

RESSALVA

Atendendo solicitação da autora, o texto completo desta tese será disponibilizado somente a partir de 13/05/2019.

GLORIA PATRICIA LÓPEZ SEPÚLVEDA

**APLICAÇÃO DE INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL NA
RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE SISTEMAS
ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

Ilha Solteira
2017



GLORIA PATRICIA LÓPEZ SEPÚLVEDA

**APLICAÇÃO DE INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL NA
RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE SISTEMAS
ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

Tese apresentada à Faculdade de
Engenharia - UNESP - Câmpus de Ilha
Solteira, para obtenção do título de
Doutora em Engenharia Elétrica.
Área de conhecimento: Automação.

Prof. Dr. Marcos Julio Rider Flores
Orientador

Ilha Solteira
2017



FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

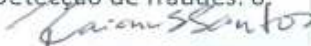
L925a López Sepúlveda, Gloria Patricia.
Aplicação de inteligência computacional na resolução de problemas de sistemas elétricos de potência / Gloria Patricia López Sepúlveda. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2017
181 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2017

Orientador: Marcos Julio Rider Flores

Inclui bibliografia

1. Aprendizado de máquina. 2. Árvores de decisão. 3. Carregamento de veículos elétricos. 4. Controle centralizado Volt-VAr. 5. Detecção de fraudes. 6. Inteligência computacional.


Raiane da Silva Santos
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao Usuário e Documentação
Supervisor Técnico de Seção
CRB 078-6/000



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

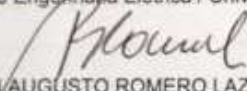
TÍTULO DA TESE: Aplicação de Inteligência Computacional na Resolução de Problemas de Sistemas Elétricos de Potência

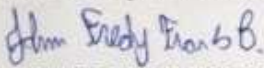
AUTORA: GLORIA PATRICIA LOPEZ SEPULVEDA


ORIENTADOR: MARCOS JULIO RIDER FLORES

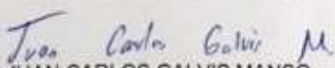
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: AUTOMAÇÃO pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. MARCOS JULIO RIDER FLORES
Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP


Prof. Dr. RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. JOHN FREDY FRANCO BAQUERO
Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Câmpus Experimental Rosana


Prof. Dr. ADRIANO BATISTA DE ALMEIDA
Centro de Engenharia e Ciências Exatas / Universidade Estadual do Oeste do Paraná


Prof. Dr. JUAN CARLOS GALVIS MANSO
Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Federal de Ouro Preto

Ilha Solteira, 13 de novembro de 2017

À minha família, em especial ao meu esposo Hugo, à minha filha Valentina, à minha mãe Carmen, à minha vovó Dioselina e à meu vovô Jorge, por todo o amor, apoio, confiança e incentivo em todas as batalhas enfrentadas ao longo da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos a todos os familiares, amigos, professores e funcionários da FEIS-UNESP, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho. Em especial, dedico meus agradecimentos:

- A Deus, por ter me dado força e saúde para chegar até aqui;
- A minha família pelo carinho, apoio e incentivo;
- Ao meu esposo Hugo Andres pelo amor, apoio, confiança e incentivo em todos os momentos;
- Ao Prof. Dr. Marcos Julio Rider Flores, por todo ensinamento, incentivo, confiança, paciência e orientação;
- Ao Prof. Dr. Rubén Romero Lázaro, pelo acompanhamento durante este tempo, sugestões e incentivo;
- Ao Prof. Dr. Fredy Franco pela co-orientação, paciência e todos os ensinamentos;
- Ao Prof. Dr. Carlos Julio Zapata pela ajuda na obtenção de dados reais;
- Ao Engenheiro Julio Gomez por permitir executar os testes desta tese em sistemas reais;
- Aos meus amigos e colegas do laboratório que de forma direta ou indireta me ajudaram;
- A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pela oportunidade e apoio financeiro.

*“Quando dois homens imaginam a mesma coisa,
ainda assim cada um tem sua própria ideia.”*

Frege

RESUMO

Nesta tese são utilizados algoritmos de Inteligência Computacional para resolver quatro problemas da área de sistemas elétricos de potência, com o intuito de automatizar a tomada de decisões em processos que normalmente são realizados por especialistas humanos ajudados de métodos computacionais clássicos. Nesta tese são utilizados os algoritmos de aprendizado de máquina: árvores de decisão, redes neurais artificiais e máquinas de vetor de suporte, para realizar o processo de aprendizado dos sistemas inteligentes e para realizar a mineração de dados. Estes algoritmos podem ser treinados a partir das medições disponíveis e ações registradas nos centros de controle dos sistemas de potência. Sistemas Inteligentes foram utilizados para realizar: a) o controle centralizado Volt-VAr em modernos sistemas de distribuição de energia elétrica em tempo real usando medições elétricas; b) a detecção de fraudes nas redes de distribuição de energia elétrica realizando um processo de mineração de dados para estabelecer padrões de consumo que levem a possíveis clientes fraudadores; c) a localização de faltas nos sistemas de transmissão de energia elétrica automatizando o processo de localização e ajudando para que uma ação de controle da falta seja realizada de forma rápida e eficiente; e d) a coordenação de carga inteligente de veículos elétricos e dispositivos de armazenamento em tempo real utilizando a tecnologia V2G, nos sistemas de distribuição de energia elétrica a partir de medições elétricas. Para o problema de controle centralizado Volt-VAr os testes foram realizados em um sistema de 42 barras, para o problema de carregamento de veículos elétricos e de dispositivos de armazenamento os testes foram realizados usando um sistema de 34 barras, e os outros dois problemas foram testados com dados reais fornecidos por empresas do setor elétrico colombiano. O software WEKA, versão 3.8.0, foi utilizado para gerenciar os três algoritmos de aprendizado de máquina através do treinamento e validação dos algoritmos Multilayer Perceptron/Backpropagation para as redes neurais artificiais, o J48/C4.5 para as árvores de decisão e o SMO/PolynomialKernel para as máquinas de vetor de suporte. Através dos resultados obtidos é possível comprovar o potencial dos Sistemas Inteligentes e da Mineração de Dados no desenvolvimento de algoritmos de automação para os quatro problemas da área de sistemas elétricos de potência.

Palavras-chave: Aprendizado de máquina. Árvores de decisão. Carregamento de veículos elétricos. Controle centralizado Volt-VAr. Detecção de fraudes. Inteligência computacional. Localização de faltas. Máquinas de vetor de suporte. Mineração de dados. Redes neurais artificiais. Sistemas inteligentes.

ABSTRACT

In this thesis Computational Intelligence algorithms are used to solve four problems of the area of power electrical systems, in order to automate decision making in processes that are usually performed by human experts aided by classical computational methods. In this thesis the machine learning algorithms are used: decision trees, artificial neural networks and support vector machines to carry out the learning process of Intelligent Systems and to perform Data Mining. These algorithms are trained from the available measurements and actions recorded in the control centers of the systems. Intelligent Systems were used to perform: a) the centralized control Volt-VAr in modern systems of distribution of electrical energy in real time using electrical measurements; b) detection of fraud in electricity distribution networks by performing a data mining process to establish patterns of consumption that lead to possible fraudulent customers; c) fault location in electric power transmission systems by automating the localization process and helping to ensure that a fault control action is performed quickly and efficiently; and d) coordination of intelligent charging of electric vehicles and storage devices using V2G technology in real-time, in electric power distribution systems using electrical measurements. For the centralized control problem Volt-VAr was tested in 42-node distribution system, for the problem of loading electric vehicles and storage devices the tests were performed using a system of 34-node, and the other two problems were tested with actual data provided by companies in the Colombian electric sector. The WEKA software, version 3.8.0, was used to manage the three machine learning algorithms through the training and validation of the Multilayer Perceptron / Backpropagation algorithms for the artificial neural networks, the J48 / C4.5 for the decision trees and the SMO/PolynomialKernel for vector support machines. Through the results obtained it is possible to prove the potential of Intelligent Systems and Data Mining in the development of automation algorithms for the four problems of the area of electrical power systems.

Keywords: Artificial neural networks. Intelligent systems. Centralized control Volt-VAr. Computational intelligence. Data mining. Decision trees. Fault location. Fraud detection. Loading of electric vehicles. Machine learning. Support vector machines.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Taxonomia das metodologias utilizadas dentro da área de IC.	31
Figura 2	AD e as regiões de decisão no espaço de objetos.	37
Figura 3	Curva de aprendizagem do algoritmo de AD em 100 exemplos gerados aleatoriamente.	37
Figura 4	Modelo matemático simples de um neurônio.	40
Figura 5	(a) Rede neural <i>feedforward</i> . (b) Rede neural recorrente.	42
Figura 6	(a) Rede <i>perceptron</i> com dois nós de entrada e dois nós de saída. (b) Rede neural com dois nós entradas, uma camada oculta de dois nós e dois nós de saída.	43
Figura 7	Comparação de desempenho dos perceptrons e das ADs.	44
Figura 8	Estrutura de uma RNA.	45
Figura 9	MVS (a) Duas classes de pontos. (b) Separador de margem máxima	50
Figura 10	Hierarquia entre Dado, Informação e Conhecimento.	53
Figura 11	Etapas do Processo de DCBD.	56
Figura 12	Seleção de dados.	57
Figura 13	Redução de dados.	57
Figura 14	Etapas do processo de DCBD.	59
Figura 15	Descrição do processo de MD.	60
Figura 16	Diagrama das variáveis de entradas e saídas do SI.	69
Figura 17	Descrição das variáveis de controle nos diferentes instantes de tempo.	70
Figura 18	Sistema de distribuição de 42 nós.	71
Figura 19	Banco de dados de treinamento.	72
Figura 20	Processo de treinamento realizado entre o MPLIM e o SI.	75

Figura 21	Perdas de energia calculadas e ação de controle definida pelos SIs durante 24 horas.	77
Figura 22	Tensão mínima calculada e ação de controle definida pelos SIs durante 24 horas.	78
Figura 23	Processo de treinamento realizado entre o MPLIM e o SI.	79
Figura 24	Perdas de energia calculadas e ação de controle definida pelo SI durante 24 horas.	81
Figura 25	Tensão mínima calculadas e ação de controle definida pelo SI durante 24 horas.	82
Figura 26	Características das perdas.	86
Figura 27	Percentual de perdas de cada empresa distribuidora em 2014.	88
Figura 28	Percentual de Perdas em Relação à Energia Injetada no Sistema Global das 64 Distribuidoras.	88
Figura 29	Percentual de perdas de cada empresa distribuidora em 2016.	89
Figura 30	Percentual de Perdas em Relação à Energia Injetada no Sistema Global das 63 Distribuidoras.	89
Figura 31	Tipos de fraudes nas redes de DEE.	97
Figura 32	Alteração do medidor.	98
Figura 33	Pré-processamento dos dados.	100
Figura 34	Árvore de Decisão (Atributo CLA_CON).	101
Figura 35	Árvore de Decisão (Atributo ANOM).	103
Figura 36	Tipos de faltas nas linhas de transmissão.	113
Figura 37	Causas das faltas nos sistemas de transmissão de energia elétrica.	114
Figura 38	Esquema geral de linha curta.	117
Figura 39	Sinal de corrente. Registro dos relés em uma perturbação real da falta. . . .	119
Figura 40	Sinal de tensão. Registro dos relés em uma perturbação real da falta.	119
Figura 41	Esquema de medição utilizado para obtenção de dados.	120
Figura 42	Diagrama unifilar da rede de transmissão do sistema Colombiano.	121
Figura 43	Modelo dos SIs com suas variáveis de entrada e saída.	122

Figura 44	Processo descritivo do funcionamento dos SIs.	123
Figura 45	Dados filtrados.	125
Figura 46	Comparação do erro médio absoluto.	126
Figura 47	Comparação da raiz do erro médio quadrado.	126
Figura 48	Comparação do erro absoluto relativo.	127
Figura 49	Comparação da raiz do erro relativo ao quadrado.	127
Figura 50	Comparação do tempo de treinamento dado em segundos.	128
Figura 51	Comparação do tempo de validação dado em segundos.	128
Figura 52	Localização de faltas ADs Vs falta simulada.	129
Figura 53	Localização de faltas RNA Vs falta simulada.	129
Figura 54	Localização de faltas RNA Vrs falta simulada.	129
Figura 55	Localização de faltas ADs Vrs falta simulada.	130
Figura 56	Diagrama de abstração de dados do MPLIM para criação da base de dados. .	138
Figura 57	Diagrama das variáveis de entradas e saídas do SI apartir da base de dados. .	139
Figura 58	Diagrama de avaliação de cada SI.	140
Figura 59	Dados que compõem a base de dados inicial.	142
Figura 60	Dados da base de dados apos à aplicação do filtro.	142
Figura 61	RNA MLP com 14 camadas ocultas.	143
Figura 62	RNA MLP com 3 camadas ocultas.	143
Figura 63	Porcentagem de classificação para os diferentes algoritmos que compõem os SIs	144
Figura 64	Comparação de tempo de treinamento entre os algoritmos que compõem os SIs	145
Figura 65	Comparação de tempo de validação entre os algoritmos que compõem os SIs	145
Figura 66	Janela inicial do WEKA (GUI Chooser).	163
Figura 67	Interface de linha de comando do WEKA.	164
Figura 68	Ambiente Explorer.	165
Figura 69	Menu do Open URL.	166

Figura 70	Menu do Open DB.	167
Figura 71	Menu do Generate DB.	168
Figura 72	Aplicação de filtros da interface Explorer	169
Figura 73	Interface de classificação.	170
Figura 74	Menu de opções adicionais na interface Classify	171
Figura 75	Ambiente Knowledge Flow.	173
Figura 76	Ambiente Experimenter.	174
Figura 77	Parâmetros a serem calibrados de uma RNA MLP.	176
Figura 78	Parâmetros a serem calibrados de um algoritmo de MVS SMO.	178
Figura 79	Parâmetros a serem calibrados de um algoritmo de MVS SMO.	178
Figura 80	Parâmetros a serem calibrados de um algoritmo de AD J48.	179

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Perdas de energia do sistema obtidas durante uma semana usando as diferentes metodologias	75
Tabela 2	Valores calculados pelo MPLIM e definidos pelo SI das perdas de energia do sistema hora a hora em kWh	76
Tabela 3	Parâmetros utilizados para o treinamento da RNA	79
Tabela 4	Perdas de energia em kWh obtidas durante uma semana usando as diferentes metodologias	80
Tabela 5	Valores calculados pelo MPLIM e definidos pelo SI das perdas do sistema hora a hora em kWh	80
Tabela 6	Porcentagem de acertos e DMA por variável para 20% de variação na demanda	83
Tabela 7	DMA dos valores obtidos (5% de variação da demanda)	83
Tabela 8	DMA dos valores obtidos (10% de variação da demanda)	83
Tabela 9	DMA dos valores obtidos (15% de variação da demanda)	83
Tabela 10	DMA dos valores obtidos (20% de variação da demanda)	84
Tabela 11	Porcentagem de resultados previstos com valores de DMA entre 0% e 20%	84
Tabela 12	Porcentagem de classificação usando Cross-Validation	84
Tabela 13	Comparação de perdas globais entre os anos 2014 e 2016.	92
Tabela 14	Matriz de Confusão (Atributo OSC).	101
Tabela 15	Matriz de Confusão (Atributo ANOM).	103
Tabela 16	Comparação dos resultados obtidos do algoritmo LibSVM.	105
Tabela 17	Comparação dos resultados obtidos do algoritmo SMO.	106
Tabela 18	Testes com o algoritmo de MVS	107
Tabela 19	Parâmetros do algoritmo de RNA	108

Tabela 20	Testes com o modelo RNA	108
Tabela 21	Dados gerados pelo Digsilent.	120
Tabela 22	Parâmetros da linha de transmissão.	121
Tabela 23	Medidas estatísticas do erro absoluto.	128
Tabela 24	Porcentagem de acerto na classificação durante a construção do modelo para diferentes arquiteturas de RNAs MLP	144
Tabela 25	Ferramentas que gerenciam SIs.	162
Tabela 26	Descrição dos parâmetros associados a técnica de RNA.	177
Tabela 27	Descrição dos parâmetros associados a técnica de MVS.	179
Tabela 28	Descrição dos parâmetros associados ao algoritmo J48.	180

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

AD	Arvore de Decisão
ABRADEE	Associao Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica
AM	Aprendizado de Máquina
AMPL	<i>A Modeling Language for Mathematical Programming</i>
ANOM	Anomalias
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AR	Alto Risco
BC	Bancos de Capacitores
BR	Baixo Risco
CA	Consumo Alto
CB	Consumo Baixo
CCIVE	Coordenao de Carga Inteligente de Veículos Elétricos
CM	Consumo Médio
CLA_CON	Classificao do Consumo
CSV	<i>Comma-Separated Values</i>
DA	Dispositivos de Armazenamento
DCBD	Descoberta do Conhecimento em Bases de Dados
DEE	Distribuio de Energia Elétrica
ECEE	Empresas Concessionárias de Energia Elétrica
ETEE	Empresas de Transmissão de Energia Elétrica
GD	Gerador Distribuido
IA	<i>Inteligência Artificial</i>
IDC	Internet Das Coisas
IC	Inteligência Computacional
KDD	<i>Knowledge Discovery in Databases</i>
MD	Minerao de Dados
MLP	<i>MultiLayer Perceptron</i>
MPLIM	Modelo Matematico de Programao Linear Inteiro Misto
MR	Médio Risco
MVS	Máquinas de Vetor de Suporte
OLTC	<i>On-Load Tap Changers</i>
OSC	Oscilao
PCSOBM	Programao Cnica de Segunda Ordem Binário Misto
PNLIM	Programao Não Linear Inteiro Misto

POSD	Planejamento da Operação dos Sistemas de Distribuição
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
RNA	Redes Neurais Artificiais
RIS	Risco
RT	Reguladores de Tensão
SBC	Sistema Baseado em Conhecimento
SCADA	Supervisão, Controle e Aquisição de Dados
SDEE	Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica
SETA	Sistema Especialista para Tratamento de Alarmes
SEP	Sistemas Elétricos de Potência
SI	Sistemas Inteligentes
SMO	<i>Support Vector Machine</i>
SR	Sem Risco
STEE	Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica
VEs	Veículos Elétricos
VEHs	Veículos Elétricos Híbridos
WEKA	<i>Waikato Environment for Knowledge Analysis</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

θ_i	Ângulo de fase na barra i
g_{ij}	Condutância da linha no ramo ij
Y	Conjunto das linhas que podem ou não serem adicionadas no ramo ij
Ω_b	Conjunto de barras
Ω_l^1	Conjunto de caminhos nos quais existem Linhas na configuração base
Ω_l^2	Conjunto de caminhos novos (onde serão adicionadas novas Linhas)
Ω_l^0	Conjunto de linhas existentes na configuração base
Ω_l	Conjunto de ramos
c_{ij}^n	Custo de construção das linhas no ramo ij
d_i	Demanda na barra i
ε_f	Error da condição de factibilidade
ε_o	Error da condição de otimalidade
ε_μ	Error do parâmetro de barreira
γ	Fator de segurança
\bar{f}_{ij}^0	Fluxo de potência ativa máximo nos ramos para o conjunto de linhas já existentes
\bar{f}_{ij}^1	Fluxo de potência ativa máximo nos ramos para o conjunto de linhas já existentes ou linhas adicionadas em paralelo
\bar{f}_{ij}^2	Fluxo de potência ativa máximo nos ramos para o conjunto de linhas correspondentes aos novos caminhos
\bar{f}_{ij}	Fluxo de potência ativa máximo permitida no ramo ij para linhas novas
f_{ij}^0	Fluxo de potência ativa nos ramos para o conjunto de linhas já existentes
f_{ij}^1	Fluxo de potência ativa nos ramos para o conjunto de linhas já existentes ou linhas adicionadas em paralelo
f_{ij}^2	Fluxo de potência ativa nos ramos do conjunto de linhas correspondentes aos novos caminhos
f_{ij}	Fluxo de potência ativa no ramo ij para linhas novas
$f_{ij,y}$	Fluxo na linha y do ramo ij
p_i	Geração na barra i
\bar{p}_i	Geração máxima na barra i
v	Investimento devido às adições de Linhas no sistema - Função Objetivo
ij	Linha entre as barras i e j
n_{ij}	Número de linhas adicionadas no ramo ij

\bar{n}_{ij}^2	Número máximo de linhas em caminhos novos
\bar{n}_{ij}^1	Número máximo de linhas que podem ser adicionadas em paralelo às linhas dos caminhos já existentes
\bar{n}_{ij}	Número máximo de Linhas que podem ser adicionados no ramo ij
n_{ij}^1	Número de linhas adicionadas em paralelo às linhas já existentes
n_{ij}^0	Número de linhas existentes na configuração base no ramo ij
n_{ij}^2	Número de linhas novas adicionadas no ramo ij
γ_{ij}	Susceptância nas linhas do ramo ij
γ_{ij}^0	Susceptância nas linhas existente do ramo ij
$w_{ij,y}$	Variável binária correspondente à linha y candidata a ser adicionada ou não no ramo ij
x_{ij}	reatância do circuito ij
q_i	vetor de geração de potência reativa na barra i
\bar{q}_i	limite máximo de geração de potência reativa na barra i
\underline{q}_i	limite mínimo de geração de potência reativa na barra i
e_i	vetor de demanda de potência reativa na barra i
V_i	magnitude de tensão na barra i
\bar{V}_i	limite máximo da magnitude de tensão na barra i
\underline{V}_i	limite mínimo da magnitude de tensão na barra i
e_i	vetor de demanda de potência reativa na barra i
s_{ij}^{de}	fluxo de potência aparente (MVA) no ramo ij saindo do terminal
s_{ij}^{para}	fluxo de potência aparente (MVA) no ramo ij chegando no terminal
\bar{s}_{ij}	limite de fluxo de potência aparente (MVA) no ramo ij
θ_{ij}	diferença angular entre as barra i e j
Ω_{bi}	conjunto das barras vizinhas da barra i
g_{ij}	condutância da linha no ramo ij
g_{ij}^0	condutância existente da linha no ramo ij
b_{ij}	susceptância da linha no ramo ij
b_{ij}^{sh}	susceptância shunt da linha no ramo ij
b_i^{sh}	susceptância shunt na barra i
G_{ij}	matriz de condutância
B_{ij}	matriz de susceptância

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	CONTEXTO	24
1.2	OBJETIVOS	27
1.2.1	Objetivo geral	27
1.2.2	Objetivos específicos	27
1.3	CONTRIBUIÇÕES DA TESE	27
1.4	ESTRUTURA DA TESE	28
2	INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL	29
2.1	INTRODUÇÃO	29
2.2	SISTEMAS INTELIGENTES	32
2.3	PARADIGMAS DE APRENDIZAGEM	33
2.3.1	Paradigma simbólico	34
<i>2.3.1.1</i>	<i>Aprendizagem em AD</i>	<i>35</i>
<i>2.3.1.2</i>	<i>Escolha de atributos</i>	<i>38</i>
<i>2.3.1.3</i>	<i>Generalização e super-adaptação</i>	<i>38</i>
<i>2.3.1.4</i>	<i>Aplicabilidade de AD</i>	<i>39</i>
2.3.2	Paradigma conexionista	40
<i>2.3.2.1</i>	<i>Redes Neurais Artificiais</i>	<i>40</i>
<i>2.3.2.2</i>	<i>Estrutura das RNAs</i>	<i>41</i>
<i>2.3.2.3</i>	<i>Rede Perceptron</i>	<i>43</i>
<i>2.3.2.4</i>	<i>Processo de Treinamento</i>	<i>47</i>
2.3.3	Paradigma estatístico	49

2.3.3.1	<i>Máquinas de Vetor de Suporte</i>	49
2.4	MINERAÇÃO DE DADOS	52
2.4.1	Sistema Baseado em Conhecimento	53
2.4.2	Sistemas de Descoberta do Conhecimento em Bases de Dados	54
2.4.3	Etapas do processo de DCBD	55
2.4.3.1	<i>Etapa de pré-processamento</i>	56
2.4.3.2	<i>Etapa de Mineração de Dados</i>	59
2.4.3.3	<i>Etapa de pós-processamento</i>	61
2.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
3	APLICAÇÃO DE SIs NO CONTROLE CENTRALIZADO Volt-VAr EM MODERNOS SDEE	64
3.1	INTRODUÇÃO	64
3.1.1	Formulação Cônica de Segunda Ordem Binário Misto para o Problema de POSD Radiais	66
3.2	METODOLOGIA PROPOSTA	68
3.3	CASO DE ESTUDO E RESULTADOS	71
3.3.1	Treinamento dos SIs	74
3.3.2	Validação dos SIs	79
3.4	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	84
4	DETECÇÃO DE FRAUDES NAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO TÉCNICAS DE MINERAÇÃO DE DADOS	86
4.1	INTRODUÇÃO	86
4.2	METODOLOGIA PROPOSTA	93
4.2.1	Etapa de Pré-processamento	94
4.2.2	Etapa de Mineração de Dados	96
4.2.3	Etapa de Pós-processamento	98
4.3	CASO DE ESTUDO E RESULTADOS	99

4.3.1	Pré-Processamento dos Dados	99
4.3.2	Mineração de Dados	100
<i>4.3.2.1</i>	<i>Aplicação do Algoritmo de AD J48</i>	<i>101</i>
<i>4.3.2.2</i>	<i>Aplicação do algoritmo de MVS</i>	<i>104</i>
<i>4.3.2.3</i>	<i>Aplicação do algoritmo de RNA</i>	<i>107</i>
4.3.3	Pós-processamento	109
4.4	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	109
5	LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA APLICANDO ALGORITMOS DE INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL	111
5.1	INTRODUÇÃO	111
5.2	MÉTODOS UTILIZADOS PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS	115
5.3	METODOLOGIA PROPOSTA	118
5.4	CASO DE ESTUDO E RESULTADOS	123
5.5	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	130
6	SISTEMAS INTELIGENTES PARA COORDENAÇÃO DE CARGA ÓTIMA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS E DISPOSITIVOS DE ARMAZENAMENTO CONSIDERANDO A TECNOLOGIA V2G	132
6.1	INTRODUÇÃO	132
6.1.1	Métodos utilizados para coordenação de carga de Veículos Elétricos	134
6.2	METODOLOGIA PROPOSTA	137
6.3	CASO DE ESTUDO E RESULTADOS	140
6.3.1	Treinamento e validação dos SIs	142
6.4	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	146
7	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	147
	REFERÊNCIAS	151

APÊNDICE A - WEKA	161
A.1 INTRODUÇÃO	161
A.1.1 Escolha de plataforma de aprendizagem de máquina	162
A.2 DESCRIÇÃO DA FERRAMENTA WEKA	163
A.2.1 Simple CLI (Command Line Interface)	164
A.2.2 Explorer	164
<i>A.2.2.1 Preprocess</i>	<i>166</i>
<i>A.2.2.2 Aplicação de Filtros</i>	<i>168</i>
<i>A.2.2.3 Classify</i>	<i>169</i>
A.2.3 Knowledge Flow	172
A.2.4 Experimenter	173
A.2.5 Classificação com RNAs e MVSs no WEKA	175

1 INTRODUÇÃO

O crescimento mundial da demanda de energia elétrica, tem provocado preocupações a nível mundial. Tal crescimento, basicamente é devido ao desenvolvimento económico. No Brasil, esta preocupação cresce, na medida em que o sistema elétrico brasileiro vem operando com níveis de geração próximos às demandas dos usuários. Considerando os investimentos estatais e privados, a preocupação permanece, pois o nível de crescimento atual supera os investimentos sendo realizados e já os compromete quando finalizados. As entidades reguladoras do mercado de energia elétrica preocupadas com cenários como este, exigem das empresas geradoras de energia a garantia do fornecimento para manter o consumo crescente. Neste contexto é de fundamental importância a otimização dos processos relacionados com a transmissão e a distribuição de energia elétrica, e para tal é necessário o uso de metodologias interdisciplinares que auxiliem na otimização e na automação destes processos (BUSH, 2013).

Considerando a preocupação das empresas concessionárias dos sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEE) e dos sistemas de transmissão de energia elétrica (STEE) em serem mais flexíveis aos avanços tecnológicos, ao aumento nos preços dos combustíveis e ao interesse da conservação do meio ambiente, incentiva-se o desenvolvimento da geração distribuída, sistemas de armazenamento de energia, programas de resposta à demanda e tecnologias de medição sincronizada, como componentes essenciais para atingir as redes inteligentes ou também conhecidas como *smart grids* (WERBOS, 2011).

A denominação de rede inteligente gera a noção de "inteligência" embutida dentro da rede de energia elétrica. Uma alternativa esta relacionada com a inteligência computacional (IC) ou aprendizagem de máquina. Se esse é de fato o objetivo das redes inteligentes, a rede elétrica deve ser projetada para suportar tal inteligência. Para tal, é necessário compreender os aspectos de aprendizagem de máquina que provavelmente serão implementados na rede inteligente (BUSH, 2013).

No entanto, o termo, inteligência não tem sido claramente definido. Portanto, isso ainda deixa em aberto a noção do que realmente é a inteligência de máquina, como pode ser medida e em que grau pode ser utilizada na rede de energia elétrica. Hernández-Orallo e Dowe (2010) relata uma forma utilizada para quantificar a inteligência da máquina de maneira nova e interessante, conhecida como teoria da informação algorítmica e tem a sua inspiração a partir da complexidade de Kolmogorov, que relaciona a noção de complexidade de informação pelo tamanho do menor programa que calcula a informação.

Diversos trabalhos têm sido publicados sobre a aplicação de técnicas de IC em Sistemas

Elétricos de Potência (SEP) desde o aparecimento do artigo publicado em (WOLLENBERG, 1986). Os sistemas baseados em conhecimento, como são os Sistemas Inteligentes (SI), têm sido amplamente utilizados para auxiliar o trabalho de profissionais da área dos SEP, principalmente aqueles que exercem funções que precisam de experiência para efetuarem tomadas de decisões, (FORD, 1985). Especificamente na área dos SEP, onde as decisões devem ser tomadas baseando-se em um conjunto muito grande de informações relevantes, cuja interpretação depende a garantia do funcionamento contínuo do fornecimento do serviço de energia elétrica. Assim, torna-se óbvia a importância de oferecer ao profissional da área dos SEP, ferramentas com uma arquitetura que a torne apta a gerenciar aquelas informações.

Várias pesquisas reportam avanços na aplicação dos SI no auxílio à operação de SEP. A importância desta alternativa aumenta à medida que estes sistemas crescem e se tornam mais complexos, o que dificulta ao operador ter controle absoluto e seguro de todas as áreas envolvidas, diminuindo consideravelmente sua capacidade de tomada de decisões rápidas e eficientes sem a assistência de um operador externo (VALIQUETTE; TORRES; MUKHEDKAR, 1991).

Considerando a complexidade dos SEP, e com o advento das subestações automatizadas, os medidores inteligentes, as *smart grids*, e a carência de ferramentas numéricas tradicionais que analisem as causas das interrupções não programadas, faltas na rede de transmissão, perdas técnicas e não técnicas de energia, entre outras problemáticas, faz-se necessária uma abordagem não tradicional, que permita ao engenheiro ou operador do sistema, entender melhor o SEP com que trabalha, levando a realizar um gerenciamento ótimo do SEP.

Segundo (LAMBERT-TORRES et al., 1997), na medida em que os sistemas se tornam mais complexos, mais imprescindível é o fato de que a decisão tomada esteja certa, e mais difícil se torna para o profissional executar ações sem ajuda externa. Dado o grande número de mudanças de estado operacional dos equipamentos, torna-se muito difícil para o engenheiro ou operador do sistema ter uma imagem de um SEP sem as informações em indicadores representativos. Portanto, faz-se necessário desenvolver SIs capazes de auxiliar na tomada de decisões, segundo um aprendizado baseado no conhecimento de um especialista humano.

Considerando que tanto as concessionárias quanto as distribuidoras de energia elétrica utilizam sistemas que podem variar de uma concepção simples, até grandes aplicações mais complexas de coleta e análise de dados, e comando de grandes processos industriais, os dados obtidos (estado de equipamentos, valores de variáveis, alarmes, ultrapassagem de limites, identificador dos usuários, etc) são armazenados e, com o passar do tempo, formam grandes bancos de dados cheios de eventos e valores de variáveis ocorridos no processo sob supervisão e controle. Esses históricos de dados formam a base para análise do comportamento dos processos. O crescimento do volume de dados cria a necessidade de novas técnicas e ferramentas capazes de transformar, de forma eficiente, automática e inteligente, esses dados em informações significativas e em conhecimento. Essas informações, de grande importância para o planejamento,

controle, gestão e tomadas de decisão, podem estar implícitas ou escondidas sob um universo de dados, e não podem ser descobertas ou, facilmente identificadas utilizando somente sistemas convencionais de gerenciamento de banco de dados. Nesse contexto, é necessário a utilização de metodologias ágeis que permitam realizar a análise de grandes quantidades de dados de forma rápida e confiável, para assim lograr à automação de tarefas que precisam da inteligência e da velocidade que pode ser aplicada mediante o uso da IC.

O objetivo das pesquisas em IC é capacitar o computador a executar funções que são desempenhadas pelo ser humano usando conhecimento e raciocínio. Para que isto seja possível é necessário que sejam analisados todos os aspectos relativos ao desenvolvimento e uso da inteligência. Dentro desse contexto, a capacidade humana de agir inteligentemente é frequentemente associada ao conhecimento que se possui. Assim, torna-se evidente que a incorporação de conhecimento e raciocínio são os requisitos fundamentais para a construção de sistemas computacionais inteligentes.

1.1 CONTEXTO

A pergunta é, o que a IC pode fazer hoje? É difícil dar uma resposta concisa porque existem muitas atividades em vários sub-campos. Nesta seção são analisadas algumas aplicações da IC na área de engenharia elétrica, como pode ser visto a seguir:

Sistema SCADA: Um sistema especialista de Supervisão, Controle e Aquisição de Dados (SCADA), é um sistema utilizado para coletar, armazenar, analisar e apresentar os dados de uma subestação de energia elétrica, sob supervisão e controle. Em alguns desses sistemas, em função dos dados coletados e analisados, algumas decisões são tomadas e enviadas aos atuadores que interferem no processo controlado em tempo real. O sistema SCADA é um processo comum de aplicação e controle, que adquire dados do processo por meio de estações remotas e os enviam para processamento por um computador central. Uma aplicação do sistema especialista SCADA pode ser vista no trabalho apresentado por Oliveira, Braz e Ferreira (1994). Neste trabalho é desenvolvido um sistema especialista protótipo para tratamento de alarmes (SETA) para sistemas de tipo SCADA. Este sistema é baseado no conhecimento dos operadores do sistema elétrico. Um simulador de eventos foi desenvolvido para gerar ocorrências de alarmes, as quais podem ser de três tipos: aleatória, manual ou através de um arquivo de alarmes previamente montado. Através deste último modo de simulação do alarme, é possível reproduzir situações de emergência ocorridas num sistema elétrico real e os resultados obtidos com a utilização do sistema SETA foram bastantes satisfatórios.

Sistema Inteligente para tomada rápida de decisões nos sistemas elétricos: A ideia deste sistema inteligente desenvolvido por Filho (2006) foi auxiliar os operadores de uma concessionária de energia elétrica brasileira na recomposição sistêmica da rede. Para isto, foi desen-

volvuda uma metodologia que utiliza, além de uma base de conhecimento própria, a integração com os sistemas da concessionária. Também foi utilizado um sistema extrator de conhecimento de grandes bases de dados que funciona em conjunto com um sistema especialista. Este sistema inteligente hierárquico aciona rotinas computacionais externas de apoio, bem como bases de dados existentes na concessionária.

Aplicações da técnica de mineração de dados para previsão da estabilidade transitória nos sistemas elétricos de potência: Tao et al. (2004) apresenta uma estrutura de mineração de dados para a simulação dos dados históricos das unidades de medidas e posteriormente realizar a previsão da estabilidade transitória nos sistemas de energia elétrica.

Mineração de dados para a detecção de barras sensíveis e barras influentes em um sistema de potência sujeito a distúrbios: Segundo Tso et al. (2004), muitos tipos de perturbações nos sistemas de potência podem conduzir a uma redução da carga do sistema. Neste trabalho uma técnica de Mineração de Dados (MD) foi aplicada a um SEP em Hong Kong para detetar as subestações mais sensíveis a distúrbios. Além disso, baseados nas análises de correlação de perfil de tensão, são identificadas as barras mais influentes onde o ajuste mais eficaz de tensão pode ser estrategicamente aplicado para auxiliar o barramento sensível, e a recuperação de tensão decorrente da perturbação pode ser deduzida.

Uma abordagem probabilística para o planejamento de rede nos sistemas elétricos de potência sob incertezas: Vassena et al. (2003) apresentam neste trabalho a utilização de uma técnica de MD para analisar uma base de dados com grande quantidade de cenários simulados usando Monte Carlo. O objetivo é utilizar a metodologia de MD para realizar os estudos de planejamento das redes de distribuição de energia elétrica sob incertezas a longo prazo. Nesta abordagem as principais incertezas externas durante o planejamento horizontal são modeladas como macro-cenários em diferentes instantes de tempo futuros. Técnicas de MD, são aplicadas para extrair informações do banco de dados, de modo a classificar cenários e reforços da rede de acordo com diferentes critérios.

Um Hardware de detecção de anomalias em tempo real utilizando uma Rede Neural Artificial para Proteção de Distância: Venkatesan e Balamurugan (2001) neste trabalho os pesquisadores descrevem um detector de falhas em tempo real para a aplicação de proteção a distância, baseado em redes neurais artificiais. Uma estrutura de rede neural ótima com um tempo de treinamento de curta duração é apresentada, para assim alcançar o objetivo em curto prazo.

Localização de falhas nas linhas de transmissão usando redes neurais de domínio complexo: Alves, Lima e Souza (2012) a localização da falha é uma tarefa crítica quando um distúrbio severo é causado por falha de isolamento em uma linha de transmissão. Para evitar custos económicos e sociais adicionais devido a interrupções de carga, o diagnóstico de falha deve ser concluído o mais rápido possível. Considerando que os SI têm sido bem sucedidos em lidar com

problemas de diagnóstico de falhas, este artigo propõe a aplicação de redes neurais de domínio complexo para mapear a relação entre sinais elétricos e localização de falha em linhas de transmissão. As redes neurais de domínio complexo permitem a representação de tensão/corrente sem amplitude e fase arbitrariamente desacopladas. Além disso, são analisados vários esquemas de representação de tensão e corrente, com base em informações eletromagnéticas transitórias e estacionárias. Para fins comparativos, essas representações de entrada também são testadas com redes neurais de domínio real. Os testes consideram condições realistas de operação/falha e assumem que a classificação de falhas já foi tratada.

Gerenciamento de energia de um veículo elétrico híbrido baseado em aprendizagem de máquina para minimizar o custo total operacional: Lin et al. (2015) neste artigo é estudado o problema de gerenciamento de energia em veículos elétricos híbridos (VEHs) com foco na minimização do custo operacional de um VEH, incluindo o custo de reposição de combustível e bateria. Mais precisamente, o artigo apresenta uma pesquisa na qual é utilizado o aprendizado de forma aninhado em que tanto as ações ótimas (que incluem a seleção da relação de transmissão e o uso do motor de combustão interna versus o motor elétrico para conduzir o veículo) e os limites na faixa do estado de carga da bateria são aprendidas sobre a marcha. O ciclo interno do processo de aprendizagem é a chave para a minimização do uso de combustível, ao passo que o ciclo externo do processo de aprendizado é crítico para minimizar o custo de reposição da bateria amortizada. Os resultados experimentais demonstram uma redução de custos operacionais máxima de 48% pela política de gerenciamento de energia de VEH proposta neste trabalho.

Modelagem elétrica da dinâmica da bateria de um veículo elétrico usando máquinas de vetor de suporte: Majid et al. (2013) As baterias utilizadas em veículos elétricos (VE) são muitas vezes limitadas pela capacidade. Quanto tempo você pode usar um VE é determinado pela duração da bateria. No entanto, há dificuldade em modelar a relação entre a tensão de carga e a corrente sob diferentes temperaturas e estados de carga (State of Charge - SOC), por conta da não-linearidade das propriedades da bateria. O objetivo da pesquisa apresentada neste artigo é modelar a dinâmica de carregamento da bateria usando a máquina de vetor de suporte, que é uma poderosa ferramenta para se aproximar da função não linear. Uma bateria de 1000 mAh Li-Po/MH é utilizada para obter o modelo da bateria e criar a base de dados utilizados nos testes de aprendizagem da máquina de vetor de suporte. Observa-se que o modelo da máquina de vetor de de suporte pode simular a dinâmica de carregamento da bateria com quantidades de dados experimentais limitados, obtendo como resultado final um baixo erro relativo.

Além destas aplicações, existe uma grande quantidade de pesquisas que estão sendo desenvolvidas na área de IC aplicada à solução de problemas de engenharia elétrica, uma ampla revisão bibliográfica sobre este tema pode ser encontrada em (BUSH, 2013).

Nesta tese são abordados quatro tipos de problemas diferentes da área da engenharia elétrica

e têm sido aplicados diferentes métodos de IC que têm permitido chegar a soluções aceitáveis quando comparadas com soluções calculadas mediante o uso de modelagem matemática.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver métodos derivados da IC baseados em Mineração de Dados e Sistemas Inteligentes, para resolver problemas relacionados com gerenciamento de energia no SDEE e no STEE, de forma a auxiliar ao operador do sistema na tomada de decisões.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Utilizar a ferramentas computacional WEKA, que permitam o rápido treinamento dos SIs, para realizar uma aplicação dos mesmos de forma eficiente para a extração do conhecimento em bancos de dados, sendo uma solução rentável para as concessionárias.
2. Aplicar SIs para resolver o problema de controle centralizado Volt/VAr em modernos SDEE usando medições elétricas.
3. Usar a mineração de dados para a identificação de fraudes nas redes de distribuição de energia elétrica, analisando padrões de consumo;
4. Aplicar SIs para resolver o problema de localização de faltas nas redes de transmissão de energia elétrica, usando histórico de medições das faltas na rede.
5. Utilizar algoritmos de IC para realizar a coordenação de carga ótima de VEs e de dispositivos de armazenamento de energia em um SDEE.

1.3 CONTRIBUIÇÕES DA TESE

As principais contribuições deste trabalho são apresentadas a seguir:

- A aplicação de três SIs para resolver o problema de controle centralizado Volt/VAr em modernos SDEE usando medições elétricas.
- A aplicação de algoritmos de mineração de dados para resolver o problema de detecção de fraudes nas redes de distribuição de energia elétrica, analisando padrões de consumo.
- Aprimoramento das técnicas atualmente utilizadas pelas empresas concessionárias de energia elétrica na detecção de fraudes no SDEE.

- A aplicação de SIs para resolver o problema de localização de faltas nas redes de transmissão de energia elétrica, usando histórico de medições das faltas na rede.
- Um modelo flexível de RNA, MVS e AD para análise da otimização do carregamento de VEs e de dispositivos de armazenamento de energia ao longo do dia.
- A exploração científica da IC e da MD como ferramentas para descoberta de conhecimento no domínio de distribuição e transmissão de energia elétrica, permitindo com que a tomada de decisões possa ser feita em tempo real.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

Esta tese de doutorado está organizada em sete capítulos, distribuídos da seguinte forma:

- No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica sobre IC e suas aplicações na solução de problemas na área da Engenharia Elétrica.
- No Capítulo 3 é desenvolvida a pesquisa para aplicação de SIs ao problema de controle centralizado Volt-VAr em modernos SDEEs.
- No Capítulo 4 é apresentada a aplicação de MD como solução ao problema de detecção de fraudes nas redes de distribuição de energia elétrica.
- No Capítulo 5 é apresentada a aplicação de algoritmos de IC como solução ao problema de localização de faltas em STEE.
- No Capítulo 6 é desenvolvida a pesquisa para aplicação de algoritmos de IC para realizar a coordenação de carga ótima de VEs e de dispositivos de armazenamento de energia em um SDEE.
- No Capítulo 7 apresentam-se as conclusões da tese e as propostas para trabalhos futuros.
- No apêndice A apresenta-se o software de livre distribuição WEKA, que foi utilizado para realizar os testes.

7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Nesta tese foi utilizada a IC mediante o uso dos algoritmos de AM para solucionar problemas de grande complexidade na área dos Sistemas Elétricos de Potência, como é o caso do Controle centralizado Volt-VAR em modernos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica; a detecção de fraudes nas redes de Distribuição de Energia Elétrica; a localização de faltas em Linhas de Transmissão de Energia Elétrica; e a Coordenação de carga inteligente de veículos elétricos e dispositivos de armazenamento considerando a tecnologia V2G. Dentre os algoritmos de AM utilizados como alternativa de solução encontram-se as RNAs, as MVS e as ADs. Para realizar o gerenciamento adequado dos algoritmos foi usada a plataforma de AM WEKA.

Os resultados obtidos durante as simulações mostram que o software WEKA é uma poderosa ferramenta, que pode ser usada para gerenciar eficientemente os algoritmos de AM, utilizados para resolver problemas de grande complexidade matemática na área dos Sistemas Elétricos de Potência. Estes problemas se caracterizam por possuir uma grande base de dados e um número elevado de variáveis, o que dificulta a tomada de decisões e a obtenção de resultados em tempos computacionais razoáveis quando solucionados através de modelos matemáticos. Portanto, a metodologia proposta surge como uma alternativa interessante que permite obter resultados satisfatórios em menor tempo.

Pode-se concluir que os principais aspectos a serem considerados na hora de resolver um problema usando algoritmos de AM através da plataforma WEKA, são os seguintes:

- Criação da base de dados a partir de um conjunto de medições, ou resultados de um modelo matemático.
- Definição do conjunto de variáveis de interesse do problema (entrada e saída).
- Obtenção de uma porcentagem de aprendizagem durante a etapa de treinamento superior a 95%. Cabe salientar que esta etapa é de maior complexidade, devido aos tempos de simulação e o esforço computacional necessário para construir o modelo de aprendizado.
- Validar os resultados do modelo de aprendizado obtido pelo WEKA com os resultados usados como referência.

De acordo com os resultados obtidos no desenvolvimento da tese, pode-se concluir que o nível de aprendizado de cada algoritmo depende do problema que está-se tratando. Para o problema de Controle centralizado Volt/VAr o algoritmo que teve maior porcentagem de aprendizado foi a MVS, apresentando 98,45% de classificação correta. Para o problema de detecção

de fraudes o algoritmo de ADs apresentaram um percentual de aprendizado de 100%. No problema de localização de faltas, o algoritmo de ADs apresentou 96,54% no seu percentual de aprendizado. Por último, no problema de CCIVEs e de DA, o algoritmo com maior nível de aprendizado foi o de AD, seguido das MVS com um percentual de aprendizado de 96,07% e 96,02%, respectivamente.

Considerando os tempos de construção dos modelos dos algoritmos de AM pode-se concluir que, mesmo que os algoritmos que compõem os SIs precisaram de um período de tempo razoável, na hora de se realizar o processo de validação dos mesmos, os tempos de resposta são de no máximo 1 segundo, o que leva a pensar que estas metodologias podem ser catalogadas como aceitáveis quando comparadas com métodos matemáticos utilizados tanto para o controle de magnitude de tensão e de potência reativa (Volt-VAr) em tempo real, quanto na coordenação de carga de VE.

Por outro lado, pode ser concluído que, realizar o processo de localização de faltas nos STEE utilizando SI garante obter resultados mais exatos e em menor tempo, o que leva à diminuição dos tempos de localização e correção da falta, garantindo um melhor serviço por parte das empresas de transmissão de energia elétrica aos seus clientes. Isto quer dizer, que podem ser implementadas dentro do contexto das Redes Inteligentes para resolver o problema de faltas em tempo real.

Segundo os resultados obtidos no desenvolvimento da tese, conclui-se que, pode ser considerado o uso destas metodologias como alternativas rápidas e eficientes de solução de problemas da área dos Sistemas Elétricos de Potência, dado que a comparação entre os resultados obtidos na solução de um modelo MPLIM tendo como objetivo a minimização das perdas do sistema de distribuição, e os resultados obtidos usando os SIs, mostram erros de previsão baixos. Além disso, considerando que poucos trabalhos têm sido desenvolvidos nesta área, as metodologias propostas surgem como ferramenta adicional a ser considerada nas futuras pesquisas que abranjem a modernização e o controle dos SDEE e dos STEE, como é o caso das Redes Inteligentes.

Por outro lado, é possível concluir que, considerando que os algoritmos de IC são tolerantes a ruídos, é possível ter dados de entrada com perturbações e mesmo assim obter um resultado final aceitável, o que leva a pensar que a utilização de métodos de IC são vantajosos dado que permitem realizar o aprendizado das atividades normalmente realizadas por controladores do sistema (humanos), sem que fatores externos afetem a tomada de decisões. Esta afirmação pode ser validada a partir dos resultados obtidos, os quais apresentam erros baixos em comparação com os resultados fornecidos por um modelo matemático, o que mostra a utilidade dos métodos proposto.

Um outro fator a destacar é que esta tese permite concluir que as metodologias desenvolvidas são um importante aporte na área dos Sistemas Elétricos de Potência, pois, foram resolvidos diversos problemas de forma eficiente, mesmo existindo aspetos e/ou fatores limitantes presen-

tes em outras abordagens. Embora seja necessário ter o conhecimento de um especialista na área de determinado problema para sua modelagem, os SI depois de treinados, apresentam resultados aceitáveis em tempos de resposta, quando comparados com o tempo de reação que pode precisar o especialista humano para tomar uma decisão baseado na sua experiência.

Considerando a capacidade de adaptação dos algoritmos de AM pode-se concluir que, os algoritmos de AM podem ser treinados quantas vezes for necessário caso a topologia da rede mude, caso exista um aumento na quantidade de clientes de uma empresa, caso aumentem as variáveis de um determinado problema, caso algum acontecimento novo surgir, mesmo assim, o treinamento necessário para um determinado algoritmo de AM não tem como ser comparado com o tempo de aprendizado de um especialista humano.

De modo geral, pode-se concluir que a utilização de IC permite representar de forma adequada problemas reais sem limitações causadas pela falta ou excesso de medições. Além disso, o processo de tomada de decisões pode ser realizado sem precisar da representação detalhada do modelo físico da rede, pois, dados de medições podem ser utilizados como entrada para o treinamento do SI.

Durante o desenvolvimento de cada capítulo desta tese, foram feitas observações relevantes que devem ser consideradas em trabalhos futuros.

No Capítulo 3:

- Testar outros algoritmos de aprendizado de máquina para determinar qual é mais eficiente na realização do controle centralizado Volt/VAr em tempo real.
- Utilizar aprendizado por reforço e Deep Learning para realizar controle centralizado Volt/VAr em tempo real.

No Capítulo 4:

- Testar a metodologia proposta em dados reais de uma empresa do setor elétrico brasileiro, considerando uma nova variável, como é o caso da variação climática.
- Aplicar Big-Data utilizando informações de medidores inteligentes em tempo real na detecção de clientes suspeitos de cometer algum tipo de fraude.
- Testar outros algoritmos de aprendizado de máquina para determinar qual é mais eficiente na realização do processo de mineração de dados para detecção de clientes suspeitos de cometer algum tipo de fraude.

No Capítulo 5:

- Testar a metodologia proposta em dados reais de uma empresa do setor elétrico brasileiro, considerando a localização de faltas em longas linhas de transmissão.
- Testar outros algoritmos de aprendizado de máquina para determinar qual é mais eficiente na realização da localização da falta em tempo real.

No Capítulo 6:

- Utilizar além das medições do sistema, variáveis estocásticas que ajudem a definir um perfil de uso dos VEs por parte dos donos, e assim obter um SI mais preciso na hora de realizar a CCIVEs e dos DA.
- Utilizar Big-Data para realizar o CCIVEs em um SDEE considerando medições obtidas em tempo real.
- Treinar um SI para que, mediante o uso de um aplicativo móvel, o dono do VE consiga ver em tempo real, uma distribuição ótima das estações de carregamento, evitando um alto índice de coincidência em cada um destes lugares, e diminuindo o tempo de espera por parte dos donos dos VEs.
- Treinar um SI para que permita realizar a predição dos veículos que podem chegar nas próximas horas para serem carregados.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. *Condições gerais de fornecimento de energia elétrica, resolução 456*. Brasília, DF, ago. 2000. 57 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. *Metodologia de tratamento regulatório para perdas não técnicas de energia elétrica*. Brasília, DF, ago. 2015. 60 p. Nota técnica 106.

ALVES, A. P.; LIMA, A.; SOUZA, S. M. Fault location on transmission lines using complex-domain neural networks. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, London, v. 43, n. 1, p. 720–727, Fourth 2012. ISSN 0142-0615.

ARAÚJO, A. C. *Considerações sobre as perdas na distribuição de energia elétrica no Brasil*. 125 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

ARAÚJO, R.; MEIRA, P.; ALMEIDA, M. Algorithms for operation planning of electric distribution networks. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, Heidelberg, v. 54, n. 3, p. 154 – 162, Jul. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA - ABRADE. *CODIGO 08-05 perdas comerciais*. Brasília, DF, ago. 2017.

BELLMAN, R. *An introduction to artificial intelligence: can computers think?* [S.l.]: Boyd & Fraser, 1978. ISBN 9780878350667.

BILGIN, B.; MAGNE, P.; MALYSZ, P.; YANG, Y.; PANTELIC, V.; PREINDL, M.; KOROBKINE, A.; JIANG, W.; LAWFORDE, M.; EMADI, A. Making the case for electrified transportation. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Piscataway, v. 1, n. 1, p. 4–17, June 2015.

BISHOP, C. M. *Pattern recognition and machine learning*. [S.l.]: Springer-Verlag, 2007. 738 p.

BRADY, P.; DAI, C.; BAGHZOUZ, Y. Need to revise switched capacitor controls on feeders with distributed generation. *IEEE PES T&D Conf. Expo*, Dallas, v. 2, p. 590 – 594, Apr. 2003.

BRAHMA, S. M.; GIRGIS, A. A. Fault location on a transmission line using synchronized voltage measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, v. 19, n. 4, p. 1619–1622, Oct 2004. ISSN 0885-8977.

BUSH, S. F. *Machine intelligence in the grid*. [S.l.]: Wiley-IEEE, 2013. 576 p. ISBN 9781118820216.

- CABRAL, J. E.; PINTO, J. O.; GONTIJ, E. M.; REIS, J. Rough sets based fraud detection in electrical energy consumers rough sets based fraud detection in electrical energy consumers. *WSEAS International Conference on Mathematics and Computers in Phisics*, Cancun, Mexico, n. 1–4, Abr. 2004.
- CAO, Y.; MIAO, Y.; MIN, G.; WANG, T.; ZHAO, Z.; SONG, H. Vehicular-publish/subscribe (v-p/s) communication nabled on-the-move ev charging management. *IEEE Communications Magazine*, Piscataway, v. 54, n. 12, p. 84–92, December 2016. ISSN 0163-6804.
- CAO, Y.; WANG, T.; KAIWARTYA, O.; MIN, G.; AHMAD, N.; ABDULLAH, A. H. An ev charging management system concerning drivers trip duration and mobility uncertainty. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, Piscataway, v. PP, n. 99, p. 1–12, Nov. 2017. ISSN 2168-2216.
- CHEN-CHING, L.; PIERCE, D. A.; SONG, H. Intelligent system applications to power systems. *IEEE Computer Applications in Power*, Piscataway, v. 10, n. 4, p. 21–22, 24, Oct 1997. ISSN 0895-0156.
- COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA-COPEL. *Relatório de sustentabilidade COPEL 2016*. Curitiba, ago. 2016. 99 p.
- CPLEX DIVISION. *CPLEX optimization subroutine library guide and reference*. New York, ago. 2009. 952 p.
- DEILAMI, S.; MASOUM, A. S.; MOSES, P. S.; MASOUM, M. A. S. Real-time coordination of plug-in electric vehicle charging in smart grids to minimize power losses and improve voltage profile. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Piscataway, v. 2, n. 3, p. 456–467, Sept 2011. ISSN 1949-3053.
- DELGADO, J. *Sistema de informação de apoio a detecção de perdas de energia eléctrica - O caso da Electra*. 140 f. Tese (Doutorado em Engenharia Eletrônica) — Universidade de Aveiro, Santiago, 2010.
- DIAGRAMA unifilar da rede de transmissão do sistema Colombiano. Medellin: [s.n.], 2016. 98 p. Dados obtidos de uma empresa cujo nome é confidencial.
- ELLER, N. A. *Arquitetura de informação para gestão de perdas comerciais de energia eléctrica*. 114 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) — Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2003.
- ENGELS, R.; THEUSINGER, C. Using a data metric for offering preprocessing advice in data mining applications,. In: EUROPEAN CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE ECAI,. Brighton, 1998. *Proceedings...* Brighton: ECAI, 1998, p. 430–434.
- FANG, X.; MISRA, S.; XUE, G.; YANG, D. Smart grid. the new and improved power grid: A survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, Piscataway, v. 14, n. 4, p. 944–980, Fourth 2012. ISSN 1553-877X.

- FAYBISOVICH, V.; KHOROSHEV, M. I. Frequency domain double-ended method of fault location for transmission lines. In: TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION. IEEE/PES. Chicago, 2008. *Proceedings...* Piscataway: IEEE, 2008, p. 1–6. ISSN 2160-8555.
- FAYYAD, U.; PIATETSKY-SHAPIRO, G.; SMYTH, P. *From data mining to knowledge discovery: an overview, in advances in knowledge discovery in databases*. Cambridge: MIT, 1996.
- FENG, D.; XIANGJUN, Z.; CHAO, Y.; XIAO'AN, Q.; ZHIHUA, W. Novel traveling wave location algorithm for transmission network based on information fusion technology. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT COMPUTATION TECHNOLOGY AND AUTOMATION (ICICTA). [S.l.], 2008. *Proceedings...* Piscataway: IEEE, 2008, p. 1091–1095.
- FILHO, J. R.; GONTIJO, E. M.; DELAIBA; MAZINA, E.; CABRAL, J. E.; PINTO, J. O. Fraud identification in electricity company customers using decision tree. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS, MAN AND CYBERNETICS (IEEE CAT. NO.04CH37583). [S.l.], 2004. *Proceedings...* Piscataway: IEEE, 2004, p. 3730–3734. ISSN 1062-922X.
- FILHO, M. *Sistema inteligente para tomada rápida de decisões nos sistemas elétricos*. 1110 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006.
- FORD, F. N. Decision support systems and expert systems: a comparison. *Information & Management*, Elsevier, v. 8, n. 1, p. 21–26, 1985.
- FOURER, R.; GAY, D. M.; KERNIGHAN, B. W. *AMPL: A modeling language for mathematical programming*. 2. ed. [S.l.]: Pacific Grove, 2002. 540 p.
- FULCZYK, M.; BALCEREK, P.; IZYKOWSKI, J.; ROSOŁOWSKI, E. Two-end unsynchronized fault location algorithm for double-circuit series compensated lines. In: POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING - CONVERSION AND DELIVERY OF ELECTRICAL ENERGY IN THE 21 CENTURY. Pittsburgh, PA, 2008. *Proceedings...* Piscataway: IEEE, 2008, p. 1–9. ISSN 1932-5517.
- GAMA, J.; FACELI, K.; LORENA, A. C.; CARVALHO, A. C. *Inteligência artificial: uma abordagem de aprendizado de máquina*. Rio de Janeiro: Grupo Gen - LTC, 2011. ISBN 9788521618805. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=4DweIAEACAAJ>>.
- GHARAVI, H.; GHAFURIAN, R. Smart grid: the electric energy system of the future. *Proceedings of the IEEE*, Piscataway, v. 99, n. 6, p. 917–921, Jun. 2011.
- GOLDSCHMIDT, R.; PASSOS, E. *Data mining: um guia prático*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005. 265 p.
- GOLDSCHMIDT, R.; PASSOS, E.; BEZERRA, E. *Data mining: conceitos, técnicas, algoritmos, orientações e aplicações*. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015. 296 p. ISBN 978-85-352-7822-4.

- GOMES, L.; FARIA, P.; MORAIS, H.; VALE, Z.; RAMOS, C. Distributed, agent-based intelligent system for demand response program simulation in smart grids. *IEEE Intelligent Systems*, Piscataway, v. 29, n. 1, p. 56–65, Jan 2014. ISSN 1541-1672.
- GONÇALVES, R.; ALVES, R. P.; FRANCO, J.; RIDER, M. J. Operation planning of electrical distribution systems using a mixed integer linear model. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, Springer, v. 24, n. 5, p. 668–679, 2013.
- GONÇALVES, R.; ALVES, R. P.; RIDER, M. J. Um modelo linear inteiro misto para o planejamento da operação de redes de distribuição de energia elétrica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA-CBA, 2012,. Goiania, 2012. *Anais...* Goiania: CBA, 2008.
- GOPALAKRISHNAN, A.; KEZUNOVIC, M.; MCKENNA, S. M.; HAMAI, D. M. Fault location using the distributed parameter transmission line model. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, v. 15, n. 4, p. 1169–1174, Oct 2000. ISSN 0885-8977.
- HAN, J.; MICHELINE, K.; JIAN, P. *Data mining: concepts and techniques*. 3. ed. Boston: Morgan Kaufmann, 2012. 703 p. (The Morgan Kaufmann Series in Data Management Systems). ISBN 978-0-12-381479-1.
- HAYKIN, S. *Neural networks: a comprehensive foundation*. 3. ed. Ontario Canada: Prentice Hall, 2008. 842 p.
- HEBB, D. O. *The organization of behavior: a neuropsychological theory*. 2. ed. New York: Psychology Press, 2008. 335 p.
- HERNÁNDEZ-ORALLO, J.; DOWE, D. L. Measuring universal intelligence: towards an anytime intelligence test. *Artificial Intelligence*, Valencia, v. 174, n. 18, p. 1508 – 1539, 2010. ISSN 0004-3702.
- HU, X.; MURGOVSKI, N.; JOHANNESSON, L. M.; EGARDT, B. Optimal dimensioning and power management of a fuel cell battery hybrid bus via convex programming. *IEEE-ASME Transactions on Mechatronics*, Piscataway, v. 20, n. 1, p. 457–468, Feb 2015. ISSN 1083-4435.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. *World energy statistics 2017*. França, Nov. 2017. 22 p. Disponível em: <<https://www.iea.org/statistics/>>. Acesso em: 13 Set. 2017.
- JAFARI, M.; GAUCHIA, A.; ZHANG, K.; GAUCHIA, L. Simulation and analysis of the effect of real-world driving styles in an ev battery performance and aging. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Piscataway, v. 1, n. 4, p. 391–401, Dec 2015.
- JAHANGIRI, P.; ALIPRANTIS, D. C. Distributed volt/var control by pv inverters. *IEEE Transaction on Power Systems*, New York, v. 28, n. 3, p. 3429–3439, Aug. 2013.
- KARFOPOULOS, E. L.; HATZIARGYRIOU, N. D. A multi-agent system for controlled charging of a large population of electric vehicles. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 28, n. 2, p. 1196–1204, May 2013. ISSN 0885-8950.
- KAWADY, T.; STENZEL, J. Investigation of practical problems for digital fault location algorithms based on emtp simulation. *IEEE/PES. Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002*, Yokohama, v. 1, p. 118 – 123, Oct. 2002.

- KERSTING, W. H. *Distribution system modeling and analysis, regulation of voltages*. 2. ed. Las Cruces, Nuevo Mexico: CRC, 2007. 425 p.
- KIM, I. S. Nonlinear state of charge estimator for hybrid electric vehicle battery. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 23, n. 4, p. 2027–2034, July 2008. ISSN 0885-8993.
- KIM, I. S. A technique for estimating the state of health of lithium batteries through a dual-sliding-mode observer. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Piscataway, v. 25, n. 4, p. 1013–1022, April 2010. ISSN 0885-8993.
- KURZWEIL, R. *The age of intelligent machines*. [S.l.]: MIT, 1990. 565 p.
- LABERGE, R. *The data warehouse mentor: practical data warehouse and business intelligence insights*. New York: McGraw-Hill, 2011. 416 p.
- LAMBERT-TORRES, G.; RIBEIRO, G.; COSTA, C.; SILVA, A. A. da; QUINTANA, V. Knowledge engineering tool for training power-substation operators. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, v. 12, n. 2, p. 694–699, Apr 1997. ISSN 0885-8977.
- LIANG, R. H.; CHENG, C. K. Dispatch of main transformer ultc and capacitors in a distribution system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, v. 16, n. 4, p. 625–630, Oct 2001. ISSN 0885-8977.
- LIANG, R. H.; WANG, Y. S. Fuzzy-based reactive power and voltage control in a distribution system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, v. 18, n. 2, p. 610–618, April 2003. ISSN 0885-8977.
- LIANG, R. H.; WANG, Y. S. A universal fault location technique for n-terminal transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, v. 23, n. 3, p. 1366–1373, July 2008. ISSN 0885-8977.
- LIANG, Y.; WANG, G.; LI, H. A novel fault location for transmission line by the combination of particle swarm optimization and least squares method. In: INTERNATIONAL POWER ENGINEERING CONFERENCE (IPEC 2007). Singapore, 2007. *Proceedings...*Piscataway: IEEE, 2007, p. 1151–1155. ISSN 1947-1262.
- LIAO, Y.; KEZUNOVIC, M. Optimal estimate of transmission line fault location considering measurement errors. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, v. 22, n. 3, p. 1335–1341, July 2007. ISSN 0885-8977.
- LIN, X.; BOGDAN, P.; CHANG, N.; PEDRAM, M. Machine learning-based energy management in a hybrid electric vehicle to minimize total operating cost. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER-AIDED DESIGN (ICCAD). Austin, 2015. *Proceedings...* Piscataway: IEEE/ACM, 2015, p. 627–634.
- LIN, X.; MAO, P.; WENG, H.; WANG, B.; BO, Z. Q.; KLIMEK, A. Study on fault location for high voltage overhead transmission lines based on neural network system. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT SYSTEMS APPLICATIONS TO POWER SYSTEMS. Toki Messe, 2011. *Proceedings...*Toki Messe, 2011, p. 1–5.

- MAHMOOD, A. M.; SATULURI, N.; KUPPA, M. R. An overview of recent and traditional decision tree classifiers in machine learning. *International Journal of Research and Reviews in Ad Hoc Networks*, New York, v. 1, n. 1, p. 1688–1697, Apr. 2011.
- MAJID, I. A.; RAHMAN, R. F.; SETIAWAN, N. A.; CAHYADI, A. I. Electric vehicle battery dynamics modelling using support vector machine. In: JOINT INTERNATIONAL CONFERENCE ON RURAL INFORMATION COMMUNICATION TECHNOLOGY AND ELECTRIC-VEHICLE TECHNOLOGY (RICT ICEV-T). [S.l.], 2013. *Proceedings...Piscataway: IEEE*, 2013, p. 1–3.
- MCCULLOCH, M. S.; PITTS, W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, Chicago, v. 5, n. 1, p. 115–133, Apr. 1943.
- MEI, K.; ROVNYAK, S. M. Response-based decision trees to trigger oneshot stabilizing control. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 19, n. 1, p. 531–537, May. 2004.
- MENG, J.; LUO, G.; GAO, F. Lithium polymer battery state-of-charge estimation based on adaptive unscented kalman filter and support vector machine. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Piscataway, v. 31, n. 3, p. 2226–2238, March 2016. ISSN 0885-8993.
- METS, K.; D’HULST, R.; DEVELDER, C. Comparison of intelligent charging algorithms for electric vehicles to reduce peak load and demand variability in a distribution grid. *Journal of Communications and Networks*, Seoul, v. 14, n. 6, p. 672–681, Dec 2012. ISSN 1229-2370.
- MITCHELL, T. M. *Machine learning*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1997. 421 p. (McGraw-Hill International Editions). ISBN 9780071154673.
- MOHAPATRA, A.; BIJWE, P. R.; PANIGRAHI, B. K. An efficient hybrid approach for volt/var control in distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, v. 29, n. 4, p. 1780–1788, Aug 2014. ISSN 0885-8977.
- MOMOH, J. A. *Electric power distribution, automation, protection, and control*. [S.l.]: CRC, 2017. 378 p.
- MULLER, K.; MIKA, S.; RATSCH, G.; TSUDA, K.; SCHOLKOPF, B. An introduction to kernel-based learning algorithms. *IEEE Transactions on Neural Networks*, New York, v. 12, n. 2, p. 181–201, Mar 2001. ISSN 1045-9227.
- NIKNAM, T.; ZARE, M.; AGHAEI, J. Scenario-based multiobjective volt/var control in distribution networks including renewable energy sources. *IEEE Transactions on Power Delivery*, New York, v. 27, n. 4, p. 2004–2019, Oct 2012. ISSN 0885-8977.
- NILSSON, N. J. *Artificial intelligence: a new synthesis*. New York: Elsevier, 1998. 513 p.
- NORTHCOTE-GREEN, J.; WILSON, R. G. *Control and automation of electrical power distribution systems*. New York: CRC, 2006. 488 p.
- OBA, C. C.; NUNES, A.; SINKITI, D.; PAPA, J. P. Identification and feature selection of non-technical losses for industrial consumers using the software weka. In: IAS INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS (INDUSCON), 10., 2012.,. Fortaleza, 2012. *Proceedings... Piscataway: IEEE*, 2012, p. 1–6.

- O'CONNELL, A.; FLYNN, D.; KEANE, A. Rolling multi-period optimization to control electric vehicle charging in distribution networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, National Harbor, v. 29, n. 1, p. 340–348, Jan 2014. ISSN 0885-8950.
- OLIVEIRA, E.; BRAZ, J.; FERREIRA, D. Um processador de alarme inteligente. *SBA Controle e Automação*, Campinas, v. 4, n. 2, p. 55 – 61, May. 1994.
- PARÂMETROS da linha de transmissão. Medellín: [s.n.], 2016. 87 p. Dados obtidos de uma empresa cujo nome é confidencial.
- PARK, J. Y.; NAM, S. R.; PARK, J. K. Control of a ultc considering the dispatch schedule of capacitors in a distribution system. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 22, n. 2, p. 755–761, May 2007. ISSN 0885-8950.
- PLATT, J. C. Sequential minimal optimization: a fast algorithm for training support vector machines. 1998.
- QUEIROGA, R. M. *Uso de técnicas de data mining para detecção de fraudes em energia elétrica*. 147 f. Tese (Doutorado em Informática) — Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória:, 2005.
- QUINLAN, J. R. Improved use of continuous attributes in c4.5. *Journal of Artificial Intelligence Research*, New York, v. 4, n. 1, p. 77 – 90, Nov. 1996.
- RAILEANU, L.; STOFFEL, K. Theoretical comparison between the gini index and information gain criteria. *Annals of mathematics and artificial intelligence*, p. 77 – 93, Oct. 2004.
- REZENDE, S. O.; PUGLIESE, J. B.; AO, F. M. V. *Sistemas baseados em conhecimentos, sistemas inteligentes*. [S.l.]: Editora Manole, 2003.
- RICH, E.; KNIGHT, K. *Artificial intelligence*. 2. ed. United States of American: McGraw-Hill, 1991. 640 p.
- ROKACH, L.; MAIMON, O. *Data mining with decision trees: theory and applications. Series in machine perception and artificial intelligence*. 2. ed. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2008. 244 p.
- ROSENBLATT, F. *Principles of neurodynamics: perceptrons and the theory of brain mechanisms*. Washington: Spartan Books, 1962. 616 p.
- ROYTELMAN, I.; GANESAN, V. Coordinated local and centralized control in distribution management systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, v. 15, n. 2, p. 718 – 724, Apr. 2000.
- RUSSELL, S. J.; NORVIG, P. *Artificial intelligence: a modern approach*. 3. ed. New Jersey: Pearson, 2009. 1152 p.
- SABILLÓN, C.; FRANCO, J. F.; RIDER, M. J.; ROMERO, R. A new methodology for the optimal charging coordination of electric vehicles considering vehicle-to-grid technology. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Piscataway, v. 7, n. 2, p. 596–607, April 2016. ISSN 1949-3029.

- SABILLÓN, C. F.; FRANCO, J. F.; RIDER, M. J.; ROMERO, R. A milp model for optimal charging coordination of storage devices and electric vehicles considering v2g technology. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENT AND ELECTRICAL ENGINEERING (EEEIC), 15., 2015. Rome, Italy, 2015. *Proceedings...* Piscataway: IEEE, 2015, p. 60–65.
- SAHA, M. M.; DAS, R.; VERHO, P.; NOVOSEL, D. Review of fault location techniques for distribution systems. *Power Systems and Communications Infrastructures for the future*, Australia, v. 12, n. 2, p. 2670–2677, 2012.
- SHAABAN, M. F.; ISMAIL, M.; EL-SAADANY, E. F.; ZHUANG, W. Real-time pev charging/discharging coordination in smart distribution systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Piscataway, v. 5, n. 4, p. 1797–1807, July 2014. ISSN 1949-3053.
- SHAHID, N.; ALEEM, S. A.; NAQVI, I. H.; ZAFFAR, N. Support vector machine based fault detection and classification in smart grids. In: GLOBECOM WORKSHOPS, 2012. [S.l.], 2012. *Proceedings...* Piscataway: IEEE, 2012, p. 1526–1531. ISSN 2166-0077.
- SHANNON, C. E.; WEAVER, W. *The mathematical theory of communication*. Illinois: University of Illinois, 1971. 144 p.
- SHAWE-TAYLOR, J.; CRISTIANINI, N. *Support vector machines and other kernel-based learning methods*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 204 p.
- SILVA, M. P. S. *Mineração de dados - Conceitos, aplicações e experiência com WEKA*. Rio Janeiro: Escola regional de Informática de Rio de Janeiro, 2004.
- SILVA, M. P. S.; ROBIN, J. R. *SKDQL - Uma linguagem declarativa de especificação de consultas e processos para descoberta de conhecimento em bancos de dados e sua implementação*. [S.l.]: UFPE, 2003.
- SUNIL, S.; VISHWAKARMA, D. N. Intelligent techniques for fault diagnosis in transmission lines 2014: an overview. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT DEVELOPMENTS IN CONTROL, AUTOMATION AND POWER ENGINEERING (RDCAPE), 2015. Noida, 2015. *Proceedings...* Piscataway: IEEE, 2015, p. 280–285.
- TAN, Y.; WANG, J. A support vector machine with a hybrid kernel and minimal vapnik-chervonenkis dimension. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, Piscataway, v. 16, n. 4, p. 385–395, April 2004. ISSN 1041-4347.
- TANG, L.; RIZZONI, G.; ONORI, S. Energy management strategy for hevs including battery life optimization. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Piscataway, v. 1, n. 3, p. 211–222, Oct 2015.
- TANG, Y.; ZHONG, J.; BOLLEN, M. Aggregated optimal charging and vehicle-to-grid control for electric vehicles under large electric vehicle population. *IET Generation, Transmission Distribution*, Piscataway, v. 10, n. 8, p. 2012–2018, 2016. ISSN 1751-8687.
- TAO, X.; RENMU, H.; PENG, W.; DONGJIE, X. Applications of data mining technique for power system transient stability prediction. *Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies*, Beijing, v. 1, n. 1, p. 389–392, Apr. 2004.

- THOTA, L. S.; BADAWY, A. S.; CHANGALASETTY, S. B.; GHRIBI, W. Classify vehicles: classification or clusterization? In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CIRCUITS, POWER AND COMPUTING TECHNOLOGIES (ICCPCT), 2015]. Nagercoil, 2015. *Proceedings...* Piscataway: IEEE, 2015, p. 1–7.
- TRIPPE, A.; MASSIER, T.; HAMACHER, T. Optimized charging of electric vehicles with regard to battery constraints - case study: Singaporean car park. In: ENERGYTECH, 2013. Cleveland, 2013. *Proceedings...* Piscataway: IEEE, 2013, p. 1–6.
- TSO, S. K.; LIN, J. K.; HO, H. K.; MAK, C. M.; YUNG, K. M.; HO, Y. K. Data mining for detection of sensitive buses and influential buses in a power system subjected to disturbances. *IEEE Transactions on Power Systems*, Beijing, v. 19, n. 1, p. 563–568, Feb 2004. ISSN 0885-8950.
- VALIQUETTE, B.; TORRES, L.; MUKHEDKAR, D. An expert system based diagnosis and advisor tool for teaching power system operation emergency control strategies. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 6, n. 3, p. 1315–1322, Aug 1991. ISSN 0885-8950.
- VAPNIK, V. N. *Statistical learning theory*. New York: Wiley-Interscience, 1998. 768 p.
- VASSENA, S.; MACK, P.; ROUSEAUX, P.; DRUET, C.; WEHENKEL, L. A probabilistic approach to power system network planning under uncertainties. In: POWER TECH CONFERENCE, 2003. Bologna, 2003. *Proceedings...* Piscataway: IEEE, 2013, p. 6 pp. Vol.2–.
- VENKATESAN, R.; BALAMURUGAN, B. A real-time hardware fault detector using an artificial neural network for distance protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, v. 16, n. 1, p. 75 – 82, Jan. 2001.
- VIAWAN, F. A.; KARLSSON, D. Voltage and reactive power control in systems with synchronous machine-based distributed generation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, v. 23, n. 2, p. 1079 – 1087, Jan. 2008.
- VILLACCI, D.; BONTEMPI, G.; VACCARO, A. An adaptive local learning-based methodology for voltage regulation in distribution networks with dispersed generation. *IEEE Transactions On Power Systems*, Piscataway, v. 21, n. 3, p. 1131 – 1140, Aug. 2006.
- VILLALOBOS, J. G. ia; ZAMORA, I.; IN, J. I. S. M.; ASENSIO, F. J.; APERRIBAY, V. Plug-in electric vehicles in electric distribution networks: a review of smart charging approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, Kidlington, v. 38, p. 717–731, 2014. ISSN 1364-0321.
- WANG, B.; DONG, X.; BO, Z.; KLIMEK, A. Impedance phase faults location algorithm for uhv transmission lines. In: IEEE/PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION: LATIN AMERICA, 2008. Bogotá, 2008. *Proceedings...* Piscataway: IEEE, 2008, p. 1–4.

- WANG, N.; ARAVINTHAN, V.; DING, Y. Feeder-level fault detection and classification with multiple sensors: A smart grid scenario. In: WORKSHOP ON STATISTICAL SIGNAL PROCESSING (SSP), 2014. Gold Coast, 2014. *Proceedings...* Piscataway: IEEE, 2014, p. 37–40. ISSN 2373-0803.
- WANG, R.; XIAO, G.; WANG, P. Hybrid centralized-decentralized (hcd) charging control of electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Piscataway, v. 66, n. 8, p. 6728–6741, Aug 2017. ISSN 0018-9545.
- WERBOS, P. J. Computational intelligence for the smart grid-history, challenges, and oportunities. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, Piscataway, v. 6, n. 3, p. 14–21, Aug 2011. ISSN 1556-603X.
- WINSTON, P. H. *Artificial intelligence*. 3. ed. New York: Pearson, 1992. 737 p.
- WITTEN, I. H.; FRANK, E. *Data mining: practical machine learning tools with JAVA implementations*. United States of America: Morgan Kaufmann Publisher, 2000. 558 p.
- WITTEN, I. H.; FRANK, E. *Data mining: practical machine learning tools and techniques*. 3. ed. United States of America: Morgan Kaufmann Publisher, 2011. 664 p.
- WITTEN, I. H.; FRANK, E.; HALL, M. A.; PAL, C. J. *Data mining: practical machine learning tools and techniques*. 4. ed. [S.l.]: Elsevier Science, 2016. 654 p. (The Morgan Kaufmann Series in Data Management Systems). ISBN 9780128043578.
- WOLLENBERG, B. F. Feasibility study for an energy management system intelligent alarm processor. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 1, n. 2, p. 241 – 247, 1986.
- YILMAZ, M.; KREIN, P. T. Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Piscataway, v. 28, n. 5, p. 2151–2169, May 2013. ISSN 0885-8993.
- ZHANG, F.; LIANG, J.; ZHANG, L.; YUN, Z. A new fault location method avoiding wave speed and based on traveling waves for ehv transmission line. In: THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRIC UTILITY DEREGULATION AND RESTRUCTURING AND POWER TECHNOLOGIES, 2008. Nanjing, 2008. *Proceedings...* Nanjing, 2015, p. 1753–1757.
- ZHAO, Y.; ZHANG, Y.; SATULURI, N.; KUPPA, M. R. Comparison of decision tree methods for finding active objects. *National Astronomical Observatories, Advances of Space Research*, Beijing, v. 1, n. 1, p. 1 – 10, Jul. 2007.