consequentes das regras).

Considerando as regras *fuzzy* da expressão 29, o método de inferência máx-min, proposto por Mamdani (1974) e apresentado por Rezende et al (2005), será detalhado a seguir.

Na conversão escalar para *fuzzy*, os antecedentes de cada regra são processados por interseção *fuzzy* entre os graus de pertinência das entradas atuais nos termos primários definidos em cada regra, gerando um grau de pertinência de

disparo para cada regra de produção *fuzzy*, ou seja, é calculado o coeficiente de disparo $D^{(k)}$, pela expressão 30.

$$D^{(k)} = T [\mu_{A_1^k}(x_1), \mu_{B_1^k}(x_2)] = \min [\mu_{A_1^k}(x_1), \mu_{B_1^k}(x_2)] \quad (30)$$

Onde:

k é o índice dos conjuntos *fuzzy* que denotam os termos primários, que compõem a regra na base de conhecimento.

μ é o grau de pertinência das variáveis de entrada.

Este processo transforma informações quantitativas em informações qualitativas e é comumente chamado de *fuzzificação*. Todas as regras com coeficiente de disparo maior que zero são ditas regras que dispararam para as entradas atuais e vão contribuir para o cálculo da saída do sistema de inferência. Os coeficientes de disparo vão limitar os valores máximos dos conjuntos *fuzzy* de saída gerados.

Considerando a figura 28, a aplicação da regra mín da equação 30 resulta nas saídas C1 com grau de pertinência de B1, e C2 com grau de pertinência de A2.

$$\mu_{C_i^j}(y) = \max_{k=1..n} [\min (D^{(k)}, \mu_C(y))], \forall y \in U_{y_2} \quad (31)$$

Onde:

$\mu_{C_i^j}(y)$ é o grau de pertinência do conjunto de saída C_i .

i é o índice do conjunto de saída C .

A expressão 31 mostra um conjunto *fuzzy* composto por uma operação global de união para cada variável de saída com informações sobre todas as regras disparadas para as entradas atuais. Por exemplo, duas saídas de regras de inferência com resultados C1. Uma com grau de pertinência 0,7 e outra com grau de pertinência 0,2. Pela regra max da expressão 31, o resultado seria C1 com grau de pertinência 0,7.

Este processo transforma uma informação qualitativa em outra informação qualitativa que pode ser utilizado em um diagnóstico qualitativo de tomada de decisão ou pode ser convertido em um valor escalar através de um processo de *defuzzificação*.

4.6.2 Modelo de Larsen

O método de raciocínio *fuzzy* de Larsen (1980), ao invés da inferência max-min utilizada por Mamdani (1974), utiliza o método de inferência *max-product* (WEBER e KLEIN, 2003). A estratégia de raciocínio *fuzzy* de Larsen é ilustrada na figura 29.

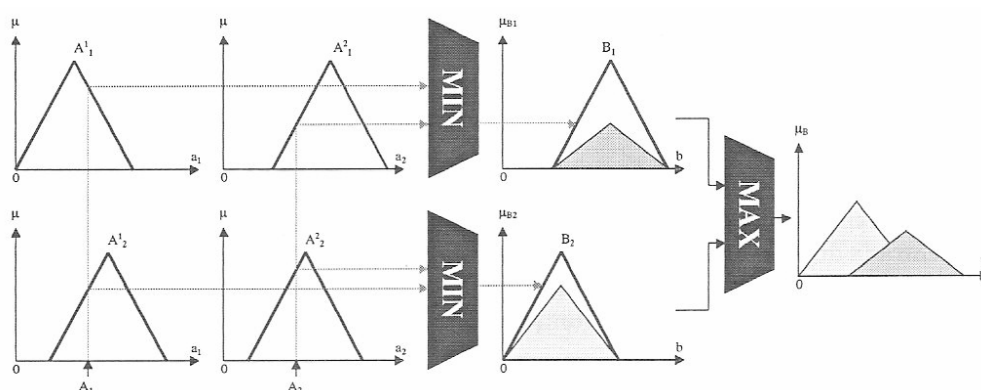


Figura 29: Processo de inferência do modelo de Larsen.

Fonte: WEBER e KLEIN, 2003.

O processamento dos antecedentes das regras está baseado em operador de inferência de produto. O conjunto *fuzzy* B1 da figura 29, resulta do produto entre os antecedentes da regra 1 e os respectivos graus de pertinência. O grau de pertinência do consequente B1, é o menor dos graus de pertinência dos antecedentes da regra 1.

O processamento do consequente, ou composição, utiliza a regra max. É idêntico ao método utilizado pelo modelo de Mamdani (1974), necessitando, portanto, de um processo de *defuzzificação*.

4.6.3 Modelo Takagi-Sugeno-Kang (TSK)

Semelhante ao modelo de Mamdani, o modelo TSK (Takagi & Sugeno 1985; Sugeno & Kang 1988) utiliza uma base de regras de inferência *fuzzy*, com a diferença de que os sucessores não são conjuntos *fuzzy*, e sim, expressões paramétricas que

relacionam as entradas e as saídas do sistema. A saída é obtida pela média ponderada das saídas das regras disparadas, conforme ilustrado na figura 30.

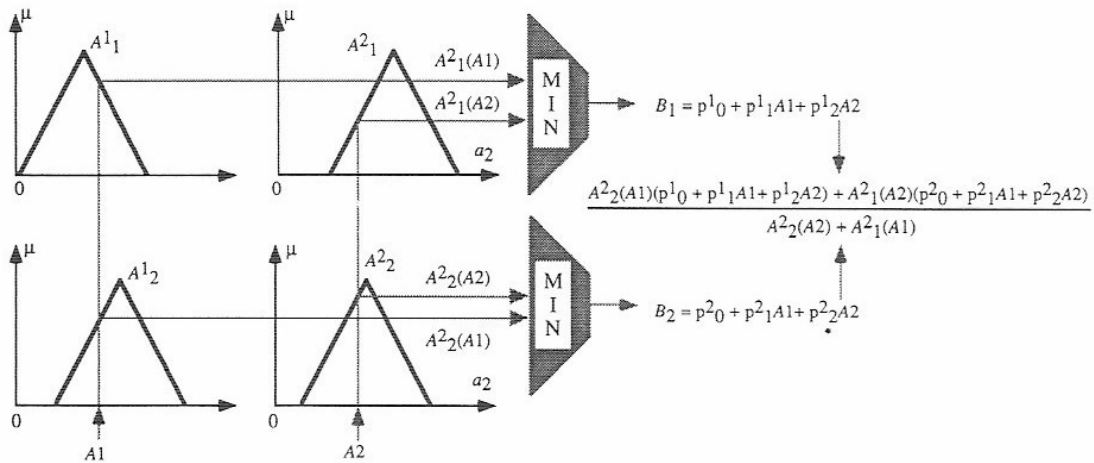


Figura 30: Processo de inferência TSK.

Fonte: PATYRA E MLYNEK, 1996.

Exemplo de uma regra genérica de TSK:

$$\text{se } x_1 = A_i \text{ e } x_2 = A_j \text{ e } \dots \text{ e } x_p = A_m \text{ então } y = \Phi(x_1, x_2, \dots, x_p) \quad (32)$$

Considerando a regra genérica da expressão 32, o método de inferência de TSK apresentado por Rezende et al (2005), será detalhado a seguir.

No processamento do conhecimento em um modelo TSK, a etapa de conversão escalar \rightarrow fuzzy, mostrada na expressão 33, é idêntica à do modelo de Mamdani, exceto da norma T , utilizada na maioria das aplicações, não ser a função “min(.)”.

$$D^{(k)} = T \left[\mu_{A_1^k}(x_1), \mu_{A_2^k}(x_2), \dots, \mu_{A_p^k}(x_p) \right] \quad (33)$$

A saída do modelo TSK é obtida diretamente pela expressão 34 que utiliza a soma das saídas das regras disparadas, ponderadas pelos valores de ativação de cada uma delas. Um modelo TSK de múltiplas saídas pode ser transformado em múltiplos modelos de um única saída (REZENDE et al, 2005).

$$\hat{y} = \frac{\sum_{i=1..k} D^{(i)} \cdot \phi_i(x_1, \dots, x_p)}{\sum_{i=1..k} D^{(i)}} \quad (34)$$

4.6.4 Modelo de Tsukamoto

O modelo de Tsukamoto (1979) utiliza funções de pertinência monotônicas, ou seja, não apresentam variações (só sobem ou só descem). “Assim como no modelo Tagaki-Sugeno-Kang, é inferido um valor não-nebuloso induzido pelo nível de ativação da regra. A saída final é obtida por média ponderada das saídas inferidas de cada regra” (DELGADO, 2002).

A estratégia de raciocínio de Tsukamoto é ilustrada na figura 31.

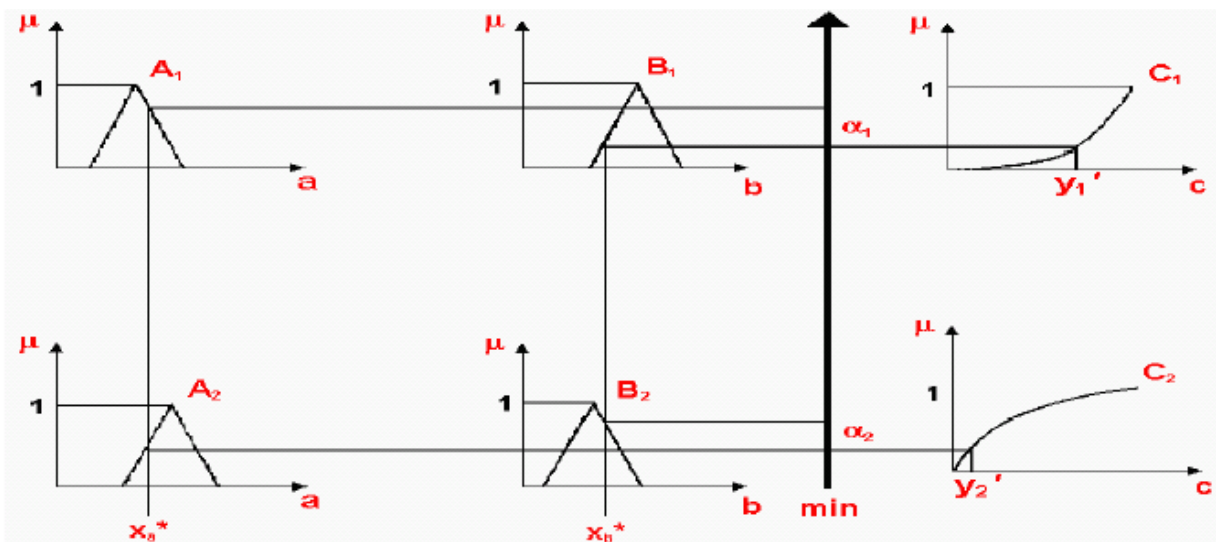


Figura 31: Processo de inferência do modelo de Tsukamoto.

Fonte: SANDRI e CORREA, 1999.

No modelo de Tsukamoto, mostrado na figura 31, cada consequente das regras é dado através de uma função monotônica. Esta função geralmente é não linear, tendo como domínio os possíveis graus de compatibilidade entre as entradas e cada premissa. Para cada regra obtém-se um único valor (y'_j) para a variável de controle, relativo à ação de controle da regra R_j , dado pela expressão 35 (SANDRI e CORREA, 1999).

$$y'_j = \mu C_j(\alpha_j) \quad (35)$$

Os valores resultantes das regras ativadas são agregados em uma única ação de controle y' através da média ponderada dada pela expressão 36.

$$y' = \frac{\sum_{j=1..n} (\alpha_j \cdot y'_j)}{\sum_{j=1..n} \alpha_j} \quad (36)$$

O modelo de Tsukamoto não é utilizado com frequência por não ser tão transparente como os modelos de Mamdani e de Takagi-Sugeno-Kang (CASTILLO e MELIN, 2001).

4.7 Composição

A Composição é a combinação de todos os subconjuntos *fuzzy* associados às variáveis de saída, formando apenas um subconjunto *fuzzy* para cada variável de saída. Um dos dois métodos, max ou soma, é normalmente usado na combinação. Na composição pelo método max, o subconjunto *fuzzy* de saída combinado é obtido pelo subconjunto de maior grau de pertinência associado à cada variável pela regra de inferência. Na composição pelo método da soma, o subconjunto *fuzzy* de saída combinado é obtido pelo ponto de soma em cima de todos os subconjuntos *fuzzy* de saída associados à variável pela regra de inferência (WEBER e KLEIN, 2003).

4.8 Métodos de defuzzificação

“A conversão *fuzzy*→escalar transforma informações qualitativas em informação quantitativa, sendo um processo de especificação. Em inglês, este processo é comumente chamado de *defuzzification*” (REZENDE et al, 2005).

Alguns métodos de *defuzzificação* são descritos a seguir, dos quais, os mais utilizados são o método do centro de massa e os métodos dos máximos.

4.8.1 Centro de massa (COG – Center of gravity).

O método do centro de massa, ou centro de gravidade (COG), calcula, para um dado conjunto *fuzzy* de saída proveniente de uma base de conhecimento processada, composto pela união de todas as regras disparadas para as entradas atuais, a abscissa

do ponto de centro de massa (centróide) correspondente e define este como o valor escalar de saída (REZENDE et al, 2005).

Dada uma regra de produção de um processo de inferência *fuzzy*, para o respectivo conjunto *fuzzy* de saída, através do método COG, chega-se a um valor escalar dado pela expressão 37.

$$b_2^* = \frac{\sum_{b \in U_{b_2}} b \cdot \mu_{B_i}(b)}{\sum_{b \in U_{b_2}} \mu_{B_i}(b)} \quad (37)$$

Onde:

b é a posição do centróide da função de pertinência individual.

$\mu_{B_i}(b)$ é a área da função de pertinência resultante da inferência *fuzzy*.

A figura 32 mostra o resultado da *defuzzificação* pelo método do centro de gravidade (COG).

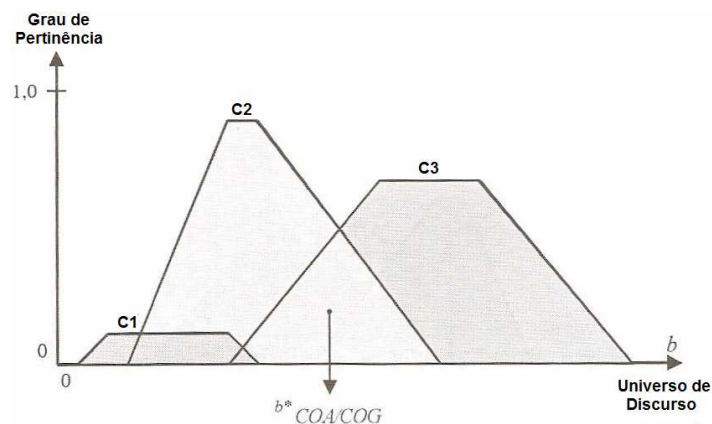


Figura 32: Defuzzificação pelo método COG.

Fonte: WEBER e KLEIN, 2003. Adaptado pelo autor.

A figura 32 apresenta um conjunto *fuzzy* para as variáveis de saída C1, C2 e C3, resultado da composição de todas as saídas das regras ativadas. O centro de massa total da figura é obtido pela expressão 37. Para calcular o centro de massa da figura, calcula-se o centro de massa e a área de C1, de C2 e de C3 e aplica-se na expressão 37. O resultado é um valor escalar, que é o resultado do processo *fuzzy*.

Este método é um dos mais complexos e mais demorados para ser implementado, mas em contrapartida é o mais preciso, pois considera a participação de

todos os conjuntos *fuzzy* de saída, inclusive os de menor grau de pertinência (WEBER e KLEIN, 2003).

4.8.2 Métodos dos máximos

Os métodos dos máximos são interessantes pela simplicidade da sua implementação, porém não consideram todas as saídas resultantes da inferência, consideram somente as de maior grau de pertinência.

4.8.2.1 Menor dos máximos (FOM – *First of maximum*).

Considerando um conjunto difuso de saída $B = \mu_b(v)$ definido no universo de discurso V da variável v .

Pelo método do menor dos máximos ou primeiro máximo, o valor numérico da saída é obtida através do ponto em que o grau de pertinência do conjunto de saída atinge o primeiro valor máximo, como mostra a expressão 38.

$$b_{\text{inf}} = \{\min(z \mid \mu_b(z) = \max(\mu_b(v)))\} \quad (38)$$

A figura 33 mostra o resultado da *defuzzificação* pelo método do menor dos máximos (FOM). O conjunto que representa a variável de saída C2, apresenta o maior grau de pertinência, logo o resultado do método é o valor onde o conjunto apresenta o seu primeiro ponto máximo.

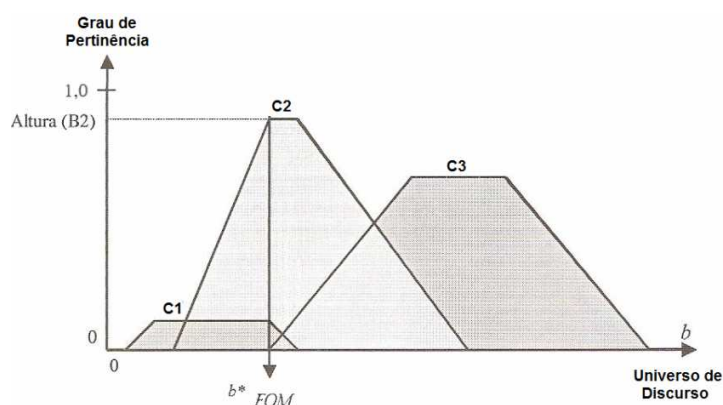


Figura 33: Defuzzificação pelo método FOM.

Fonte: WEBER e KLEIN, 2003. Adaptado pelo autor.

4.8.2.2 Maior dos máximos (LOM – *Last of maximum*).

O valor numérico da saída do método do maior dos máximos, ou último máximo, é obtido pela expressão 39, através do ponto em que o grau de pertinência do conjunto de saída atinge o último valor máximo.

$$b_{\text{sup}} = \{ \max(z \mid \mu_b(z) = \max(\mu_b(v))) \} \quad (39)$$

A figura 34 mostra o resultado da *defuzzificação* pelo método do maior dos máximos (LOM). O conjunto C2 apresenta o maior grau de pertinência, logo o resultado do método é o valor onde o conjunto apresenta o seu último ponto máximo.

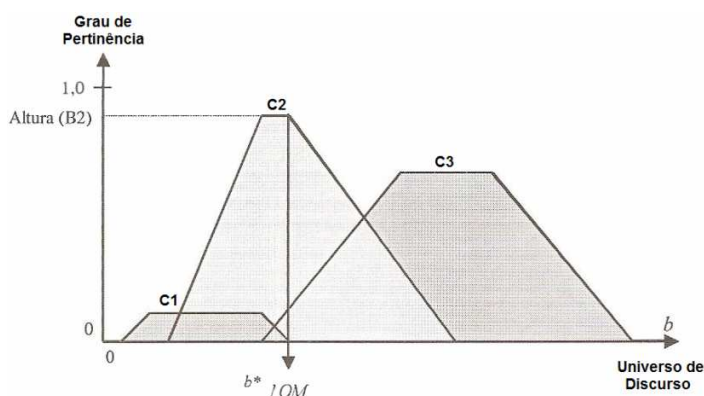


Figura 34: *Defuzzificação* pelo método LOM.

Fonte: WEBER e KLEIN, 2003. Adaptado pelo autor.

4.8.2.3 Média dos máximos (MOM – *Mean of maxima*).

É o método que busca retornar o ponto que possui o maior grau de pertinência, porém no universo existe mais de um ponto com grau de pertinência máxima. Ao invés de pegar um ponto aleatório realiza-se uma média entre eles, dada pela expressão 40.

$$b_{\text{med}} = \frac{b_{\text{inf}} + b_{\text{sup}}}{2} \quad (40)$$

A figura 35 mostra o resultado da *defuzzificação* pelo método da média dos máximos (MOM). C2 é o conjunto que apresenta o maior grau de pertinência. O resultado deste método é o ponto médio, entre o primeiro e último ponto de máximo do conjunto C2.

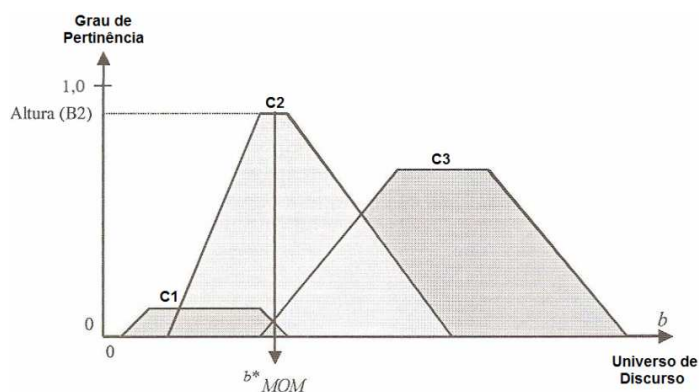


Figura 35: Defuzzificação pelo método MOM.

Fonte: WEBER e KLEIN, 2003. Adaptado pelo autor.

Existem diversos outros métodos de *defuzzificação*, porém não são aplicados com tanta frequência como os métodos dos máximos e o método do centro de gravidade. A seguir são apresentados mais alguns métodos que utilizam diferentes técnicas para obter um valor escalar de saída, para um determinado conjunto *fuzzy* formado pela composição dos conjuntos *fuzzy* das regras disparadas.

4.8.3 Defuzzificação por altura (HD – Height defuzzification).

Defuzzificação por altura é um método de *defuzzificação* que, ao invés de utilizar a união entre os conjuntos *fuzzy* de saída, considera os conjuntos *fuzzy* que foram “cortados” individualmente. O valor de saída é obtido calculando-se, primeiramente, o somatório dos produtos dos valores do centro dos conjuntos *fuzzy* de saída pelas respectivas alturas dos conjuntos “cortados” após o processo de inferência. Posteriormente, este somatório é dividido pelo somatório das alturas dos conjuntos *fuzzy* “cortados”. É um método simples, rápido e eficiente (WEBER e KLEIN, 2003).

O valor numérico da saída (b^*) pelo método da *defuzzificação* por altura é obtido pela expressão 41.

$$b^* = \frac{\sum_{i=1}^n c^{(i)} \cdot a_i}{\sum_{i=1}^n a_i} \quad (41)$$

Onde:

a é altura dos conjuntos *fuzzy* de saída “cortados”.

c é o valor do centro dos conjuntos *fuzzy* de saída.

i é o índice do conjunto *fuzzy* de saída.

n é número de conjuntos *fuzzy* de saída “cortados” após a inferência.

A figura 36 mostra o resultado da *defuzzificação* pelo método HD. A aplicação da expressão 41 implica no somatório, entre os produtos dos centros (C_i) pelas alturas (C_i) e divide-se o valor pelo somatório das alturas (C_i), onde i varia de 1 a 3.

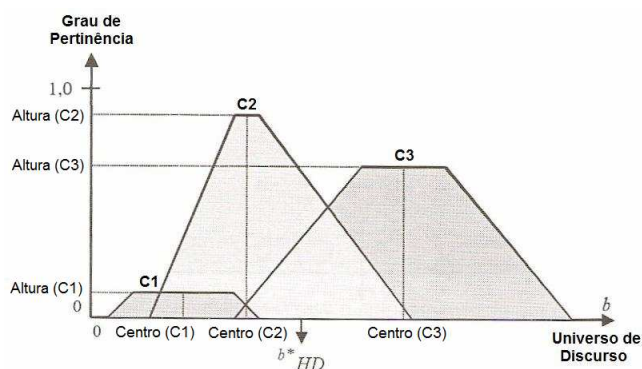


Figura 36: *Defuzzificação* pelo método HD.

Fonte: WEBER e KLEIN, 2003. Adaptado pelo autor.

4.8.4 Centro de maior área (COLA – *Center of largest area*).

Das figuras que representam os conjuntos *fuzzy* de saída, o método do centro da maior área determina o centro da figura de maior área para o resultado da *defuzzificação*. Este método é indicado quando as saídas do processo de inferência *fuzzy* são formadas por conjuntos de múltiplas áreas (WEBER e KLEIN, 2003).

A figura 37 mostra o resultado da *defuzzificação* pelo método do centro de maior área (COLA).

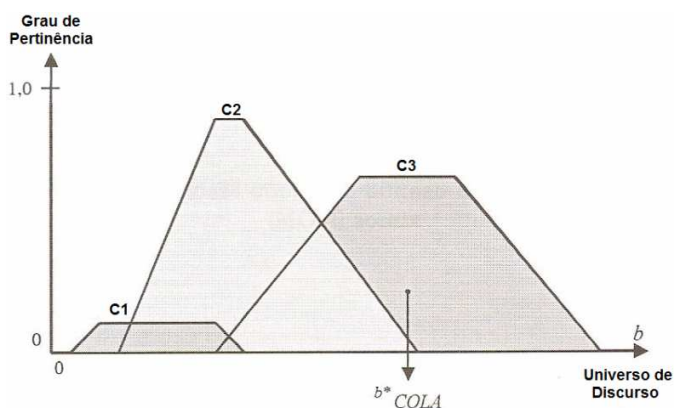


Figura 37: *Defuzzificação* pelo método COLA.

Fonte: WEBER e KLEIN, 2003. Adaptado pelo autor.

4.8.5 Centro de máximo (COM – *Center of maximum*).

O método do centro de máximo não calcula a área dos conjuntos *fuzzy* das saídas. Este método baseia-se no fato de que as funções de pertinência apresentam pesos sobre o universo de discurso que passa a ser considerado como espécie de “gangorra”. Neste método é feita uma média dos graus de pertinência das variáveis de saída e seus valores (altura x distância até o centro da “gangorra”), o resultado (centro de máximo) é obtido através do ponto onde a “gangorra” possa ser apoiada de forma que fique em equilíbrio (WEBER e KLEIN, 2003).

A figura 38 mostra o resultado da *defuzzificação* pelo método do centro de máximo (COM).

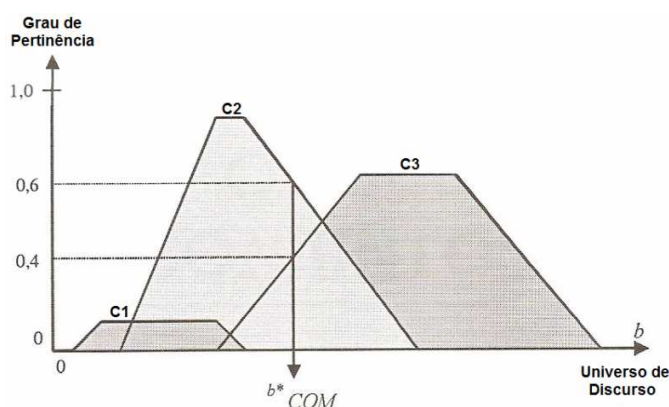


Figura 38: *Defuzzificação* pelo método COM.

Fonte: WEBER e KLEIN, 2003. Adaptado pelo autor.

Dos métodos de *defuzzificação* apresentados nesta seção, percebe-se, que os métodos que consideram todas as saídas *fuzzy* das regras “disparadas” (COG, HD e COM) apresentam resultados parecidos, o que dá indícios que estes métodos são mais precisos.

4.9 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados os conceitos de lógica *fuzzy*, necessários para descrever os conjuntos e as regras *fuzzy* utilizadas para modelar um sistema.

O conteúdo apresentado neste capítulo é a base para a modelagem do sistema de cerca elétrica utilizando lógica *fuzzy*.

As características relevantes dessa técnica são a possibilidade de tratar informação linguística, subjetiva e imprecisa, que é muito difícil de ser quantificada pela matemática convencional.

No próximo capítulo será apresentada a metodologia adotada na realização deste trabalho.

5 MODELO FUZZY PROPOSTO

Neste capítulo será feito o detalhamento do projeto, a metodologia utilizada para a elaboração dos conjuntos *fuzzy*, a descrição dos processos de inferência *fuzzy* e o processo de *defuzzificação* utilizado neste trabalho. Neste capítulo também será descrito o funcionamento do *software* e a validação do método utilizado neste trabalho.

5.1 Metodologia

Esta seção apresenta a metodologia utilizada neste trabalho. Inicialmente é feita a classificação da pesquisa. A seção 5.1.2 apresenta um quadro resumo com as quatro etapas de inferência *fuzzy* do sistema modelado. As etapas de inferência e a elaboração dos conjuntos *fuzzy* de cada etapa, são apresentadas nas seções 5.1.3 a 5.1.6. O processo de *defuzzificação* é descrito na seção 5.1.7 e o desenvolvimento do *software* é apresentado na seção 5.1.8. O capítulo 5 é encerrado com a validação do método, na seção 5.1.9.

5.1.1 Classificação da pesquisa

Segundo Santos (2000), três critérios podem ser utilizados para identificar a natureza metodológica dos trabalhos de pesquisa. São eles:

- Caracterização segundo os objetivos.
- Caracterização segundo os procedimentos de coleta.
- Caracterização segundo as fontes de informação.

Segundo os objetivos, a pesquisa obteve informações referentes às características do solo e do clima em determinadas regiões, para fins de estimativa de aterramento elétrico. A pesquisa classifica-se como exploratória. Conforme Santos (2000), “[...] Explorar é tipicamente a primeira aproximação de um tema e visa criar maior familiaridade em relação a um fato ou fenômeno.”

De acordo os procedimentos de coleta, a pesquisa define-se como bibliográfica, documental e experimental. A pesquisa obteve de dados referentes aos fatores que contribuem para a degradação dos transformadores de AT, caracteriza-se, portanto, como experimental. Segundo com Santos (2000), “[...] Experimento – É quando um fato ou fenômeno da realidade é reproduzido de forma controlada, com o objetivo de descobrir os fatores que o produzem ou por ele são produzidos.”

As fontes de informação dos dados da pesquisa foram o campo e a bibliografia.

5.1.2 Processo de inferência *fuzzy* do sistema modelado

Nesta seção será descrito todo o processo de inferência *fuzzy* do sistema de cerca elétrica. O processo foi dividido em quatro etapas de inferência, onde as regras disparadas na primeira etapa são utilizadas como antecedentes na segunda etapa de inferência e as regras disparadas na segunda e na terceira etapa de inferência vão compor os antecedentes da última etapa de inferência *fuzzy*.

Na primeira etapa de inferência os antecedentes são formados pela textura do solo (1), pela salinidade (2) e pela umidade do solo (3), e o consequente é a resistividade elétrica do solo (4).

Na segunda etapa de inferência o consequente da primeira etapa de inferência, a resistividade elétrica do solo (4), juntamente com a relação entre o número e a dimensão das hastes de aterramento (5) formam os antecedentes da segunda etapa de inferência. O consequente da segunda etapa de inferência é a resistência elétrica do aterramento (6).

A terceira etapa de inferência tem como antecedentes a potência do energizador (7) e a carga ligada na cerca (8) e o consequente dessa etapa de inferência é a relação entre a carga e a potência (9).

Os antecedentes da última etapa de inferência são formados pela resistência elétrica do aterramento (6), resultante da segunda etapa de inferência, pela relação entre a carga e a potência (9), consequente da terceira etapa de inferência e pela Isolação do transformador de alta tensão (10). O consequente da última etapa de inferência é a durabilidade do TR-AT (11).

No quadro 1 é mostrado um diagrama com um resumo das quatro etapas de inferência *fuzzy*.

1º Etapa de Inferência Fuzzy.	
Antecedentes:	
Textura do Solo {AR, MD, AG, MAG}	(1)
Salinidade {SL, NSL}	(2)
Umidade do Solo {MB, B, MDB, MD, MDR, R, MR}	(3)
Consequente:	
Resistividade do Solo {MB, B, MDB, MDR, R, MR}	(4)
2º Etapa de Inferência Fuzzy.	
Antecedentes:	
Resistividade do Solo {MB, B, MDB, MDR, R, MR}	(4)
Relação Número de Hastes x Dimensão das Hastes {MB, B, MDB, MDR, R, MR, P}	(5)
Consequente:	
Resistência do Aterramento {MB, B, MDB, MDR, R, MR, P}	(6)
3º Etapa de Inferência Fuzzy.	
Antecedentes:	
Potência do Energizador {MBa, Ba, MDa, Aa, MAa}	(7)
Carga Ligada {Pa, MBa, Ba, MDa, Aa, MAa}	(8)
Consequente:	
Relação Carga/Potência {MB, B, MD, R, MR, P}	(9)
4º Etapa de Inferência Fuzzy.	
Antecedentes:	
Resistência do Aterramento {MB, B, MDB, MDR, R, MR, P}	(6)
Relação Carga/Potência {MB, B, MD, R, MR, P}	(9)
Isolação do TR {IB, IMB}	(10)

Consequente:

Durabilidade do TR {P, MR, R, MD, B, MB}

(11)

Quadro 1 – Resumo das quatro etapas de inferência *Fuzzy*

Onde:

MB	Rótulo <i>fuzzy</i> muito bom.
B	Rótulo <i>fuzzy</i> bom.
MDB	Rótulo <i>fuzzy</i> médio bom.
MD	Rótulo <i>fuzzy</i> médio.
MDR	Rótulo <i>fuzzy</i> médio ruim.
R	Rótulo <i>fuzzy</i> ruim.
MR	Rótulo <i>fuzzy</i> muito ruim.
P	Rótulo <i>fuzzy</i> péssimo.
AR	Textura arenosa.
MD	Textura média.
AG	Textura argilosa.
MAG	Textura muito argilosa.
SL	Salino.
NSL	Não salino.
Pa	Rótulo <i>fuzzy</i> péssima.
MBa	Rótulo <i>fuzzy</i> muito baixa.
Ba	Rótulo <i>fuzzy</i> baixa.
MDa	Rótulo <i>fuzzy</i> média.
Aa	Rótulo <i>fuzzy</i> alta.
MAa	Rótulo <i>fuzzy</i> muito alta.
IB	Rótulo <i>fuzzy</i> isolamento bom.
IMB	Rótulo <i>fuzzy</i> isolamento muito bom.

O modelo de inferência de Mamdani (1974) é utilizado nesse processo por apresentar conjuntos *fuzzy* também nos consequentes, o que facilita a utilização das saídas como entradas no processo de inferência seguinte, necessitando de *defuzzificação* somente para as saídas do último processo de inferência *fuzzy*.

5.1.3 Primeira etapa do processo de inferência *fuzzy*

Na primeira etapa do processo de inferência *fuzzy* foram definidos os rótulos correspondentes às saídas *fuzzy* para a resistividade do solo.

Na falta de um mapa completo da resistividade elétrica, ou da condutividade elétrica dos solos do Brasil, o mapa da figura 39 foi utilizado na classificação *fuzzy* dos valores da resistividade elétrica do solo.



Figura 39: Estimativa da resistividade média do solo nos Estados Unidos.

Fonte: U.S.D.A. REA bulletin, 1994.

Para definir os conjuntos *fuzzy* foi tomado como base o mapa da figura 39, no qual os valores médios da resistividade elétrica são definidos em progressão geométrica de ordem 2, aproximadamente. Dessa forma os conjuntos *fuzzy* foram definidos para os valores médios de resistividade elétrica mostrados no quadro 2.

$\rho \leq 33 \Omega.m \rightarrow$ Muito bom (MB)
 $\rho = 67 \Omega.m \rightarrow$ Bom (B)
 $\rho = 125 \Omega.m \rightarrow$ Médio bom (MDB)
 $\rho = 250 \Omega.m \rightarrow$ Médio ruim (MDR)
 $\rho = 500 \Omega.m \rightarrow$ Ruim (R)
 $\rho \geq 1000 \Omega.m \rightarrow$ Muito ruim (MR)

Quadro 2 – Valores médios dos conjuntos *fuzzy* para a resistividade do solo

Com base nos dados do quadro 2, foram definidos os rótulos representando os conjuntos *fuzzy* para a resistividade do solo, ilustrados na figura 40.

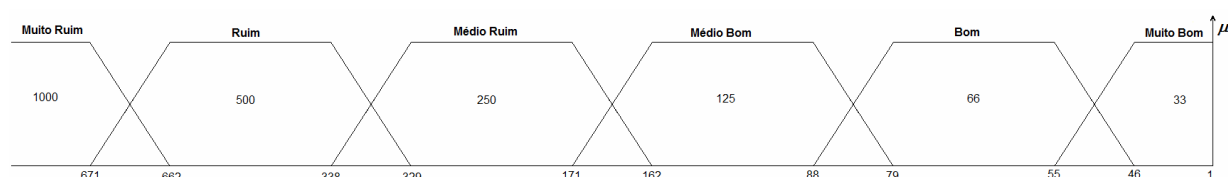


Figura 40: Representação gráfica dos conjuntos *fuzzy* para a resistividade do solo

Fonte: Elaborado pelo autor.

A opção pela representação trapezoidal dos conjuntos *fuzzy* tem a finalidade de mostrar que o conjunto *fuzzy* não representa um valor *crisp* de resistividade e sim um conjunto de valores difusos próximos ao valor médio definido a partir do mapa da figura 39, facilitando o mapeamento das regiões, uma vez que há uma variação da resistividade elétrica considerável numa mesma região.

Na ausência de um mapa completo da resistividade elétrica dos solos no Brasil, após efetuar buscas nos mais diversos órgãos do governo e entidades de pesquisa, sem encontrar um mapa completo, optou-se pela utilização do mapa pedológico de classificação dos solos elaborado pelo IBGE, ilustrado na figura 41, e mapas estatísticos da umidade média do solo, mostrados na figura 42 (p.86).

Na confrontação de mapas de condutividade elétrica do solo com mapas pedológicos, Frasson, Pereira e Molin (2004) chegaram à conclusão que a correlação entre a condutividade elétrica do solo com a pedologia é possível, sendo que vários fatores que implicam em mudanças na classificação pedológica, também implicam numa alteração de condutividade elétrica. Estudos apresentados por Machado et al (2004), Faulin, Molin e Magalhães (2005) e por Castro e Molin (2004), comprovam a correlação da condutividade elétrica dos solos com a textura dos solos, com a umidade e com a salinidade dos solos.

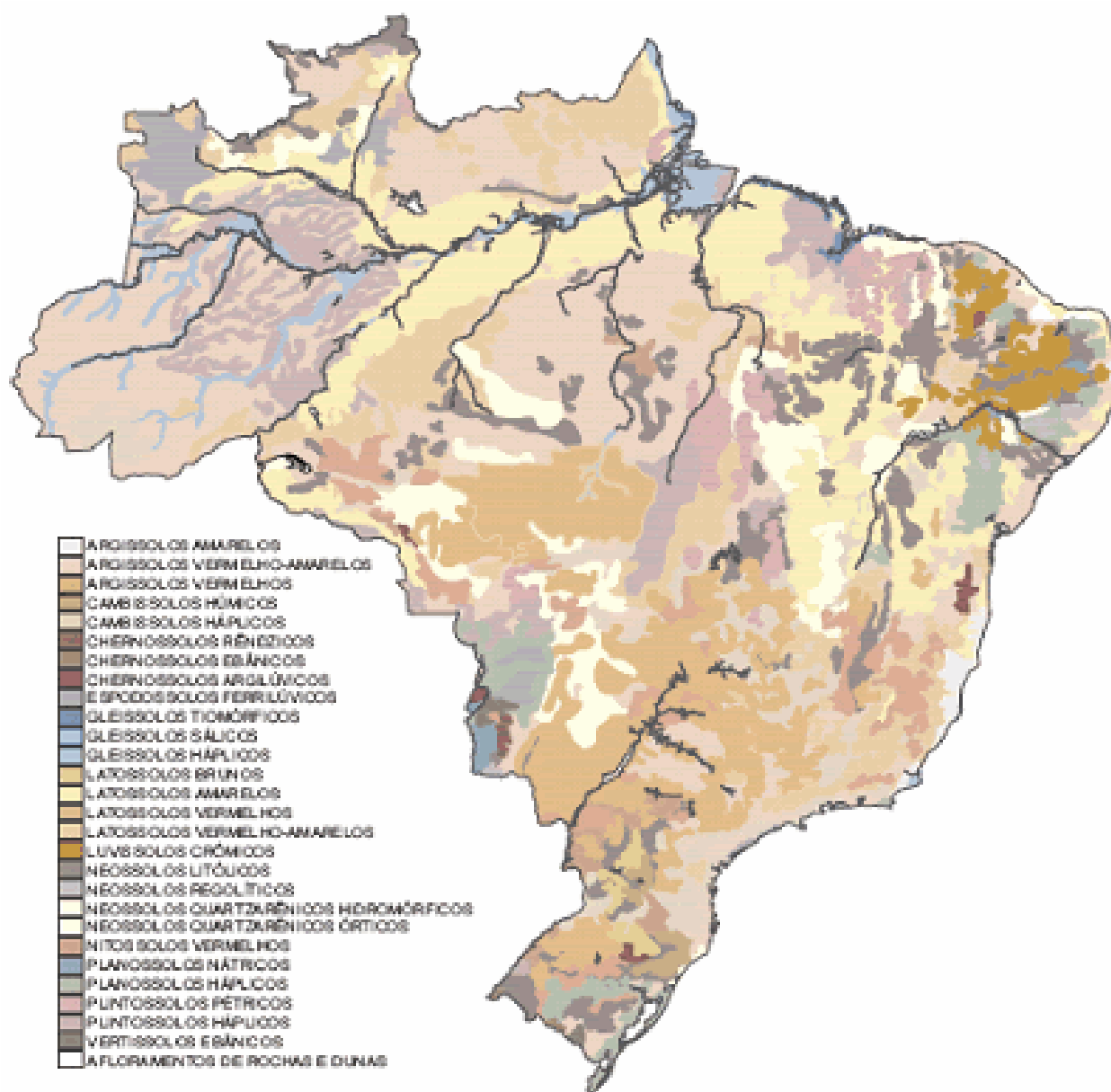


Figura 41: Mapa de solos do Brasil

Fonte: IBGE, 2005.

Das informações contidas no mapa pedológico de classificação dos solos, ilustrado na figura 41, considerou-se a textura do solo e a salinidade como as mais relevantes, além dos mapas da umidade média do solo, ilustrado na figura 42. A partir da confrontação destes mapas foram definidos os conjuntos *fuzzy* e foram escritas as regras *fuzzy* para a resistividade do solo.

No quadro 3 é mostrada a classificação dos conjuntos *fuzzy* para a textura do solo.

Arenosa – AR
Média - MD
Argilosa - AG
Muito argilosa – MAG

Quadro 3 – Conjuntos *fuzzy* para a textura do solo

A classificação dos solos quanto à salinidade é mostrada no quadro 4, onde solos classificados como salinos e solos classificados como sálcos são inclusos no conjunto dos solos Salinos e os demais tipos de solos fazem parte do conjunto dos solos Não salinos.

Salinos – SL
Não salinos – NSL

Quadro 4 – Conjuntos *fuzzy* para a salinidade do solo

Os solos classificados como salinos e os sálcos têm resistividade do solo inferior a 2,5 Ω .m, portanto enquadram-se no conjunto *fuzzy* definido como Muito bom no quadro 2.

A figura 42 apresenta os mapas com as médias da umidade do solo entre 1997 e 2004 para a profundidade entre 500 e 1500 mm, com base nestes mapas foi elaborado o quadro 5 (p.87) com os conjuntos *fuzzy* para a umidade do solo.

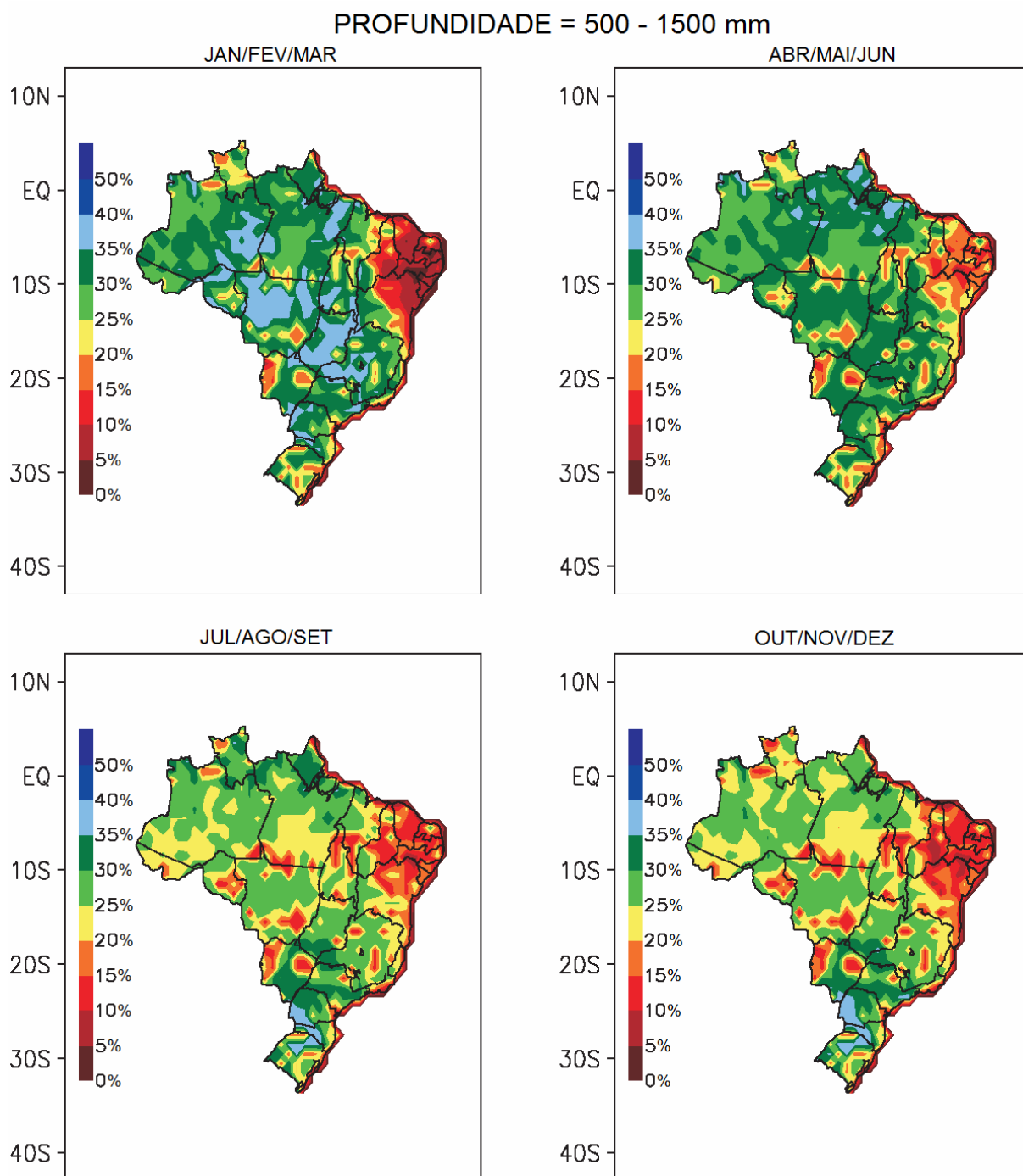


Figura 42: Média da umidade do solo entre 1997 e 2004 entre 500 e 1500 mm de profundidade.
 Fonte: GEVAERD e FREITAS, 2006, adaptado pelo autor.

$U \geq 35\% \rightarrow$ Muito bom (MB)

U = 30 % → Bom (B)
 U = 25 % → Médio bom (MDB)
 U = 20 % → Médio (MD)
 U = 15 % → Médio ruim (MDR)
 U = 10 % → Ruim (R)
 U ≤ 5 % → Muito ruim (MR)

Quadro 5 – Conjuntos *fuzzy* para a umidade do solo

As regras de produção *fuzzy* foram escritas com base no conhecimento especialista e dos resultados de trabalhos que relacionam condutividade elétrica, textura do solo e umidade do solo (FRASSON, PEREIRA e MOLIN, 2004), (MACHADO et al, 2004), (FAULIN, MOLIN e MAGALHÃES, 2005), (GEORGE, 1999), (FRANCESQUINI, 2007) e (AS/NZS, 2007). Tomando como antecedentes a textura do solo (TS), umidade do solo (U) e a salinidade (S) e como consequente a resistividade elétrica do solo (Res). Os conjuntos *fuzzy* foram definidos com grau de pertinência 1.

No quadro 6 são mostradas algumas regras de inferência *fuzzy*.

Se TS = MAG(1) **e** U = MD(1) **e** S = NSL(1) **então** Res = B(1)
Se TS = AR(1) **e** U = R(1) **e** S = NSL(1) **então** Res = R(1)
Se U = R(1) **e** S = SL(1) **então** Res = B(1)
Se U = MDR(1) **e** S = SL(1) **então** Res = MB(1)

Quadro 6 – Regras de inferência *fuzzy* para a resistividade do solo

Um resumo de todas regras de inferência para a resistividade do solo, apresentadas no anexo I, é mostrado na tabela 10.

Tabela 10 – Regras *fuzzy* para resistividade do solo.

SL,TS\UM	MB	B	MDB	MD	MDR	R	MR
SL	MB	MB	MB	MB	MB	B	MDR
MAG	MB	MB	MB	B	B	MDB	R
AG	MB	MB	B	B	MDB	MDR	R
MD	B	B	B	B	MDR	MDR	R
AR	MDB	MDB	MDB	MDR	MDR	R	MR

Fonte: Elaborado pelo autor.

As saídas das regras disparadas na primeira etapa de inferência,

correspondente à resistividade do solo, vão compor os antecedentes da segunda etapa de inferência *fuzzy* juntamente com os conjuntos *fuzzy* da relação número e dimensão das hastes de aterramento.

5.1.4 Segunda etapa do processo de inferência *fuzzy*

Na segunda etapa de inferência *fuzzy* são definidas as características do aterramento elétrico, com base na relação do número e das dimensões das hastes de aterramento e da resistividade do solo resultante da primeira etapa de inferência *fuzzy*.

Para a definição dos conjuntos *fuzzy* para o aterramento elétrico, foram levadas em conta, além do conhecimento especialista do departamento técnico da empresa, as informações da literatura e das normas técnicas que recomendam um valor de resistência de aterramento de aproximadamente 10 Ohms como sendo um valor adequado para um sistema de aterramento (ABNT, 2005). Nas instalações onde o sistema de aterramento tem a finalidade de proteção, é fundamental que a resistência do aterramento não seja muito superior ao sugerido pela literatura, no caso do sistema de cerca elétrica, onde o aterramento é parte do circuito de corrente, os dados da empresa apresentam que um valor em torno de 50 Ohms já pode ser considerado um valor bom para sistemas com energizadores de baixa potência, até porque é muito difícil conseguir valores de resistência de aterramento inferiores a 50 Ohms em solos arenosos. O quadro 7 apresenta os valores, com grau de pertinência igual a 1, definidos para os conjuntos *fuzzy* para a resistência do aterramento.

$R \leq 25\Omega$	→ Muito bom (MB)
$40\Omega \leq R \leq 60\Omega$	→ Bom (B)
$80\Omega \leq R \leq 120\Omega$	→ Médio bom (MDB)
$160\Omega \leq R \leq 240\Omega$	→ Médio ruim (MDR)
$320\Omega \leq R \leq 480\Omega$	→ Ruim (R)
$640\Omega \leq R \leq 960$	→ Muito ruim (MR)
$R \geq 1280$ e Sem Terra	→ Péssimo (P)

Quadro 7 – Valores dos conjuntos *fuzzy* para a resistência do aterramento

Com base nos dados do quadro 7, foram definidos os rótulos representando os conjuntos *fuzzy* para a resistência elétrica do aterramento, ilustrados na figura 43.

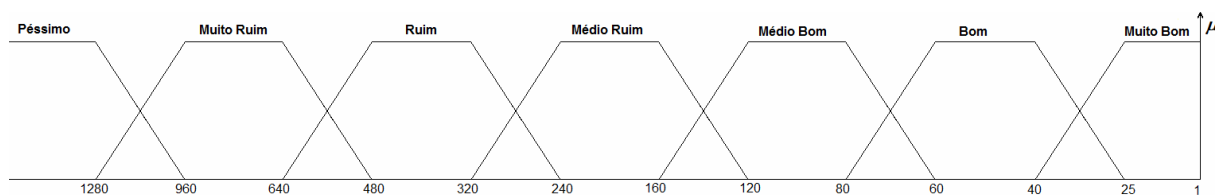


Figura 43: Representação dos conjuntos *fuzzy* para a resistência do aterramento

Fonte: Elaborado pelo autor.

A relação entre o número de hastes de aterramento e as dimensões das hastes foi definida a partir do tamanho padrão das hastes comercializadas pela empresa, para o número de 1 haste até 6 hastes alinhadas em paralelo. Com base na expressão 15 (p.46), para os valores da resistividade do quadro 2, foi calculada a resistência do aterramento para cada caso, conforme mostrado no anexo II, e a partir destes valores foram definidos os conjuntos *fuzzy* e os respectivos graus de pertinência para cada situação, mostrados na tabela 11.

Tabela 11 – Conjuntos *fuzzy* para relação do número e dimensão das hastes.

Número de Hastes	Comprimento da Haste	Conjuntos <i>Fuzzy</i>
6	3 m	Muito Bom → MB(1)
5	3 m	Muito Bom → MB(0.89) e Bom(0.11)
4	3 m	Bom → B(1)
3	3 m	Bom → B(0.81) e MDB(0.19)
2	3 m	Médio Bom → MDB(1)
6	1,2 m	Médio Bom → MDB(0.93) e MDR(0.7)
5	1,2 m	Médio Bom → MDB(0.86) e MDR(0.14)
4	1,2 m	Médio Ruim → MDR(1)
3	1,2 m	Médio Ruim → MDR(0.83) e R(0.17)
1	3 m	Ruim → R(1)
2	1,2 m	Ruim → R(0.8) e MR(0.2)
1	1,2 m	Muito Ruim → MR(1)
0	0	Péssimo → P(1)

Fonte: Elaborado pelo autor.

As regras de produção *fuzzy* para a resistência de aterramento (R_t) foram escritas com base no conhecimento especialista do departamento técnico da empresa fabricante de energizadores, e nos cálculos do anexo II, feitos à partir da expressão 15 (p.46) . Tomando como antecedentes a resistividade elétrica do solo (Res) resultante da primeira etapa de inferência e a relação do número e dimensão das hastes (NDH), mostrada na tabela 11, e como consequente a resistência elétrica do aterramento (R_t).

No quadro 8 são mostradas algumas regras de inferência *fuzzy* para resistência do aterramento.

Se $Res = MB(1)$ **e** $NDH = B(1)$ **então** $R_t = MB(1)$

Se $Res = B(1)$ **e** $NDH = MR(1)$ **então** $R_t = B(1)$

Se $Res = MR(1)$ **e** $NDH = MDB(1)$ **então** $R_t = MDR(1)$

Se $Res = MR(1)$ **e** $NDH = MR(1)$ **então** $R_t = MR(1)$

Quadro 8 – Regras de inferência *fuzzy* para a resistência do aterramento

O resumo de todas as regras de inferência para a resistência de aterramento, apresentadas no anexo II, é mostrado na tabela 12.

Tabela 12 – Regras *fuzzy* para resistência do aterramento.

NDH \ Res	MB	B	MDB	MDR	R	MR
MB	MB	MB	MB	MB	B	MDB
B	MB	MB	MB	MB	B	MDR
MDB	MB	MB	MB	B	MDB	MDR
MDR	MB	MB	B	B	MDR	R
R	MB	MB	B	MDB	MDR	R
MR	MB	B	MDB	MDR	R	MR
P	P	P	P	P	P	P

Fonte: Elaborado pelo autor.

As saídas das regras disparadas na segunda etapa de inferência, correspondente à resistência do aterramento, vão compor os antecedentes da última etapa de inferência *fuzzy* juntamente com os conjuntos *fuzzy* da relação entre a carga ligada no energizador e a sua potência, resultantes da terceira etapa de inferência *fuzzy*.

5.1.5 Terceira etapa do processo de inferência *fuzzy*

Na terceira etapa de inferência *fuzzy* é definida a relação entre a potência do energizador e a carga ligada, ou seja, o comprimento da cerca.

Para a definição dos conjuntos *fuzzy* da relação entre a potência do energizador e a carga ligada, foram levadas em conta as tensões na saída dos transformadores de alta tensão dos modelos de diferentes potências, para diferentes cargas ligadas. O quadro 9 apresenta os valores das tensões (V_s), em quilo volts, que representam os conjuntos *fuzzy*, com grau de pertinência igual a 1, para a relação entre a potência do energizador e a carga ligada.

$V_s \leq 4\text{kv} \rightarrow$ Muito bom (MB)
 $4,5\text{kv} < V_s \leq 5\text{kv} \rightarrow$ Bom (B)
 $5,5\text{kv} < V_s \leq 6\text{kv} \rightarrow$ Médio (MD)
 $6,5\text{kv} < V_s \leq 7\text{kv} \rightarrow$ Ruim (R)
 $7,5\text{kv} < V_s \leq 8\text{kv} \rightarrow$ Muito ruim (MR)
 $V_s \geq 8,5\text{kv}$ ou Sem Carga \rightarrow Péssimo (P)

Quadro 9 – Valores dos conjuntos *fuzzy* para a relação entre a potência e a carga ligada no energizador

A figura 44 ilustra os conjuntos *fuzzy* definidos para a relação entre a potência e a carga ligada no energizador.

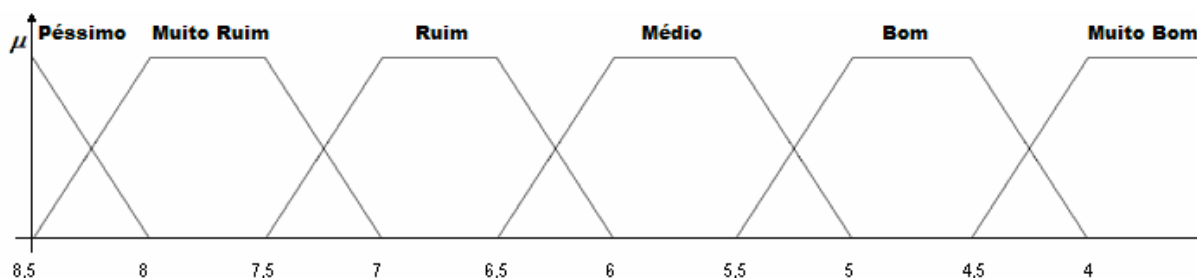


Figura 44: Representação dos conjuntos *fuzzy* para a relação entre a carga e a potência
 Fonte: Elaborado pelo autor.

Os conjuntos *fuzzy* para potência do energizador, mostrados no quadro 10, foram definidos a partir dos modelos comercializados pela empresa fabricante de eletrificadores de cerca.

$P = 0,35\text{J} \rightarrow$ Muito baixa (MBa)
 $P = 0,5\text{J} \rightarrow$ Baixa (Ba)
 $P = 2\text{J} \rightarrow$ Média (MDa)
 $P = 4\text{J} \rightarrow$ Alta (Aa)
 $P = 6\text{J} \rightarrow$ Muito alta (MAa)

Quadro 10 – Valores dos conjuntos *fuzzy* para potência do energizador

Com base nas informações da tabela 8 (p.50) e das informações obtidas na empresa, foram definidos os conjuntos *fuzzy* para a carga ligada, apresentados no quadro 11.

Sem Carga → Péssima (Pa)
13,5kΩ → Muito baixa (MBa)
2,7kΩ → Baixa (Ba)
1kΩ → Média (MDa)
500Ω → Alta (Aa)
100Ω → Muito alta (MAa)

Quadro 11 – Valores dos conjuntos *fuzzy* para a carga ligada

As regras de produção *fuzzy* para a relação entre a carga e a potência (Rcp) foram escritas com base no conhecimento especialista e nas medições realizadas nos energizadores comercializados pela empresa.

No quadro 12 são mostradas algumas regras de inferência para a relação entre a carga ligada e a potência do energizador.

Se P = (MBa(1) ou Ba(1)) e L = (MAa(1) ou Aa(1)) então Rcp = MB(1)
Se P = (MBa(1) ou Ba(1)) e L = Ba(1) então Rcp = MD(1)
Se P = (MDa(1) ou Aa(1) ou MAa(1)) e L = Ba(1) então Rcp = R(1)
Se P = (MDa(1) ou Aa(1) ou MAa(1)) e L = MBa(1) então Rcp = MR(1)

Quadro 12 – Regras de inferência *fuzzy* para a relação carga e potência

O resumo de todas as regras de inferência para a relação entre a carga ligada e a potência do energizador, apresentadas no anexo III, é mostrado na tabela 13.

Tabela 13 – Regras *fuzzy* para relação entre a carga e a potência.

P \ L	Pa	MBa	Ba	MDa	Aa	MAa
MBa	P	MR	MD	B	MB	MB
Ba	P	MR	MD	B	MB	MB
MDa	P	MR	R	MD	B	MB
Aa	P	MR	R	MD	B	MB
MAa	P	MR	R	MD	B	MB

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1.6 Quarta etapa do processo de inferência *fuzzy*

Na quarta etapa de inferência *fuzzy* são definidos os conjuntos *fuzzy* para a durabilidade do transformador de AT.

A figura 45 ilustra os conjuntos *fuzzy* definidos para a durabilidade do transformador de AT.

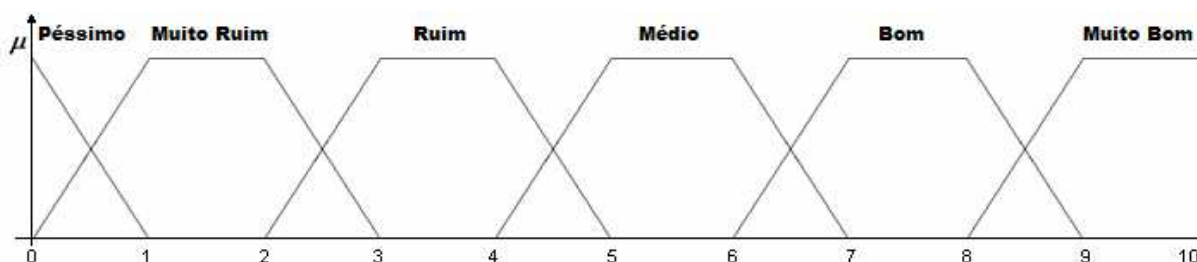


Figura 45: Representação dos conjuntos *fuzzy* para a durabilidade do TR-AT

Fonte: Elaborado pelo autor.

No quadro 13 são mostrados os conjuntos *fuzzy* para a durabilidade do TR-AT (D), definidos a partir do conhecimento especialista do departamento técnico da empresa fabricante.

- | |
|--|
| <p>D < 1 ano → Péssimo (P)</p> <p>1 ano < D < 2 anos → Muito ruim (MR)</p> <p>3 anos < D < 4 anos → Ruim (R)</p> <p>5 anos < D < 6 anos → Médio (MD)</p> <p>7 anos < D < 8 anos → Bom (B)</p> <p>D > 9 anos → Muito bom (MB)</p> |
|--|

Quadro 13 – Regras de inferência *fuzzy* para a durabilidade do TR-AT

Os antecedentes da quarta etapa de inferência *fuzzy* são formados pelos consequentes da segunda e da terceira etapa de inferência *fuzzy* e dos conjuntos *fuzzy* referentes à isolação do transformador de alta tensão.

Os conjuntos *fuzzy* para a isolação do TR-AT (Is), mostrados no quadro 14, foram definidos a partir dos materiais utilizados, pela empresa fabricante de eletrificadores de cerca, para confeccionar os transformadores de AT.

Is de Papel → Bom (IB)
Is de Fita Plástica → Muito bom (IMB)

Quadro 14 – Regras de inferência *fuzzy* para a isolação do TR-AT

As regras de produção *fuzzy* para a durabilidade do TR-AT (Dtr) foram escritas com base no conhecimento especialista dos técnicos e nos dados obtidos na empresa.

No quadro 15 são mostradas algumas regras de inferência para a durabilidade do TR-AT.

Se $R_t = MB(\mu)$ **e** $R_{cp} = MB(1)$ **e** $Is = IMB(1)$ **então** $Dtr = MB(\mu_{R_t})$
Se $R_t = MDB(\mu)$ **e** $R_{cp} = R(1)$ **e** $Is = IMB(1)$ **então** $Dtr = MD(\mu_{R_t})$
Se $R_t = MR(\mu)$ **e** $R_{cp} = MR(1)$ **e** $Is = IB(1)$ **então** $Dtr = MR(\mu_{R_t})$
Se $R_t = P(\mu)$ **então** $Dtr = P(\mu_{R_t})$

Quadro 15 – Regras de inferência *fuzzy* para a durabilidade do TR-AT

O resumo de todas as regras de inferência para a durabilidade do TR-AT, apresentadas no anexo IV, é mostrado na tabela 14.

Tabela 14 – Regras *fuzzy* para a durabilidade do TR-AT.

Rcp Rt	MB		B		MD		R		MR		P
	IMB	IB	IMB	IB	IMB	IB	IMB	IB	IMB	IB	
MB	MB	MB	B	B	B	B	MD	MD	R	R	P
B	MB	MB	B	B	MD	MD	MD	MD	R	R	P
MDB	MB	B	B	B	MD	MD	MD	MD	R	R	P
MDR	MB	B	B	B	MD	MD	MD	R	R	R	P
R	B	B	B	MD	MD	MD	R	R	R	R	P
MR	B	B	MD	MD	MD	MD	R	R	R	MR	P
P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1.7 Processo de defuzzificação

No processo de *defuzzificação* foi utilizado o método do centro de massa (COG), pois este método considera todas as regras disparadas, não somente as de maior grau de pertinência como os métodos dos máximos, embora a sua complexidade computacional seja maior.

As saídas do processo de inferência, correspondentes à durabilidade do TR-AT, resumem-se a apenas cinco conjuntos *fuzzy* de formato trapezoidal e um conjunto *fuzzy* de formato triangular, o que minimiza a complexidade computacional, tornando viável a utilização do método do centro de gravidade.

O centro de massa é calculado pela expressão 42.

$$CM = \frac{\sum_{i=1..k} A_i \cdot x_i}{\sum_{i=1..k} A_i} \quad (42)$$

Onde:

A = Área do rótulo

x = Posição do centro de massa de cada rótulo

k = Número de rótulos do conjunto de saída

Os rótulos na forma trapezoidal são definidos pelos seguintes parâmetros:

$a, b = m, c = n, d$.

O rótulo na forma triangular é definido pelos seguintes parâmetros:

$a = b, m, c$.

A figura 46 mostra a representação para o rótulo *fuzzy P*.

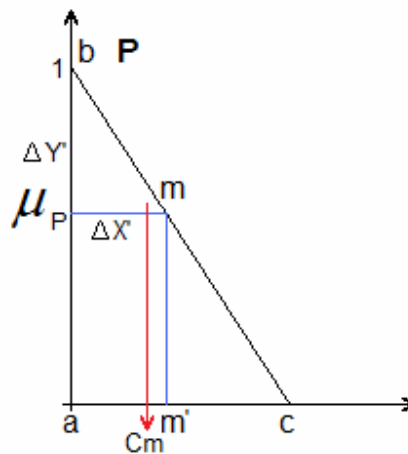


Figura 46: Representação do rótulo *fuzzy P*

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a figura 46, o grau de pertinência corresponde à altura da figura geométrica:

$$H = \mu_P$$

Para grau de pertinência igual a um, a figura tem formato geométrico de um triângulo retângulo.

A área do triângulo é dada pela expressão 43.

$$A_t = H \times B / 2 \quad (43)$$

Onde:

H = Altura do triângulo

B = Base do triângulo

O centro de massa de um triângulo retângulo é dado pela expressão 44.

$$Cm_t = B / 3 \quad (44)$$

Para graus de pertinência menores que um, a figura 46 assume o formato trapezoidal. Para efeitos de cálculo do centro de massa, a figura pode ser dividida em duas partes, um retângulo e um triângulo retângulo, cujas equações para o centro de massa são conhecidas.

A área do retângulo definido pelos pontos $a\mu mm'$ é dado pela expressão 45.

$$A_1 = H \times (m' - a) \quad (45)$$

O centro de massa do retângulo é dado pela expressão 46.

$$Cm_1 = (m' - a) / 2 \quad (46)$$

A área do triângulo retângulo definido pelos pontos $m'mc$ é dado pela expressão 47.

$$A_2 = H \times (c - m') / 2 \quad (47)$$

O centro de massa do triângulo retângulo é dado pela expressão 48.

$$Cm_2 = (c - m') / 3 \quad (48)$$

A área total da figura 46 é dada pela expressão 49.

$$A = H \times ((c - a) + (m' - a)) / 2 \quad (49)$$

O centro de massa total da figura 46 é dado pela expressão 50.

$$Cm = (A_1 \times Cm_1 + A_2 \times Cm_2) / (A_1 + A_2) \quad (50)$$

Substituindo as expressões 45, 46, 47 e 48 na expressão 49, obtemos:

$$C_m = (Hx(m'-a) \times (m'-a)/2 + (Hx(c-m')/2) \times (c-m')/3) / (Hx(m'-a) + Hx(c-m')/2)$$

Após algumas simplificações, obtém-se a expressão 51.

$$C_m = 3x(m'-a)^2 + (c-m')^2 / (6x(m'-a) + 3x(c-m')) \quad (51)$$

Para $a=0$ e $c=1$, a expressão 51 resume-se na expressão 52.

$$C_m = (4m'^2 - 2m' + 1) / (3m' + 3) \quad (52)$$

O valor de m' pode ser obtido pela relação dos triângulos semelhantes.

$$\text{tg}_1 = \text{tg}_2$$

$$(c-a) / 1 = (m'-a) / (1-H)$$

$$m' = aH + c(1-H)$$

para $a=0$ e $c=1$, obtem-se:

$$m' = 1 - H$$

substituindo m' na expressão 52, obtém-se a expressão 53 que é utilizada para calcular o centro de massa da figura 46.

$$C_m = (4H^2 - 6H + 3) / (6 - 3H) \quad (53)$$

Substituindo m' na expressão 49, e para $a=0$ e $c=1$, obtém-se a expressão 54 que é utilizada para calcular a área da figura 46.

$$A = H \times (2 - H) / 2 \quad (54)$$

A figura 47 mostra a representação para o rótulo *fuzzy* **MR**.

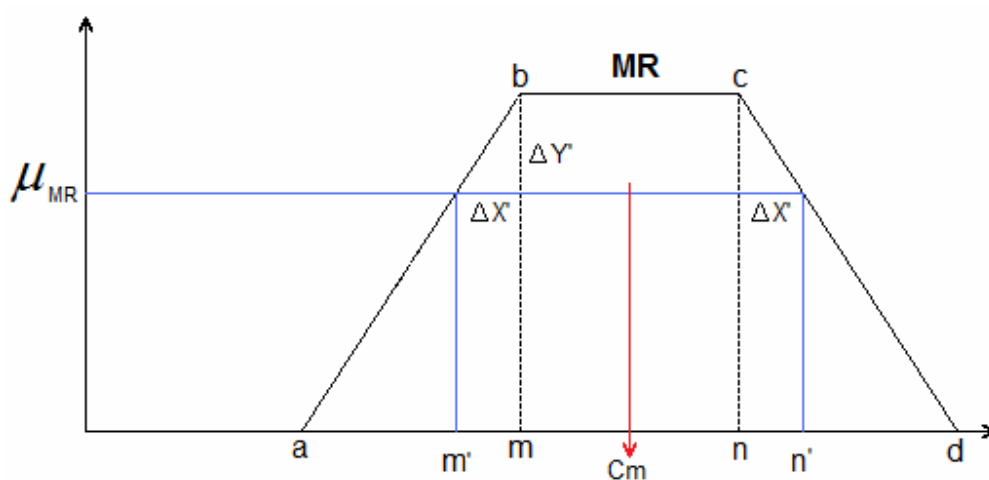


Figura 47: Representação do rótulo *fuzzy* MR

Fonte: Elaborado pelo autor.

A área do trapézio é dado pela expressão 55.

$$A = H \times (BM + bm) / 2 \quad (55)$$

Onde:

H = Altura do trapézio

BM = Base maior

bm = Base menor

A área do rótulo da figura 47 é calculada pela expressão 55.

$$A = H \times ((d - a) + (n' - m')) / 2$$

$$n' = n + \Delta X'$$

$$m' = m - \Delta X'$$

$$A = H \times ((d - a) + (n + \Delta X' - (m - \Delta X'))) / 2$$

$$A = H \times ((d - a) + (n - m + 2\Delta X')) / 2$$

Para grau de pertinência igual a 1, $\Delta X'$ é igual a zero.

Para grau de pertinência menor que zero, $\Delta X'$ pode ser obtido pela relação dos triângulos semelhantes formados pelos pontos **cdn** e **cn'n**, mostrada a seguir:

$$\text{tg}1 = \text{tg}2$$

$$\Delta X' / \Delta Y' = (d - n) / 1$$

Como $\Delta Y' = 1 - \mu = 1 - H$

$$\Delta X' = (1 - H) \times (d - n) \quad (56)$$

Substituindo $\Delta X'$ na expressão da área, obtém-se:

$A = H \times (d - a + n - m + 2 \times (1 - H) \times (d - n)) / 2$, substituindo n por c e m por b ,
obtem-se a área do rótulo da figura 47, dada pela expressão 57.

$$A = H \times (d - a + c - b + 2 \times (1 - H) \times (d - c)) / 2 \quad (57)$$

O centro de massa é obtido pela expressão 58.

$$C_m = a + (d + a) / 2 \quad (58)$$

As expressões 57 e 58 são utilizadas para calcular a área e o centro de massa dos rótulos **MR**, **R**, **MD** e **B**, que tem a mesma forma geométrica.

A figura 48 mostra a representação para o rótulo *fuzzy* **MB**.

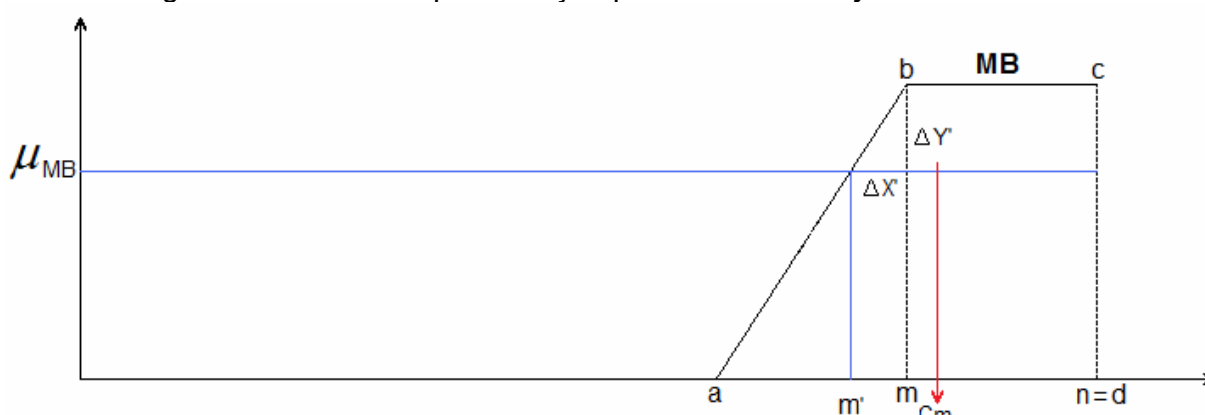


Figura 48: Representação do rótulo *fuzzy* MB

Fonte: Elaborado pelo autor.

A área do rótulo é calculada pela expressão 55.

$$A = H \times ((n - a) + (n - m')) / 2$$

$$m' = m - \Delta X'$$

recalculando $\Delta X'$ para o rótulo da figura 48,

$$(m - a) / 1 = \Delta X' / \Delta Y'$$

$$m - a = \Delta X' / (1 - H)$$

$$\Delta X' = (m - a) \times (1 - H)$$

$$m' = m - ((m - a) \times (1 - H))$$

$$A = H \times ((n - a) + (n - m + (m - a) \times (1 - H))) / 2$$

$$A = H \times (2n - a - m + (m - a) \times (1 - H)) / 2$$

substituindo **m** e **n** por **b** e **c**, respectivamente, obtém-se a área do rótulo da figura 48, dado pela expressão 59.

$$A = H \times (2c - a - b + (b - a) \times (1 - H)) / 2 \quad (59)$$

O centro de massa do rótulo pode ser calculada separando-se o rótulo em dois polígonos e igualando-se as áreas, conforme descrito a seguir:

$$A1 = A2$$

$$A2 = (n - Cm) \times H$$

$$A1 = ((Cm - m') + (Cm - a)) \times H / 2$$

Substituindo **m'** em **A1**,

$$A1 = ((Cm - (m - ((m - a) \times (1 - H)))) + (Cm - a)) \times H / 2$$

Igualando-se as áreas **A1** e **A2**,

$$((Cm - (m - ((m - a) \times (1 - H)))) + (Cm - a)) \times H / 2 = (n - Cm) \times H$$

$$(Cm - (m - ((m - a) \times (1 - H)))) + (Cm - a) = 2 \times (n - Cm)$$

$$Cm + (Cm - a) = 2n - 2Cm + (m - ((m - a) \times (1 - H)))$$

$$2Cm - a + 2Cm = 2n + m - ((m - a) \times (1 - H))$$

$$4Cm = a + 2n + m - ((m - a) \times (1 - H))$$

$$Cm = (a + 2n + m - ((m - a) \times (1 - H))) / 4$$

substituindo **m** e **n**, obtém-se a posição do centro de massa do rótulo da figura 48, dado pela expressão 60.

$$Cm = (a + b + 2c - ((b - a) \times (1 - H))) / 4 \quad (60)$$

De posse das Equações 53, 54, 57, 58, 59 e 60 é possível calcular a área e o centro de massa dos rótulos da figura 45.

Supondo que a expressão “Durabilidade = B(0.7) e MB(0.3)”, representada na figura 49, seja o resultado de um processo de inferência *fuzzy* e utilizando as Equações 57, 58, 59 e 60, é demonstrado a seguir o método de *defuzzificação* COG.

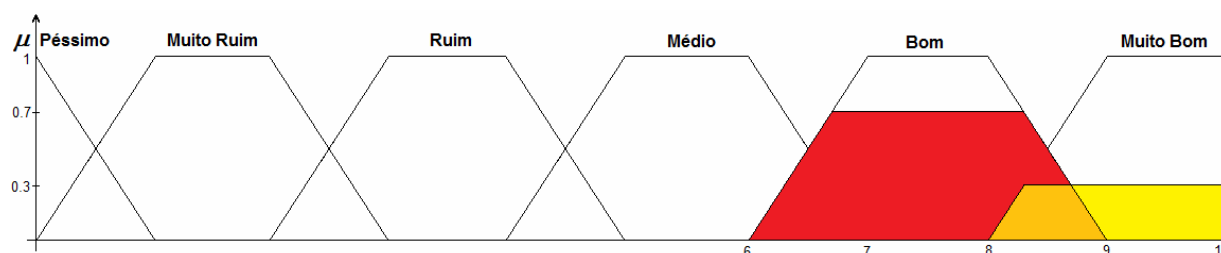


Figura 49: Representação do rótulo *fuzzy* B(0.7) e MB(0.3)

Fonte: Elaborado pelo autor.

A área do rótulo **Bom** é calculada pela expressão 57 (p.98).

$$A1 = 0,7 \times (9 - 6 + 8 - 7 + 2 \times (1 - 0,7) \times (9 - 8)) / 2$$

$$A1 = 1,61$$

O centro de massa do rótulo **Bom** é calculado pela expressão 58 (p.98).

$$Cm1 = 6 + (9 - 6) / 2$$

$$Cm1 = 7,5$$

A área do rótulo **Muito bom** é calculada pela expressão 59 (p.99).

$$A2 = 0,3 \times (2 \times 10 - 8 - 9 + (9 - 8) \times (1 - 0,3)) / 2$$

$$A2 = 0,555$$

O centro de massa do rótulo **Muito bom** é calculado pela expressão 60 (p.100).

$$Cm2 = (8 + 9 + 2 \times 10 - ((9 - 8) \times (1 - 0,3))) / 4$$

$$Cm2 = 9,075$$

O centro de massa da figura 49 é calculado pela expressão 42 (p.94).

$$CM = ((A1 \times Cm1) + (A2 \times Cm2)) / (A1 + A2)$$

$$CM = ((1,61 \times 7,5) + (0,555 \times 9,075)) / (1,61 + 0,555)$$

$$CM = 7,9037$$

Fazendo-se uma comparação com os métodos dos máximos, os resultados da *defuzzificação* para a figura 49 são apresentados a seguir:

$\Delta X'$ é calculado pela expressão 56 (p.98).

$$\Delta X' = (1 - 0,7) \times (9 - 8) = 0,3$$

$$m' = m - \Delta X' = 7 - 0,3 = 6,7$$

$$n' = n + \Delta X' = 8 + 0,3 = 8,3$$

Pelo método do menor dos máximos obtém-se:

$$FOM = 6,7$$

Pelo método do maior dos máximos obtém-se:

$$LOM = 8,3$$

Pelo método da média dos máximos obtém-se:

$$MOM = 7,5$$

Neste exemplo pode-se observar que os três métodos de máximo apresentam resultados diferentes do resultado obtido pelo método COG. Observa-se, também, que somente o método COG considera a participação do rótulo **MB**, o que é um indício de que o resultado apresentado pelo método COG seja o mais coerente dos métodos analisados.

A utilização das equações 53, 54, 57, 58, 59 e 60, possibilita a escrita de um algoritmo de baixa complexidade computacional para o processo de *defuzzificação* pelo método COG, que é apresentado na seção 5.2.

5.1.8 Descrição do *software*

Nesta seção são descritos os procedimentos adotados no desenvolvimento do *software* desenvolvido para a empresa fabricante de energizadores de cerca. Este *software* tem a finalidade de gerar um banco de dados com informações relevantes das características dos transformadores de AT de um determinado lote, e as características da região de destino dos energizadores desse lote. Estas informações serão úteis para futuras consultas, para gerar dados estatísticos e para futuros ajustes das regras de inferência *fuzzy* adotadas neste trabalho.

O *software* foi desenvolvido no ambiente de programação do *visual basic 2008 express* e o código fonte foi escrito numa classe principal chamada de TRAT.

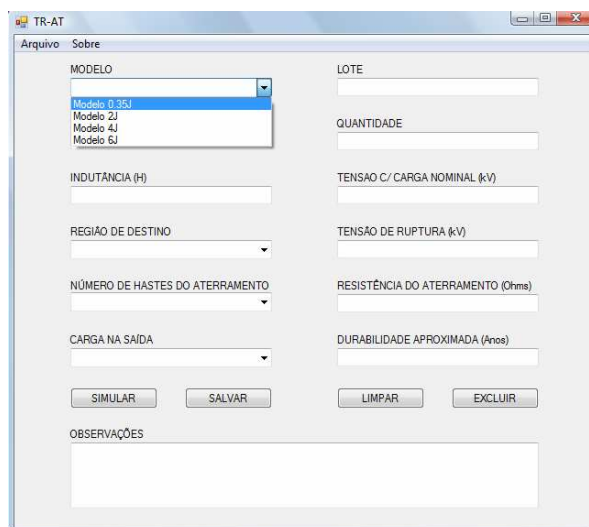
A interface visual do *software* é mostrada na figura 50. Além das entradas para os dados obtidos através de ensaios, dos campos para a seleção dos modelos e das características da instalação, apresenta os botões para simular a durabilidade esperada e para salvar os dados em um banco de dados.

Figura 50: Interface visual do *software*

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os passos relevantes para a simulação da durabilidade são mostrados a seguir:

1. Selecionar o modelo de eletrificador. Esta seleção vai fornecer a potência do energizador simulado para o modelo *fuzzy*. O campo de seleção do modelo é mostrado na figura 51.

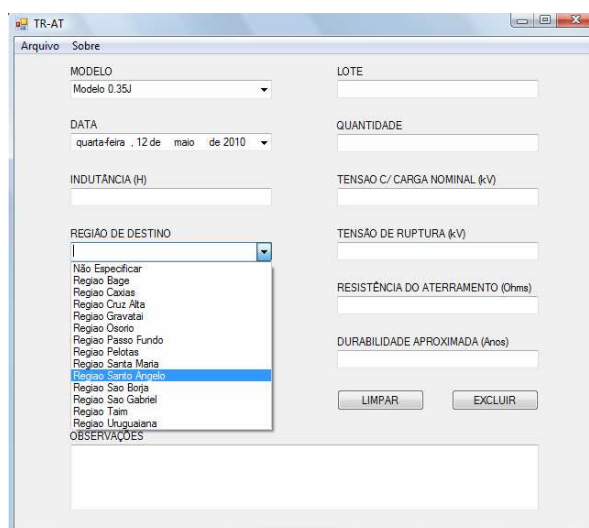


The screenshot shows a window titled 'TR-AT' with a menu bar containing 'Arquivo' and 'Sobre'. The main area is divided into two columns. The left column contains a 'MODELO' dropdown menu with a list of options: 'Modelo 0 35J', 'Modelo 2J', 'Modelo 4J', and 'Modelo 6J'. Below this are fields for 'INDUTÂNCIA (H)', 'REGIÃO DE DESTINO', 'NÚMERO DE HASTES DO ATERRAMENTO', and 'CARGA NA SAÍDA'. The right column contains fields for 'LOTE', 'QUANTIDADE', 'TENSÃO C/ CARGA NOMINAL (kV)', 'TENSÃO DE RUPTURA (kV)', 'RESISTÊNCIA DO ATERRAMENTO (Ohms)', and 'DURABILIDADE APROXIMADA (Anos)'. At the bottom, there are four buttons: 'SIMULAR', 'SALVAR', 'LIMPAR', and 'EXCLUIR'. A text area labeled 'OBSERVAÇÕES' is located at the very bottom.

Figura 51: Campo de seleção do modelo

Fonte: Elaborado pelo autor.

2. Escolher a região de destino. Esta escolha fornece as características do tipo de solo e do clima da região da instalação da cerca elétrica. A figura 52 ilustra o campo de seleção da região de destino.



The screenshot shows the same 'TR-AT' window as in Figure 51. The 'MODELO' dropdown is now set to 'Modelo 0 35J'. The 'DATA' dropdown is set to 'quarta-feira, 12 de maio de 2010'. The 'REGIÃO DE DESTINO' dropdown menu is open, showing a list of regions: 'Não Especificar', 'Região Bagé', 'Região Caxias', 'Região Cruz Alta', 'Região Gravataí', 'Região Osório', 'Região Passo Fundo', 'Região Pelotas', 'Região Santa Maria', 'Região Santa Vitoria', 'Região São Borja', 'Região São Gabriel', 'Região Taíva', 'Região Uruguaiana'. The 'Região Santa Vitoria' option is highlighted. The other fields and buttons remain the same as in Figure 51.

Figura 52: Campo de seleção da região

Fonte: Elaborado pelo autor.

3. Selecionar a quantidade e as dimensões das hastes de aterramento. A seleção das hastes de aterramento juntamente com as características do solo da região selecionada, resulta na resistência do aterramento simulado, que é calculado pelo *software* e mostrado no campo resistência do aterramento. Na figura 53 está ilustrado o campo de seleção do número de hastes de aterramento.

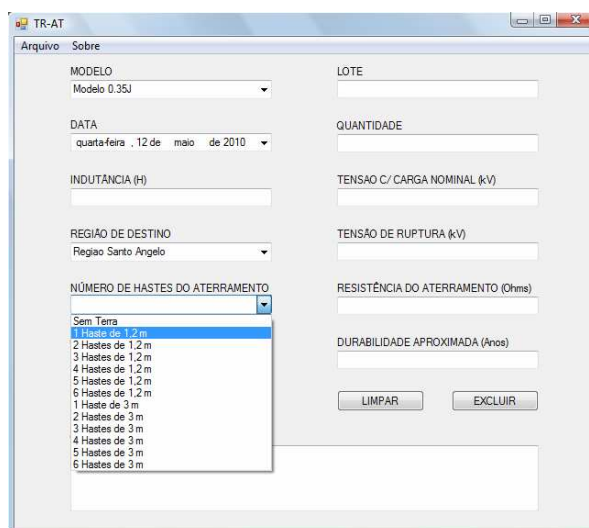


Figura 53: Campo de seleção do aterramento

Fonte: Elaborado pelo autor.

4. Selecionar uma carga para a cerca elétrica. A escolha da carga ligada fornece ao *software* as informações sobre o comprimento da cerca elétrica, que é uma informação relevante para o processo de inferência *fuzzy*. O campo de seleção da carga ligada é ilustrado na figura 54.

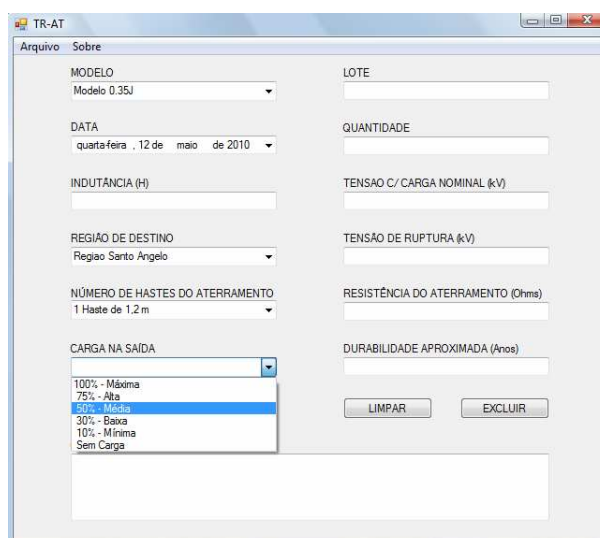


Figura 54: Campo de seleção da carga

Fonte: Elaborado pelo autor.

5. O botão simular comanda o início do processo de inferência *fuzzy* e retorna o resultado do valor da resistência de aterramento para as entradas simuladas e o valor estimado para a durabilidade do transformador de AT. A figura 55 mostra o botão simular e apresenta os valores simulados da resistência elétrica do aterramento e da durabilidade do TR-AT.

Figura 55: Botão simular

Fonte: Elaborado pelo autor.

O quadro 16 mostra as chamadas aos procedimentos executadas quando o comando simular é acionado.

```
' SIMULAR
Private Sub ButtonSimular_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs)
Handles ButtonSimular.Click

    ConverteParaSingle()           ' Converte os valores string para single
    FuzzyTerra()                   ' Chama o procedimento de fuzzificação do aterramento
    FuzzyPowLoad()                 ' Chama o procedimento de fuzzificação da relação carga/potência
    FuzzyDurab()                   ' Chama o procedimento de fuzzificação da durabilidade
    DurabTRi = DefuzziDurab()      ' Chama a função de defuzzificação
    ConverteParaString()           ' Converte os valores single para string
    InsertQuote()                  ' Atualiza os campos da tela
```

End Sub

Quadro 16 – Procedimentos executados pelo comando simular do *software*

A chamada ao procedimento “ConverteParaSingle()” converte as informações selecionadas pelo usuário na interface mostrada na figura 50 em valores numéricos, para serem utilizados pelo *software*.

O procedimento “FuzzyTerra()” realiza as duas etapas de inferência *fuzzy* iniciais.

No quadro 17 são mostradas as regras *fuzzy* da primeira etapa de inferência.

```
' Regras fuzzy para a resistividade do solo
'TS(1) & UM(1) & SL(1) --> Res(1)
If (TS = "MAG") And (UM = "MR") And (SL = "NSL") Then Res = "R"
If (TS = "MAG") And (UM = "R") And (SL = "NSL") Then Res = "MDB"
If (TS = "MAG") And ((UM = "MDR") Or (UM = "MD")) And (SL = "NSL") Then Res = "B"
If (TS = "MAG") And ((UM = "MDB") Or (UM = "B") Or (UM = "MB")) And (SL = "NSL") Then Res = "MB"

If (TS = "AG") And (UM = "MR") And (SL = "NSL") Then Res = "R"
If (TS = "AG") And (UM = "R") And (SL = "NSL") Then Res = "MDR"
If (TS = "AG") And (UM = "MDR") And (SL = "NSL") Then Res = "MDB"
If (TS = "AG") And ((UM = "MD") Or (UM = "MDB")) And (SL = "NSL") Then Res = "B"
If (TS = "AG") And ((UM = "B") Or (UM = "MB")) And (SL = "NSL") Then Res = "MB"

If (TS = "MD") And (UM = "MR") And (SL = "NSL") Then Res = "R"
If (TS = "MD") And (UM = "R") And (SL = "NSL") Then Res = "MDR"
If (TS = "MD") And (UM = "MDR") And (SL = "NSL") Then Res = "MDB"
If (TS = "MD") And ((UM = "MD") Or (UM = "MDB") Or (UM = "B") Or (UM = "MB")) And (SL = "NSL")
Then Res = "B"

If (TS = "AR") And (UM = "MR") And (SL = "NSL") Then Res = "MR"
If (TS = "AR") And (UM = "R") And (SL = "NSL") Then Res = "R"
If (TS = "AR") And ((UM = "MDR") Or (UM = "MD")) And (SL = "NSL") Then Res = "MDR"
If (TS = "AR") And ((UM = "MDB") Or (UM = "B") Or (UM = "MB")) And (SL = "NSL") Then Res = "MDB"

If (UM = "MR") And (SL = "SL") Then Res = "MDR"
If (UM = "R") And (SL = "SL") Then Res = "B"
If ((UM = "MDR") Or (UM = "MD") Or (UM = "MDB") Or (UM = "B") Or (UM = "MB")) And (SL = "SL")
Then Res = "MB"
```

Quadro 17 – Regras *fuzzy* da primeira etapa de inferência

No quadro 18 são mostradas algumas regras da segunda etapa de inferência *fuzzy*. As regras dessa etapa de inferência são escritas de forma a abranger os dois rótulos possíveis para as saídas do aterramento, cada rótulo com seu grau de pertinência definido pelas variáveis globais “Gpt1” e “Gpt2”.

```
' Res(1) & EstxTR(GPtx) --> Terra(GPtx)
If Res = "MR" And (Est1TR = "MB" Or (Est1TR = "B" And Gpt1 = 1)) Then
  Cont = Cont + 1
  Terra(Cont) = "MDB"
  GpMDB = Gpt1
' mín GP
```

```

End If
If Res = "MR" And (Est2TR = "MB" Or (Est2TR = "B" And Gpt2 = 1)) Then
    Cont = Cont + 1
    Terra(Cont) = "MDB"
    GpMDB = Gpt2           ' mín GP
End If
If Res = "MR" And ((Est1TR = "B" And Gpt1 < 1) Or (Est1TR = "MDB") Or ((Est1TR = "MDR" And Gpt1 =
1))) Then
    Cont = Cont + 1
    Terra(Cont) = "MDR"
    GpMDR = Gpt1           ' mín GP
End If
If Res = "MR" And ((Est2TR = "B" And Gpt2 < 1) Or (Est2TR = "MDB") Or ((Est2TR = "MDR" And Gpt2 =
1))) Then
    Cont = Cont + 1
    Terra(Cont) = "MDR"
    GpMDR = Gpt2           ' mín GP
End If
If Est1TR = "P" Then
    Cont = Cont + 1
    Terra(Cont) = "P"
    GpP = Gpt1             ' mín GP
End If
If Est2TR = "P" Then
    Cont = Cont + 1
    Terra(Cont) = "P"
    GpP = Gpt2             ' mín GP
End If

```

Quadro 18 – Regras *fuzzy* da segunda etapa de inferência

O procedimento “FuzzyPowLoad()” realiza a terceira etapa de inferência *fuzzy* referente à relação entre a carga e a potência do energizador. No quadro 19 são mostradas as regras *fuzzy* da terceira etapa de inferência.

```

If ((ModeloS = "0,35") Or (ModeloS = "0,5")) And (Carga1 > 50) Then
    CP = "MB"
End If
If ((ModeloS = "0,35") Or (ModeloS = "0,5")) And (Carga1 = 50) Then
    CP = "B"
End If
If ((ModeloS = "0,35") Or (ModeloS = "0,5")) And (Carga1 = 30) Then
    CP = "MD"
End If
If ((ModeloS = "0,35") Or (ModeloS = "0,5")) And (Carga1 < 30) And (Carga1 <> 0) Then
    CP = "MR"
End If
If ((ModeloS = "2") Or (ModeloS = "4") Or (ModeloS = "6")) And (Carga1 = 100) Then
    CP = "MB"
End If
If ((ModeloS = "2") Or (ModeloS = "4") Or (ModeloS = "6")) And (Carga1 = 75) Then
    CP = "B"
End If
If ((ModeloS = "2") Or (ModeloS = "4") Or (ModeloS = "6")) And (Carga1 = 50) Then

```

```

    CP = "MD"
End If
If ((ModeloS = "2") Or (ModeloS = "4") Or (ModeloS = "6")) And (Carga1 = 30) Then
    CP = "R"
End If
If ((ModeloS = "2") Or (ModeloS = "4") Or (ModeloS = "6")) And (Carga1 < 30) And (Carga1 <> 0) Then
    CP = "MR"
End If
If Carga1 = 0 Then           ' Sem Carga
    CP = "P"
End If

```

Quadro 19 – Regras *fuzzy* da terceira etapa de inferência

O procedimento “FuzzyDurab()” realiza a quarta e última etapa de inferência *fuzzy* referente à durabilidade do TR-AT do energizador de cerca. Nesta etapa os antecedentes das regras de inferência são formados pelas saídas originadas nas etapas de inferência anteriores e o tipo de isolamento do TR-AT. As saídas geradas na segunda etapa de inferência *fuzzy* podem ter graus de pertinência diferentes de um, o que implica que são formadas por um ou mais rótulos *fuzzy*. Nesta etapa as saídas, correspondentes à resistência de aterramento, podem pertencer no máximo a dois rótulos distintos, identificados pelo índice “cont” e armazenados no vetor “Terra()”.

No quadro 20 é mostrada a estrutura de repetição que identifica os rótulos *fuzzy* presentes nas saídas da segunda etapa de inferência.

```

For x = 0 To Cont           ' Para utilizar somente um rótulo de cada estado presente
    If Terra(x) = "MB" Then TMB = 1
    If Terra(x) = "B" Then TB = 1
    If Terra(x) = "MDB" Then TMDb = 1
    If Terra(x) = "MDR" Then TMDR = 1
    If Terra(x) = "R" Then TR = 1
    If Terra(x) = "MR" Then TMR = 1
    If Terra(x) = "P" Then TP = 1
Next

```

Quadro 20 – Estrutura de repetição que identifica os rótulos *fuzzy* presentes nas saídas da segunda etapa de inferência

No quadro 21 são mostradas algumas regras *fuzzy* da última etapa de inferência.

```

' Como GPc1 = 1, mín GP = GpMB
If TMB = 1 And CP = "MB" And MatTRi = 3 Then
    If GpMB > GpDurMB Then GpDurMB = GpMB           ' máx GP
    Cont = Cont + 1
    Durab(Cont) = "MB"
End If

```

```

If TMB = 1 And CP = "MB" And MatTRi = 1 Then
  If GpMB > GpDurB Then GpDurB = GpMB      ' máx GP
  Cont = Cont + 1
  Durab(Cont) = "B"
End If

```

Quadro 21 – Regras *fuzzy* da última etapa de inferência

A *defuzzificação* é feita na chamada da função “DefuzziDurab()” e retorna o valor que é salvo na variável “DurabTRi”.

No quadro 22 é mostrada a estrutura de repetição que identifica os rótulos *fuzzy* presentes nas saídas da última etapa de inferência.

```

For ix = 0 To Cont      ' Para utilizar somente um rótulo de cada estado presente
  If Durab(ix) = "MB" Then DMB = 1
  If Durab(ix) = "B" Then DB = 1
  If Durab(ix) = "MD" Then DMD = 1
  If Durab(ix) = "R" Then DR = 1
  If Durab(ix) = "MR" Then DMR = 1
  If Durab(ix) = "P" Then DP = 1
Next

```

Quadro 22 – Estrutura de repetição que identifica os rótulos *fuzzy* presentes nas saídas da última etapa de inferência

No quadro 23 é mostrada a implementação do método do centro de massa. As equações demonstradas na seção 5.1.7 (p.94), são utilizadas para calcular a área e o centro de massa dos rótulos *fuzzy*.

```

If DP = 1 Then
  h = GpDurP      ' Grau de pertinência (Altura do trapézio)
  L = 1 - h      ' Acréscimo da base menor do trapézio
  Mr = Area(0, 0, L, 1, h)      ' Calcula a área do trapézio
  Cx = (4 * h ^ 2 - 6 * h + 3) / (6 - 3 * h)      ' Centro de massa do rótulo
  Ax = Ax + (Mr * Cx)      ' Acumula área x centro de massa para o somatório
  Bx = Bx + Mr      ' Acumula a área para o somatório
End If
If DMR = 1 Then
  h = GpDurMR      ' Grau de pertinência (Altura do trapézio)
  L = 1 - h      ' Acréscimo da base menor do trapézio
  Mr = Area(0, 1 - L, 2 + L, 3, h)      ' Calcula a área do trapézio
  Cx = 1.5      ' Centro de massa do rótulo
  Ax = Ax + (Mr * Cx)      ' Acumula área x centro de massa para o somatório
  Bx = Bx + Mr      ' Acumula a área para o somatório
End If
If DR = 1 Then
  h = GpDurR      ' Grau de pertinência (Altura do trapézio)
  L = 1 - h      ' Acréscimo da base menor do trapézio
  Mr = Area(2, 3 - L, 4 + L, 5, h)      ' Calcula a área do trapézio
  Cx = 3.5      ' Centro de massa do rótulo
  Ax = Ax + (Mr * Cx)      ' Acumula área x centro de massa para o somatório
  Bx = Bx + Mr      ' Acumula a área para o somatório

```


End If	
If DMD = 1 Then	
h = GpDurMD	' Grau de pertinência (Altura do trapézio)
L = 1 - h	' Acréscimo da base menor do trapézio
Mr = Area(4, 5 - L, 6 + L, 7, h)	' Calcula a área do trapézio
Cx = 5.5	' Centro de massa do rótulo
Ax = Ax + (Mr * Cx)	' Acumula área x centro de massa para o somatório
Bx = Bx + Mr	' Acumula a área para o somatório
End If	
If DB = 1 Then	
h = GpDurB	' Grau de pertinência (Altura do trapézio)
L = 1 - h	' Acréscimo da base menor do trapézio
Mr = Area(6, 7 - L, 8 + L, 9, h)	' Calcula a área do trapézio
Cx = 7.5	' Centro de massa do rótulo
Ax = Ax + (Mr * Cx)	' Acumula área x centro de massa para o somatório
Bx = Bx + Mr	' Acumula a área para o somatório
End If	
If DMB = 1 Then	
h = GpDurMB	' Grau de pertinência (Altura do trapézio)
L = 1 - h	' Acréscimo da base menor do trapézio
Mr = Area(8, 9 - L, 10, 10, h)	' Calcula a área do trapézio
Cx = (37 - L) / 4	' Centro de massa do rótulo
Ax = Ax + (Mr * Cx)	' Acumula área x centro de massa para o somatório
Bx = Bx + Mr	' Acumula a área para o somatório
End If	
Return (Ax / Bx)	' Centro de massa total (Somatório)

Quadro 23 – Estrutura de *defuzzificação* pelo método COG

5.1.9 Validação do método

Nesta seção é feita uma análise dos dados obtidos nos experimentos práticos, realizados nas dependências da empresa fabricante de eletrificadores de cerca, e a comparação dos resultados com os valores resultantes da simulação utilizando o *software* descrito na seção 5.2.

A obtenção dos dados foi iniciada no mês de outubro do ano de 2008, e mensalmente foram coletados dados referentes ao estado dos energizadores. Os equipamentos foram instalados com o intuito de reproduzir diversas situações de cargas ligadas nas cercas e diferentes características de aterramento, como mostrado na tabela 15.

Tabela 15 – Características da instalação dos energizadores utilizados nos testes de durabilidade do TR-AT.

Número	Isolação TR-AT	Potência	Carga Ligada	Aterramento
1	Papel	0,35J	Sem Carga	Rt = 27,5Ω
2	Papel	0,35J	RI = 16,2kΩ	Rt = 27,5Ω
3	Papel	0,35J	RI = 5,4kΩ	Rt = 27,5Ω
4	Papel	0,35J	RI = 2,7kΩ	Rt = 27,5Ω
5	Papel	0,35J	RI = 5,4kΩ	Sem Terra
6	Papel	0,35J	RI = 5,4kΩ	Rt = 810Ω
7	Papel	0,35J	RI = 5,4kΩ	Rt = 128Ω
8	Papel	0,35J	RI = 16,2kΩ	Rt = 128Ω
9	Fita Plástica	0,35J	RI = 16,2kΩ	Rt = 128Ω
10	Papel	0,35J	RI = 16,2kΩ	Rt = 810Ω

Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente os testes foram feitos com energizadores de baixa potência. Estes equipamentos são modelos de baixo custo e por esse motivo utilizam transformadores de AT mais simples e, portanto, mais vulneráveis aos problemas de instalação incorreta. Reescrevendo os dados da tabela 15, utilizando os rótulos *fuzzy* definidos na seção 5.1, obtém-se a tabela 16.

Tabela 16 – Valores *fuzzy* das características da instalação dos energizadores utilizados nos testes de durabilidade do TR-AT.

Número	Isolação TR-AT	Potência	Carga Ligada	Aterramento
1	B	MB	P	MB
2	B	MB	MB	MB
3	B	MB	B e MB	MB
4	B	MB	B	MB
5	B	MB	B e MB	P
6	B	MB	B e MB	MA
7	B	MB	B e MB	MdB
8	B	MB	MB	MdB
9	MB	MB	MB	MdB
10	B	MB	MB	MA

Fonte: Elaborado pelo autor.

A integridade dos transformadores de AT dos equipamentos em teste foi verificada mensalmente, e os resultados após 18 meses são mostrados na tabela 17.

Tabela 17 – Resultados obtidos após 18 meses de testes.

Número	Isolação TR-AT	Potência	Carga Ligada	Aterramento	Durabilidade
1	B	MB	P	MB	4,25 meses
2	B	MB	MB	MB	>18 meses
3	B	MB	B e MB	MB	>18 meses
4	B	MB	B	MB	>18 meses
5	B	MB	B e MB	P	3 meses
6	B	MB	B e MB	MA	>18 meses
7	B	MB	B e MB	MdB	>18 meses
8	B	MB	MB	MdB	>18 meses
9	MB	MB	MB	MdB	>18 meses
10	B	MB	MB	MA	17 meses

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 17 apresenta três situações de instalação que apresentaram problemas no TR-AT durante o período dos testes, justamente as condições de instalação mais críticas. No quadro 24 são apresentadas as regras *fuzzy* correspondentes às condições de instalação dos três casos acima descritos.

Se Rt = P **então** Dtr = P

Se Rcp = P **então** Dtr = P

Se Rt = MR **e** Rcp = MR **e** Is = IB **então** Dtr = MR

Quadro 24 – Regras *fuzzy* para a durabilidade do TR-AT

Para simular as regras *fuzzy* mostradas no quadro 24, foi utilizando o *software* descrito na seção 5.2. O *software* permite a simulação sem selecionar uma região de destino, neste caso quando é selecionada a opção “Não Especificar”, é possível fazer a simulação para um valor definido para a resistência de aterramento. A figura 56

apresenta as características da situação de instalação número 1, onde a resistência do aterramento era de 27,5 Ohms e sem carga ligada.

The screenshot shows the TR-AT software interface with the following parameters:

Parameter	Value
MODELO	Modelo 0.35J
LOTE	
DATA	quarta-feira, 12 de maio de 2010
QUANTIDADE	
INDUTANCIA (H)	
TENSAO C/ CARGA NOMINAL (kV)	
REGIÃO DE DESTINO	Não Especificar
TENSAO DE RUPTURA (kV)	
NÚMERO DE HASTES DO ATERRAMENTO	
RESISTÊNCIA DO ATERRAMENTO (Ohms)	27,5
CARGA NA SAÍDA	Sem Carga
DURABILIDADE APROXIMADA (Anos)	0,362963

Buttons: SIMULAR, SALVAR, LIMPAR, EXCLUIR

OBSERVAÇÕES

Figura 56: Simulação da situação de instalação número 1.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 57 é mostrada a situação de instalação número 5, sem aterramento e com uma baixa carga ligada.

The screenshot shows the TR-AT software interface with the following parameters:

Parameter	Value
MODELO	Modelo 0.35J
LOTE	
DATA	quarta-feira, 12 de maio de 2010
QUANTIDADE	
INDUTANCIA (H)	
TENSAO C/ CARGA NOMINAL (kV)	
REGIÃO DE DESTINO	Não Especificar
TENSAO DE RUPTURA (kV)	
NÚMERO DE HASTES DO ATERRAMENTO	Sem Terra
RESISTÊNCIA DO ATERRAMENTO (Ohms)	
CARGA NA SAÍDA	30% - Baixa
DURABILIDADE APROXIMADA (Anos)	0,3058823

Buttons: SIMULAR, SALVAR, LIMPAR, EXCLUIR

OBSERVAÇÕES

Figura 57: Simulação da situação de instalação número 5.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 58 mostra a situação de instalação número 10, com uma resistência de aterramento de 810 Ohms e uma carga ligada muito baixa.

Figura 58: Simulação da situação de instalação número 10.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados das três situações de instalação simuladas são apresentados no quadro 25.

- | |
|---|
| <p>1) Se $R_t = P$ então $D_{tr} = 0,36$ anos (4,3 meses)</p> <p>5) Se $R_{cp} = P$ então $D_{tr} = 0,30$ anos (3,6 meses)</p> <p>10) Se $R_t = MR$ e $R_{cp} = MR$ e $I_s = IB$ então $D_{tr} = 1,5$ anos (18 meses)</p> |
|---|

Quadro 25 – Resultados da simulação

Fazendo uma comparação entre os resultados obtidos, apresentados na tabela 17, com os resultados da simulação mostrados no quadro 25, obtemos a tabela 18.

Tabela 18 – Comparação dos resultados simulados com os resultados dos testes.

Regras Fuzzy	Testes	Simulação
Se $R_t = P$ então $D_{tr} =$	4,25 meses	4,3 meses
Se $R_{cp} = P$ então $D_{tr} =$	3 meses	3,6 meses
Se $R_t = MR$ e $R_{cp} = MR$ e $I_s = IB$ então $D_{tr} =$	17 meses	18 meses

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados apresentados na tabela 18 mostram que o *software* de simulação apresentou valores próximos aos obtidos a campo, correspondendo às expectativas, pois os testes feitos a campo apresentaram resultados dentro dos esperados pelos técnicos da empresa. Estes resultados mostram que o modelo *fuzzy* utilizado, traduziu as informações vagas e imprecisas, como “péssimo” e “muito ruim”, em informações quantitativas com valores escalares satisfatórios.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho realizado possibilitou o aprofundamento dos estudos dos principais fatores que influenciam para o bom funcionamento de um sistema de cerca elétrica. Verificou-se que um sistema de aterramento ineficiente, ou seja, com uma elevada resistência elétrica, além de interferir na eficiência da cerca elétrica, contribui para a redução da durabilidade do TR-AT do energizador de cerca. Da mesma forma, um sistema de cerca elétrica mal dimensionado, com pouca carga ligada, ou sem carga, também contribui para a redução da durabilidade de TR-AT.

A contribuição deste trabalho na modelagem um sistema de cerca elétrica foi a utilização da lógica *fuzzy*. O modelo *fuzzy*, utilizado neste trabalho, mostrou-se eficiente e de fácil aplicação para o tipo de variáveis de um sistema de cerca elétrica. Os resultados apresentados foram coerentes, com os valores obtidos na empresa fabricante de eletrificadores de cerca ZEBU SISTEMAS ELETRÔNICOS, parceira deste trabalho.

A opção por rótulos *fuzzy* de formato trapezoidal, facilitou a definição dos conjuntos *fuzzy* para variáveis como a resistividade elétrica do solo, que apresentam considerável variação na mesma região. O formato trapezoidal permitiu trabalhar com uma faixa de valores com grau de pertinência igual a um, e não somente um valor pontual como, por exemplo, o formato triangular, o que facilita a modelagem de sistemas formados por variáveis imprecisas.

A escolha do modelo de MAMDANI, que apresenta conjuntos *fuzzy* também na saída, permitiu a utilização da saída de uma etapa, como entrada em uma etapa de inferência seguinte, sem precisar, portanto, de um processo de *fuzzificação*. O processo necessita de *defuzzificação* apenas para a saída da última etapa de inferência. O modelo mostrou-se adequado para o tipo de variáveis estudadas.

O equacionamento do processo de *defuzzificação* pelo método do centro de massa, por meios matemáticos, facilitou o desenvolvimento do *software*. A utilização das equações resultou num *software* de baixa complexidade computacional e num algoritmo de fácil compreensão. O resultado obtido foi muito bom, pois o método do centro de massa considera todas as saídas do sistema.

No decorrer deste trabalho de dissertação, surgiram algumas idéias que servem de sugestão para trabalhos futuros. Dentre essas idéias podemos destacar a inclusão da incidência de raios da região (Índice ceraúnico) no sistema *fuzzy*, com base no mapa isoceraúnico do Brasil. Segundo um levantamento de dados na empresa fabricante de energizadores, é considerável a quantidade de transformadores de AT danificados pela ação das descargas elétricas provenientes de raios. A ação do efeito das descargas elétricas, que atingem a cerca elétrica, é amenizada quando é instalado um equipamento desviador de raios entre o energizador e a cerca eletrificada. É recomendável incluir no sistema *fuzzy*, as probabilidades de danificar o TR-AT, devido à incidência de raios da região, com e sem o uso de desviador de raios.

O *software* desenvolvido para simular as condições da instalação da cerca elétrica, possibilita à empresa elaborar um banco de dados, onde ficam armazenadas informações referentes aos lotes fabricados, para futuras consultas. Além da possibilidade de aproveitamento do sistema *fuzzy* para implementar um simulador, no site da empresa.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 7117: Medição da resistividade do solo pelo método dos quatro pontos (Wenner)*. Rio de Janeiro, 1981. 15p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 5419: Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas*, Rio de Janeiro, 2005. 42p.

AUSTRALIAN/NEW ZEALAND STANDARD. *AS/NZS 1768:2007: Lightning protection*. Sydney e Wellington, 2007.

Disponível em: < <http://www.dee.feis.unesp.br/qualienergi/dados/dr02322-324nz.pdf> >
Acesso em: 10 mai. 2010.

BARBOSA, D. et al. *Lógica Fuzzy aplicada à proteção de transformadores*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 2006, Campina Grande. Anais do Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2006.

BARROS, L. C.; BASSANEZI, R. C. *Tópicos de Lógica Fuzzy e Biomatemática*. 1. ed. Campinas - SP: UNICAMP/IMECC, 2006. 354p.

BRITISH COLUMBIA MINISTRY OF AGRICULTURE, FOOD AND FISHERIES (BCMAFF). *Grounding Systems for Electric Fences - Fencing Fact Sheet*. Canadá, 1996, 4p.

CASTILLO, O.; MELIN, P. *Soft Computing for Control of Non-Linear Dynamical Systems*. Heidelberg, Alemanha: Physica-Verlag, 2001, 221p.

CASTRO, C. N.; MOLIN, J. P. Definição de Unidades de Gerenciamento do Solo através da sua Condutividade Elétrica e variáveis Físico-Químicas utilizando Classificação *Fuzzy*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 1., São Pedro, SP – ESALQ/USP, 2004, 9p.

DARE PRODUCTS. *Electric Fencing Made Easy*. Disponível em: <http://dareproducts.com/pdf_s/Electric_Fencing_Made_Easy_Installation.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2009.

DELGADO, Myriam Regattieri De Biase da Silva. *Projeto Automático de Sistemas Nebulosos: Uma Abordagem Co-Evolutiva*. 2002. 186 f. Tese de Doutorado (Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, 2002.

FAN, S. S.; WANG, B. Application of Fuzzy Modeling to Identify the Soil Resistivity of Dynamic Grounding System. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT COMPUTATION TECHNOLOGY AND AUTOMATION - ICICTA 2008, Changsha, Hunan, China, 2008. 4p.

FAULIN, G. D. C.; MOLIN, J. P.; MAGALHÃES, R. P. Variabilidade Espacial do Teor de Água e sua Influência na Condutividade Elétrica do Solo. In: XXXIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, Canoas – RS, 2005. 4p.

FERNANDES, Rafael Tramontini. *Supervisão de um Sistema Híbrido Eólico/Diesel usando Lógica Fuzzy*. 2005. 100 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2005.

FRANCESCHINI, Marston H. D. *Correlação da condutividade elétrica com atributos físico-químicos do solo*. SP - ESALQ/USP, 2007.

FRASSON, F. R.; PEREIRA, W. C.; MOLIN, J. P. *Confrontação de Mapas de Condutividade Elétrica do Solo com Mapas Pedológicos e sua Aplicação na Definição de Unidade de Gerencimento para Agricultura de Precisão*. SP - ESALQ/USP, 2004.

GEORGE, Brendan Hugh. *Comparison of techniques for measuring the water content of soil and other porous media*. 1999. 190 f. Dissertação (Department of Agricultural Chemistry & Soil Science) - University of Sydney, New South Wales, Australia, 1999.

GEVAERD, R.; FREITAS, S. R. *Estimativa operacional da umidade do solo para iniciação de modelos de previsão numérica da atmosfera. Parte I: Descrição da metodologia e validação*. Revista Brasileira de Meteorologia, 21, 3a, 59-73, 2006.

IBGE. *Mapa de Clima do Brasil*. Disponível em: <<http://mapas.ibge.gov.br/clima>>. Acesso em: 08 ago. 2008.

IBGE. *Mapa de Solos do Brasil*. Disponível em: <<http://mapas.ibge.gov.br/solos>>. Acesso em: 08 ago. 2008.

KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. *Aterramento Elétrico*. 5. ed. Florianópolis: Geraldo Kindermann, 2002. 214p.

KOSKO, Bart. *Neural networks and fuzzy systems: a dynamical systems approach to machine intelligence*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1992. 449p.

LARSEN, P. Martin. Industrial applications of fuzzy logic control. *International Journal of Man-Machine Studies*. v.12, 01 Jan. 1980, p. 3-10.

LORENTZOU, M. I.; HATZIARGYRIOU, N. D. Transmission Line Modeling of Grounding Electrodes and Calculation of their Effective Length under Impulse Excitation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS - IPST'05 - Montreal, Canadá, 2005. 6p.

MACHADO, P. L. O. A. et al. Mapeamento da condutividade elétrica e relação com os teores de argila de um Latossolo Vermelho sob plantio direto de grãos no Paraná. In:

CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 1., São Pedro, SP – ESALQ/USP, 2004, 10p.

MACIEL, N. F.; LOPES, J. S. *Cercas Elétricas: Equipamentos, Instalação e Manejo*. 1. ed. Viçosa - MG: Aprenda Fácil, 2000. 166p.

MAMDANI, Ebrahim H. *Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant*. IEEE - Control and Science, v.121(12), p.1585-1588, 1974.

MARTINO, M.; REIS, F.; DIAS, G. Model And Simulation in ATP of Electric Fence with Lightning Protection Device. In: VIII INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION - SIPDA 2005, 2005, São Paulo.

MARTINO, Marcelo Giovanni Bonifacino de. *Estudo e Implementação de um Energizador de Cerca Elétrica*. 2005. 209 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

McNEILL, J. D. *Electrical conductivity of soils and rocks*. Ontario, Geonics Limited, Technical Note TN-5, 1980, 22p.

MEGGER. *Getting Down TO Earth – A practical guide to earth resistance testing*. USA, 2005. Disponível em: <<http://megger.com/det>>. Acesso em: 08 ago. 2008.

NICOLETTI, M. do C.; CAMARGO, H. de A. *Fundamentos da Teoria de Conjuntos Fuzzy; Série Apontamentos*. 1. ed. São Paulo: EdUfscar, 2004, 105.

PATYRA, M. J.; MLYNEK, D. M. *Fuzzy logic : implementation and applications*. Chichester : W. Teubner, 1996. 317 p.

POO, David Fernando Gómez. *“Electric Fence Line to PC Wireless Radio Frequency Communications Interface”*. 2006. 97 f. Dissertação (Master of Engineering in Electronics) – University of Waikato, Nova Zelândia, 2006.

PY, Carlos R. *Cercas elétricas: instalação e uso*. Guaíba - RS: Agropecuária, 1998. 76p.

REZENDE, S. O. et al. *Sistemas Inteligentes: fundamentos e aplicações*. 1. ed. São Paulo: Manole Ltda, 2005, 525p.

SANDRI, Sandra; CORREA, Cláudio. Lógica Nebulosa. In: V ESCOLA DE REDES NEURAIIS, Promoção: Conselho Nacional de Redes Neurais, pp. c073-c090, 19 de julho, 1999 - ITA, São José dos Campos – SP.

SANTOS, Antonio R. dos. *Metodologia Científica – a construção do conhecimento*. 3. ed. Rio de Janeiro: DP&A, 2000, 144p.

SILVA, V. A. D. et al. Estudo Comparativo entre as Funções de Pertinência inseridas na Entrada e na Saída de um Sistema *Fuzzy* desenvolvido na Plataforma LABVIEW 9.0. In: SIMPÓSIO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL, 9., São João Del Rei, MG – UFSJ, 2010. 8p.

STAFIX. *Stafix Electric Fencing Manual*. Disponível em: <http://www.kencove.com/fence/98_Planning_resource.php>. Acesso em: 23 jan. 2009.

SUGENO, M.; KANG, G. T. Structure identification of fuzzy model. *Fuzzy Sets & Systems*. ScienceDirect, v.28, p. 15-33, Out. 1988.

TAKAGI, T.; SUGENO, M. *Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modelling and Control*. IEEE Trans. on Systems, Man & Cybernetics, Vol. IS: 116-132, 1985.

TELLES, Matheus Sebastian. *Sistema Especialista Fuzzy para diagnóstico de Transformadores de Potência*. 2005. 155 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2005.

THRIMAWITHANA, D.J.; MADAWALA, U.K. Pulse propagation along multi wire electric fences. in: POWER ENGINEERING CONFERENCE, 2007, Singapore. IPEC2007 International – Power Engineering Conference, 2007. p. 916-921.

THRIMAWITHANA, D.J.; MADAWALA, U.K. Pulse propagation along single wire electric fences. in: POWER ENGINEERING CONFERENCE, 2007, Singapore. IPEC2007 International – Power Engineering Conference, 2007. p. 643-648.

TSUKAMOTO, Y. An approach to fuzzy reasoning method. In: ADVANCES IN FUZZY SET THEORY AND APPLICATIONS (M.M. Gupta, R.K. Ragade, Yager eds.). North-Holland, 1979. p.137-149.

U.S.D.A. *Agriculture handbook n. 60: Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. Washington, D.C., 1954. 190p.

U.S.D.A. *Agriculture handbook n. 18: Soil survey manual*. Washington, D.C., 1951. 503p.

U.S.D.A. *REA bulletin 1751F-802: Electrical Protection Grounding Fundamentals*. Rural Electrification Administration, Washington D.C., 1994, 108p.

VINCENT, W. R. et al. *The Mitigation of Radio Noise from External Sources Handbook*. 6. ed. Signal Enhanced Laboratory, Department of Electrical and Computer Engineering, Naval Postgraduate School. Monterey, CA, USA. 2007. 126p.

VISACRO FILHO, Silvério. *Aterramentos Elétricos: Conceitos básicos, Técnicas de Medição e Instrumentação, Filosofias de Aterramento*. 3. ed. São Paulo: Artliber, 2002.

WEBER, L.; KLEIN, P. A. T. *Aplicação da Lógica Fuzzy em Software e Hardware*. 1. ed. Canoas - RS: Ed. ULBRA, 2003. 112p.

ZADEH, Lotfi Asker. *Fuzzy sets. Information and Control*. 8: 338–353, 1965.

ANEXO I

Tabela a - Resistividade de alguns Tipos de Solo.

Textura	Argila(%)	Silte(%)	Areia(%)	Umidade(%)	Resistividade	FONTE
Argilosa	38,88	10,73	56,39	20	51,02	GEORGE, 1999
Argilosa	47,55	18,48	33,97	20	40,48	"
Média	23,9	19,08	57,02	9,42	273,22	FRANCESQUINI, 2007
Média	23,9	19,08	57,02	14,61	108,69	"
Média	11,06	14,2	74,74	2,85	540,54	"
Média	11,06	14,2	74,74	11,19	233,64	"
	9,19	7,34	83,47	2,05	621,12	"
Arenosa	9,19	7,34	83,47	4,78	432,9	"
Arenosa	9,19	7,34	83,47	7,91	326,79	"
Argilosa	37	14,09	48,91	12,39	144,92	"
Argilosa	37	14,09	48,91	16,26	74,09	"
Argilosa	44,32	19,79	35,87	9,17	183,82	MOLIN et al, 2005
Argilosa	35,3	15,8	46	22,6	66,22	"
Argilosa				0	10000000	AS/NZS, 2007
Argilosa				2,5	1500	"
Argilosa				5	430	"
Argilosa				10	185	"
Argilosa				15	105	"
Argilosa				20	63	"
Argilosa				30	42	"
Areia				2,5	3000000	"
Areia				5	50000	"
Areia				10	2100	"
Areia				15	630	"
Areia				20	290	"

Fonte: GEORGE, 1999, FRANCESQUINI, 2007, MOLIN et al, 2005, AS/NZS, 2007, adaptado pelo autor.

Com base nos dados da Tabela a e do conhecimento especialista, foram escritas as Regras *Fuzzy* para a Resistividade do Solo, mostradas a seguir:

Se TS = MAG e U = MR e S = NSL então Res = R
Se TS = MAG e U = R e S = NSL então Res = MDB
Se TS = MAG e U = (MDR ou MD) e S = NSL então Res = B
Se TS = MAG e U = (MDB ou B ou MB) e S = NSL então Res = MB

Se TS = AG e U = MR e S = NSL então Res = R
Se TS = AG e U = R e S = NSL então Res = MDR
Se TS = AG e U = MDR e S = NSL então Res = MDB
Se TS = AG e U = (MD ou MDB) e S = NSL então Res = B
Se TS = AG e U = (B ou MB) e S = NSL então Res = MB

Se TS = MD e U = MR e S = NSL então Res = R
Se TS = MD e U = R e S = NSL então Res = MDR
Se TS = MD e U = MDR e S = NSL então Res = MDB
Se TS = MD e U = (MD ou MDB ou B ou MB) e S = NSL então Res = B

Se TS = AR e U = MR e S = NSL então Res = MR

Se TS = AR **e** U = R **e** S = NSL **então** Res = R

Se TS = AR **e** U = (MDR **ou** MD) **e** S = NSL **então** Res = MDR

Se TS = AR **e** U = (MDB **ou** B **ou** MB) **e** S = NSL **então** Res = MDB

Se U = MR **e** S = SL **então** Res = MDR

Se U = R **e** S = SL **então** Res = B

Se U = (MDR **ou** MD **ou** MDB **ou** B **ou** MB) **e** S = SL **então** Res = MB

Tabela b – Resistência de aterramento em Ohms (Ω) para as diferentes configurações de aterramento e resistividade do solo.

Número Hastes	Comprimento da Haste (m)	NDH	$\rho(\Omega.m)$					
			33	67	125	250	500	1000
6	3	MB(1)	2,99	6,07	11,326	22,652	45,305	90,611
5	3	MB(0.89)	3,337	6,775	12,641	25,282	50,565	101,131
4	3	B(1)	3,863	7,844	14,635	29,27	58,54	117,081
3	3	B(0.81)	4,737	9,618	17,944	35,888	71,776	143,552
2	3	MDB(1)	6,428	13,051	24,349	48,699	97,398	194,797
6	1,2	MDB(0.93)	6,865	13,938	26,004	52,008	104,017	208,034
5	1,2	MDB(0.86)	7,464	15,154	28,273	56,547	113,094	226,189
4	1,2	MDR(1)	8,462	17,182	32,056	64,112	128,224	256,449
3	1,2	MDR(0.83)	10,185	20,679	38,58	77,161	154,323	308,646
1	3	R(1)	11,199	22,737	42,42	84,841	169,683	339,367
2	1,2	R(0.8)	13,83	28,079	52,386	104,773	209,547	419,094
1	1,2	MR(1)	24,96	50,684	94,56	189,121	378,243	756,487

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nos dados da Tabela b e do conhecimento especialista, foram escritas as Regras *Fuzzy* para a Resistência do Aterramento, mostradas a seguir:

Se Res = MR(1) e NDH = (MB(μ_{MB}) ou B(1)) **então** Rt = MDB(μ_{NCH})

Se Res = MR(1) e NDH = (B(0.81) ou MDB(μ_{MDB}) ou MDR(1)) **então** Rt = MDR(μ_{NCH})

Se Res = MR(1) e NDH = (MDR(0.83) ou R(μ_R)) **então** Rt = R(μ_{NCH})

Se Res = MR(1) e NDH = MR(1) **então** Rt = MR(μ_{NCH})

Se Res = R(1) e NDH = (MB(μ_{MB}) ou B(1)) **então** Rt = B(μ_{NCH})

Se Res = R(1) e NDH = (B(0.81) ou MDB(μ_{MDB}) ou MDR(1)) **então** Rt = MDB(μ_{NCH})

Se Res = R(1) e NDH = (MDR(0.83) ou R(μ_R)) **então** Rt = MDR(μ_{NCH})

Se Res = R(1) e NDH = MR(1) **então** Rt = R(1)

Se Res = MDR(1) e NDH = (MB(μ_{MB}) ou B(1)) **então** Rt = MB(μ_{NCH})

Se Res = MDR(1) e NDH = (B(0.81) ou MDB(μ_{MDB}) ou MDR(1)) **então** Rt = B(μ_{NCH})

Se Res = MDR(1) e NDH = (MDR(0.83) ou R(μ_R)) **então** Rt = MDB(μ_{NCH})

Se Res = MDR(1) e NDH = MR(1) **então** Rt = MDR(1)

Se Res = MDB(1) e NDH = (MB(μ_{MB}) ou B(μ_B) ou MDB(μ_{MDB})) **então** Rt = MB(μ_{NCH})

Se Res = MDB(1) e NDH = (MDR(μ_{MDR}) ou R(μ_R)) **então** Rt = B(μ_{NCH})

Se Res = MDB(1) e NDH = MR(μ_{MR}) **então** Rt = MDB(μ_{NCH})

Se Res = B(1) e NDH = (MB(μ_{MB}) ou B(μ_B) ou MDB(μ_{MDB}) ou MDR(μ_{MDR}) ou R(μ_R)) **então** Rt = MB(μ_{NCH})

Se Res = B(1) e NDH = MR(1) **então** Rt = B(1)

Se Res = MB(1) **então** Rt = MB(1)

Se NDH = P(0.94) **então** Rt = P(0.94)

ANEXO III

Tabela c – Tensão de saída dos energizadores para diferentes cargas.

	SC	13,5kΩ	2,7kΩ	1kΩ	500Ω	100Ω
--	----	--------	-------	-----	------	------

0,25J	9,0kv	8,4kv	6kv	4kv	2,5kv	0,8kv
0,5J	9,0kv	8,5kv	6,3kv	4,8kv	3kv	1,1kv
2J	8,5kv	8,3kv	6,7kv	5,3kv	4,7kv	2,0kv
4J	8,5kv	8,4kv	6,9kv	5,7kv	4,8kv	2,2kv
6J	8,5kv	8,4kv	7,2kv	5,8kv	4,9kv	2,5kv

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nos dados da Tabela c e do conhecimento especialista, foram escritas as Regras *Fuzzy* para a relação entre a potência do energizador e o comprimento da cerca, mostradas a seguir:

Se P = (MB(1) **ou** B(1)) **e** L = (MA(1) **ou** A(1)) **então** Rcp = MB(1)

Se P = (MB(1) **ou** B(1)) **e** L = MD(1) **então** Rcp = B(1)

Se P = (MB(1) **ou** B(1)) **e** L = B(1) **então** Rcp = MD(1)

Se P = (MB(1) **ou** B(1)) **e** L = MB(1) **então** Rcp = MR(1)

Se L = P(0.95) **então** Rcp = P(0.95)

Se P = (MD(1) **ou** A(1) **ou** MA(1)) **e** L = MA(1) **então** Rcp = MB(1)

Se P = (MD(1) **ou** A(1) **ou** MA(1)) **e** L = A(1) **então** Rcp = B(1)

Se P = (MD(1) **ou** A(1) **ou** MA(1)) **e** L = MD(1) **então** Rcp = MD(1)

Se P = (MD(1) **ou** A(1) **ou** MA(1)) **e** L = B(1) **então** Rcp = R(1)

Se P = (MD(1) **ou** A(1) **ou** MA(1)) **e** L = MB(1) **então** Rcp = MR(1)

ANEXO IV

Tabela d – Regras *Fuzzy* para a Durabilidade do TR-AT

CP	MB		B		MD		R		MR		P
RT	IMB - IB		IMB - IB		IMB - IB		IMB - IB		IMB - IB		
MB	MB	MB	B	B	B	B	MD	MD	R	R	P
B	MB	MB	B	B	MD	MD	MD	MD	R	R	P
MDB	MB	B	B	B	MD	MD	MD	MD	R	R	P
MDR	MB	B	B	B	MD	MD	MD	R	R	R	P
R	B	B	B	MD	MD	MD	R	R	R	R	P
MR	B	B	MD	MD	MD	MD	R	R	R	MR	P
P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P

Fonte: Elaborado pelo autor.

Se $R_t = MB(\mu)$ **e** $R_{cp} = MB(1)$ **e** $Is = IMB(1)$ **então** $D_{tr} = MB(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MB(\mu)$ **e** $R_{cp} = MB(1)$ **e** $Is = IB(1)$ **então** $D_{tr} = MB(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MB(\mu)$ **e** $R_{cp} = B(1)$ **e** $Is = IMB(1)$ **então** $D_{tr} = B(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MB(\mu)$ **e** $R_{cp} = B(1)$ **e** $Is = IB(1)$ **então** $D_{tr} = B(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MB(\mu)$ **e** $R_{cp} = MD(1)$ **e** $Is = IMB(1)$ **então** $D_{tr} = B(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MB(\mu)$ **e** $R_{cp} = MD(1)$ **e** $Is = IB(1)$ **então** $D_{tr} = B(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MB(\mu)$ **e** $R_{cp} = R(1)$ **e** $Is = IMB(1)$ **então** $D_{tr} = MD(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MB(\mu)$ **e** $R_{cp} = R(1)$ **e** $Is = IB(1)$ **então** $D_{tr} = MD(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MB(\mu)$ **e** $R_{cp} = MR(1)$ **e** $Is = IMB(1)$ **então** $D_{tr} = R(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MB(\mu)$ **e** $R_{cp} = MR(1)$ **e** $Is = IB(1)$ **então** $D_{tr} = R(\mu_{R_t})$

Se $R_{cp} = P(\mu)$ **então** $D_{tr} = P(\mu_{R_{lp}})$

Se $R_t = B(\mu)$ **e** $R_{cp} = MB(1)$ **e** $Is = IMB(1)$ **então** $D_{tr} = MB(\mu_{R_t})$

Se $R_t = B(\mu)$ **e** $R_{cp} = MB(1)$ **e** $Is = IB(1)$ **então** $D_{tr} = MB(\mu_{R_t})$

Se $R_t = B(\mu)$ **e** $R_{cp} = B(1)$ **e** $Is = IMB(1)$ **então** $D_{tr} = B(\mu_{R_t})$

Se $R_t = B(\mu)$ **e** $R_{cp} = B(1)$ **e** $Is = IB(1)$ **então** $D_{tr} = B(\mu_{R_t})$

Se $R_t = B(\mu)$ **e** $R_{cp} = MD(1)$ **e** $Is = IMB(1)$ **então** $D_{tr} = MD(\mu_{R_t})$

Se $R_t = B(\mu)$ **e** $R_{cp} = MD(1)$ **e** $Is = IB(1)$ **então** $D_{tr} = MD(\mu_{R_t})$

Se $R_t = B(\mu)$ **e** $R_{cp} = R(1)$ **e** $Is = IMB(1)$ **então** $D_{tr} = MD(\mu_{R_t})$

Se $R_t = B(\mu)$ **e** $R_{cp} = R(1)$ **e** $Is = IB(1)$ **então** $D_{tr} = MD(\mu_{R_t})$

Se $R_t = B(\mu)$ **e** $R_{cp} = MR(1)$ **e** $Is = IMB(1)$ **então** $D_{tr} = R(\mu_{R_t})$

Se $R_t = B(\mu)$ **e** $R_{cp} = MR(1)$ **e** $Is = IB(1)$ **então** $D_{tr} = R(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MDB(\mu)$ **e** $R_{cp} = MB(1)$ **e** $Is = IMB(1)$ **então** $D_{tr} = MB(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MDB(\mu)$ **e** $R_{cp} = MB(1)$ **e** $Is = IB(1)$ **então** $D_{tr} = B(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MDB(\mu)$ **e** $R_{cp} = B(1)$ **e** $Is = IMB(1)$ **então** $D_{tr} = B(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MDB(\mu)$ **e** $R_{cp} = B(1)$ **e** $Is = IB(1)$ **então** $D_{tr} = B(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MDB(\mu)$ **e** $R_{cp} = MD(1)$ **e** $Is = IMB(1)$ **então** $D_{tr} = MD(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MDB(\mu)$ **e** $R_{cp} = MD(1)$ **e** $Is = IB(1)$ **então** $Dtr = MD(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MDB(\mu)$ **e** $R_{cp} = R(1)$ **e** $Is = IMB(1)$ **então** $Dtr = MD(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MDB(\mu)$ **e** $R_{cp} = R(1)$ **e** $Is = IB(1)$ **então** $Dtr = MD(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MDB(\mu)$ **e** $R_{cp} = MR(1)$ **e** $Is = IMB(1)$ **então** $Dtr = R(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MDB(\mu)$ **e** $R_{cp} = MR(1)$ **e** $Is = IB(1)$ **então** $Dtr = R(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MDR(\mu)$ **e** $R_{cp} = MB(1)$ **e** $Is = IMB(1)$ **então** $Dtr = MB(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MDR(\mu)$ **e** $R_{cp} = MB(1)$ **e** $Is = IB(1)$ **então** $Dtr = B(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MDR(\mu)$ **e** $R_{cp} = B(1)$ **e** $Is = IMB(1)$ **então** $Dtr = B(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MDR(\mu)$ **e** $R_{cp} = B(1)$ **e** $Is = IB(1)$ **então** $Dtr = B(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MDR(\mu)$ **e** $R_{cp} = MD(1)$ **e** $Is = IMB(1)$ **então** $Dtr = MD(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MDR(\mu)$ **e** $R_{cp} = MD(1)$ **e** $Is = IB(1)$ **então** $Dtr = MD(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MDR(\mu)$ **e** $R_{cp} = R(1)$ **e** $Is = IMB(1)$ **então** $Dtr = MD(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MDR(\mu)$ **e** $R_{cp} = R(1)$ **e** $Is = IB(1)$ **então** $Dtr = R(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MDR(\mu)$ **e** $R_{cp} = MR(1)$ **e** $Is = IMB(1)$ **então** $Dtr = R(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MDR(\mu)$ **e** $R_{cp} = MR(1)$ **e** $Is = IB(1)$ **então** $Dtr = R(\mu_{R_t})$

Se $R_t = R(\mu)$ **e** $R_{cp} = MB(1)$ **e** $Is = IMB(1)$ **então** $Dtr = B(\mu_{R_t})$

Se $R_t = R(\mu)$ **e** $R_{cp} = MB(1)$ **e** $Is = IB(1)$ **então** $Dtr = B(\mu_{R_t})$

Se $R_t = R(\mu)$ **e** $R_{cp} = B(1)$ **e** $Is = IMB(1)$ **então** $Dtr = B(\mu_{R_t})$

Se $R_t = R(\mu)$ **e** $R_{cp} = B(1)$ **e** $Is = IB(1)$ **então** $Dtr = MD(\mu_{R_t})$

Se $R_t = R(\mu)$ **e** $R_{cp} = MD(1)$ **e** $Is = IMB(1)$ **então** $Dtr = MD(\mu_{R_t})$

Se $R_t = R(\mu)$ **e** $R_{cp} = MD(1)$ **e** $Is = IB(1)$ **então** $Dtr = MD(\mu_{R_t})$

Se $R_t = R(\mu)$ **e** $R_{cp} = R(1)$ **e** $Is = IMB(1)$ **então** $Dtr = R(\mu_{R_t})$

Se $R_t = R(\mu)$ **e** $R_{cp} = R(1)$ **e** $Is = IB(1)$ **então** $Dtr = R(\mu_{R_t})$

Se $R_t = R(\mu)$ **e** $R_{cp} = MR(1)$ **e** $Is = IMB(1)$ **então** $Dtr = R(\mu_{R_t})$

Se $R_t = R(\mu)$ **e** $R_{cp} = MR(1)$ **e** $Is = IB(1)$ **então** $Dtr = R(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MR(\mu)$ **e** $R_{cp} = MB(1)$ **e** $Is = IMB(1)$ **então** $Dtr = B(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MR(\mu)$ **e** $R_{cp} = MB(1)$ **e** $Is = IB(1)$ **então** $Dtr = B(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MR(\mu)$ **e** $R_{cp} = B(1)$ **e** $Is = IMB(1)$ **então** $Dtr = MD(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MR(\mu)$ **e** $R_{cp} = B(1)$ **e** $Is = IB(1)$ **então** $Dtr = MD(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MR(\mu)$ **e** $R_{cp} = MD(1)$ **e** $Is = IMB(1)$ **então** $Dtr = MD(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MR(\mu)$ **e** $R_{cp} = MD(1)$ **e** $Is = IB(1)$ **então** $Dtr = MD(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MR(\mu)$ **e** $R_{cp} = R(1)$ **e** $Is = IMB(1)$ **então** $Dtr = R(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MR(\mu)$ **e** $R_{cp} = R(1)$ **e** $Is = IB(1)$ **então** $Dtr = R(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MR(\mu)$ **e** $R_{cp} = MR(1)$ **e** $Is = IMB(1)$ **então** $Dtr = R(\mu_{R_t})$

Se $R_t = MR(\mu)$ **e** $R_{cp} = MR(1)$ **e** $Is = IB(1)$ **então** $Dtr = MR(\mu_{Rt})$

Se $R_t = P(\mu)$ **então** $Dtr = P(\mu_{Rt})$