

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

Júlio César Ribeiro

**UM NOVO CONCEITO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL BASEADO NAS REDES
DA LÓGICA PARACONSISTENTE ANOTADA DE DOIS-VALORES PARA
TRATAMENTO DE INCERTEZAS NA ESTIMATIVA DE SEÇÃO EM FALTA DO
SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA**

**Santa Maria, RS
2022**

Júlio César Ribeiro

**UM NOVO CONCEITO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL BASEADO NAS REDES
DA LÓGICA PARACONSISTENTE ANOTADA DE DOIS-VALORES PARA
TRATAMENTO DE INCERTEZAS NA ESTIMATIVA DE SEÇÃO EM FALTA DO
SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Elétrica**. Defesa com participação por videoconferência.

Orientador: Ghendy Cardoso Junior, Dr. Eng.

Santa Maria, RS
2022

Ribeiro, Júlio César

UM NOVO CONCEITO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL BASEADO
NAS REDES DA LÓGICA PARACONSISTENTE ANOTADA DE DOIS
VALORES PARA TRATAMENTO DE INCERTEZAS NA ESTIMATIVA DE
SEÇÃO EM FALTA DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA / Júlio
César Ribeiro.- 2022.

101 p.; 30 cm

Orientadora: Ghendy Cardoso Junior
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, RS, 2022

1. Rede de Análise Paraconsistente 2. Rede Neural
Paraconsistente 3. Estimção da seção em Falta 4.
Diagnóstico de Falta 5. Proteção de Sistemas Elétricos I.
Cardoso Junior, Ghendy II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, JÚLIO CÉSAR RIBEIRO, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Tese) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Júlio César Ribeiro

**UM NOVO CONCEITO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL BASEADO NAS REDES
DA LÓGICA PARACONSISTENTE ANOTADA DE DOIS-VALORES PARA
TRATAMENTO DE INCERTEZAS NA ESTIMATIVA DE SEÇÃO EM FALTA DO
SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Elétrica**. Defesa com participação por videoconferência.

Aprovada em 26 de julho de 2022

Ghendy Cardoso Junior, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Aécio de Lima Oliveira, Dr. (UFSM)

Antônio Carlos Duarte Ricciotti, Dr. (UNIR)
(Participação por videoconferência)

Paulo Cícero Fritzen, Dr. (UTFPR-CT)
(Participação por videoconferência)

Fernando Guilherme Kaehler Guarda, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS

2022

DEDICATÓRIA

Ao meu anjo João Lucas; à Patrícia Mara Cabral de Vasconcellos, pelo
companheirismo e paciência; à minha princesa Ana Júlia Cabral de
Vasconcellos Ribeiro; e aos meus pais Lúcia Helena Reis Ribeiro e José
Agostinho Ribeiro;

AGRADECIMENTOS

Aos professores da UFSM, Lenois Mariotto, Diego Berlezi Ramos, pelo incentivo, sugestões e contribuições desde o mestrado. E em especial, ao Professor Ghendy Cardoso Junior, pela orientação desde 2012 e, mais do que isto, pela confiança e pela compreensão nos momentos mais difíceis do doutorado;

Aos Coordenadores do DINTER (UNIR/UFSM), professores: saudoso Carlos Alberto Tenório de Carvalho Júnior, Antônio Carlos Duarte Ricciotti, Viviane Barrozo da Silva e José Renes Pinheiro;

Ao Departamento de Engenharia Elétrica, por compreender a importância da qualificação de seus docentes e à Universidade Federal de Santa Maria – UFSM;

À Fundação de Amparo ao Desenvolvimento das Ações Científicas e Tecnológicas e à Pesquisa (FAPERO), pela contribuição da bolsa de pesquisa.

Aos meu sogro Mário Cabral e Benedita (carinhosamente, Dona Cissa);

À família (irmãos, sobrinhas, sobrinhos, cunhadas, cunhados) que torcem por mim e que são a base emocional de minhas conquistas;

Aos amigos de cerveja que nem sabem o quanto contribuíram para a realização deste trabalho (Lagoinha – SP, Santa Maria – RS e Porto Velho – RO);

Por fim, às pessoas mais integras e amorosas que ILUMINAM A MINHA VIDA: minha mãe **Lúcia Helena Reis Ribeiro**. meu pai **José Agostinho Ribeiro**; minha esposa **Patrícia Mara Cabral de Vasconcellos**; minha filha **Ana Júlia Cabral de Vasconcellos Ribeiro** (minha vida).

RESUMO

UM NOVO CONCEITO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL BASEADO NAS REDES DA LÓGICA PARACONSISTENTE ANOTADA DE DOIS-VALORES PARA TRATAMENTO DE INCERTEZAS NA ESTIMATIVA DE SEÇÃO EM FALTA NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

AUTOR: JÚLIO CÉSAR RIBEIRO

ORIENTADOR: GHENDY CARDOSO JUNIOR

Esta tese propõe um novo conceito de inteligência artificial baseada em uma lógica contemporânea e não clássica chamada de lógica paraconsistente anotada de dois valores (LPA2v) aplicada para estimativa de seção em falta no sistema elétrico de potência. A estimativa de uma seção em falta é um problema de tomada de decisão, pois, em condições elétricas anormais, um grande volume de alarmes é gerado em um curto espaço de tempo. Cabe ao operador do centro de controle tomar a decisão mais adequada para isolar a seção em falta. Neste contexto, a importância deste trabalho é desenvolver uma metodologia que auxilie o operador na tomada de decisões em situações de estresse. Além disso, considerando que não há relatos na literatura da LPA2v para estimativa de seção em falta, o trabalho contribui no aspecto inovador. Sua inovação está na abordagem do problema porque, ao contrário das metodologias convencionais que estabelecem soluções binárias (seção em falta é 1 e não falta é 0), a LPA2v admite incertezas na sua própria tomada de decisão. Desta forma, é possível garantir uma maior confiabilidade nas soluções repassadas para o operador pois, na existência de uma solução incerta, evita decisões precipitadas no binário 1. A LPA2v é fundamentada em evidências e, quanto mais evidências obtiver em um cenário de falta, mais equânimes serão os diagnósticos/soluções. Para extração das evidências, foram utilizadas três funções heurísticas que empregam regras de inferências a partir dos alarmes reportados no sistema de supervisão e aquisição de dados (SCADA). O uso de três funções evita a dependência de valores probabilísticos ou empíricos. Outrossim, foram desenvolvidas duas redes paraconsistentes, ambas extraindo evidências das três funções heurísticas. A primeira chamada de rede de análise paraconsistente com LPA2v foi testada em um subsistema de 138/203 kV da região sul do Brasil e seus resultados foram comparados com modelo de métodos exatos para otimizar soluções. A segunda chamada de rede neural artificial paraconsistente analítica foi testada em sistema de transmissão de 345 kv e foi comparada com três modelos de lógicas proposicionais que incorporam valores de intervalos *fuzzy* e redes neurais pulsante. Por fim, ambas as redes paraconsistentes apresentaram: 1- robustez e resiliência nos resultados, pois nos casos de falta com alarmes falsos e falhos, detectaram soluções incertas como era de se esperar; 2- fácil implementação em sistemas elétricos distintos, pois dispensa treinamentos e construções elaboradas das regras de inferências ou padrões; 3- intuitividade na estimação de falta no SEP, pois vai além dos métodos que oferecem soluções convencionais (0 ou 1) para o operador do sistema.

Palavra-chave: Rede de Análise Paraconsistente. Rede Neural Paraconsistente. Estimação da seção em Falta. Diagnóstico de Falta. Proteção de Sistemas Elétricos. Incerteza.

ABSTRACT

A NOVEL CONCEPT OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE BASED ON PARACONSISTENT ANNOTATED LOGIC OF TWO-VALUES NETWORKS FOR TREATMENT OF UNCERTAINTY IN THE FAULT SECTION ESTIMATION IN AN ELECTRICAL POWER SYSTEM

AUTHOR: Júlio César Ribeiro

ADVIDOR: Ghendy Cardoso Junior

This thesis proposes a novel concept of artificial intelligence based on a contemporary and non-classical logic called Paraconsistent Annotated Logic of two-values (PAL2v) applied on fault section estimation in an electric power system. The fault section estimation is a decision-making problem because, under abnormal electrical operating conditions, a large volume of alarms are generated in a short time. It is up to the control center operator to make the most appropriate decision to isolate the fault section. In this context, the importance of this work is to develop a methodology that aids the operator in decision making in stressful situations. In addition, considering that there are no reports in the literature of LPA2v for fault section estimation, the work contributes to the innovative aspect. Its innovation lies on the problem's approach, since unlike conventional methodologies that establish binary solutions (fault section is 1 and not fault is 0), LPA2v admits uncertainties in its own decision making. Likewise, it is possible to ensure higher reliability in the solutions passed to the operator, because in the presence of an uncertain solution, it avoids hasty decisions in binary 1. LPA2v is evidence-based, and the more evidence it obtains for a fault scenario, the more equitable the diagnoses/solutions will be. To extract the evidence, three heuristic functions were used that employ inference rules using reported alarms from Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA). The use of three functions avoids dependence on probabilistic or empirical values. Furthermore, two paraconsistent networks were developed, both extracting evidence from the heuristic functions. The first paraconsistent analysis network call with LPA2v was tested on a 138/203 kV subsystem in southern Brazil and its results were compared with exact mathematical models to solution optimizations. The second analytical paraconsistent artificial neural network call was tested in a 345 Kv transmission system and was compared with three propositional logic models that incorporate fuzzy interval values and spiking neural network. Finally, both paraconsistent networks showed: 1- robustness in the comparisons of results, because in cases of false and failed alarms, they detected uncertain solutions as expected; 2- easy implementation in different electrical systems, as it does not require training and elaborate construction of rules or pattern; 3- intuitiveness in estimating faults in the SEP, as it goes beyond methods that offer conventional solutions (0 or 1) for the system operator.

Keywords: Paraconsistent Analysis Network. Paraconsistent Neural Network. Fault Section Estimation. Fault Diagnosis. Protection of Electrical Systems. Uncertainty.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Estados lógicos não Extremos do Reticulado LPA2v	22
Tabela 2.2 – Estados lógicos extremos do reticulado LPA2v	22
Tabela 2.3 – Valores de Controle	22
Tabela 2.4 – Conjunto de regras	39
Tabela 2.5 – Classificação dos <i>especialistas</i>	42
Tabela 4.1 – Descrição do modelo MIP	56
Tabela 5.1 – Regras da proteção da Linha de Transmissão 230 kV	66
Tabela 5.2 – Regras da proteção do Transformador de Potência	68
Tabela 5.3 – Regras da proteção da Barra	69
Tabela 5.4 – Regras da proteção do gerador síncrono	70
Tabela 5.5 – Regras da proteção do banco de capacitor	71
Tabela 5.6 – Regras da proteção dos disjuntores	72
Tabela 5.7 – Classificações dos <i>especialistas</i> (RAP – LPA2v)	73
Tabela 5.8 – Flexibilização dos valores de controles	74
Tabela 5.9 – Regras de proteção da L (WANG, PENG, <i>et al.</i> , 2019)	78
Tabela 5.10 – Regras de proteção da B (WANG, PENG, <i>et al.</i> , 2019)	79
Tabela 6.1 – Alarmes do sistema SCADA da metodologia RAP–LPA2v	83
Tabela 6.2 – Resultados e comparações do modelo RAP–LPA2v	84
Tabela 6.3 – Demonstração do resultado da RAP–LPA2v do estudo de caso três	86
Tabela 6.4 – Demonstração dos resultados da RAP–LPA2v dos seis estudo de casos	86
Tabela 6.5 – Alarmes reportados do sistema SCADA (metodologia RNAPA)	89
Tabela 6.6 – Resultados e comparações (metodologia RNAPA)	90
Tabela 6.7 – Evidências das seções alarmadas a nível de sistema	90

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Tendência de modelos para diagnóstico de falta no sistema de potência	6
Figura 1.2 – Estatísticas baseadas em editoras de periódicos desde 2005	7
Figura 2.1 – Reticulado representado através do diagrama de Hasse	17
Figura 2.2 – Quadro unitário do plano cartesiano (QUPC).....	17
Figura 2.3 – Reticulado \mathcal{L}	18
Figura 2.4 – Mudança de Escala.....	19
Figura 2.5 – Rotação de 45°	19
Figura 2.6 – Translação	20
Figura 2.7 – Reticulado \mathcal{L}	21
Figura 2.8 – Relação dos reticulados QUPC e \mathcal{L}	22
Figura 2.9 – Reticulado da LPA2v	23
Figura 2.10 – Representação do reticulado LPA2v com ação dos valores de controles	24
Figura 2.11 – Fluxograma do algoritmo para-analisador	25
Figura 2.12 – Nó de Análise Paraconsistente	26
Figura 2.13 – Representação do G_{CR} no reticulado \mathcal{L}	26
Figura 2.14 – Fluxograma do algoritmo NAP.....	27
Figura 2.15 – RAP de configuração simples de duas NAP's	28
Figura 2.16 – Análise comparativa da célula neural artificial e célula neural biológica.....	30
Figura 2.17 – Fluxograma do algoritmo CNAPA	31
Figura 2.18 – Estrutura da RNAPA.....	31
Figura 2.19 – Unidade neural artificial paraconsistente de extração máximo e mínima.....	32
Figura 2.20 – Unidade de extração máxima para várias entradas	33
Figura 2.21 – Unidade de extração mínima para várias entradas.....	33
Figura 2.22 – RNAPA com unidade de extração máximo e mínimo	33
Figura 2.23 – Modelo de vetor entre q e d	38
Figura 3.1 – Desligamento forçado do sistema no período 07/2016 à 07/2017	45
Figura 3.2 – Geração x Consumo de energia no Brasil.....	46
Figura 3.3 – Arquitetura IEC 61850 em anel múltiplo.....	48
Figura 3.4 – Exemplo de proteção por zona.....	51
Figura 4.1 – Matriz P das regras de operação de proteção da B	56
Figura 4.2 – Demonstração do funcionamento do modelo IVFSNP <i>systems</i>	58

Figura 4.3 – Demonstração do funcionamento do modelo rWCFRSNPSs.....	59
Figura 4.4 – Demonstração do funcionamento do modelo do modelo FL.....	61
Figura 5.1 – Fluxograma da ESF da RAP – LPA2v.....	64
Figura 5.2 – Proteção da linha de transmissão de 230 kV.....	65
Figura 5.3 – Proteção do T de 138/13,8/230 kV	67
Figura 5.4 – Proteção da Barra	68
Figura 5.5 – Proteção do gerador.....	69
Figura 5.6 – Proteção do banco de capacitor.....	71
Figura 5.7 – Exemplo numérico do funcionamento da RAP-LPA2v na B	73
Figura 5.8 – Fluxograma do diagnóstico de falta RNAPA.....	75
Figura 5.9 – Fluxograma do algoritmo das seções não alarmadas	77
Figura 5.10 – Classificações dos <i>especialistas</i> (RNAPA).....	79
Figura 5.11 – Exemplo numérico do funcionamento da RNAPA na L25.....	80
Figura 6.1 – Diagrama unifilar do subsistema de energia do sul do Brasil.....	83
Figura 6.2 – Sistema de Transmissão de 345 kV	87

LISTA DE ABREVIATURAS

A3C	Asynchronous Advantage Actor-Criticator
AD	Análise discriminante
Ad	Árvore de decisão
AG's	Algoritmos Genéticos
Aneel	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	Instituto Nacional Americano de Padrões
B	Barra
BC	Banco de Capacitor
BCBSO	Binary Coded Brain Storm Optimization
BSO	Brain Storm Optimization
CB	Coded Binary
CB	Disjuntores
CCM	Casamento de Cosseno Modificado
CEI	Cleveland Electric Illuminating
CNAPA	Célula Neural Artificial Paraconsistente Analítica
CNAPA's	Células Neurais Artificiais Paraconsistente Analítica
COS	Centro de Operação do Sistema
DDPG	Deep Deterministic Policy Gradient
DEC	Duração Equivalente de Continuidade
DF	Defeito
DFSNP	Diagnóstico de Falta Baseado em Sistemas Neurais Pulsantes
DMIC	Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora
DMS	Distribution Management System
DQN	deep Q network
SEM	Energy Management System
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ESF	Estimativa de Seção em Falta
FE	Falta Externa
FE_AT	Falta Externa do lado de Alta Tensão
FE_BT	Falta Externa do lado de Baixa Tensão
FE_S1	Falta Externa na direção de S1
FE_S2	Falta Externa na direção de S2
FEC	Frequência Equivalente de Continuidade
FI	Falta Interna
FIC	Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
FL	Fuzzy Logic
G	Gerador
GOOSE	Generic Object-Oriented Substation Events
HC	Heurística Construtiva
IA	Inteligência Artificial
IEC	Internacional Electrotechnical Commission
IED	Intellegent Electronic Device
IFSNP	Intuitionistic Fuzzy Spiking Neural P
IHM	Interação Homem Máquina
ivFRSN P	Fuzzy Reasoning Spiking Neural P systems with interval-valued fuzzy
IVFSNP	intervalo de valores fuzzy em sistemas neurais pulsantes

Knn	k-Nearest Neighbors
L	Linha de Transmissão
LP	Lógica Paraconsistente
LPA	lógica paraconsistente anotada
MIP	Mixed Integer Programming
MMS	Manufacturing Message Specification
Mus	Unidades de Fusão
NAF	Normalized Advantage Functions NAF
NAP's	nós de análises paraconsistentes
NB	Naïve Bayesian
NF	Não Falta
NM	Normal
NOS	Operador Nacional do Sistema
OPGW	Optical Ground Wire
P	Proposição
P's	Proposições
PI	Programação Binária
PI	Proporcional-Integral
PNS	Proteção Não Seletiva
PPO	Proximal Policy Optimization
OS	Proteção Seletiva
QEE	qualidade da energia elétrica
QUPC	Quadro Unitário do Plano Cartesiano
RFSNP	Raciocínios Fuzzy em Sistemas Neurais Pulsantes
RL	Regressão lógica
RN	Rede Neural
RPG	Regressão por processo gaussiano
RSTP	Rapid Spanning Tree Protocol
RVS	Regressão por Vetores de Suporte
rWCFRSN	Weighted Corrective Fuzzy Reasoning Spiking Neural P systems with real
SAC	Soft-Actor-Critic
SARSA	State-Action-Reward-State-Action
SAS	Sistema de Automação de Subestação
SCADA	Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados
SE	Subestação
SE's	Sistemas Especialistas
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SE	Subestação
SIN	Sistema Interligado Nacional
SNP	Spiking Neural P systems
SSD	Sistema de Suporte a Decisão
SV	Sampled Value
SVM	support vector machine
T	Transformador de Potência
TC	Transformador de Corrente
TD3	Twin Delayed Deep Deterministic
TIC	tecnologia da informação e comunicação
TOIPM-	Método de Processamento de Informações de Ordem Temporal Baseado em
TP	Transformador de Tensão

TRPO	Trust Region Policy Optimization
UHE	Usina Hidroelétrica
UNAPE	Unidade neural artificial Uaraconsistente de extração máxima
UNAPE	unidade neural artificial paraconsistente de extração mínima
UTR	Unidade Terminais Remotas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Considerações gerais	1
1.2	Objetivo	3
1.3	Motivação	4
1.4	Contribuições	4
1.5	Estado-da-arte	5
1.5.1	Modelos baseados no conhecimento	8
1.5.2	Modelos de otimização	9
1.5.3	Modelos de lógicas proposicionais.....	10
1.5.4	Modelos LPA2v.....	12
1.6	Estrutura do trabalho.....	13
2	INTRODUÇÃO DA LPA2v	16
2.1	Lógica paraconsistente anotada de dois valores (LPA2v).....	16
2.1.1	Proposição e anotações da LPA2v.....	17
2.1.2	Relação algébrica entre QUPC e o novo reticulado \mathcal{L}	18
2.1.3	Obtenção de μ e λ a partir de G_c e G_{ct}	21
2.1.4	Construção do reticulado da LPA2v e estados lógicos resultantes	21
2.1.5	Valores de controle do reticulado LPA2v	23
2.1.6	Algoritmo para-analisador da LPA2v	24
2.2	Rede de análise paraconsistente (RAP) para tratamento de incerteza.....	25
2.2.1	Determinação das variáveis da NAP	26
2.2.2	Algoritmo da NAP.....	27
2.2.3	Configuração da RAP	28
2.3	Rede neural artificial paraconsistente analítica (RNAPA).....	29
2.3.1	Algoritmo da CNAPA	31
2.3.2	Estrutura da RNAPA	31

2.3.3	Unidade neural artificial paraconsistente de extração de mínimo e máximo.....	32
2.4	Determinação dos <i>especialistas (e)</i>	34
2.4.1	Heurística do teorema de Bayes	35
2.4.2	Heurística construtiva (<i>HC</i>).....	36
2.4.3	Função do cosseno modificado (<i>CM</i>).....	37
2.5	Extração das evidências do <i>e</i>	39
2.5.1	Composição do conjunto de evidências.....	42
2.6	Considerações finais	43
3	FUNDAMENTAÇÕES TEÓRICAS	44
3.1	Desligamento não programado	44
3.1.1	Dados dos desligamentos não programados.....	45
3.2	Digitalização das SEs do SEP.....	47
3.2.1	Barramento de processo da figura 3.3	48
3.2.2	Barramento de estação da figura 3.3 conectado em anel.....	49
3.2.3	Considerações do SAS.....	50
3.3	Fundamentações de proteção e manobra.....	50
3.4	Considerações finais.....	52
4	MÉTODOS INVESTIGADOS	54
4.1	Considerações gerais.....	54
4.2	Método investigado MIP.....	55
4.3	Método investigado IVFSNP <i>systems</i>	57
4.4	Método investigado rWCFRSNPSs	59
4.5	Método investigado FL	60
4.6	Considerações finais.....	61
5	METODOLOGIAS PROPOSTAS	62
5.1	Considerações gerais.....	62
5.2	Formalização da metodologia RAP-LPA2v.....	63

5.2.1	Regras de proteção empregadas na base de dados da RAP–LPA2v	65
5.2.1.1	Filosofia de proteção da Linha de 230 kV	65
5.2.1.2	Regras de proteção da Linha de 230 kV	66
5.2.1.3	Filosofia de proteção do Transformador de 138/13,8/230 kV	66
5.2.1.4	Regras de proteção do Transformador.....	67
5.2.1.5	Filosofia de proteção da B	68
5.2.1.6	Regras de proteção da barra.....	68
5.2.1.7	Filosofia de proteção do gerador síncrono	69
5.2.1.8	Regras de proteção do gerador síncrono de 13,8 kV	70
5.2.1.9	Filosofia de proteção do BC	70
5.2.1.10	Regras de proteções do banco de capacitor	71
5.2.1.11	Proteção do disjuntor	72
5.2.1.12	Regras de proteções dos disjuntores	72
5.2.2	Exemplo numérico da RAP–LPA2v	72
5.3	Aplicação da Metodologia RNAPA.....	75
5.3.1	Regras de proteção empregadas na base de dados da RNAPA	78
5.3.2	Exemplo numérico da RNAPA	79
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	82
6.1	Resultados e discussões da RAP–LPA2v	82
6.1.1	Considerações dos resultados apresentados da RAP–LPA2v	86
6.2	Resultados e discussões da RNAPA	87
6.2.1	Considerações dos resultados apresentados da RNAPA	90
6.3	Considerações finais	91
7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	92
7.1	Conclusões da metodologia RAP–LPA2v	92
7.2	Conclusões da metodologia RNAPA.....	92
7.3	Sugestões para trabalhos futuros	93

7.4	Publicações de artigo submetidos em revistas internacionais que fundamentaram esta pesquisa.....	93
8	Referências	94

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentadas algumas considerações relacionadas ao tema “estimativa de seção em falta (ESF) no sistema elétrico de potência (SEP)” decorrentes das interrupções de energia não programadas, assim como uma breve informação referente às estatísticas de desligamento forçado no SEP brasileiro. Alguns aspectos relevantes referentes a ESF são apresentados a fim de justificar o objetivo, motivação e contribuição deste trabalho. Assim como, é apresentada uma base referente ao estado da arte para demonstrar que a ESF é uma das principais linhas de pesquisa do SEP. Por fim, é demonstrado como este trabalho está estruturado.

1.1 Considerações gerais

O setor elétrico vem demandando, cada vez mais, por ferramentas externas de inteligência artificial (IA) capazes de assegurar, dentro do possível, a continuidade do fornecimento de energia, minimizando os impactos das interrupções não programadas. Essas interrupções são consideradas anormais e são, muitas vezes, inevitáveis. Assegurar a continuidade requer a capacidade de tolerar e superar vários tipos de falhas de menor e maior gravidade. É de fundamental importância um sistema que proteja os equipamentos que compõem o setor elétrico, pois tal proteção permite detectar e isolar o equipamento defeituoso, garantindo assim a continuidade do fornecimento de energia.

No Brasil, o Operador Nacional do Sistema (ONS) é o órgão responsável pela coordenação da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional (SIN) e pelo planejamento da operação dos sistemas isolados, sob a fiscalização da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel)¹. A Aneel é responsável pela qualidade da energia elétrica ao consumidor e tal qualidade é mensurada através de indicadores de continuidade coletiva como: duração equivalente de continuidade (DEC) e frequência equivalente de continuidade (FEC); e os indicadores de continuidades individuais como: frequência de interrupção individual por unidade consumidora (FIC) e duração máxima de interrupção continuada por unidade consumidora (DMIC). Além desses indicadores, as empresas

¹ “Estabelecer os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica – QEE, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço.” (MÓDULO 8 – QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 2008, p. 3). O Módulo 8 visa medir e avaliar de forma quantitativa a qualidade, o serviço e o desempenho do sistema elétrico, acarretando em multas ou a suspensão do direito de prestação de serviço.

também podem ser autuadas em descontos na parcela variável por indisponibilidade (PVI)². Todos esses indicadores são influenciados nos casos de ocorrências de interrupções não programadas e servem como parâmetros de penalidade nas empresas concessionárias de energia.

Manter a qualidade e continuidade da energia conforme estabelecido pela Aneel é um processo não trivial, pois exige experiência dos operadores do centro de operação do sistema (COS) para analisar os inúmeros alarmes reportados após uma perturbação. A quantidade de alarmes reportados pelo Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA) está relacionada com a complexidade da perturbação. Como por exemplo, destacam-se:

- ✓ Em 2002 uma concessionária inglesa de energia, denominada de SP PowerSystems registrou 15.000 alarmes em um período de 24 horas decorrente de uma tempestade (DAVIDSON, MCARTHUR, *et al.*, 2006);
- ✓ FRITZEN (2012, p. 13) destacou que em 2007, a queda de duas linhas de transmissão da central elétrica de Furnas ocasionou o blecaute dos estados de Rio de Janeiro e Espírito Santo (a ONS não transcreveu no relatório os alarmes reportados);
- ✓ Em novembro de 2009 uma perturbação complexa atingiu 18 estados do Brasil em decorrência de três curtos-circuitos monofásicos, praticamente simultâneos no SIN. Tal perturbação resultou em aproximadamente 83 alarmes em um período de 1 minuto e 47 segundos (ONS, 2009, p. 28, tabela 4.1, linha 70);
- ✓ Em março de 2018 uma perturbação decorrente da atuação indevida do disjuntor da subestação (SE) Xingu no Pará. Tal atuação ocorreu porque foi colocada proteção indevida de sobrecorrente de 4.000 A, valor esse abaixo da corrente nominal o que acarretou na abertura dos disjuntores quando o fluxo de carga aproximou a 4.000 MW. Ao menos 8 disjuntores abriram em um período de 3 segundos, atingindo ao menos 12 estados do Brasil (ONS, 2018).
- ✓ Em novembro de 2020 uma perturbação no transformador TR1 230/69/13,8 kV da subestação (SE) Macapá ocorreu após um curto-circuito na fase B do

² Resolução Normativa N° 270/2007 PVI (Parcela Variável por Indisponibilidade) estabelece a parcela a ser deduzida do PB (Pagamento Base) das concessionárias de transmissão, responsáveis pelo desligamento programado e não programado do SEP.

transformador seguido de explosão e incêndio, acarretando em, aproximadamente, 11 alarmes em um período de 3,9 segundos, desligamento da usina hidroelétrica (UHE) de Coaracy Nunes e de 95% das cargas (ONS, 2020, p. 31, tabela 3, linha 21).

Verifica-se que a complexibilidade da perturbação dificulta uma análise precisa do operador devido ao grande volume de alarmes reportados, bem como, dificulta o restabelecimento rápido do sistema de energia. Assim, investimentos e ampliações no SEP se tornam prioritários e imprescindíveis para minimizar as perturbações. Tais investimentos e ampliações consistem em modernas ferramentas computacionais que possibilitam, em tempo hábil, localizar e diagnosticar a causa do problema que originou a perturbação e, ao mesmo tempo, auxiliar o operador a gerenciar e monitorar as contingências do SEP.

Englert, Chowdhury e Grigsby (1991) destacaram que um dos principais objetivos e dificuldades do operador do sistema de energia é manter a sua continuidade e que a ESF é essencial para a manutenção, pois é impossível evitar falhas nos equipamentos ou operações incorretas por erro humano. Para CARDOSO JUNIOR (2003, p. 2) “Outra dificuldade na análise das informações são as falhas em unidades terminais remotas (UTR) nos canais de comunicação ou na aquisição de dados, implicando em informação incompleta ou corrompida, o que dificulta ainda mais a tarefa de diagnóstico”. Já, PAUL BARRINGER (2004) demonstrou que a probabilidade de falha humana em uma sala de controle para diagnosticar corretamente um evento é de 100% em um período de 1 minuto e de 0,01% após 15 minutos;

1.2 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo geral oferecer aos operadores do COS, métodos alternativos de IA que permitam, dentro do possível, analisar os alarmes para agilizar a ESF após a ocorrência de uma contingência. Além disso, fazer com que os métodos propostos assegurem, dentro do possível, a eficácia e fidelidade das informações referentes a ESF. A eficácia e fidelidade devem ocorrer principalmente em situações de estresse quando da ocorrência de faltas complexas como faltas múltiplas, assim como em casos de enxurrada de enviados ao COS.

Como objetivos específicos destacam-se:

- ✓ utilizar, pela primeira vez, uma categoria de lógica não clássica para o desenvolvimento de dois métodos de IA dedicada a ESF no SEP;
- ✓ estabelecer a ESF de forma ponderada / cautelosa, ou seja, disponibilizar para o operador não apenas a seção defeituosa, mas também, informar possíveis incertezas que possam ocorrer na ESF;
- ✓ comparar metodologias distintas a partir dos conceitos da lógica paraconsistente que melhor se adequa a ESF;
- ✓ realizar testes computacionais a fim de avaliar a eficácia das metodologias distintas em sistemas de potências distintos.

1.3 Motivação

Considerando a quantidade de alarmes gerados após uma interrupção não programada e considerando a capacidade limitada dos operadores em processar de forma rápida e eficaz a origem desses alarmes, o uso de IA tornou-se fundamental no COS. Ao longo de décadas, observaram-se alguns métodos de IA que mais se destacaram nas literaturas como: sistemas especialistas, redes bayesianas, redes neurais, métodos de otimização, redes petri e lógica *fuzzy*.

Embora as inteligências artificiais (IAs) mencionadas apresentem uma boa eficiência no processamento de alarmes e ESF, essas carecem de uma característica que permita lidar com suas próprias incertezas. Levando em conta que após a análise dos alarmes pode-se obter mais de uma solução plausível, utilizar métodos que prevaleçam de soluções ditas como certas e únicas podem conduzir o operador a soluções equivocadas. Assim, destacam-se duas motivações principais:

- ✓ Existência de uma lacuna na literatura referente a modelos aplicados no SEP motiva a criação de métodos que permitam detectar as incertezas em seus resultados, ou seja, as incertezas na ESF (exceto RIBEIRO, CARDOSO JR., *et al.*, 2021);
- ✓ A robustez da LPA2v motiva a sua aplicação no SEP para ESF;

1.4 Contribuições

Considerando que todos os modelos estão sujeitos a soluções incertas referentes a ESF,

este trabalho tem como contribuição principal, apresentar um novo conceito de interpretação da solução do problema, ou seja, da interpretação da ESF. Nesse aspecto, as incertezas detectadas são disponibilizadas ao operador a fim de garantir a fidelidade e prudência das informações.

Em suma, tendo em vista que, ao final, a pesquisa é uma experiência subjetiva e que a ESF é um processo não trivial devido às diversidades de alarmes, o que se pretende neste trabalho não é garantir a assertividade da ESF, mas sim proporcionar à ciência e aos operadores do sistema, novas formas e alternativas de interpretar e indicar a ESF. Assim, na existência de uma solução incerta, cabe ao operador reanalisar outras informações antes de reestabelecer o fornecimento de energia.

1.5 Estado-da-arte

Levando em conta que este trabalho se concentra em temas como ESF no SEP e diagnóstico de falta no SEP, as literaturas consultadas concentram-se nesses temas. Ambos os temas são semelhantes em sua essência, pois tem como base a localização do desligamento não programado.

Há décadas, pesquisadores vêm intensificando seus estudos na tentativa de solucionar, em tempo hábil, a restauração do fornecimento de energia. Englert, Chowdhury e Grigsby (1991) realizaram uma investigação em laboratório para detectar faltas em linhas de transmissão elétrica e descreveram, nessa pesquisa, a importância do tema em relação à continuidade do serviço:

Um dos principais objetivos dos sistemas de energia elétrica de utilidade pública é manter um alto nível de continuidade de serviço. É impossível evitar a falha acidental ou a operação incorreta devido a erro humano e conexões acidentais ou "flash over" entre os fios ou a partir de fios de terra ao longo dos sistemas de entrega. Detecção e análise da ocorrência de tais falhas nestes sistemas são essenciais para a manutenção em tempo útil de serviço (ENGLERT, CHOWDHURY e GRIGSBY, 1991, p. 919, tradução nossa).

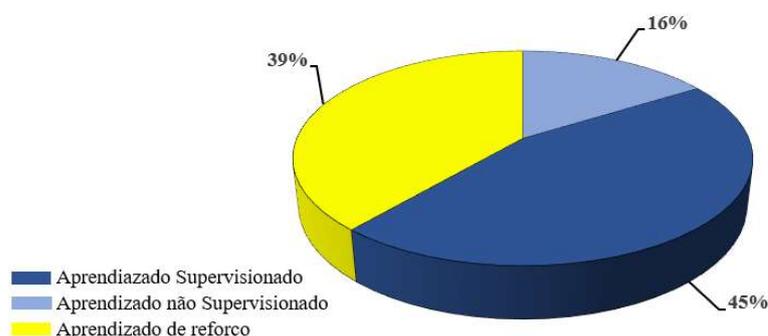
DY LIACCO (1967) apresentou de forma discursiva as condições necessárias para um projeto de controle e melhoria de confiabilidade do sistema de geração e transmissão. Na primeira parte do trabalho são discutidas as estratégias gerais para manter a confiabilidade de um sistema; na segunda parte discute-se a implementação prática do projeto de controle e melhoria na empresa *Cleveland Electric Illuminating* (CEI). Posteriormente, DY LIACCO e

KRAYNAK (1969) desenvolveram um modelo lógico que analisa as operações dos disjuntores e dos relés de proteção em um sistema de potência. O modelo é simples por utilizar somente variáveis lógicas e declarações lógicas dispensando elaborações de operações matemáticas mais complexas.

Desde então, houve uma explosão de trabalhos relacionados à confiabilidade no sistema de energia com mais de 2100 documentos incluindo jornais, anais de conferências e capítulo de livros (FERREIRA, ZANGHI, *et al.*, 2016). O trabalho de FERREIRA, ZANGHI, *et al.* contabilizou documentos entre 1939 a 2014.

Já VAISH, DWIVEDI, *et al.* (2021) apresentaram uma revisão abrangente referente a utilização de modelos de aprendizado de máquina para diagnóstico de faltas no sistema de potência. Com base na figura 7 do trabalho de VAISH, DWIVEDI, *et al.* (2021), é possível quantificar três possíveis tendências de modelos conforme mostra a Figura 1.1.

Figura 1.1 – Tendência de modelos para diagnóstico de falta no sistema de potência



Os modelos de cada tendência são:

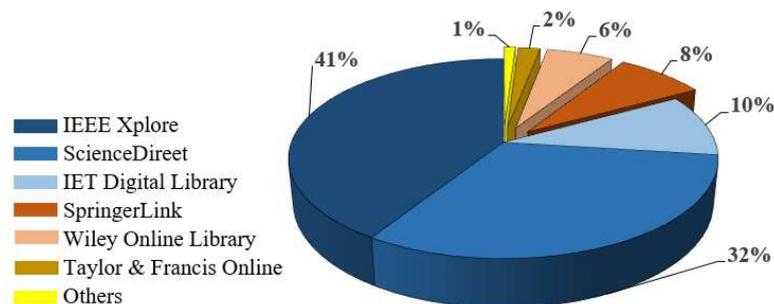
- ✓ **Aprendizado não supervisionado:** K-médias, K-medoides, Agrupamento hierárquico, Fuzzy de agrupamento e Modelo misto gaussiano;
- ✓ **Aprendizado supervisionado:** Regressão lógica (RL), k-vizinhos mais próximos (do inglês, *k-Nearest Neighbors – kNN*), Máquina de vetores de suporte (do inglês *support vector machine – SVM*), Rede neural (RN), Naïve Bayesian (NB), Análise discriminante (AD), Árvore de decisão (AD), Conjunto de métodos (do inglês *ensemble methods*), Regressão Linear, Regressão não linear, Regressão por processo gaussiano (RPG), Regressão por vetores de suporte (RVS),

Modelos linear generalizado e Árvores de regressão;

- ✓ **Aprendizado de reforço:** Monte Carlo, Aprendizado por qualidade (do inglês *Quality-learning* – *Q-learning*), Estado-ação-estado-ação-recompensa com traço de elegibilidade (do inglês *state-action-reward-a state with eligibility traces* – *Q-learning-lambda*), Estado-ação-estado-ação-recompensa (do inglês *state-action-reward-state-action* – *SARSA*), Aprendizado por reforço profundo (do inglês *deep Q network* – *DQN*), Gradiente de política determinista profunda (do inglês *deep deterministic policy gradient* – *DDPG*), Ator-crítico de vantagens assíncrona (do inglês *asynchronous advantage actor-critic* – *A3C*), Função de vantagens normalizadas com Q-learning (*Q-learning with normalized advantage functions* – *NAF*), Otimização de política por região de confiança (do inglês *trust region policy optimization* – *TRPO*), Otimização de política proximal (do inglês *proximal policy optimization* – *PPO*), Gradiente de política determinística profunda com atraso duplo (do inglês *twin delayed deep deterministic policy gradient* – *TD3*) e Ator-crítico suave (do inglês *soft-actor-critic* – *SAC*).

Os modelos citados acima podem servir como parâmetros de tendências para trabalhos futuros relacionados a faltas no sistema de potência. De outra forma, um dado interessante apresentado por VAISH, DWIVEDI, *et al* (2021), foi que ao final do trabalho, os autores citaram 190 literaturas de pesquisa revisadas publicadas desde 2005 nas diversas editoras de periódicos conforme mostra a figura 1.2. As subseções a seguir listam quatro classes de modelos.

Figura 1.2 – Estatísticas baseadas em editoras de periódicos desde 2005



1.5.1 Modelos baseados no conhecimento

Modelos baseados no conhecimento ou Sistemas Especialistas (SE's) utilizam basicamente formulações matemáticas capazes de inferir novas soluções a partir de soluções previamente conhecidas. A utilização do SE's é relativamente simples e de fácil adaptação para ESF. Para LIU E DILLON (1992), os SE's foram as primeiras ferramentas aplicadas na segurança do SEP. Os autores apresentaram centenas de pesquisas utilizando SE's nas principais áreas do SEP como: redução de alarmes, diagnóstico de falhas, restauração e monitoramento e controle de subestação, entre outros.

VAZQUEZ, CHACON e ALTUVE (1997) apresentaram um SE diagnóstico de falta em tempo real no sistema elétrico. Na primeira etapa o modelo utiliza as informações referentes ao estado de operação dos relés e disjuntores a fim de estimar o local da falta e um processador para atualizar a topologia da rede. Na segunda etapa é construída uma árvore de classificação a partir de uma base de conhecimento. Na última etapa, a seção candidata a falta é selecionada a partir de um índice de factibilidade estabelecido pelo classificador. O modelo foi testado usando informações registradas durante distúrbios reais e, praticamente em todos os casos, obtiveram índices de factibilidade que pudessem identificar a seção faltosa.

HUANG (2002) apresentou uma estimativa online de seção em falta utilizando um novo sistema de suporte à decisão SSD (do inglês *decision support system*). Basicamente, a partir das informações dos disjuntores o SSD cria automaticamente um conjunto de regras de vetores binários para representar a base de conhecimento. O diagnóstico é estabelecido a partir de uma função que infere a similaridade entre a base de conhecimento e os vetores que antecedem a base de conhecimento.

ZHAO, BAI , *et al.* (2005) também propuseram um novo sistema especialista (SE) no processamento de alarmes e ESF. Os autores destacaram que devido à dificuldade e diversidade das informações para a manutenção da base de regra, foi inserido no SE um pré-tratamento dos alarmes para fornecer maior rapidez e robustez. Um formalismo chamado de Backus-Naur (do inglês *Backus-Naur Form*) foi utilizado para permitir ao operador descrever e atualizar a base de regras.

CHEN, SHUN e LIN (2011) utilizaram uma abordagem gráfica para ESF com base no conjunto de causa e efeito para redes de transmissão de energia. O conjunto é descrito como uma ferramenta de modelagem gráfica para representar as causalidades entre as faltas e as ações necessárias dos dispositivos de proteção. A base de conhecimento é formulada por uma matriz

de regra binária; esta é constituída a partir das regras do dispositivo de proteção. Um algoritmo de inferências para operações de matrizes é constituído para relacionar a ocorrência de um evento (causa) com a matriz de regra binária (efeito). Os autores descreveram que o algoritmo de inferência é rápido, pois requer apenas operações simples de matrizes; a base de conhecimento é simples e intuitivo para ilustrar a relação entre faltas e dispositivo de proteção e viável na utilização das informações do SCADA.

Outros trabalhos utilizando SE's também contribuíram para a ESF, como: XIANGLI, MENG e YAJIE, (2014), aplicaram o SE em uma base de conhecimento construída a partir da lógica de comutação temporal dos relés e disjuntores e um mecanismo de inferência para o processo de ESF; WANG *et al.* (2015) utilizaram a representação do conhecimento e modelos de Rede Petri para diagnóstico de falta na rede elétrica; ZHANG, GE, *et al.*, (2018) elaboraram um modelo especialista capaz de diagnosticar a falta no sistema elétrico, mesmo com erros de transmissões de informações do sistema de comunicação.

1.5.2 Modelos de otimização

Para OYAMA (1992), a ESF pode ser formulada como um problema de otimização inteira não linear. O autor propôs um método que relaciona a máquina de boltzmann com a função objetiva para melhor definição das soluções. Desde então outros métodos utilizando modelos de otimização foram propostos. WEN e HAN (1995) formularam uma programação inteira binária com algoritmos genéticos (AG's) para ESF. Nesse mesmo ano, WEN, CHANG e SRINIVASAN (1995) propuseram, pela primeira vez, um método de processamento de alarmes como um problema de otimização combinatória, onde a função objetiva é responsável por elencar as seções candidatas a falta e o AG's responsável por encontrar a melhor solução que explique os alarmes reportados. Outros modelos relacionados a problemas de otimização utilizando formulações heurísticas podem ser consultados nas literaturas como: HE, CHIANG, *et al* (2009); HUANG (2002); e LEÃO, PEREIRA e MANTOVANI (2010);

FRITZEN, ZAUKE, *et al.*, (2012) apresentaram pela primeira vez um sistema híbrido que relaciona métodos heurísticos com métodos de soluções exatas para obter solução ótima do modelo a nível de sistema. Desta forma, foi utilizada a heurística construtiva (HC) para elencar cada seção candidata a falta e a programação binária (PI) para obter a solução ótima da ESF.

Posteriormente, OLIVEIRA, DE ARAÚJO *et al.*, (2016), combinaram a heurística do teorema de *bayes* com programação inteira mista (MIP do inglês, “*mixed integer*

programming”). Assim, foi possível evoluir na melhoria das soluções heurísticas referentes às seções candidatas à falta, bem como, evoluir na resposta do modelo, pois a MIP além de fornecer uma melhor solução, faz um ranqueamento dos possíveis diagnósticos a nível de sistema. Destaca-se aqui que a MIP foi um dos modelos utilizados para comparação e validação deste trabalho.

Um algoritmo de otimização de tempestade cerebral BSO, (do inglês *brain storm optimization*) com codificação binária CB, (do inglês *binary coded*) foi proposto por XIONGA, SHI, *et al.*, (2018) para ESF. O BSO é um processo no qual um grupo de indivíduos com experiências distintas se reúne para apresentar novas ideias com a finalidade de resolver um problema. Cada indivíduo da população representa uma ideia. Essas ideias são agrupadas por um algoritmo, e em seguida, são atualizadas com base na combinação de ideias próximas ou semelhantes. Em algoritmo denominado como BCBSO, cada indivíduo da população representa seções candidatas a falta; essas são codificadas como um problema de programação inteira (0 ou 1) e utilizadas para resolver a função objetivo. A função objetiva é constituída a partir da diferença entre os alarmes relatados das seções candidatas a falta e os estados esperados dos relés de proteção e disjuntores. O modelo apresentou resultados satisfatórios para ESF quando comparado com outros modelos semelhantes.

Destaca-se que, dentre as literaturas mencionadas acima referentes a modelos de otimização, o modelo MIP foi utilizado para comparar e validar os resultados deste trabalho.

1.5.3 Modelos de lógicas proposicionais

Assim como a fuzzy, a LPA2v é uma lógica proposicional que permite combinar proposições a partir de conectivos lógicos, bem como estabelecer conclusões a partir de valores de pertinências atribuídos a cada proposição. Neste sentido, um modelo que se assemelha com a LPA2v e que vem motivando pesquisadores é a modelagem gráfica chamada de raciocínios fuzzy em sistemas neurais pulsantes (RFSNP, do inglês *Fuzzy Reasoning Spiking Neural P systems*). Esse modelo assemelha-se com LPA2v por tratar-se de uma lógica não clássica; estabelece a ESF no SEP a partir de valores de pertinências. Assim, podem-se destacar resumidamente alguns trabalhos.

CHIN (2003) propôs um sistema híbrido para identificar seções em falta no SEP. O sistema utiliza uma rede de causa-efeito em paralelo com lógica *fuzzy* e é chamado de FL, do inglês “*fuzzy logic*”. A rede é uma modelagem gráfica que representa as causalidades entre

estado de operação dos relés, estado de operação dos disjuntores e falta. A relação entre o estado de operação dos relés principais e retaguarda, bem como dos disjuntores define o grau de pertinência da seção em falta. Duas formas de relação *fuzzy* são propostas neste trabalho que são: relação binária e relação coordenativas. Ambas apresentaram os mesmos resultados, bem como, as mesmas eficiências nos diagnósticos.

XIONG, SHI, *et al.* (2013) introduziram pela primeira vez o RFSNP para diagnóstico de faltas no sistema de potências. Os neurônios da RFSNP são construídos a partir da relação causa-efeito entre a seção candidata a falta e os disparos (pulso) dos dispositivos de proteção. Após o disparo, cada neurônio recebe valores de confiança *fuzzy*, o diagnóstico é estabelecido a partir do algoritmo de regras fuzzy que calcula o nível de confiança das seções candidatas a falta. Posteriormente, PENG, WANG, *et al.* (2013) utilizaram um modelo semelhante ao modelo RFSNP com seus respectivos algoritmos de regra *fuzzy* para diagnóstico de falta no transformador de potência.

Posteriormente, WANG, ZHANG, *et al.*, (2015) integraram no modelo RFSNP um algoritmo chamado de diagnóstico de falta baseado em sistema neurais pulsantes (DFSNP, do inglês, *fault diagnosis method based on fuzzy reasoning spiking neural P systems*). O algoritmo DFSNP cria conjuntos das seções alarmadas a partir das informações do SCADA, cada disparo de relés e disjuntores corresponde a um pulso e cada pulso representa um neurônio e a esse, é atribuído um valor único de pertinência *fuzzy*. Segundo os autores, o algoritmo evita a construção de grandes modelos de diagnóstico.

Já WANG, PENG, *et al.* (2019) integraram no sistema neural pulsante um conjunto de intervalo de valores *fuzzy*. Os autores intitularam o trabalho como intervalo de valores fuzzy em sistemas neurais pulsantes (IVFSNP do inglês, “*interval-valued fuzzy spiking neural P systems*”). O processamento das informações do SCADA e a criação dos conjuntos das seções alarmadas seguem os mesmos princípios propostos em WANG, ZHANG, *et al.*, (2015). Os autores concluíram que a atribuição de um intervalo de valores *fuzzy* para cada pulso contribuiu na performance dos resultados nos casos de sinais de trip incompletos ou incertos. Da mesma forma, mostrou ser mais eficiente quando comparado com números *fuzzy* convencionais (utilização de um único valor de pertinência). Outros trabalhos semelhantes para diagnóstico de falta no SEP foram propostos nas literaturas como:

- ✓ YU, WANG, *et al* (2017) propuseram o sistema neural pulsante de raciocínio *fuzzy* com valores de intervalos de números *fuzzy* (ivFRSN P systems, do

inglês, “*fuzzy reasoning spiking neural P systems with interval-valued fuzzy numbers*”);

- ✓ PENG, WANG, *et al.* (2018) propuseram intuicionista *fuzzy* em sistemas neurais pulsantes (IFSNP do inglês, “*intuitionistic fuzzy spiking neural P*”);
- ✓ (WANG, WEI, *et al.*, 2020) propuseram pesos corretivos do raciocínio *fuzzy* com números reais em sistemas neurais pulsante (rWCFRSNPSs do inglês, “*weighted corrective fuzzy reasoning spiking neural P systems with real numbers*”).

Destaca-se que além do modelo MIP, mais três modelos com lógicas proposicionais foram utilizados para comparar e validar os resultados deste trabalho, sendo: FL (CHIN, 2003), IVFSNP (WANG, PENG, *et al.*, 2019) e rWCFRSNPSs (WANG, WEI, *et al.*, 2020).

1.5.4 Modelos LPA2v

Considerando que poucas são as literaturas relacionadas a LPA2v aplicadas no SEP, as literaturas mencionadas a seguir são resultados de uma pesquisa multidisciplinar como: ciências humanas, informática, engenharia mecânica e medicina.

Com relação às literaturas apresentadas nas subseções anteriores, todas obtiveram bons resultados em seus diagnósticos, porém, observa-se que não possuem em suas essências formulações que permitam distinguir os possíveis resultados plausíveis de forma quantitativa. A análise quantitativa, ou seja, a análise do grau de pertinência de cada seção candidata a falta permite detectar e tratar as incertezas na ESF a partir de duas ou mais seções plausíveis à falta.

Já com relação aos modelos de rede neural pulsante com lógica *fuzzy*, esses assemelham-se à LPA2v por estabelecer resultados a partir do grau de pertinências de cada seção candidata à falta. No entanto, os valores de pertinência *fuzzy* utilizados em cada pulso dos relés e disjuntores são empíricos e/ou probabilísticos, o que na prática pode inviabilizar a aplicação do modelo. A fim de minimizar a inexatidão na ESF e tornar o modelo independente de valores empíricos e/ou probabilísticos, a LPA2v é eficiente na ESF por analisar o grau de pertinências de cada seção candidata à falta, bem como, permite integrar vários especialistas distintos (funções heurísticas) tornando um modelo mais robusto em termos heurísticos. A seguir, são apresentadas as literaturas multidisciplinares.

Na área da engenharia mecânica, COELHO, DA SILVA FILHO, *et al* (2019)

propuseram um controlador Proporcional-Integral (PI) híbrido com LPA2v para controlar o nível de pressão de um vaso industrial. Os autores obtiveram bons resultados quando comparado com controladores convencionais. Na área da mecânica robótica, TORRES, LAMBERT-TORRES, *et al.*, (2011) construíram um robô de controle autônomo baseado na LPA2v com redes neurais artificiais paraconsistente. Na informática, PENA, CARVALHO, *et al.*, (2017) propuseram a *correlational paraconsistent machine* para detectar anomalias no tráfego de rede de computadores; o modelo ajudou no processamento de informações contraditórias encontradas no tráfego da rede.

Na área da medicina, FONSECA, GUIDO, *et al.*, (2020) utilizaram a LPA2v para investigar patologias fonoaudiológicas como: dificuldades de falar, disfagia e câncer. Já DA SILVA FILHO, NUNES, *et al.*, (2016) aplicaram a LPA2v para apoiar médicos no diagnóstico de câncer de pele. Outros trabalhos utilizando LPA2v no apoio à medicina foram apresentados por: (ABE, HELDER e NAKAMATSU, 2014); (DA SILVA LOPES, ABE e ANGHINAH, 2010); e (DO AMARAL, TOMIATTI, *et al.*, 2018).

Na área de sistemas elétricos, RIBEIRO, JUNIOR e OLIVEIRA (2015) apresentaram pela primeira vez uma metodologia chamada de teoria da lógica paraconsistente e conjunto com o sistema de raciocínio baseado em casos para classificar o tipo de falta em um transformador de potência. DA SILVA FILHO, CAMARGO, *et al.*, (2016) construíram um simulador LPA2v para apoiar a equipe de operação na recomposição da rede de energia após uma contingência. Outros modelos LPA2v que auxiliam a melhor restauração do sistema de energia após uma contingência podem ser consultados em (MARTINS, 2003), (DA SILVA FILHO, ROCCO, *et al.*, 2006), (DA SILVA FILHO, ROCCO, *et al.*, 2007) e (DA SILVA FILHO e ROCCO, 2008). Por fim, trabalhos como previsão de perfil de carga em médio prazo e monitoramento da tensão para detectar variação e desequilíbrio de tensão foram apresentados em (FERRARA, LAMBERT-TORRES, *et al.*, 2009) e (DA CRUZ, ROCCO, *et al.*, 2015), respectivamente.

1.6 Estrutura do trabalho

O trabalho está estruturado em sete capítulos, incluindo o primeiro capítulo da introdução. O segundo capítulo descreve a introdução da composição da Lógica Paraconsistente Anotada de dois valores expondo de forma resumida a sua origem e sua aplicação. Tendo em vista que neste trabalho é utilizado um modelo paraconsistente anotado de dois valores (2v), são apresentados os conceitos de obtenção desses valores, o algoritmo da LPA2v chamado de

Para – Analisador e uma breve descrição das duas redes paraconsistentes que irão compor a aplicação das metodologias. Além disso, descreve também as três funções heurísticas que são: *bayes*, *heurística construtiva* e *cosseño modificado*, ambas chamadas neste trabalho de *especialistas (e)* da LPA2v. Exemplos numéricos das funções heurísticas são demonstrados neste capítulo;

O terceiro capítulo descreve as fundamentações teóricas que tangem as causas dos desligamentos não programados, apresentando dados estatísticos desses desligamentos e reforça a importância da ESF no SEP. Seguindo no mesmo capítulo, é apresentado o processo de digitalização das subestações convencionais, como meio de aperfeiçoar e automatizar as subestações, integrando modernos dispositivos de proteção com modernas redes de comunicações *ethernet*. Por fim, o capítulo aborda as fundamentações de proteção e manobra do SEP e suas conclusões finais.

O quarto capítulo apresenta quatro metodologias investigadas e utilizadas na comparação e validação deste trabalho. Essas metodologias foram apresentadas pelos autores CHIN (2003), OLIVEIRA, DE ARAÚJO, *et al.* (2016), WANG, PENG, *et al.* (2019) e WANG, WEI, *et al.* (2020). As fundamentações teóricas de cada metodologia investigada foram descritas resumidamente neste capítulo. Assim, para melhor compreensão dessas metodologias, foram demonstrados exemplos do funcionamento e suas considerações.

O quinto capítulo apresenta, em dois momentos, as duas metodologias propostas neste trabalho sendo que no primeiro e segundo momento, são apresentadas as metodologias chamadas de RAP–LPA2v e RNAPA respectivamente. Ambos mostram como as metodologias foram aplicadas no SEP; e a forma detalhada da construção das bases de dados, cada qual, com suas respectivas regras de proteção dos equipamentos primários. Além disso, são apresentados exemplos numéricos de funcionamento e as considerações finais.

O sexto capítulo também apresenta em dois momentos os resultados e discussões de ambas as metodologias. No primeiro momento, mostra as vantagens e eficácia da RAP–LPA2v ao ser comparada com o método proposto pelos autores OLIVEIRA, DE ARAÚJO, *et al.* (2016). No segundo momento, mostra as vantagens e eficácia da RNAPA ao ser comparada com os métodos propostos pelos autores CHIN (2003), WANG, PENG, *et al.* (2019) e WANG, WEI, *et al.* (2020). Além disso, considerando que RNAPA é uma evolução da RAP–LPA2v, ambos os métodos também foram comparados. Finalizando o capítulo, foram descritas a robustez e potencialidade dos métodos propostos.

Por fim, no sétimo e último capítulo, são apresentadas as conclusões e os resultados

alcançados ao longo de todo o desenvolvimento do trabalho, manifestando a originalidade do assunto, propondo a continuidade da pesquisa da LPA2v em trabalhos futuros, bem como, foi descrito a publicação em revista internacional.

2 INTRODUÇÃO DA LPA2v

Neste capítulo é apresentada a teoria da lógica paraconsistente anotada (LPA), e suas redes, sendo: rede de análise paraconsistentes (RAP) e rede neural paraconsistente (RNP). Tal conhecimento é de fundamental importância para facilitar a compreensão do funcionamento das redes LPA2v no processo de ESF no SEP. Para se ter uma visão mais aprofundada e detalhada, vale consultar as obras DA SILVA FILHO, ABE e LAMBERT-TORRES (2008) e CARVALHO e ABE (2012). As informações da teoria da LPA2v contidas neste capítulo foram retiradas das obras mencionadas neste parágrafo.

A subseção 2 descreve o conceito da LPA2v e as formulações e algoritmos que regem o seu funcionamento; Na subseção 2.2 descreve-se uma metodologia baseada em redes de análise paraconsistente, as suas formulações e algoritmos; Na subseção 2.3 descreve-se uma segunda metodologia chamada de rede neural artificial paraconsistente analítica, suas formulações e algoritmo; Na subseção 2.4 descreve-se as funções heurísticas utilizadas para compor os dois valores da LPA2v; Na subseção 2.5 descreve-se numericamente como são extraídos os valores de evidência de cada e ; O capítulo é finalizado na subseção 2.6 com as devidas considerações finais.

2.1 Lógica paraconsistente anotada de dois valores (LPA2v)

Neste capítulo é apresentada a LPA2v como uma lógica não clássica que contrapõe as leis básicas de uma lógica clássica que apresenta soluções baseadas no binário 1 ou 0, assim como, são apresentadas as equações que demonstram que a LPA2v é capaz de comportar contradições em sua estrutura.

Na década de 50, o lógico polonês Stanislaw Jaskowski (1906 – 1965) e o lógico brasileiro Newton Carneiro Affonso da Costa (1927 –) apresentaram, de modo independente, trabalhos que, de alguma forma, consideravam a contradição na estrutura lógica. A esses estudos, o filósofo Francisco Miró Quesada denominou de “Paraconsistente”; essa denominação foi feita em 1976 e rapidamente adotada pela comunidade científica mundial (SILVA FILHO e ABE, 2000). Lógica (do grego *logiké*) significa “ciência do raciocínio” e “Para” (do grego *pará*) significa “junto de” ou “ao lado de”. Portanto, Lógica Paraconsistente (LP) refere-se a um raciocínio ao lado da consistência. É uma lógica não clássica e não trivial, reconhecendo padrões além da lógica clássica (0 ou 1), o que permite resolver situações

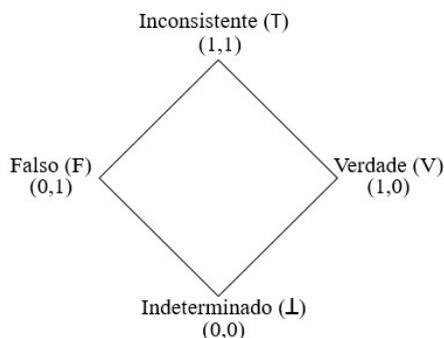
paradoxais.

2.1.1 Proposição e anotações da LPA2v

A LPA2v é composta por proposições (P’s). Cada proposição (P) possui anotação de um par ordenado, ou seja, anotação de dois valores (A2v). O primeiro par ordenado representa o grau de evidência favorável (μ) a P; o segundo representa o grau de evidência desfavorável (λ) a P. Os valores de μ e λ acompanhados da P são chamados de sinal lógico paraconsistente ($P_{(\mu,\lambda)}$) e tais valores podem vir de quaisquer fontes de informações, desde que pertençam ao reticulado τ , onde: $|\tau| = \{\mu \in \mathfrak{R} | 0 \leq x \leq 1\} \times \{\lambda \in \mathfrak{R} | 0 \leq x \leq 1\}$.

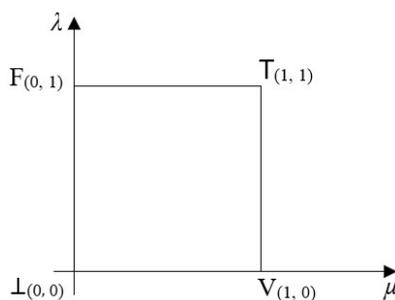
A figura 2.1 mostra o reticulado τ , os vértices representam os símbolos inconsistente (T), indeterminado (\perp), verdade (V) e falso (F) e estão associados as coordenadas (1, 1), (0, 0), (1, 0) e (0, 1) respectivamente. Cada vértice do reticulado representativo de τ são anotações de μ e λ e podem ser representadas no quadro unitário do plano cartesiano (QUPC) conforme figura 2.2.

Figura 2.1 – Reticulado representado através do diagrama de Hasse



Fonte: adaptado de DA SILVA FILHO, ABE e LAMBERT-TORRES, (2008, p. 13)

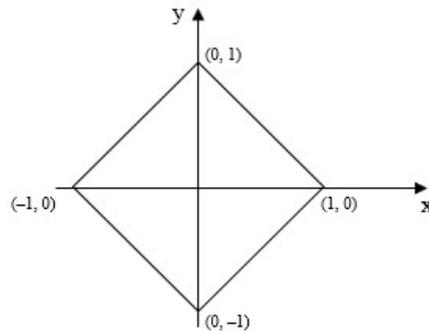
Figura 2.2 – Quadro unitário do plano cartesiano (QUPC)



Fonte: adaptado de DA SILVA FILHO, ABE e LAMBERT-TORRES, (2008, p. 22)

Do mesmo modo como foi estabelecido as coordenadas e símbolos para τ , define-se um novo reticulado \mathcal{L} munido dos símbolos de τ . Porém, \mathcal{L} é definido como um sistema de coordenadas $(0, 1)$, $(0, -1)$, $(-1, 0)$ e $(1, 0)$ associado aos respectivos símbolos T, \perp , V e F (ver figura 2.3).

Figura 2.3 – Reticulado \mathcal{L}



2.1.2 Relação algébrica entre QUPC e o novo reticulado \mathcal{L}

A relação algébrica permite determinar \mathcal{L} a partir de QUPC e vice-versa. Esta relação é definida através da transformação linear (T) do QUPC a partir de três princípios: mudança de escala, rotação e translação.

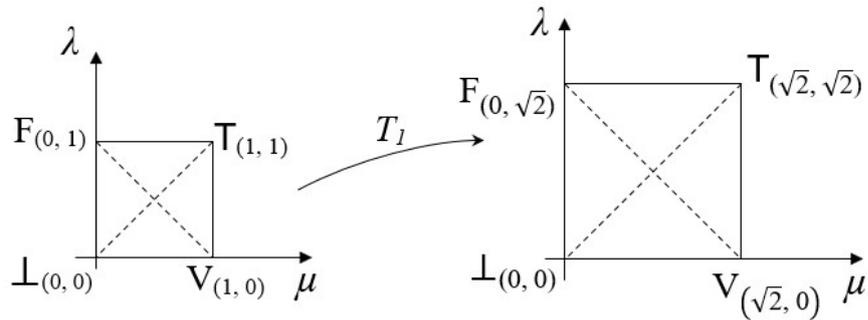
- ✓ **Mudança de escala:** partindo do QUPC, muda-se a escala através do produto das variáveis μ e λ por $\sqrt{2}$.

$$T_{1(\mu, \lambda)} = (\sqrt{2} \times \mu, \sqrt{2} \times \lambda) \quad 2.1$$

A equação matricial correspondente da equação 2.1 é estabelecida a partir da equação 2.2. A mudança de escala pode ser demonstrada na figura 2.4.

$$T_{1(\mu, \lambda)} = [\mu \quad \lambda] \times \begin{bmatrix} \sqrt{2} & 0 \\ 0 & \sqrt{2} \end{bmatrix} \quad 2.2$$

Figura 2.4 – Mudança de Escala



Fonte: adaptado de DA SILVA FILHO, ABE e LAMBERT-TORRES, (2008, p. 23)

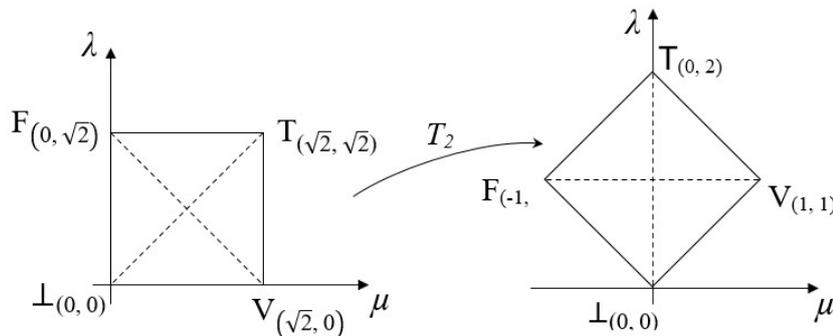
- ✓ **Rotação de 45°:** após a mudança de escala, faz-se a rotação de 45° mantendo a coordenada (0, 0) em sua origem, conforme equação 2.3.

$$T_{2(\mu, \lambda)} = \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \mu - \frac{\sqrt{2}}{2} \lambda, \frac{\sqrt{2}}{2} \mu + \frac{\sqrt{2}}{2} \lambda \right) \quad 2.3$$

A equação matricial correspondente à equação 2.3 é estabelecida a partir da equação 2.4. A rotação de 45° pode ser visualizada na figura 2.5.

$$T_{2(\mu, \lambda)} = [\mu \quad \lambda] \times \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \quad 2.4$$

Figura 2.5 – Rotação de 45°



Fonte: adaptado de DA SILVA FILHO, ABE e LAMBERT-TORRES, (2008, p. 23)

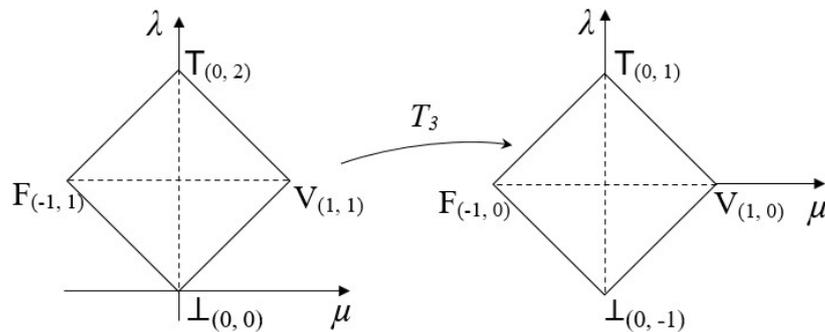
- ✓ **Translação:** com os valores de T_2 , é estabelecida a translação a partir da transformação linear dada por T_3 .

$$T_3(\mu, \lambda) = (\mu, \lambda - 1) \tag{2.5}$$

Fazendo a composição de $T_1 \circ T_2 \circ T_3$, obtém-se a transformação representada pela equação 2.6. A translação pode ser demonstrada na figura 2.6.

$$T_{(\mu, \lambda)} = (\mu - \lambda, \mu + \lambda - 1) \tag{2.6}$$

Figura 2.6 – Translação



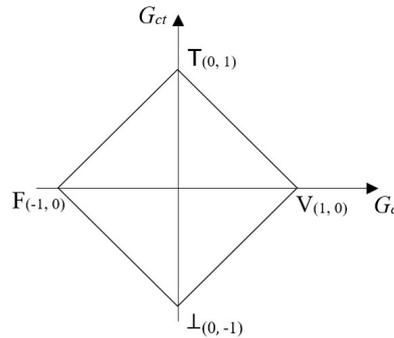
Fonte: adaptado de DA SILVA FILHO, ABE e LAMBERT-TORRES, (2008, p. 24)

A equação 2.6 permite converter os pontos do QUPC em novos pontos do reticulado \mathcal{L} . O primeiro termo do par ordenado define o grau de certeza (G_c) e o segundo termo define o grau de contradição (G_{ct}) conforme descrito nas respectivas equações 2.7 e 2.8. As novas coordenadas variam em um intervalo real fechado $[-1, 1]$. A figura 2.6 mostra o reticulado \mathcal{L} .

$$G_c = \mu - \lambda \tag{2.7}$$

$$G_{ct} = \mu + \lambda - 1 \tag{2.8}$$

Figura 2.7 – Reticulado \mathcal{L}



Fonte: adaptado de DA SILVA FILHO, ABE e LAMBERT-TORRES, (2008, p. 26)

2.1.3 Obtenção de μ e λ a partir de G_c e G_{ct}

Para a obtenção de μ e λ a partir de G_c e G_{ct} basta determinar a transformada inversa de T_1 , T_2 e T_3 na forma de F_1 , F_2 e F_3 onde:

$$F_1(\mu, \lambda) = \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \mu, \frac{\sqrt{2}}{2} \lambda \right) \quad 2.9$$

$$F_2(\mu, \lambda) = \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \mu + \frac{\sqrt{2}}{2} \lambda, \frac{\sqrt{2}}{2} \mu + \frac{\sqrt{2}}{2} \lambda \right) \quad 2.10$$

$$F_3(\mu, \lambda) = (\mu, \lambda + 1) \quad 2.11$$

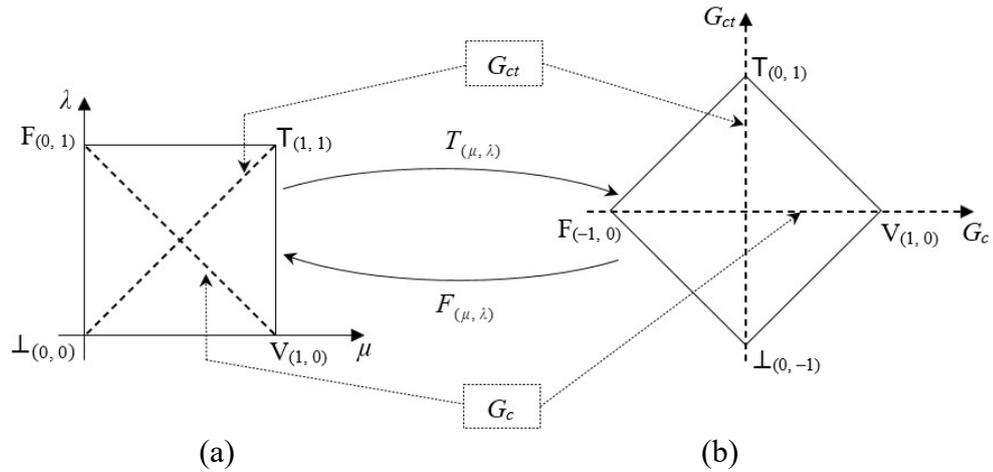
Fazendo a composição de $F_1 \circ F_2 \circ F_3$ e ao mesmo tempo substituindo μ por G_c e λ por G_{ct} , obtêm-se a transformação representada pela equação 2.12.

$$F(\mu, \lambda) = \left(\frac{1}{2} G_c + \frac{1}{2} G_{ct} + \frac{1}{2}, -\frac{1}{2} G_c + \frac{1}{2} G_{ct} + \frac{1}{2} \right) \quad 2.12$$

2.1.4 Construção do reticulado da LPA2v e estados lógicos resultantes

O reticulado da LPA2v contém doze regiões chamadas de estados lógicos resultante e é constituído a partir da relação geométrica entre QUPC e \mathcal{L} . A figura 2.8 mostra como os reticulados QUPC (a) e \mathcal{L} (b) podem se relacionar com base nas equações 2.6 e 2.12.

Figura 2.8 – Relação dos reticulados QUPC e \mathcal{L}



Fonte: adaptado de DA SILVA FILHO, ABE e LAMBERT-TORRES, (2008, p. 29)

As linhas tracejadas da figura 2.8 denotam os segmentos linha perfeitamente consistente ($\overline{V F}$) e linha perfeitamente contraditória (\overline{T}) (MARTINS, 2003, p. 7). Sobrepondo as duas imagens da figura 2.8, obtém-se o reticulado da LPA2v com os doze estados lógicos resultantes com seus respectivos símbolos. As descrições dos símbolos de cada região e os valores de controle estão discriminados nas tabelas 2.1, 2.2 e 2.3.

Tabela 2.1 – Estados lógicos não Extremos do Reticulado LPA2v

$qV \rightarrow T$ quase V tendendo à T	$qF \rightarrow \perp$ quase F tendendo à \perp
$qV \rightarrow \perp$ quase V tendendo à \perp	$qF \rightarrow T$ quase F tendendo à T
$q\perp \rightarrow V$ quase \perp tendendo à V	$qT \rightarrow F$ quase T tendendo à F
$q\perp \rightarrow F$ quase \perp tendendo à F	$qT \rightarrow V$ quase T tendendo à V

Tabela 2.2 – Estados lógicos extremos do reticulado LPA2v

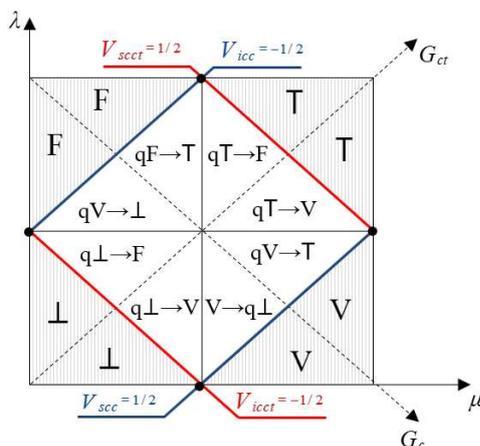
V → verdade	T → inconsistente
F → falso	\perp → indeterminado

Tabela 2.3 – Valores de Controle

V_{scc}	→ Valor Superior de Controle de Certeza
V_{icc}	→ Valor Inferior de Controle de Certeza
V_{scct}	→ Valor Superior de Controle de Contradição
V_{icct}	→ Valor Inferior de Controle de Contradição

A figura 2.9 abaixo mostra o resultado da sobreposição das duas imagens da figura 2.8 com todos os símbolos dos estados lógicos resultantes; as variáveis μ , λ , G_c e G_{ct} ; e os valores de controles (V_{scc} , V_{icc} , V_{sct} e V_{ict}).

Figura 2.9 – Reticulado da LPA2v



Fonte: adaptado de DA SILVA FILHO, ABE e LAMBERT-TORRES, (2008, p. 30)

2.1.5 Valores de controle do reticulado LPA2v

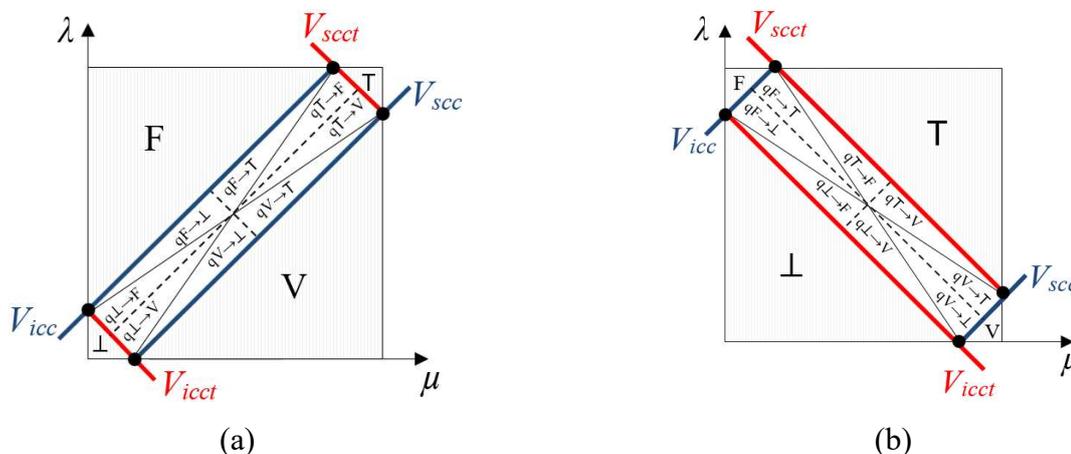
Os valores de controle da figura 2.9 servem para delimitar as regiões extremas (hachuradas) das não extremas (não hachuradas). Esses variam em um intervalo real fechado $[-1, 1]$, como também podem ser normalizados para variar em um intervalo $[0, 1]$. Os valores em módulo das variáveis G_c e G_{ct} maiores ou iguais aos valores de controle sempre irão representar as regiões hachuradas, ao passo que os valores menores sempre irão representar as regiões não hachuradas. De outra forma, qualquer ponto que estiver localizado nas regiões hachuradas sempre será classificado como estados lógicos V , F , T ou L . Assim, qualquer ponto fora das regiões hachuradas sempre será classificado como estados lógicos tendenciosos tabela 2.2.

Os valores de controle possibilitam flexibilizar as regiões alterando suas dimensões do reticulado da LPA2v, assim como as características da resposta. A flexibilização é externa e arbitrária, pois irá depender da rigorosidade que se deseja obter no “conhecimento” dos sinais de entrada e consequentemente nos sinais de saída (resposta).

A figura 2.10 mostra dois reticulados da LPA2v, cada qual com suas respectivas regiões flexibilizadas. A figura (a) refere-se a uma LPA2v onde exige-se baixo “conhecimento” dos sinais de entrada, pois os valores de controle estão flexibilizados para as regiões V e F ; já na figura (b) exige-se um alto “conhecimento” dos sinais de entrada, pois os valores de controle

estão flexibilizados para as regiões T e \perp .

Figura 2.10 – Representação do reticulado LPA2v com ação dos valores de controles



Fonte: adaptado de (MARTINS, 2003, p. 36 à 37)

Com base nas apresentações do reticulado LPA2v e dos símbolos das três tabelas 2.1, 2.2 e 2.3 é possível criar um algoritmo chamado de para-analisado; este irá estabelecer uma resposta lógica para cada P.

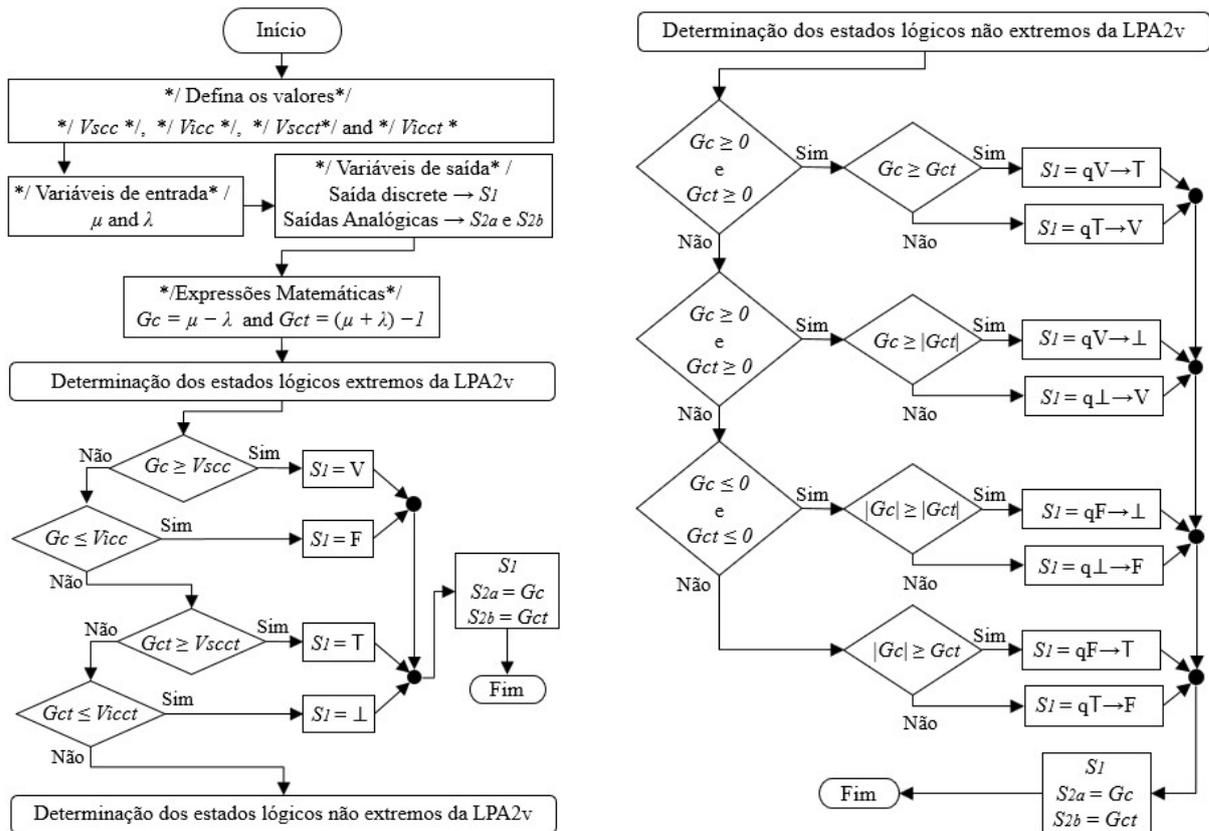
2.1.6 Algoritmo para-analisador da LPA2v

Definidos os doze estados lógicos resultantes e as variáveis de entrada da LPA2v, DA SILVA FILHO (2006) estabeleceu um algoritmo chamado de para-analisado. O autor descreveu que a elaboração do algoritmo pode ser definida como:

[...] resultado das várias sentenças descritivas no reticulado representado no QUPC é proposto o algoritmo para implementação em um programa de computação convencional que possibilita a aplicação da Lógica Paraconsistente Anotada de anotação com dois valores LPA2v em Sistemas de Controle e Especialistas de IA (SILVA FILHO, 2006, p. 23).

A figura 2.11 mostra o funcionamento do algoritmo para-analisador. De forma resumida o algoritmo funciona em três momentos. No primeiro momento o algoritmo recebe as informações advindas dos e que fornecem valores que variam em um intervalo entre 0 e 1; Posteriormente, é feito o processamento das informações a partir do G_c e G_{ct} ; por fim, o processo é finalizado, e caso exista um alto grau de contradição, concluir-se-á que ainda não exista uma certeza na tomada de decisão, ao passo que, caso exista um baixo grau de contradição, então conclui-se que se possa formular uma conclusão na tomada de decisão.

Figura 2.11 – Fluxograma do algoritmo para-analisador



2.2 Rede de análise paraconsistente (RAP) para tratamento de incerteza

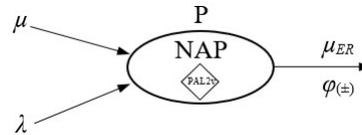
No trabalho de DA SILVA FILHO, ABE e LAMBERT-TORRES (2008, p. 40), os autores destacaram que um sistema de apoio às tomadas de decisão que tratam o conhecimento incerto deve ser capaz de representar, manipular e comunicar dados considerados incertos. A fim de minimizar as incertezas é necessário analisar individualmente cada P com suas respectivas evidências (μ e λ). Porém, tal análise deve ser feita por um sistema que permita integrar todas as n -ésima proposições (P_n) e suas evidências para estabelecer a solução mais adequada.

A RAP é composta por vários nós de análises paraconsistentes (NAP's) interligados entre si; cada nó de análise paraconsistente (NAP) processa as informações de cada P_n . Cada P_n contém as evidências necessárias para, ao final, obter valores suficientes na a tomada de decisão. As evidências μ e λ da P_n advêm de agentes distintos, cada i -ésimo agente é denominada como *especialista* (e_i).

A figura 2.12 mostra uma NAP analisando uma P com suas respectivas variáveis de entradas μ e λ e variáveis de saída denominadas de grau de evidência resultante real (μ_{ER}) e

intervalo de certeza ($\varphi(\pm)$).

Figura 2.12 – Nó de Análise Paraconsistente



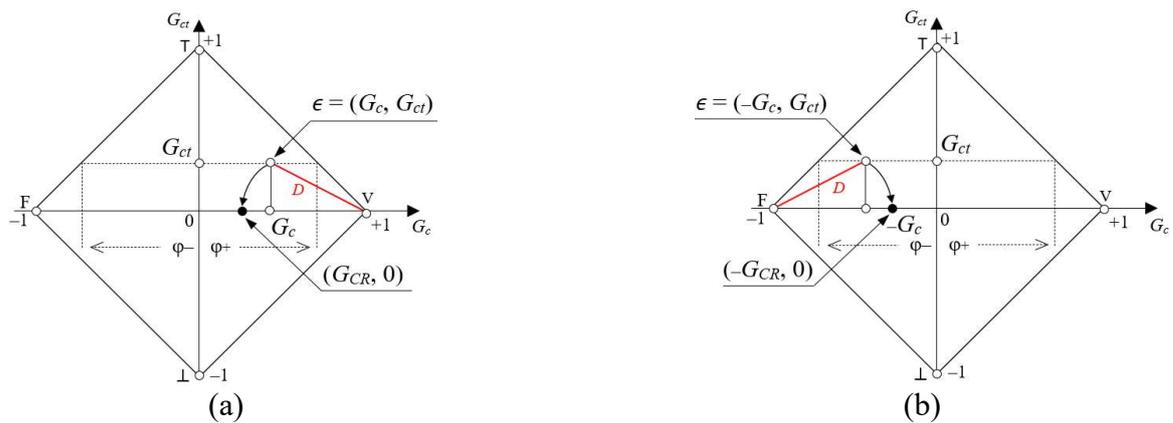
Fonte: adaptado de DA SILVA FILHO, ABE e LAMBERT-TORRES, (2008, p. 102)

2.2.1 Determinação das variáveis da NAP

A equação 2.13 estabelece o cálculo de μ_{ER} . Esse varia em um intervalo real fechado $[0, 1]$, é um grau de evidência favorável a P e é denominado real porque o seu valor advém do grau de certeza real (G_{CR}). O G_{CR} é um valor livre dos efeitos da contradição ($G_{ct} = 0$) e varia em um intervalo real fechado $[-1, 1]$. Para determinar G_{CR} , é necessário calcular a distância D da figura 2.12 (a) e (b). A distância D é a reta em vermelho que vai do vértice do G_c até o ponto de interpolação ϵ , a sua projeção no eixo do G_c permite obter os pontos $(G_{CR}, 0)$ e $(-G_{CR}, 0)$ das respectivas imagens (a) e (b).

As equações 2.14 e 2.15 estabelecem o cálculo do G_{CR} para $G_c > 0$ e $G_c < 0$ respectivamente. Já a equação 2.16 estabelece valor da distância D .

Figura 2.13 – Representação do G_{CR} no reticulado \mathcal{L}



Fonte: adaptado de DA SILVA FILHO, ABE e LAMBERT-TORRES, (2008, p. 55)

$$\mu_{ER} = \frac{G_{CR} + 1}{2} \tag{2.13}$$

Para $G_c > 0$ tem-se:

$$G_{CR} = 1 - D \quad 2.14$$

Para $G_c < 0$, tem-se:

$$G_{CR} = D - 1 \quad 2.15$$

Para $G_c = 0$, tem-se $D \geq 1$. Nessas condições, sempre será adotado valor nulo para G_{CR} ($G_{CR}=0$).

$$D = \sqrt{(1 - |G_c|)^2 + G_{ct}^2} \quad 2.16$$

O $\varphi_{(\pm)}$ é calculado pela equação 2.17; o seu valor absoluto representa a máxima variação tendendo a V ($\varphi_{(+)}$) ou a máxima variação tendendo a F ($\varphi_{(-)}$). O sinal positivo (+), negativo (–) ou nulo (0) serve para indicar se: φ foi originado de um G_{ct} positivo, negativo ou nulo; e serve também para recuperar as variáveis de origem ($\mu, \lambda, G_c, G_{ct}$).

$$\varphi_{(\pm)} = 1 - |G_{ct}| \quad 2.17$$

onde:

$$\varphi_{(\pm)} = \varphi_{(+)} \text{ se } G_{ct} > 0$$

$$\varphi_{(\pm)} = \varphi_{(-)} \text{ se } G_{ct} < 0$$

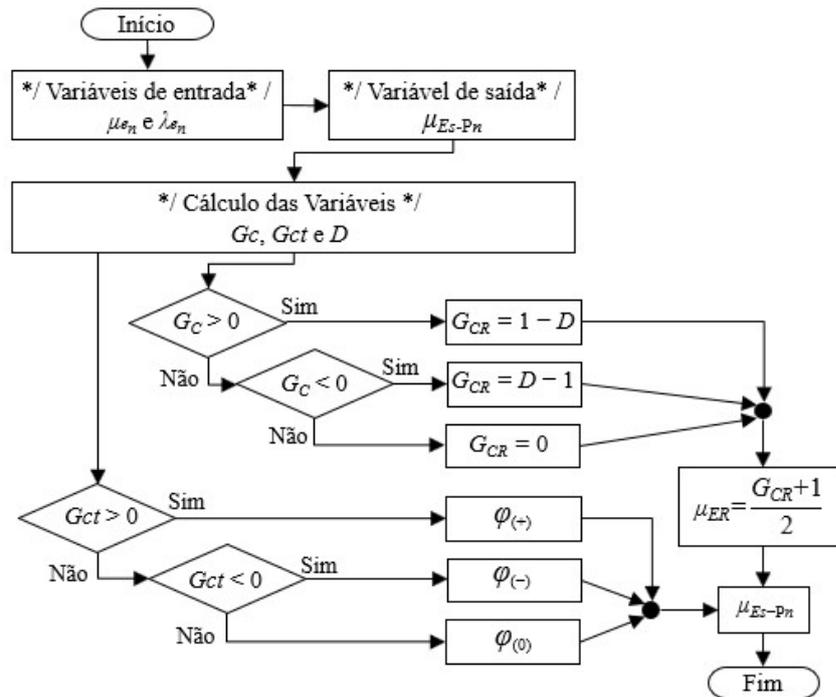
$$\varphi_{(\pm)} = \varphi_{(0)} \text{ se } G_{ct} = 0$$

2.2.2 Algoritmo da NAP

Com base nas fundamentações matemáticas e geométricas e na modelagem da NAP, DA SILVA FILHO, ABE e LAMBERT-TORRES (2008, p. 81) elaboraram um algoritmo de análise paraconsistente da LPA2v com saída de grau de evidência resultante real e intervalo de certeza. O fluxograma da figura 2.14 mostra que após receber os valores de evidências nas entradas, a saída pode ser expressa por uma única variável chamada de grau de evidência de saída (μ_{Es}). O μ_{Es} é composto por μ_E e $\varphi_{(\pm)}$ conforme representado pela equação 2.18.

$$\mu_{Es} = \begin{bmatrix} \mu_E \\ \varphi_{(\pm)} \end{bmatrix} \quad 2.18$$

Figura 2.14 – Fluxograma do algoritmo NAP



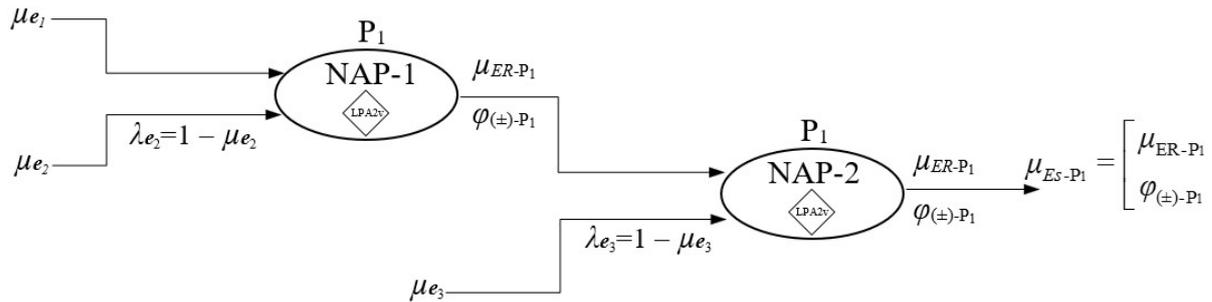
2.2.3 Configuração da RAP

Várias configurações podem ser propostas para a RAP como configuração simples, configuração simples com desativação do NAP, configuração simples com desativação do NAP por indefinição, configuração tridimensional entre outras. Porém, neste trabalho foi utilizada a configuração simples para a construção da RAP, pois a escolha desta configuração foi considerada a facilidade de adaptação no processo de construção da RAP para ESF no SEP. Outros trabalhos podem ser propostos a fim de mensurar a eficiência de cada configuração para ESF no SEP. Não menos importante, dentro do que foi proposto para ESF, a configuração simples apresentou resultados satisfatórios³.

A figura 2.15 mostra a RAP de configuração simples composta por duas NAP's interligadas entre si e ambas analisando a mesma proposição (P₁). A RAP processa todas as evidências de entradas advindas de e_i e produz uma única saída, a qual irá entrar na NAP posterior na forma de evidência favorável. Cada especialista e₁, e₂ e e₃ da figura 2.15 emite um valor numérico favorável à mesma proposição P₁.

Figura 2.15 – RAP de configuração simples de duas NAP's

³ Considerando que a RAP apresentou resultados satisfatórios, foi construído posteriormente neste trabalho uma nova configuração utilizando redes neurais artificiais paraconsistentes.



Fonte: adaptado de DA SILVA FILHO, ABE e LAMBERT-TORRES, (2008, p. 102)

A NAP-1 recebe de e_1 o grau de evidências favorável (μ_{e_1}), e o grau de evidência desfavorável (λ_{e_2}) de e_2 . No interior da NAP-1 encontra-se a LPA2v responsável no processamento das evidências. A saída da NAP-1 estabelece a evidência resultante real favorável a P_1 e o intervalo de certeza (μ_{ER-P_1} e $\varphi_{(\pm)-P_1}$).

A NAP-2 recebe, na entrada, a evidência resultante real advinda na NAP-1 (μ_{ER-P_1}) e o grau de evidência desfavorável advinda do e_3 (λ_{e_3}). Após o processamento é estabelecido o resultado final chamado de grau de evidência de saída (μ_{ES}). O μ_{ES} sempre será representado por duas variáveis mais a proposição analisada pelas NAP's (μ_{ER-P_1} e $\varphi_{(\pm)-P_1}$).

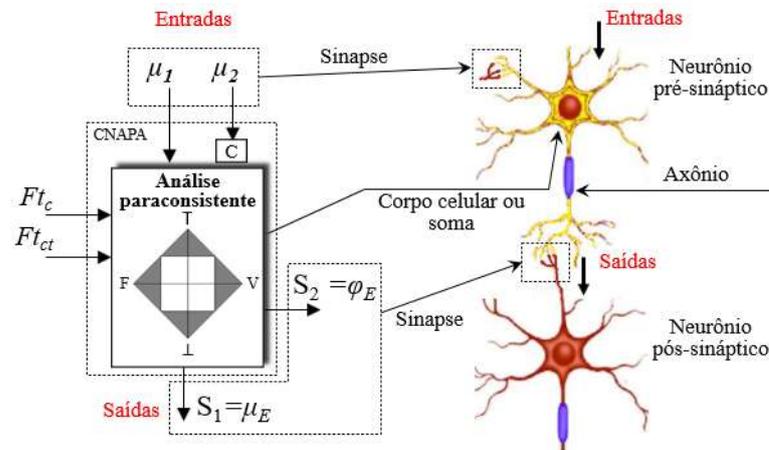
2.3 Rede neural artificial paraconsistente analítica (RNAPA)

A RNAPA é uma classe da rede neural da lógica paraconsistente que pode ser compreendida como IA contemporânea. Sua finalidade é buscar soluções robustas na tomada de decisão. A RNAPA é constituída por uma estrutura de conexões em série de células neurais artificiais paraconsistente analítica (CNAPA's), em que cada célula neural artificial paraconsistente analítica (CNAPA) assemelha-se ao funcionamento do neurônio biológico do cérebro humano. A figura 2.16 mostra uma analogia simplificada entre a CNAPA e o neurônio pré-sináptico. Nessa analogia, as sinapses representam os sinais de entrada (μ_1 e μ_2) e sinais de saída (S_1 e S_2); já o corpo celular ou soma representa o processamento dos sinais de entrada. Assim como a NAP, os sinais μ_1 e μ_2 são evidências favoráveis de uma determinada P_n e tais evidências advêm de um e_i .

O processamento das informações no corpo celular da CNAPA está condicionado ao fator de tolerância à certeza (F_{tc}), fator de tolerância à contradição (F_{ic}), operador de complemento (C) que transforma a evidência favorável em evidência desfavorável (λ_C) (equação 2.19), grau de contradição normalizado (μ_{ctr}) (equação 2.20), grau de evidência

resultante (μ_E) (equação 2.21) e intervalo de evidência resultante (φ_E) (equação 2.22). Ambas as variáveis variam em um intervalo real fechado $[0,1]$.

Figura 2.16 – Análise comparativa da célula neural artificial e célula neural biológica



$$\lambda_C = 1 - \mu_2 \quad 2.19$$

$$\mu_{cm} = \frac{\mu_1 + \lambda_C}{2} \quad 2.20$$

$$\mu_E = \frac{(\mu - \lambda_C) + 1}{2} \quad 2.21$$

$$\varphi_E = 1 - |2\mu_{ctr} - 1| \quad 2.22$$

A equação 2.20 define o quanto de contradição existe nos sinais de entrada a partir da comparação com o V_{sct} e V_{ict} . Já a equação 2.21 define o quanto de certeza existe nos sinais de entrada a partir da comparação com o V_{scc} e V_{icc} . Considerando que ambas as equações variam em um intervalo real fechado $[0, 1]$, os valores de controle V_{sct} , V_{ict} , V_{scc} e V_{icc} devem ser normalizados para o mesmo intervalo conforme equações 2.23, 2.24, 2.25 e 2.26 respectivamente. Os fatores de tolerância variam em um intervalo real fechado $[0, 1]$ e são ajustados arbitrariamente e externamente. Externa pois depende de quanto se deseja exigir de conhecimento dos sinais de entrada de cada CNAPA para obter uma melhor eficiência na saída.

$$V_{sct} = \frac{1 + Ft_{ct}}{2} \quad 2.23$$

$$V_{ict} = \frac{1 - Ft_{ct}}{2} \quad 2.24$$

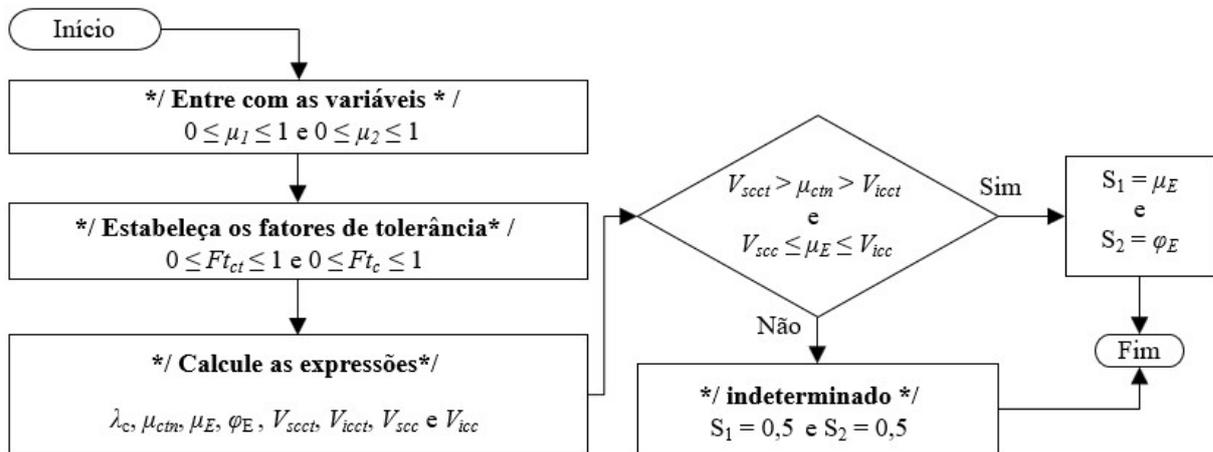
$$V_{scc} = \frac{1 + Ft_c}{2} \tag{2.25}$$

$$V_{icc} = \frac{1 - Ft_c}{2} \tag{2.26}$$

2.3.1 Algoritmo da CNAPA

Com base nas fundamentações matemáticas DA SILVA FILHO, ABE e LAMBERT-TORRES (2008, p. 217) elaboraram um algoritmo para o tratamento de incerteza conforme fluxograma da figura 2.17.

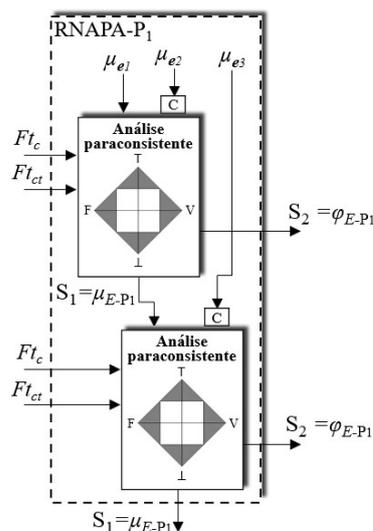
Figura 2.17 – Fluxograma do algoritmo CNAPA



2.3.2 Estrutura da RNAPA

A figura 2.18 mostra a estrutura da RNAPA composta por duas CNAPA's interligadas em série processando as evidências de uma mesma proposição (P₁). De outra forma, cada especialista e₁, e₂ e e₃ emite um valor numérico favorável a mesma proposição P₁ e tais evidências são processadas conforme ajustes dos fatores de tolerâncias. A vantagem dos fatores de tolerâncias é que, caso as evidências advindas produzam contradições e certezas fora do limiar estabelecido por Ft_c e Ft_{ct}, a saída sempre será definida como indeterminado (0,5). Assim, é possível obter uma melhor eficiência de cada CNAPA e por consequência uma melhor robustez nos resultados da RNAPA.

Figura 2.18 – Estrutura da RNAPA



2.3.3 Unidade neural artificial paraconsistente de extração de mínimo e máximo

Além das CNAPA´s são utilizadas no processamento das informações duas unidades neurais que são: unidade neural artificial paraconsistente de extração máxima (UNAPE máx) e unidade neural artificial paraconsistente de extração mínima (UNAPE mín) . A figura 2.19 (a) e (b) mostra uma UNAPE máx (OR) e UNAPE mín porta (END) respectivamente. Os sinais de entrada advêm das evidências de cada RNAPA, ou seja, da saída de cada RNAPA. Deste modo, dado um conjunto de evidências, tem-se como objetivo obter, na saída, a maximização e minimização dessas evidências.

Figura 2.19 – Unidade neural artificial paraconsistente de extração máximo e mínima



A quantidade de UNAPE máx e UNAPE mín conectadas em série entre si depende da quantidade de sinais recebidos de cada P em análise e, conseqüentemente, determina a característica de conexão. A figura 2.20 (a) mostra uma unidade de extração de máximo para número de sinais pares na entrada e a figura 2.20 (b) mostra uma unidade de extração de

máximo para números de sinais ímpares na entrada. Para UNAPE mín adota-se a mesma configuração conforme figura 2.20 (a) e (b).

Figura 2.20 – Unidade de extração máxima para várias entradas

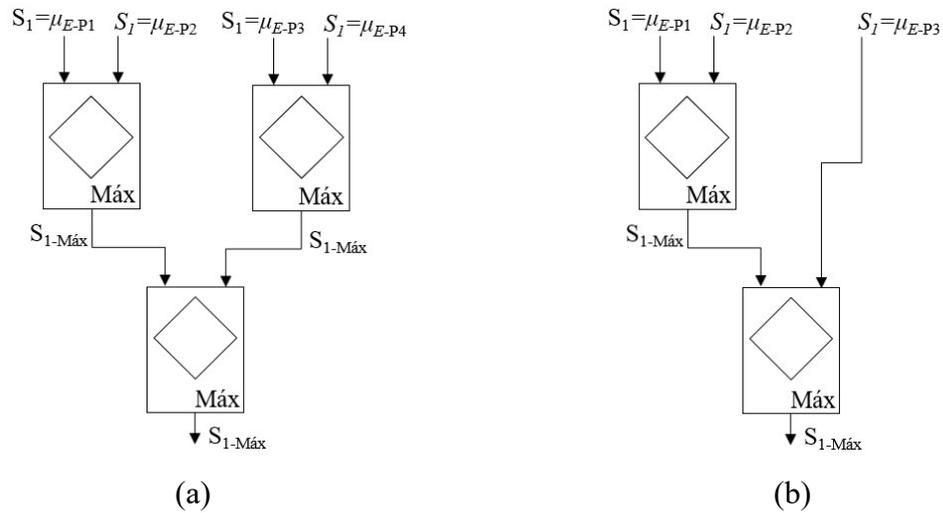
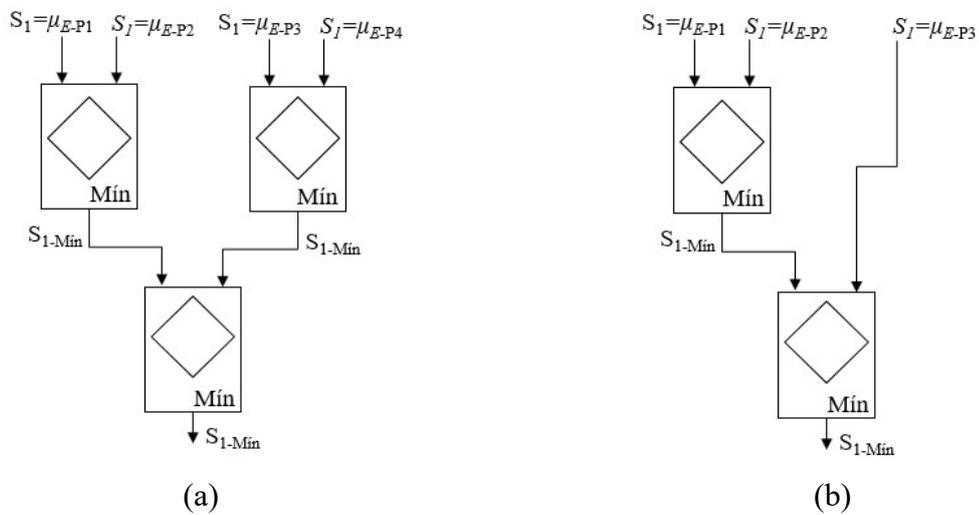
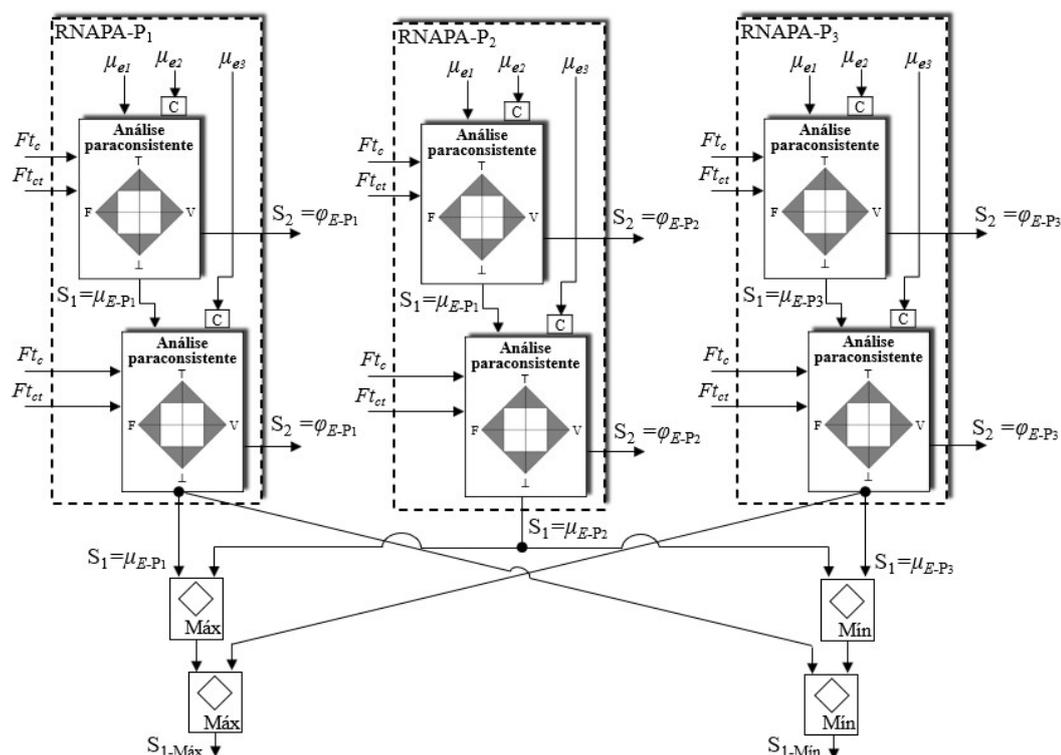


Figura 2.21 – Unidade de extração mínima para várias entradas



As conexões entre CNAPA's, UNAPE máx e UNAPE mín estão representadas na figura 2.22.

Figura 2.22 – RNAPA com unidade de extração máximo e mínimo



Cada RNAPA processa as informações de três proposições (P_1 , P_2 e P_3). As evidências favoráveis de cada P advêm de três especialistas (e_1 , e_2 e e_3). A saída de cada RNAPA serve como entrada para cada UNAPE máx e UNAPE mín. Ao final da maximização e minimização, a UNAPE máx sempre irá emitir a evidência favorável (μ) a P representado por $S_{1-Máx}$, ao passo que UNAPE mín sempre irá emitir a evidência desfavorável (λ) a P representado por $S_{1-Mín}$.

2.4 Determinação dos *especialistas* (e)

Vários e podem ser utilizados, porém neste trabalho serão apresentados três como multiagente provedores das evidências μ e λ . Cada e é uma função heurística que tem como objetivo solucionar problemas presentes a partir de um dado conhecimento do passado. Em outras palavras, na ocorrência de um problema desconhecido, as funções heurísticas extraem do passado um conjunto de soluções para resolver problemas presentes; a cada extração é estabelecido um conjunto de grau de pertinência no intervalo real fechado entre 0 e 1. Essas soluções são classificadas e o grau de similaridade ordenado de forma crescente; os maiores graus de pertinências são sugeridos para compor a solução e , conseqüentemente as entradas da LPA2v (μ e λ).

Com relação às funções heurísticas, WANGENHEIM e WANGENHEIM (2003, p.

106 - 122) citam alguns modelos mais relevantes para determinação de similaridade como: Vizinho mais próximo; Distância Euclidiana; Distância de Manhattan; Distância de Chebychev; Coeficiente de Casamento Simples; Modelo de Contraste; Modelo do Vetor. Já no trabalho apresentado por GUPTA e MONTEZEMI (1997) faz-se uma comparação e simulação de duas métricas de similaridade que são: Casamento do Vizinho mais Próximo e Casamento de Contraste de Tversky. Como resultado, o autor propôs uma nova função chamada de Casamento Cosseno Modificada.

Considerando a diversidade de métricas/funções heurísticas encontradas nas literaturas, a comparação dessas seria computacionalmente inviável. Este trabalho apresenta três funções adequadas para solucionar o problema do trabalho proposto. Tais funções já foram utilizadas nas literaturas para ESF no SEP e serão apresentadas nas subseções a seguir.

2.4.1 Heurística do teorema de Bayes

O teorema de Bayes foi primeiramente formulado por Thomas Bayes. Porém após sua formulação, o trabalho caiu no esquecimento e só foi resgatado e revelado na literatura pelo matemático Pierre-Simon de Laplace (SOUSA, 2018, p. 2). O teorema de Bayes foi fundamentado a partir da relação da probabilidade condicional e da lei da probabilidade total.

Sejam dois eventos A e B , $P(A)$ é a probabilidade a priori de A ; $P(B)$ é a probabilidade a priori de B e $P(A | B)$ é a probabilidade condicional da ocorrência de A dado B . Isso pode ser representado da seguinte forma:

$$P(A | B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}, \text{ para } P(B) > 0 \quad 2.27$$

Considerando a probabilidade dos eventos, A e B ocorrerem simultaneamente. Considerando a regra do produto e considerando A e B permutáveis, pode-se obter a seguinte expressão:

$$P(A \cap B) = P(B)P(A | B) \leftrightarrow P(B \cap A) = P(A)P(B | A) \quad 2.28$$

A partir da equação 2.28, tem-se a seguinte relação.

$$P(A | B) = \frac{P(A)P(B | A)}{P(B)} \quad 2.29$$

Dado um espaço amostral formado pela união de partes do *i-ésimo* evento A mutuamente exclusivas, a probabilidade de $P(B)$ no espaço amostra é:

$$P(B) = \sum_i^n P(A_i)P(B | A_i) \quad 2.30$$

Assim, a função heurística do teorema de Bayes pode ser representada conforme equação 2.31.

$$P(A_i | B) = \frac{P(A_i)P(B | A_i)}{\sum_{j=1}^n P(A_j)P(B | A_j)} \quad 2.31$$

onde:

$P(A_i | B)$ é a probabilidade do *i-ésimo* evento A justificar a ocorrência do evento B ;

$P(A_i)$ é a probabilidade de ocorrência do *i-ésimo* evento A ;

$P(B | A_i)$ é a probabilidade de ocorrência do *i-ésimo* evento A dado B ;

$P(B | A_j)$ é a probabilidade incondicional.

2.4.2 Heurística construtiva (HC)

Heurística vem do grego “*Heurikein*” que significa eu encontro, descobro. De acordo com BULLARD e KLEMPERER (1984, apud ZANAKIS e EVANS, 1981, p. 84) as definições de heurística incluem procedimentos simples capazes de fornecer soluções fáceis e rápidas, mas que não sejam necessariamente ótimas soluções. No mesmo trabalho, BULLARD e KLEMPERER (1984, apud NICHOLSON, 1971) destacaram que procedimento é a forma de resolver problemas mediante a uma abordagem intuitiva, em que a estrutura do problema pode ser analisada de forma inteligente para obter uma solução razoável.

No trabalho de FRITZEN, ZAUK, *et al*, (2012), foi apresentado o resultado da heurística construtiva a partir da expressão 2.32 abaixo. Essa expressão trata a solução de um evento presente dado o conhecimento de um evento passado; de outra forma, os eventos são

relacionados como uma combinação linear das medidas de suas características comuns e distintas. O modelo é utilizado para descobrir, analisar e explicar fenômenos empíricos a partir do conhecimento.

$$HC = \frac{a + e}{\max(a + e)} \quad 2.32$$

$$a = A * B \quad 2.33$$

$$e = \tilde{A} * \tilde{B} \quad 2.34$$

onde:

a: é o produto interno entre os eventos *A* e *B*;

b: é o produto interno entre a negação dos eventos *A* e *B*;

max: é o valor máximo de escala entre cada elementos dos eventos *A* e *B*.

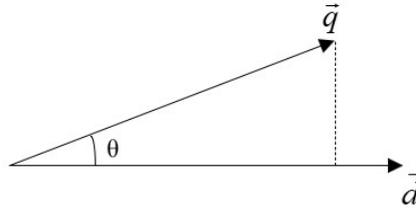
Destaca-se que o desempenho da função da heurística construtiva pode cair significativamente caso os elementos dos eventos apresentem pesos como forma de ponderação. Neste caso a utilização das expressões 2.33 e 2.34 consideram pesos iguais para todos os elementos (FRITZEN, 2012, p. 84).

2.4.3 Função do cosseno modificado (*CM*)

A função do *CM* tem como objetivo modificar a função Modelo de Vetor através das similaridades local, ou seja, é acrescentada uma similaridade escalonada ao longo das descrições. O modelo de vetor proposto inicialmente por SALTON (1966), medem o ângulo entre dois vetores em um espaço vetorial conforme figura 2.23. Quanto mais próximo for de um, mais similar são os vetores. A modificação do modelo do vetor pode ser compreendida como:

A modificação implica que o cosseno do ângulo gerado pelos pesos do vetor caso novo e do vetor caso prévio é ponderado pela semelhança escalonada ao longo de cada descrição. Como resultado a função do cosseno modificado (*CM*) pode ser ordenada de acordo com a diminuição da similaridade (GUPTA e MONTEZEMI, 1997, p. 604, tradução nossa).

Figura 2.23 – Modelo de vetor entre \vec{q} e \vec{d}



Fonte: adaptado de LIMA e ROSATELLI (2004, p. 44)

A equação 2.35 refere-se ao modelo de vetor e a função de similaridade escalonada é apresentada pela equação 2.36 abaixo.

$$Sim_{(q,d)} = \frac{\vec{q} \cdot \vec{d}}{|\vec{q}| \times |\vec{d}|} = \frac{\sum_i^m \omega_i^n \omega_i^{pk}}{\sqrt{\sum_i^m (\omega_i^n)^2 \sum_i^m (\omega_i^{pk})^2}} \quad 2.35$$

Onde:

\vec{d} : é o vetor caso prévio;

\vec{q} : é o vetor caso novo;

pk : é o *ésimo* vetor caso prévio;

n : é o n - *ésimo* vetor caso novo;

$i=1, \dots, m$, *ésimo* elemento dos casos prévios e novos;

ω_i^n : é o peso de cada elemento do caso novo;

ω_i^{pk} : é o peso de cada elemento do caso prévio.

$$\sim(\omega_i^n, \omega_i^{pk}) = 1 - \left(\frac{|\omega_i^n - \omega_i^{pk}|}{R_i} \right) \quad 2.36$$

Estabelecidas as equações modelo de vetor e similaridade local, obtém-se a equação 2.37.

$$CM^{pk} = \frac{\sum_i^m \omega_i^n \omega_i^{pk} \left(1 - \left(\frac{|\omega_i^n - \omega_i^{pk}|}{R_i} \right) \right)}{\sqrt{\sum_i^m (\omega_i^n)^2 \sum_i^m (\omega_i^{pk})^2}} \quad 2.37$$

Onde:

$\sim(\omega_i^n, \omega_i^{pk})$: é a função de similaridade local;

R_i : é o valor máximo de escala do i -ésimo elemento entre o caso novo e prévio.

2.5 Extração das evidências do e

Esta seção tem como objetivo apresentar um desenvolvimento prático mostrando como as evidências são extraídas de cada e . Para extração das evidências são considerados três conjuntos de regras (L) cada qual classificado por um i -ésimo vetor binário de quatro bits. Dessa forma tem-se que: $L = \{l_1, l_2, l_3\}$, tal que: $l_1 = [0 \ 0 \ 1 \ 1]$; $l_2 = [1 \ 1 \ 1 \ 1]$; e $l_3 = [1 \ 0 \ 0 \ 1]$.

A tabela 4 corresponde ao conjunto contendo as três regras e suas classificações, cada bit 1...4 é denominado, neste trabalho, como alarme, onde 1 significa que o alarme foi acionado e 0, caso contrário.

Tabela 2.4 – Conjunto de regras

Bits	Regras		
	l_1	l_2	l_3
bit 1	0	1	1
bit 2	0	1	0
bit 3	1	1	0
bit 4	1	1	1

Estabelecidos os conjuntos de regras, cada e irá estabelecer um valor de pertinência entre um novo vetor $H = [0 \ 1 \ 1 \ 1]$ e os vetores l_1, l_2 e l_3 , de forma que:

- ✓ **Especialista Bayes (e_1):** as probabilidades utilizadas neste trabalho são as mesmas utilizadas no trabalho de OLIVEIRA, DE ARAÚJO, *et al.*, (2016) onde: probabilidade de acionamento correto dos alarmes é $pC = 0.8975$, probabilidade de

falha de acionamento dos alarmes é $pf = 0.025$ e probabilidade de acionamento indevido dos alarmes é $pi = 0.0775$.

$$P(H | l_i) = \text{probabilidade_condicional} \left(\begin{matrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \right)$$

$$P(H | l_1) = 0,8975 \times 0,0775 \times 0,8975 \times 0,8975 = 56,03 \times 10^{-3}$$

$$P(H | l_2) = 0,025 \times 0,8975 \times 0,8975 \times 0,8975 = 18,07 \times 10^{-3}$$

$$P(H | l_3) = 0,025 \times 0,0775 \times 0,0775 \times 0,8975 = 0,13 \times 10^{-3}$$

$$P(l_1 | H) = \frac{56,03 \times 10^{-3}}{56,03 \times 10^{-3} + 18,07 \times 10^{-3} + 0,13 \times 10^{-3}} = 0,754$$

$$P(l_2 | H) = \frac{18,07 \times 10^{-3}}{56,03 \times 10^{-3} + 18,07 \times 10^{-3} + 0,13 \times 10^{-3}} = 0,243$$

$$P(l_3 | H) = \frac{0,13 \times 10^{-3}}{56,03 \times 10^{-3} + 18,07 \times 10^{-3} + 0,13 \times 10^{-3}} = 0,0018$$

$$P(H | l_i) = [0,756 \quad 0,243 \quad 0,0018]$$

✓ **Especialista HC (e2):** essa função foi utilizada no trabalho de FRITZEN, ZAUKE *et al.*, (2012) e é definida nesse exemplo como:

$$a = H * L = [0 \quad 1 \quad 1 \quad 1] * \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = [2 \quad 3 \quad 1]$$

$$b = \tilde{H} * \tilde{L} = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0] * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = [1 \quad 0 \quad 0]$$

$$HC = \frac{a + e}{\max(a + e)} = \frac{[2 \quad 3 \quad 1] + [1 \quad 0 \quad 0]}{3} = \frac{[3 \quad 3 \quad 1]}{3}$$

$$HC = [1 \quad 1 \quad 0,333]$$

- ✓ **Especialista CM^{pk} (e_3):** o terceiro e último e é a função de Casamento do Cosseno Modificado proposto no trabalho de GUPTA e MONTEZEMI, (1997). A fim de evitar zero no denominador, os valores binários 0 e 1 foram substituídos por 1 e 2 respectivamente.

$$CM^L = \left(\begin{array}{c} [1] \\ 2 \\ 2 \\ 2 \end{array}, \begin{array}{ccc} [1 & 2 & 2] \\ 1 & 2 & 1 \\ 2 & 2 & 1 \\ 2 & 2 & 2 \end{array} \right)$$

Similaridade ao longo das descrições para $L=l_1$

$$\sim(\omega_1^H, \omega_1^l) = 1 - \frac{|1-1|}{1} = 1$$

$$\sim(\omega_2^H, \omega_2^l) = 1 - \frac{|2-1|}{1} = 0,5$$

$$\sim(\omega_3^H, \omega_3^l) = 1 - \frac{|2-2|}{2} = 1$$

$$\sim(\omega_4^H, \omega_4^l) = 1 - \frac{|1-1|}{1} = 1$$

$$CM^{l_1} = \frac{1 \times 1 \times 1 + 2 \times 1 \times 0,5 + 2 \times 2 \times 1 + 2 \times 2 \times 1}{\sqrt{(1^2 + 2^2 + 2^2 + 2^2) \times (1^2 + 1^2 + 2^2 + 2^2)}} = 0,877$$

Similaridade ao longo das descrições para $L=l_2$

$$\sim(\omega_1^H, \omega_1^l) = 1 - \frac{|1-2|}{2} = 0,5$$

$$\sim(\omega_2^H, \omega_2^l) = 1 - \frac{|2-2|}{2} = 1$$

$$\sim(\omega_3^H, \omega_3^l) = 1 - \frac{|2-2|}{2} = 1$$

$$\sim(\omega_4^H, \omega_4^L) = 1 - \frac{|2-2|}{2} = 1$$

$$CM^L = \frac{1 \times 2 \times 0,5 + 2 \times 2 \times 1 + 2 \times 2 \times 1 + 2 \times 2 \times 1}{\sqrt{(1^2 + 2^2 + 2^2 + 2^2) \times (2^2 + 2^2 + 2^2 + 2^2)}} = 0,901$$

Similaridade ao longo das descrições para $L=l_3$

$$\sim(\omega_1^H, \omega_1^L) = 1 - \frac{|1-2|}{2} = 0,5$$

$$\sim(\omega_2^H, \omega_2^L) = 1 - \frac{|2-1|}{2} = 0,5$$

$$\sim(\omega_3^H, \omega_3^L) = 1 - \frac{|2-1|}{2} = 0,5$$

$$\sim(\omega_4^H, \omega_4^L) = 1 - \frac{|2-2|}{2} = 1$$

$$CM^L = \frac{1 \times 2 \times 0,5 + 2 \times 1 \times 0,5 + 2 \times 1 \times 0,5 + 2 \times 2 \times 1}{\sqrt{(1^2 + 2^2 + 2^2 + 2^2) \times (2^2 + 1^2 + 1^2 + 2^2)}} = 0,613$$

$$CM^L = [0,877 \quad 0,901 \quad 0,613]$$

2.5.1 Composição do conjunto de evidências

Os resultados compõem o conjunto de evidências conforme tabela 2.5 abaixo. A primeira coluna mostra as regras l_1 , l_2 e l_3 sendo que cada regra representa as proposições P_1 , P_2 e P_3 respectivamente. Já as colunas 2, 3 e 4 representam os resultados numéricos dos três **especialistas** (e_1 , e_2 e e_3). Assim, para cada P têm-se e_1 , e_2 e e_3 emitindo valores de evidência favorável (μ) para RAP e RNAPA.

Tabela 2.5 – Classificação dos **especialistas**

Regras	e_1 (Bayes)	e_2 (HC)	e_3 (CM^{pk})
l_1	0.754	1	0.877
l_2	0.243	1	0.901
l_3	0.001	0.333	0.613

2.6 Considerações finais

Este capítulo apresentou a composição da LPA2v e suas equações que possibilitam trabalhar com informações contraditórias em sua estrutura. Foi apresentada também a construção de duas redes paraconsistentes denominadas de RAP e RNAPA. Embora a RAP e a RNAPA apresentem algumas semelhanças em seus funcionamentos, a RNAPA difere-se na forma em que as informações são processadas. Na RNAPA, os valores de controle estão presentes no núcleo de cada CNAPA, o que permite estabelecer o quanto de μ_E pode ser aceitável na saída de cada CNAPA. É importante destacar que a partir da LPA2v é possível configurar uma diversidade de redes paraconsistentes como: rede de análise paraconsistente com desativação de NAP, rede de análise paraconsistente tridimensional, rede de análise paraconsistente com filtro de inconsistência, rede neural paraconsistente analítica real e rede neural artificial paraconsistente de aprendizagem, entre outras. Não menos importante, essas redes podem servir de objetos de estudo em trabalhos futuros. As redes (RAP e RNAPA) utilizadas neste trabalho supriram adequadamente a solução do problema proposto (ESF).

Finalizando este capítulo, foi apresentada a composição de três funções heurísticas utilizadas para integrar os valores de evidências dos três e . Conforme mencionado acima, diante da diversidade de funções heurísticas disponíveis nas literaturas não é viável quantificar a eficácia de cada função. Porém, neste trabalho foram utilizadas três funções que apresentaram eficácia em trabalhos relacionados a ESF no SEP. As redes RAP e RNAPA utilizam três funções como e que fornecem as evidências. Mas é possível inserir nessas redes quantos especialistas forem necessários para obter um melhor desempenho da rede. Além de funções heurísticas, é possível obter valores de evidências de quaisquer agentes desde que emitam sinais no intervalo real fechado $[0, 1]$.

3 FUNDAMENTAÇÕES TEÓRICAS

Neste capítulo serão apresentadas as fundamentações no que tangem às causas dos desligamentos não programados, o processo de digitalização das SEs convencionais como forma de minimizar tais desligamento, bem como a filosofia de proteção dos equipamentos primários da SE. O desligamento não programado é um processo que envolve alto conhecimento do operador do centro de controle e ferramentas computacionais robustas que visem apoiar o operador a identificar a origem do desligamento. Esses desligamentos são anomalias no sistema elétrico decorrentes de origens diversas como: naturais, transitórias ou capacidade de geração para atender a demanda. Além disso, é preciso que os equipamentos das SEs convencionais sejam modernizados para melhorar a autonomia do operador a nível de SE, e também, empregar filosofias de proteção que atendam os requisitos mínimos de proteção segundo a ONS.

Considerando as limitações dos equipamentos analógicos que compõem as SEs convencionais frente a novas tecnologias da informação e comunicação (TIC), a digitalização é uma tendência global das concessionárias de energia e ocorre de forma gradual devido à complexibilidade e alto custo. São apresentadas neste capítulo, as principais tecnologias de proteção e comunicação que vêm sendo aplicadas no sistema elétrico pelas concessionárias de energia.

Este capítulo está dividido em quatro subseções: a subseção 3.1 apresenta as origens dos desligamentos não programados a partir de dados estatísticos fornecidos por órgãos como ANEEL e empresa de pesquisa energética (EPE)⁴; a subseção 3.2 apresenta a digitalização das SEs convencionais incluindo os equipamentos digitais responsáveis pela proteção, geração e envio dos alarmes para COS (SCADA); a subseção 3.3 apresenta as fundamentações de proteção e manobra do SE; a subseção 3.4 finaliza com as devidas considerações.

3.1 Desligamento não programado

Os SEP são considerados grandes sistemas de energia inter-relacionados e compostos por três grupos compreendidos como geração, transmissão e distribuição. Cada grupo contém

⁴ EPE é uma empresa pública federal vinculada ao Ministério de Minas e Energia criada através do decreto Nº 5.184 de 16 de Agosto de 2004, com a finalidade de “prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético, tais como energia elétrica, petróleo e gás natural e seus derivados, carvão mineral, fontes energéticas renováveis e eficiência energética, dentre outras”.

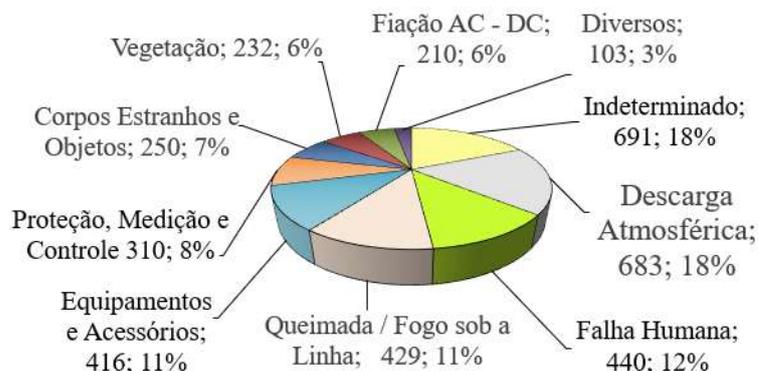
uma diversidade e variedade de equipamentos elétricos primários, dentre eles, os que mais se destacam pela sua importância e robustez são: geradores de energia, barramentos, linhas de transmissão, transformadores de potência, banco de capacitores, relés de proteção e disjuntores (RIBEIRO, 2016, p. 49).

Toda e qualquer anomalia elétrica que ocorra em alguns desses equipamentos tem origens diversas como: natural, transitória ou por capacidade de geração versus demanda. Nos relatórios referentes à análise de desligamento forçado (ALMEIDA, DA COSTA, *et al.*, 2018, p. 38) e anuário estatístico de energia elétrica 2021 ano base 2020 (EPE, 2022), apontam que as anomalias elétricas estão quase sempre relacionadas a origem natural. Os dados desses relatórios estão descritos na subseção 3.1.1 e contribuem para uma melhor compreensão e lisura das informações referentes às causas dos desligamentos não programados no Brasil.

3.1.1 Dados dos desligamentos não programados

A última edição publicada na ANEEL por ALMEIDA, DA COSTA, *et al.* (Relatório de Análise de Desligamentos Forçados do Sistema de Transmissão Edição 2018, p. 38) quantifica as interrupções ocorridas no período de 1º de julho de 2016 a 30 de junho de 2017. Nesse período ocorreram no Brasil 3.764 (três mil, setecentos e sessenta e quatro) interrupções. Desse total, 75,6% ocorreram em linhas de transmissão e 24,4% ocorreram em subestação. De outra forma: 18% das interrupções foram classificadas como “indeterminado”, ou seja, não foi diagnosticada a origem do desligamento; 12% por falha humana; 11% relacionadas a falhas em equipamentos e acessórios e 8% relacionado a proteção, medição e controle. A figura 3.1 abaixo mostra detalhadamente as causas dos desligamentos. Ressalta-se que desde 2017 a ANEEL não mais publicou tal relatório.

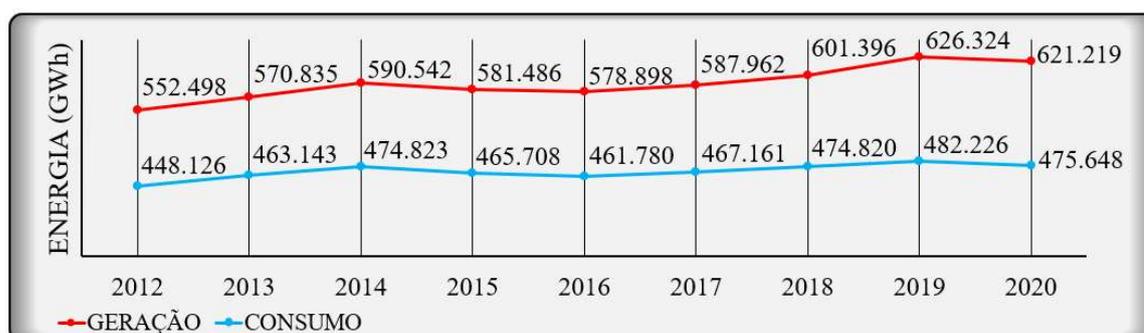
Figura 3.1 – Desligamento forçado do sistema no período 07/2016 à 07/2017



Fonte: ALMEIDA, DA COSTA, *et al* (2018, p. 38)

Já no último anuário estatístico de energia elétrica 2022 (ano base 2021), conforme EPE (2022), verifica-se que as interrupções não programadas do SEP no Brasil estão muito mais associadas as origens naturais do que na sua própria capacidade de geração de energia para atender a demanda. A figura 3.2 mostra os dados do anuário EPE que correlaciona a capacidade de geração com o consumo de energia elétrica no Brasil. Os dados referentes a geração foram retirados da tabela 2.3 do relatório EPE e incluem: gás natural, hidráulica, derivados do petróleo, carvão, nuclear, biomassa, eólica entre outros. Já os dados referentes ao consumo de energia foram retirados da tabela 4.1 e incluem: residencial, industrial comercial, rural, poder público, iluminação pública, serviço público e consumo próprio. Com relação a diferença entre geração e consumo, destaca-se que o anuário EPE não faz uma abordagem reflexiva sobre tal diferença.

Figura 3.2 – Geração x Consumo de energia no Brasil



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2022)

Observa-se que no período de nove anos a geração de energia no Brasil sempre esteve em média 121.970 (GWh) superior ao consumo, o que em tese, pode não justificar que as grandes interrupções derivam de um déficit na capacidade de geração. Em uma outra análise, na tabela 3.1 do relatório EPE verifica-se que a média de 121.970 GWh supre individualmente o consumo do sul (87.906 GWh), centro-oeste (38.874 GWh), norte (37.670 GWh) e nordeste (81.165 GWh).

Todavia, é importante destacar que o Brasil já passou por grandes desafios referentes ao déficit da geração de energia versus consumo. Como exemplo relacionado a problema de geração, pode-se destacar o blecaute ocorrido em março de 1999 decorrente de sobrecarga que derrubou aproximadamente 10 estados incluindo do distrito federal. Posteriormente em 2001 e 2002 foi imposto o racionamento de energia, pois havia mais demanda do que oferta (FRITZEN, 2012, p. 13). Já com relação aos desligamentos por origens diversas podem destacar

as referências mencionadas no capítulo 1: queda na linha de transmissão (FRITZEN, 2012), condições climáticas (ONS, 2009, p. 9), falha humana decorrente de ajuste indevido na proteção de sobrecorrente (ONS, 2018, p. 7) e falha humana por falta de manutenção no transformador (ONS, 2020, p. 6).

3.2 Digitalização das SEs do SEP

Nas últimas décadas as SEs convencionais vêm passando por grandes processos de digitalização para garantir uma maior autonomia do operador da SE e conseqüentemente, eliminar de forma mais rápida os desligamentos programados ou não. Essas mudanças ocorrem de forma acelerada e implicam na modificação das SEs convencionais para um sistema de automação de subestação (SAS), também conhecida mais abrangentemente como rede inteligente (do inglês “*smart grid*”). Os principais equipamentos do SAS consistem na instalação de uma nova geração de relés digitais multifuncionais chamados de dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs do inglês “*Intelligent Electronic Device*”), “*ethernet switch*” e unidades de fusão (MUs, do inglês “*merging unit*”). Uma das vantagens do SAS são as redes de comunicação baseadas em *ethernet* que permitem que os IEDs da SE realizem de forma rápida e eficiente a: medição, monitoramento, proteção e controle. Além disso, o SAS pode operar com IEDs de diferentes fabricantes.

Para LIM, (2017) o objetivo do SAS é aumentar a capacidade operacional da subestação através da troca de informações entre os diferentes equipamentos de proteção da rede. O autor destaca ainda que o maior desafio da comunicação entre esses equipamentos é que eles são desenvolvidos por diferentes fornecedores com suas próprias tecnologias exclusivas. A fim de ultrapassar esses desafios, a norma da comissão eletrotécnica internacional (IEC) 61850 parte 9-2 (IEC, do inglês “*internacional electrotechnical commission*”)⁵ que trata sobre redes e sistemas de comunicação em SEs, definiu protocolos de comunicações que garantam a interoperabilidade e intercambiabilidade entre esses equipamentos.

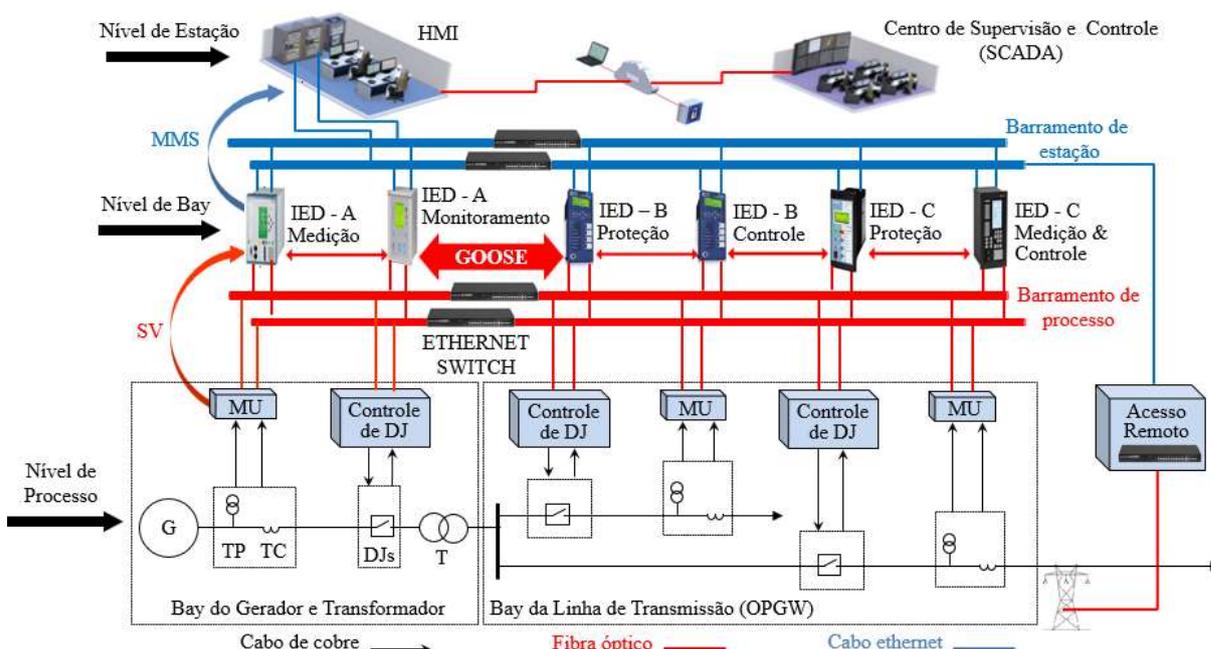
A figura 3.3 mostra uma arquitetura IEC 61850 composta por: quatro barramentos, sendo dois de processo e dois de estação (esses conectados em anel); três níveis, sendo nível de processo, de bay e de estação; e três protocolos de comunicação, sendo comunicação vertical

⁵ Fundada em 1906, a IEC (International Electrotechnical Commission) é a organização líder mundial para a preparação e publicação de padrões internacionais para todas as tecnologias elétricas, eletrônicas e relacionadas. Estes são conhecidos coletivamente como “eletrotecnologia” (IEC International Electrotechnical Commission, 2022).

(entre níveis) chamado de valor amostrado (SV, do inglês “*sampled value*”), especificação de mensagem de fabricação (MMS do inglês, “*manufacturing message specification*”); e comunicação horizontal (entre IEDs) chamado de objeto genérico orientado pelo evento de subestação (GOOSE do inglês, “*generic object-oriented substation events*”).

As descrições sucintas dos barramentos em anel e dos níveis do SAS estão descritas nas subseções 3.2.1 e 3.2.2.

Figura 3.3 – Arquitetura IEC 61850 em anel múltiplo



3.2.1 Barramento de processo da figura 3.3

Os benefícios do barramento de processo incluem a facilitação do uso de transformadores de instrumentos não convencionais, registro aprimorado de perturbações, medição fasorial e a remoção de cabos de cobre entre o pátio de manobra e salas de proteção e controle (INGRAM, SCHAUB, *et al.*, 2013). O barramento deve fornecer comunicação em tempo real, pois transporta informações críticas de tempo como: sinais fasoriais de corrente e tensão, intertravamento e estado de operação dos equipamentos primários entre outros. Essas informações são digitalizadas no nível de processo, confinadas nos *switches ethernet* e submetidas ao nível de bay de forma que:

- ✓ Nível de processo é o pátio do SAS composto pelo bay do transformador e bay da

linha de transmissão. Seus equipamentos são: Geradores (G), transformadores de potência (T), linha de transmissão (L), barra (B), disjuntores (CB), transformadores de corrente (TC) e transformador de tensão (TP) e unidades de fusão (MUs, do inglês “*merging unit*”). A MU coleta os sinais fasoriais e estado de operação dos equipamentos, digitaliza, funde e envia em pacotes SV com carimbo de tempo (BALAN, LAJITHA, *et al.*, 2018);

- ✓ Nível de bay são os IEDs multifuncionais. Esses podem ser habilitados para as funcionalidades como medição, monitoramento, proteção e controle. A figura 3.3 mostra seis IEDs, suas funções e fabricantes (A, B e C). O GOOSE são mensagens multicast de tempo crítico como trip entre IEDs e mudança de estado do sistema elétrico como exemplo liberação e bloqueio (HUSSAIN, FAROOQ e USTUN, 2019).

3.2.2 Barramento de estação da figura 3.3 conectado em anel

O barramento de estação faz a interface entre o nível de bay e o nível da estação. Este transporta as informações de gerenciamento e de tempo crítico, como alarmes e eventos relacionados à proteção dos equipamentos primários. Além disso, uma outra característica desse barramento é a interface remota com outras SEs por meios de cabos terrestres óptico (OPGW, do inglês “*optical ground wire*”); tal interface garante a redundância das mensagens como também acesso remoto entre SEs. DE DOMINICIS, FLAMMINI, *et al.*, (2011) destacam que, de modo geral, o barramento da estação adota topologias em anel redundantes que possibilita caminhos alternativos gerenciados por protocolo de árvore de expansão rápida (RSTP do inglês, “*rapid spanning tree protocol*”). A RSTP garante que as mensagens sejam entregues em caso de falha na rede.

O nível de estação e o nível de centro de controle (SCADA) estão acima do barramento de estação e podem ser definidas como:

- ✓ O nível de estação é o operador local da SE, é o nível onde ocorre a interação homem máquina (IHM), através de software e gateway fazendo a coordenação com o nível de centro de controle (SCADA). Nesse nível os operadores também podem emitir sinais para realizar certos tipos de controle manual (LEI, SINGH e SPRINTSON, 2014);
- ✓ O nível de centro de controle (SCADA) também é IHM, estabelece as interfaces com o

nível de estação e verifica as mensagens GOOSE. Este é o nível mais alto da hierarquia focado no gerenciamento de todos os sistemas de automação de subestações (SASs) e SEs convencionais que compõem o SEP. O SCADA coleta, analisa e apresenta os alarmes gerados por anomalias elétricas ocorridas no SEP. O SCADA deve possuir códigos abertos conforme protocolos IEC 61850 ou implementação de “gateways” dedicado a conversão de protocolos.

3.2.3 Considerações do SAS

Finalizando a subseção 3.2, embora o SAS seja uma realidade para garantir uma maior automação no SEP a fim de solucionar a ESF, ele também proporciona dificuldade e desvantagem na implementação. Com relação a dificuldade, CHEN, LIN, *et al* (2012), destacam que embora os protocolos de comunicação IEC 61850 sejam utilizados para aumentar a qualidade de comunicação, é muito difícil integrar os protocolos em diferentes IEDs fabricados por diferentes fornecedores, pois esses sempre usam protocolos fechados. Assim, em muitos casos, faz-se necessária a utilização de “gateways” de alto custo para garantir a interoperabilidade e intercambiabilidade. Já com relação a desvantagem, ZHU, LIU, *et al.* (2020) afirmam que a implementação de alto nível da tecnologia da informação e comunicação (TIC) aumenta os riscos de uma invasão cibernética no SCADA, podendo os invasores obter acesso às infraestruturas de todo o SEP lançando ataques para manipular as medições das SEs.

3.3 Fundamentações de proteção e manobra

Todo equipamento primário do SEP como G, T, L, B, banco de capacitores (BC) etc, são equipamentos providos de dispositivos de proteção que lhes garantam suas integridades e continuidade de energia durante uma falta não programada. Na ocorrência de uma falta, esses dispositivos protegem e ao mesmo tempo, realizam manobras no sistema elétrico para isolar a parte defeituosa do sistema de forma rápida e seletiva.

A qualidade na filosofia de proteção é um desafio para as concessionárias de energia, pois deve-se equilibrar o melhor arranjo de proteção versus benefícios relacionados aos custos de implantação, manutenção entre outras adversidades (C37.91-2008 - IEEE Guide for Protecting Power Transformers - Redline, 2008)

Basicamente um esquema de proteção é composto por disjuntores (CBs), chaves

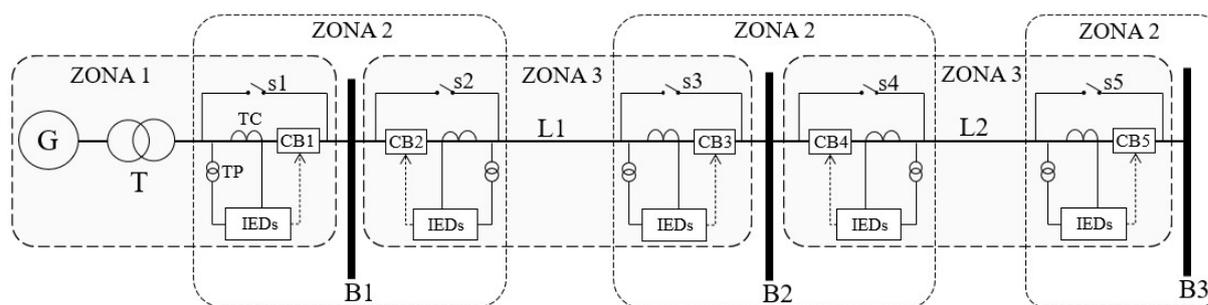
seccionadoras (s), TC, TP e relés (ou IEDs habilitados para operar como proteção, medição, monitoramento e controle). Os relés medem e monitoram constantemente as grandezas elétricas e, quando necessário, (no caso de anomalia nas grandezas elétricas) acionam a abertura dos disjuntores. Já as chaves seccionadoras modificam por meio de manobras a topologia do sistema elétrico garantindo o isolamento total da parte defeituosa e a continuidade da energia elétrica no SEP.

Comumente, para se obter uma filosofia de proteção que seja tecnicamente viável e ofereça diferentes graus de qualidade, as funcionalidades de proteção devem possuir (RIBEIRO, 2016):

- ✓ Sensibilidade para identificar anomalias elétricas que excedam o nível normal ou para detectar o limiar em que a proteção deva atuar;
- ✓ Seletividade para obter precisão na descontinuidade de energia, ou seja, desenergizar tão somente o equipamento defeituoso;
- ✓ Velocidade para reestabelecer a energia nas suas condições normais após a falta;
- ✓ Confiabilidade e competência para distinguir entre condições normais de operação e condições de falta.

A figura 3.4 mostra um sistema simplificado de proteção composto por dispositivos de monitoramento, controle e proteção como: IEDs, TC, TP, CB1...5 e s1...5, cada qual alocados em suas respectivas zonas de proteção (ZONA1...3).

Figura 3.4 – Exemplo de proteção por zona



Na prática, a filosofia de proteção divide o sistema elétrico em zonas supervisionadas, cada qual, dotada de dispositivos de proteção a fim de garantir o menor número de desligamento. A figura 3.4 acima mostra o sistema dividido em: zona 1- proteções do G e T; zona 2- proteções das barras (B1, B2 e B3); zona 3- proteções das linhas (L1 e L2). De outra

forma, a proteção de cada zona é configurada para atuar somente para faltas dentro do seu alcance de proteção.

Os equipamentos primários da figura 3.4 (G, B1...3 e L1...2) são formulados por dois tipos de proteção sendo:

- ✓ Proteção seletiva (PS) composta por IEDs habilitados para operar como relés de proteção principal (ou primária). Esses são programados para completar em alta velocidade sua função de operação (disparo do inglês, “*trip*”) em toda a extensão de sua zona. Além disso, esses IEDs determina a coordenação de dois ou mais equipamentos de proteção, para atuarem em uma sequência de operação preestabelecida (SUOZA, 2008);
- ✓ Proteção não seletiva (PNS) composta por IEDs habilitados para operar como relés de proteção de retaguarda local e remota. Esses detectam anomalias não apenas na sua zona, mas também em zonas vizinhas como por exemplo, relé de proteção de sobrecorrente. A proteção contra falha de disjuntor também é não seletiva. Essa age na abertura dos disjuntores locais ou remotos de modo a isolar a falta.

3.4 Considerações finais

Este capítulo mostrou as principais origens de um desligamento não programado no SEP brasileiro tendo, como base de informações, dois relatórios estatísticos. Foi demonstrado que nas últimas décadas, as grandes interrupções de energia no Brasil não derivam de um déficit na capacidade de produção, mas sim por origens diversas (falha humana, queda de torre, falta de manutenção entre outros). Essas interrupções resultaram em grandes impactos, uma vez que, a falta de energia perdurou por horas e em vários estados brasileiros.

Posteriormente, foi apresentado o SAS que é a digitalização de uma SE convencional. Apesar do alto custo e da complexibilidade da digitalização, o SAS é uma tendência global sendo implementado gradativamente por concessionárias de energia. Uma subestação totalmente autônoma faz melhorar a qualidade da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica e, ao mesmo tempo, minimizar os impactos de um desligamento não programado.

Finalizando o capítulo, foram apresentadas as fundamentações de proteção e manobra e como os dispositivos de proteção devem atuar em cada zona diante de um desligamento programado ou não. Destaca-se que independentemente da tecnologia envolvida em uma SE

(digital ou convencional), esta deve ser dotada de proteção que garanta a sensibilidade, seletividade velocidade e confiabilidade.

4 MÉTODOS INVESTIGADOS

No desenvolvimento deste trabalho foram investigadas várias literaturas propondo diferentes métodos para ESF no SEP e/ou diagnóstico de falta no SEP. Em sua maioria, estas utilizam como base de informações os alarmes reportados pelo SCADA. Este capítulo tem como propósito apresentar quatro metodologias utilizadas para comparar e validar a RAP-LPA2v e RNAPA, conforme descrito abaixo.

- (1) Para o ESF no SEP utilizando a RAP-LPA2v, foi utilizado na comparação e validação o método MIP proposto pelos autores OLIVEIRA, DE ARAÚJO, *et al.*, (2016). Os dados referentes a topologia da rede, filosofia de proteção e os alarmes SCADA foram retirados do trabalho desses mesmos autores;
- (2) Para diagnóstico de falta no SEP utilizando a RNAPA, foram utilizadas na comparação e validação três metodologias que têm como característica a lógica *fuzzy*. Duas chamadas de IVFSNP *systems*, rWCFRSNPs se baseiam em sistema neural pulsante (SNP *systems*, do inglês, do inglês *spiking neural P systems*) com valores *fuzzy*. A terceira chamada de FL se baseia em redes de causa-efeito com valores *fuzzy*. Os dados referentes à topologia da rede, filosofia de proteção e os alarmes SCADA foram retirados da IVFSNP *systems* propostos pelos autores WANG, PENG, *et al.*, (2019). Destaca-se que a RNAPA é uma evolução da RAP-LPA2v e, por esse motivo, também foi incluída na comparação.

4.1 Considerações gerais

De forma resumida, o método proposto por OLIVEIRA, DE ARAÚJO, *et al.*, (2016). é tratado como um problema de otimização que visa em um classificador de eventos baseado no teorema de *bayes* que não requeira dados estatísticos e formula um modelo MIP para o problema de ESF, levando em consideração a teoria de recobrimento parcimoniosa e a hierarquização de possíveis múltiplas soluções. Para resolução do modelo MIP, foi utilizado o “*solver*” comercial IBM ILOG CPLEX Optimization Studio versão 12.4. Não menos importante, os autores OLIVEIRA, DE ARAÚJO, *et al.*, (2016) consideraram filosofias reais de proteção, especificando os relés e suas características de operação.

A SNP é uma classe de modelos de computação de membrana distribuída e paralela,

no qual, os neurônios biológicos enviam pulsos ao longo das sinapses, sendo esses, representados por números *fuzzy*. A SNP é uma das principais formas de uma rede pulsante P, pode ser vista como um grafo direcionado cujos arcos representam as conexões sinápticas entre os neurônios. Nos últimos anos, uma classe de variantes que integram diferentes lógicas *fuzzy* em sistemas SNP foram desenvolvidas (PENG, WANG, *et al.*, 2018). Já, as redes de causa-efeito são modelagens gráficas que relacionam as seções em faltas com operações dos dispositivos de proteção.

A seguir, são demonstrados na subseção 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 os quatro modelos investigados e utilizados na comparação dos resultados deste trabalho.

4.2 Método investigado MIP

Conforme mencionado, os autores descrevem que a MIP se baseia na teoria da parcimônia, em que a hipótese mais simples para explicar os alarmes reportados deve servir como solução do problema. O critério é otimizar (minimizar) a função objetivo para determinar a melhor solução.

As equações abaixo descrevem as formulações do problema: 4.1 é a função objetivo, onde $W_1 \geq W_2 \geq W_3$ são as importâncias das variáveis (pesos); 4.2 estabelece que cada alarme (a_j) deve estar associado ao menos um evento (e_i). Caso contrário, o alarme é falso (s_j); 4.3 estabelece que um evento deve estar associado ao menos um alarme. Caso contrário o alarme é falho (f_j); 4.4 é a restrição *big M* que indica na variável ve_i custo associado ao evento e_i , ou seja, total de alarmes falhos existem ($ve_i \geq 0$); já 4.5, 4.6 e 4.7 correspondem às condições binárias das variáveis.

Modelo (função objetivo)

$$\min W_1 \sum_{j \in J} s_j + W_2 \sum_{j \in I} ve_j + W_3 \sum_{i \in I} e_i \quad 4.1$$

Sujeito a

$$s_j + \sum_{j \in E_j} e_i \geq a_j \quad \forall j \in J \quad 4.2$$

$$e_i \leq a_j + f_j \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad 4.3$$

$$M_i (e_i - 1) + \sum_{j \in A_i} f_j \leq ve_i \quad \forall i \in I \quad 4.4$$

$$e_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I \quad 4.5$$

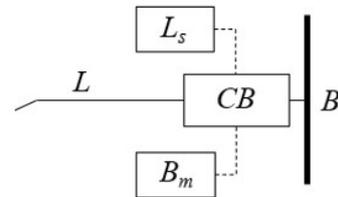
$$s_j, f_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad 4.6$$

$$ve_i \geq 0 \quad \forall i \in I \quad 4.7$$

A figura 4.1 mostra a matriz P que são padrões de operação de proteção da B. As linhas representam o conjunto de alarmes (J) e as colunas representam o conjunto de eventos na barra (I). Os alarmes a_1 , a_2 e a_3 são os dispositivos de proteção B_m , CB e L_s respectivamente (1 operou e 0 caso contrário). Já o alarme a_4 representa a classificação de falta estabelecida pelo teorema de Bayes (1 falta na barra e 0 caso contrário).

Figura 4.1 – Matriz P das regras de operação de proteção da B

$$P = \begin{matrix} & a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \\ \begin{matrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} & \begin{matrix} \rightarrow \text{falta na B} \\ \rightarrow \text{falta na B} \\ \rightarrow \text{falta na B} \\ \rightarrow \text{não falta na B} \end{matrix} \end{matrix}$$



Considerando os padrões acima, obtém-se a forma com que o modelo MIP é descrito conforme tabela 4.1. De outra forma, considerando a solução “ótima” da instância referente aos alarmes reportados a_3 e a_4 , obtém-se os seguintes resultados: Instância (a_3 e a_4); Solução ótima ($e_2 = 1, ve_2 = 1, s_2 = 0, f_1 = 1$) e função objetiva ($9s_2 + 3ve_2 + e_2 = 4$). Finalmente, o modelo MIP informa que ocorreu uma falta caracterizada pelo evento e_2 (falta na B) com falha de operação no alarme a_1 .

Tabela 4.1 – Descrição do modelo MIP

$\min W_1(s_1 + s_2 + s_3 + s_4) + W_2(ve_1 + ve_2 + ve_3 + ve_4) + W_3(e_1 + e_2 + e_3 + e_4)$	
Sujeito a	Determinação de ve_2 e f_1 para $e_2 = 1, a_3 = 1$ e $a_4 = 1$
$s_1 + e_1 + e_2 + e_3 \geq a_1$	$s_1 + e_1 + 1 + e_3 \geq 0$
$s_2 + e_2 \geq a_2$	$s_2 + 1 \geq 1$
$s_3 + e_2 + e_4 \geq a_3$	$s_3 + 1 + e_4 \geq 1$
$s_4 + e_1 + e_2 + e_3 \geq a_4$	$s_4 + 1 + e_2 + e_3 \geq 1$
$e_1 \leq a_1 + f_1$	$0 \leq 0 + f_1$
$e_1 \leq a_4 + f_1$	$0 \leq 1 + f_1$
$e_2 \leq a_1 + f_1$	$1 \leq 0 + f_1$

→ $f_1 = 1$ para satisfazer a função

Tabela 4.1 – Descrição do modelo MIP

$\min W_1(s_1+s_2+s_3+s_4)+W_2(v_1+v_2+v_3+v_4)+W_3(e_1+e_2+e_3+e_4)$	
Sujeito a	Determinação de v_2 e f_1 para $e_2 = 1, a_3 = 1$ e $a_4 = 1$
$e_2 \leq a_3 + f_3$	$1 \leq 1 + f_3$
$e_2 \leq a_4 + f_4$	$1 \leq 1 + f_4$
$e_3 \leq a_1 + f_1$	$0 \leq 0 + f_1$
$e_3 \leq a_2 + f_2$	$0 \leq 0 + f_2$
$e_3 \leq a_4 + f_4$	$0 \leq 1 + f_4$
$e_4 \leq a_3 + f_3$	$0 \leq 1 + f_3$
$2(e_1 - 1) + f_1 + f_4 \leq v_1$	$2(0 - 1) + 1 + f_4 \leq v_1$
$3(e_2 - 1) + f_1 + f_3 + f_4 \leq v_2$	$3(1 - 1) + 1 + f_3 + f_4 \leq v_2 \rightarrow v_2 = 1$ para satisfazer a função
$3(e_3 - 1) + f_1 + f_2 + f_4 \leq v_3$	$3(0 - 1) + 1 + f_2 + f_4 \leq v_3$
$1(e_4 - 1) + f_4 \leq v_4$	$1(0 - 1) + f_4 \leq v_4$
$e_1, e_2, e_3, e_4 \in \{0, 1\}$	$0, 1, 0, 0 \in \{0, 1\}$
$f_1, f_2, f_3, f_4 \in \{0, 1\}$	$1, 0, 0, 0 \in \{0, 1\}$
$s_1, s_2, s_3, s_4 \in \{0, 1\}$	$0, 0, 0, 0 \in \{0, 1\}$
$v_1, v_2, v_3, v_4 \geq 0$	$0, 1, 0, 0 \geq 0$

Apesar da simplicidade do exemplo em considerar somente a proteção da barra com poucos padrões ($P_{4 \times 4}$), o modelo MIP é aplicado no SEP como um todo, estabelecendo padrões a nível de sistema com maior quantidade e diversidade. Esses padrões incluem toda modelagem de filosofias de proteção do SEP, bem como são incorporadas as classificações estabelecidas pelo teorema de *bayes* em nível de equipamento.

4.3 Método investigado IVFSNP systems

O modelo IVFSNP systems é uma variante do sistema neural pulsante SNP que integra os valores de intervalos fuzzy em seu processo de funcionamento; sua definição é estabelecida na equação 4.8.

$$\Pi = (A, \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m, syn, I, O) \tag{4.8}$$

Onde:

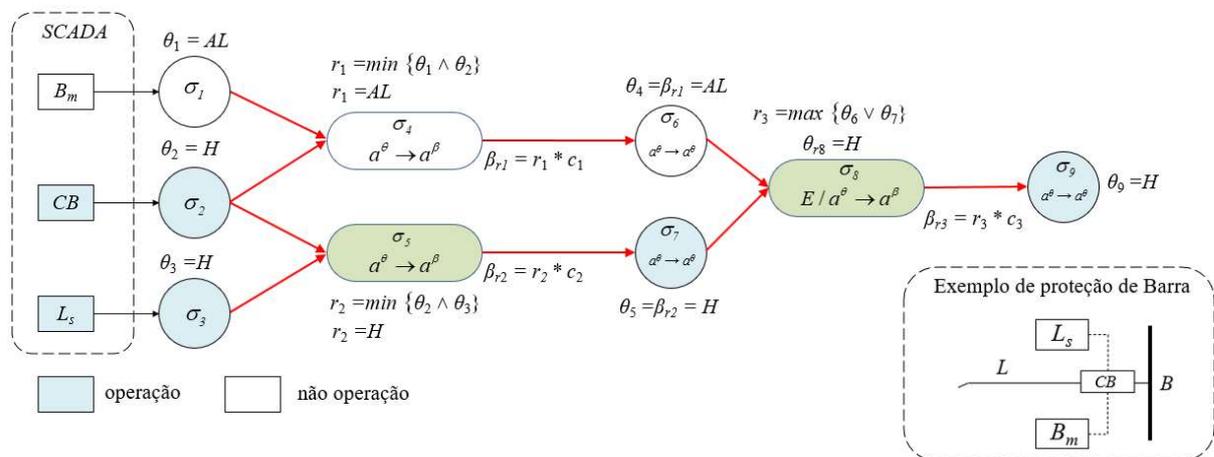
- (1) $A = \{a\}$ é um alfabeto singleton, em que a é o pulso (estado de operação);

- (2) $\sigma_1, \sigma_1, \dots, \sigma_m$ conjunto de m neurônios na forma de $\sigma_i = (\theta_i, r_i, c_i)$, $i \in \{1, 2, \dots, m\}$, sendo:
- (a) θ_i neurônio de proposição representado por valores de intervalos *fuzzy*;
 - (b) r_i neurônio de regra de disparo na forma $a^\theta \rightarrow a^\theta$ ou $a^\theta \rightarrow a^\beta$, sendo θ e β valores de intervalos *fuzzy*;
 - (c) c_i fator de confiança do neurônio de regra representado por valores de intervalos *fuzzy*.
- É definido conforme nível de proteção;
- (3) *syn* são as sinapses que interligam os neurônios de proposição e de regra e vice-versa;
- (4) I e O denotam o conjunto de neurônios de entrada (σ_1) e saída (σ_m) da função Π respectivamente.

Desconsiderando as variáveis que regem o funcionamento do algoritmo, a figura 4.2 mostra o seu funcionamento com: relé principal de barra (B_m); relé de retaguarda de linha (L_s); (CB); sinais de entrada dos neurônios de proposição $\theta_p = (VH \ VH \ AL)$; fator de confiança de cada neurônio de regra $C = (AH \ AH \ AH)$ e no canto esquerdo um exemplo de proteção de barra.

As siglas representam os intervalos *fuzzy*, sendo absolutamente alto (AH, do inglês “*absolutely-high*”), alto (H, do inglês “*high*”) e absolutamente baixo (AL, do inglês “*absolutely-low*”). Seus valores são: AH = [(1,0 1,0 1,0 1,0; 1,0), (1,0 1,0 1,0 1,0; 1,0)], H = [(0,7825 0,815 0,885 0,9075; 0,8), (0,72 0,78 0,92 0,97; 1)] e AL = [(0,0 0,0 0,0 0,0; 0,8), (0,0 0,0 0,0 0,0; 1)]. O algoritmo é finalizado no neurônio de saída σ_9 e é considerado falta se o pulso de saída $\theta_{pi} \geq [(0,65 0,6725 0,7575 0,79; 0,8), (0,58 0,63 0,80 0,86; 1)]$. Destaca-se que na ocorrência de uma falha no CB, a rede estabelece, na saída, um nível de confiança AL .

Figura 4.2 – Demonstração do funcionamento do modelo IVFSNP systems



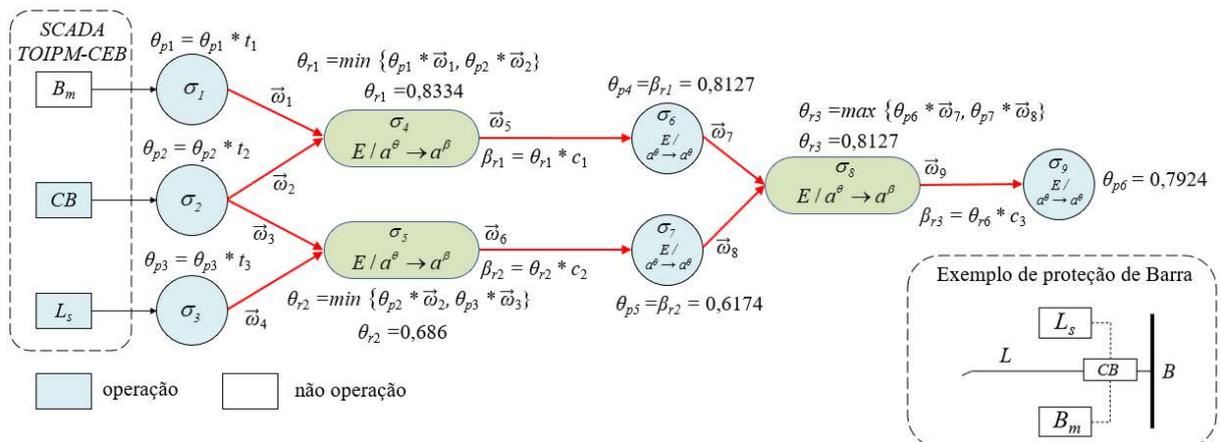
4.4 Método investigado rWCFRSNPSs

Esse modelo também tem como definição formal Π . Porém, além das variáveis já descritas (θ_i, r_i e c_i), são acrescentadas novas variáveis em σ_i de forma que:

- (1) Para os neurônios $\sigma_i = (\theta_i, r_i, c_i, t_i, \vec{\omega}_i, \lambda_i)$, $i \in \{1, 2, \dots, m\}$, sendo:
 - (a) t_i parâmetro de correção da informação dos neurônios de entrada; este corrige os alarmes falsos e falhos antes do início do algoritmo. A correção é chamada de método de processamento de informações de ordem temporal baseado em redes de causa-efeito (TOIPM-CEN, do inglês, “temporal order information processing method based on cause-effect networks”);
 - (b) $\vec{\omega}_i$ Peso de saída dos neurônios de proposição (dados estatísticos);
 - (c) λ_i limiar de disparo dos neurônios;
 - (d) r_i neurônio de regra de disparo na forma de $E / a^\theta \rightarrow a^\beta$ para $E = \{a^n, \theta \geq \lambda_i\}$, sendo θ e β números fuzzy.

Desconsiderando as variáveis que regem o funcionamento do algoritmo, a figura 4.3 mostra o seu funcionamento com: os sinais de entrada $\theta_p = (0,8504 \ 0,9833 \ 0,7)$; pesos de cada sinapse $\vec{\omega} = (0,98 \ 0,95 \ 0,95 \ 0,98 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1)$; parâmetros de correção $T = (1 \ 1 \ 1)$; e fator de confiança dos neurônios de regra $C = (0,975 \ 0,9 \ 0,975)$. O algoritmo finaliza no neurônio de saída σ_9 e é considerado falta se o pulso de saída $\theta_{pi} \geq 0,5$. Perceba que o sistema TOIPM-CEN corrigiu as mensagens de alarmes estabelecendo o valor binário $t_1 = 1$, pois o relé B_m deveria operar e não operou.

Figura 4.3 – Demonstração do funcionamento do modelo rWCFRSNPSs



4.5 Método investigado FL

Este método baseia-se em um sistema que utiliza uma rede causa-efeito com lógica *fuzzy*. A rede é representada por nós: da seção em falta; dos relés; dos disjuntores. Dado X e S como condições de cada nó, uma relação *fuzzy* é denotada por $R(X, S)$, onde a condição de X implica a condição de S . A metodologia proposta utiliza duas funções de relação, sendo implicação máxima de Zadeh e relação *fuzzy* binária. Como ambas estabelecem os mesmos resultados, será demonstrada apenas a relação binária da equação 4.9, onde \tilde{A} e \tilde{B} são definidos como conjuntos de números *fuzzy* nos universos discursivos X e S , respectivamente.

$$t(x_i = \tilde{A} \rightarrow y_i = \tilde{B}) = \begin{cases} 1, & \mu_{\tilde{A}}(x_i) \leq \mu_{\tilde{B}}(y_i) \\ 0, & \mu_{\tilde{A}}(x_i) > \mu_{\tilde{B}}(y_i) \end{cases} \quad 4.9$$

Dada a relação *fuzzy*, dois conjuntos *fuzzy* são constituídos, sendo \tilde{M} a relação entre relé principal (B_{MR}) e disjuntor (CB) e \tilde{B} a relação entre relé de backup de linha (L_{BR}) e CB . As equações 4.10 e 4.11 definem as relações de pertinências de \tilde{M} e \tilde{B} , respectivamente.

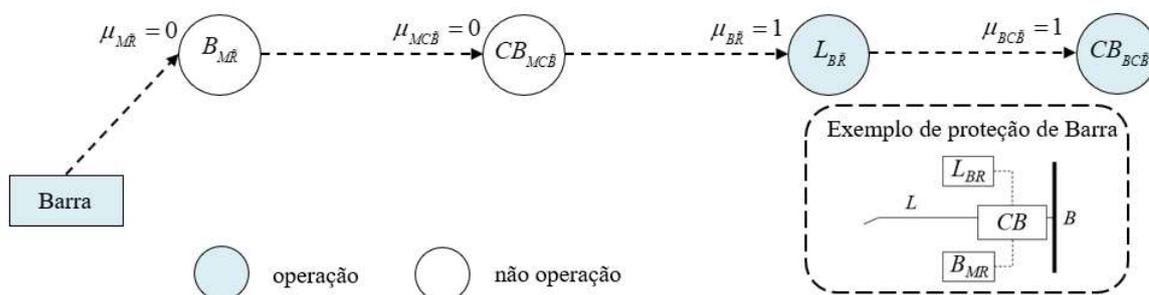
$$\mu_{\tilde{M}}(k) = \max\{\mu_{M\tilde{R}}(k), \mu_{MC\tilde{B}}(k)\} \quad 4.10$$

$$\mu_{\tilde{B}}(k) = \max\{\mu_{B\tilde{R}}(k), \mu_{BC\tilde{B}}(k)\} \quad 4.11$$

Usando a implicação *fuzzy* da equação 4.9, o diagnóstico é estabelecido a partir da combinação das pertinências $\mu_{\tilde{M}}$ e $\mu_{\tilde{B}}$, essa combinação é a relação difusa \tilde{C} da equação 4.9 (onde k é o caminho dos neurônios). Desconsiderando as variáveis que regem o funcionamento do algoritmo, a figura 4.4 mostra a rede de causa-efeito composta por cinco nós sendo: nó da Barra, nó do relé principal (B_{MR}), nó do relé de retaguarda (L_{BR}) e dois nós do disjuntor CB , sendo $CB_{M\tilde{B}}$ e $CB_{B\tilde{C}}$. O algoritmo é finalizado na equação 4.12 e é considerado falta se $\max\{\mu_{\tilde{C}}(k)\} = 1$.

$$\mu_{\tilde{C}}(k) = \begin{cases} 1, & \text{se } \mu_{\tilde{B}} \leq \mu_{\tilde{M}} \\ 0, & \text{se } \mu_{\tilde{B}} > \mu_{\tilde{M}} \end{cases} \quad 4.12$$

Figura 4.4 – Demonstração do funcionamento do modelo do modelo FL



Percebe-se que o modelo FL apresenta fragilidade no diagnóstico em casos de falha nos relés principais. Neste sentido, os três estudos de casos apresentados pelos autores não envolveram falha nos relés principais.

4.6 Considerações finais

Dentre várias metodologias investigadas ao longo deste trabalho, quatro (IVFSNP systems, rWCFRSNPs, FL e MIP) foram utilizados para fins de comparação dos resultados e validação das metodologias propostas (RAP-PLA2v e RNAPA). O propósito deste capítulo foi demonstrar de forma clara, porém sucinta, as suas estruturas de funcionamento de cada metodologia investigada e como os diagnósticos são obtidos a partir do estado de operação dos relés e disjuntores.

Foram demonstradas as formulações matemáticas e como essas são utilizadas a partir de condições pré-estabelecidas. Com exceção da MIP, as metodologias SNP criam redes neurais para cada seção do sistema elétrico. A fim de simplificar os exemplos, foi demonstrado somente o formato da rede neural e rede causa-efeito (FL) da barra. Por fim, a mesma simplicidade foi adotada na MIP, onde foram demonstrados somente os padrões de proteção simples da barra.

5 METODOLOGIAS PROPOSTAS

Neste capítulo é apresentada a estrutura de funcionamento e aplicação das metodologias RAP-LPA2v e RNAPA para a ESF no SEP. Essas têm como base de dados as informações do SCADA como eventos, seções alarmadas e estado de operação dos relés e disjuntores de cada seção. Com relação aos alarmes reportados pelo SCADA, é importante destacar que ambas as metodologias não incluem:

- ✓ Módulo de interface com o SCADA que possibilite carregar em tempo real os alarmes gerados e reportados;
- ✓ Processadores de alarmes que permitam, em tempo real, realizar o agrupamento dos alarmes por seção e nem a reordenação cronológica dos alarmes;
- ✓ Identificação da topologia da rede (antes e pós contingência);

Neste sentido, deve-se considerar para ambas as metodologias que as informações referentes aos alarmes reportados pelo SCADA foram pré-estabelecidas, ou seja, os alarmes SCADA foram cadastradas manualmente nas tabelas 6.1 e 6.5 do capítulo 6.

5.1 Considerações gerais

Na ocorrência de uma contingência no SEP devido a faltas, a atuação de relés e disjuntores dá origem a muitos alarmes que são enviados ao COS. O COS é dotado de sistemas de controle e supervisão capazes de executar o processamento e monitoramento dos alarmes em grande volume, variedade e velocidade. Nesse aspecto, o SCADA é caracterizado como grandes dados (em inglês “*big data*”), o que o torna complexo no processamento e monitoramento em tempo real. Tal complexibilidade é decorrente de centenas de milhares de mensagens relacionadas aos alarmes e medições físicas de sistemas elétricos heterogêneos (ALVES, MARTINS, *et al.*, 2017).

Para LEÃO (2011), no caso de sistema de transmissão, os alarmes gerados pelo SCADA são reportados ao sistema de gestão de energia (EMS, do inglês, “*energy management system*”), ao passo que para os sistemas de distribuição esses alarmes são enviados para o sistema de gestão de distribuição (DMS, do inglês, “*distribution management system*”). O autor

destaca ainda que o EMS é um sistema amplo podendo ser utilizado para qualquer sistema de gerenciamento.

O EMS é uma ferramenta de supervisão alocada no topo da camada do SCADA e suas funções típicas estão relacionadas à operação, em tempo real, a usinas hidrelétricas como: programação hidrelétrica de curto prazo, controle conjunto de tensão e potência reativa e controle automático de geração (NEIS, WEHRMEISTER e MENDES, 2019). Com relação à operação em tempo real, DAI, LIU, *et al.* (2020) relatam que o ciclo de atualização do sistema EMS é muito maior que o ciclo do SCADA, o que prejudica a intervenção do operador na tomada de decisão. Assim, os autores propuseram um modelo para que os tempos de ciclos (SCADA e EMS) sejam reduzidos em dezenas de segundo a fim de aproximar o tempo desses ciclos.

A intervenção do operador no sistema elétrico em situações de *stress* é um processo que envolve experiência por parte do operador. Para FRITZEN (2012), cabe ao operador utilizar a sua experiência e procurar entre uma grande quantidade de mensagens, a causa do problema. No entanto, um período de tempo significativo tende a ser necessário para identificar a causa do problema, tempo este que pode ser crucial para prevenir uma deterioração do sistema.

5.2 Formalização da metodologia RAP-LPA2v

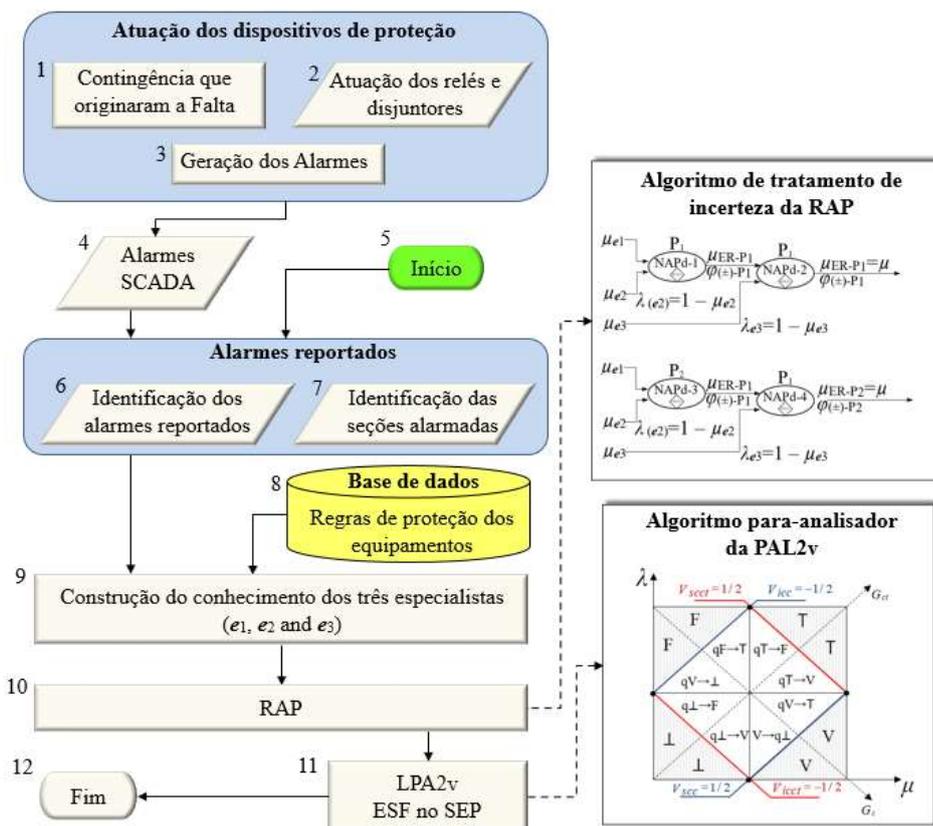
Esta metodologia propõe uma lógica não clássica para tratar incertezas na ESF no SEP. A inovação deste é propor pela primeira vez, o uso da RAP agregada com a LPA2v para construir uma rede dedicada à detecção e tratamento de incertezas que ocorrem no processo de ESF. O diferencial do RAP-PAL2v é permitir a inclusão de diferentes e com diferentes conhecimentos, promovendo resultados mais plausíveis e equânimes.

A RAP tem a função de processar o conhecimento proveniente dos e_1 , e_2 , e_3 da subseção 2.4 (teorema de bayes, heurística construtiva e função do cosseno modificado). Após o processamento, são entregues na saída, novas evidências. Já a LPA2v tem a função de identificar e tratar as incertezas que podem ocorrer, devido à imprecisão dos alarmes gerados.

A figura 5.1 mostra o fluxograma da RAP-LPA2v para ESF a partir dos alarmes reportados do SCADA. Na ocorrência de uma contingência após uma falta (bloco 1), os dispositivos de proteção operam para isolar a área defeituosa (bloco 2) e, conseqüentemente, vários alarmes são gerados pelo SCADA (blocos 3 e 4). Os alarmes reportados pelo SCADA ativa a RAP-LPA2v (bloco 5) e o processo inicia na identificação dos alarmes reportados, ou

seja, estado de operação dos relés e disjuntores (bloco 6) e na identificação das seções candidatas a falta (bloco 7). A construção do conhecimento de e_1 , e_2 e e_3 é determinada a partir das inferências entre os alarmes reportados e as regras de proteção contidas na base de dados (blocos 8 e 9). A base de dados contém as regras de proteção utilizadas na metodologia RAP–LPA2v. Destaca-se aqui, que os e emitem suas classificações para cada seção candidata a falta na forma de pertinência. Essas classificações informam se a falta foi originada. Caso contrário, as seções podem ser classificadas como não falta, falta externa ou a direção da falta. A RAP processa os valores de pertinências (μ e λ) e estabelece em sua saída os valores de pertinências das seções alarmadas (bloco 10). Por fim, esses valores são analisados pela LPA2v a fim de detectar as incertezas da ESF (bloco 11). Após a análise, o processo é finalizado (bloco 12).

Figura 5.1 – Fluxograma da ESF da RAP – LPA2v



As duas imagens à direita da figura 5.1 acima exemplificam dois algoritmos. O algoritmo de tratamento de incerteza da RAP processando duas proposições P1 e P2. E posteriormente, o algoritmo para-analisador da LPA2v verifica a existência de incertezas dentre as duas proposições em análise. A seguir, são demonstradas as filosofias de proteção utilizadas para compor a base de dados desta metodologia.

5.2.1 Regras de proteção empregadas na base de dados da RAP–LPA2v

Conforme mencionado, a filosofia de proteção desta metodologia é a mesma proposta por OLIVEIRA, DE ARAÚJO, *et al* (2016). A proteção de cada equipamento que compõe o subsistema são filosofias reais de proteção empregadas por uma empresa de energia elétrica do sul do Brasil. Os equipamentos protegidos são: L de 230 kV , B, T, G, BC e CB. Essas proteções seguem o instituto nacional americano de padrões (ANSI, do Inglês “*American National Standards Institute*”)⁶. As descrições das funcionalidades dos disjuntores e relés de proteção mencionadas neste trabalho foram obtidas em (C37.91-2008 - IEEE Guide for Protecting Power Transformers - Redline, 2008).

5.2.1.1 Filosofia de proteção da Linha de 230 kV

A figura 5.2 mostra uma L conectada entre duas seções (S1 e S2) com seus respectivos relés, disjuntores (CB1 e CB2), TPs e TCs.

Figura 5.2 – Proteção da linha de transmissão de 230 kV



Fonte: (OLIVEIRA, 2016, p. 75)

Os relés que compõem a L são definidos como: **87L (Relé Diferencial de linha)**, proteção seletiva, opera em um percentual de corrente, ângulo de fase ou outras diferenças quantitativas elétricas. É uma proteção seletiva e geralmente está associada à proteção principal;

⁶ ANSI – Supervisiona a criação, promulgação e uso de milhares de normas e diretrizes que impactam diretamente as empresas em quase todos os setores, incluindo a geração transmissão e distribuição de energia

67 (Relé de sobrecorrente diferencial de neutro), opera com um valor especificado de sobrecorrente que flui em uma direção predeterminada., é utilizado como proteção de retaguarda em caso de falta no neutro; **79 (Relé de religamento automático)**, controla o religamento e bloqueio automático do disjuntor, opera em faltas temporárias, onde a diferença entre os tempos de bloqueio e religamento é suficiente para eliminação da falta; **62BF (Relé temporizado)**, opera na ocorrência de um atraso de tempo do dispositivo responsável pela eliminação da falta, caso a falta não seja eliminada, o 62BF envia sinal de *trip* para todos os disjuntores de retaguarda; **21 (Relé de distância)**, proteção seletiva, opera quando a admitância, impedância ou reatância de um circuito aumenta ou diminui fora dos limites predeterminados. 21-1 proteção de backup da primeira zona (instaladas em S1 e S2), 21-2 e 21-3 são proteções de retaguarda temporizada da segunda e terceira zona respectivamente.

5.2.1.2 Regras de proteção da Linha de 230 kV

A tabela 5.1 abaixo refere-se às vinte e três regras de proteções da L, cada qual com suas respectivas classificações, sendo: as regras de número 1 a 10 são classificadas como Falta Interna (FI); de 11 a 15 são classificadas como Falta Externa na direção de S1 (FE_S1); de 16 à 20 são classificadas como Falta Externa da direção de S2 (FE_S2) e as regras de 21 a 23 são classificadas como Não Falta (NF). As proteções de retaguarda (*backup*) são denominadas como direção de S1 (D_S1) e direção de S2 (D_S2).

Tabela 5.1 – Regras da proteção da Linha de Transmissão 230 kV

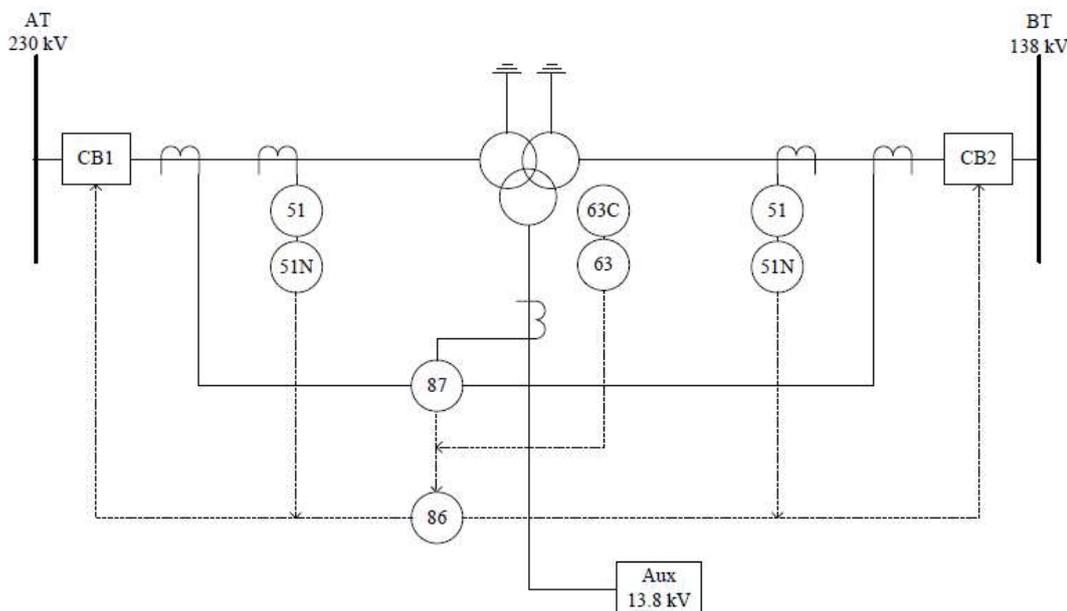
Proteção	Alarmes	Regras																						
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Seletiva	87L, 21-1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
retaguarda D_S1	67N, 21-2, 21-3	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0
retaguarda D_S2	67N, 21-2, 21-3	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CB1 62BF	CB1 62BF	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
CB2 62BF	CB2 62BF	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
CB1	CB1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0
CB2	CB2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
Classificação		FI										FE_S1					FE_S2				NF			

5.2.1.3 Filosofia de proteção do Transformador de 138/13,8/230 kV

A figura 5.3 mostra um T conectado entre dois barramentos de alta tensão de 230 kV

(AT) e baixa tensão de 138 kV (BT) com seus relés, disjuntores (CB1 e CB2) e TCs.

Figura 5.3 – Proteção do T de 138/13,8/230 kV



Fonte: (OLIVEIRA, 2016, p. 76)

Além da proteção do relé 87 definido na subseção 5.2.1.1, os relés que também compõem a proteção do T são definidos como: **63T/63C** (Relés de Pressão de Gás do transformador/comutador (Buchholz), proteção seletiva, operam a uma determinada taxa de pressão de gás acumulada no transformador, decorrente de falhas no isolamento das bobinas e/ou conexões internas e/ou curto-circuito interno); **51/51N** (Relés de Sobrecorrente Temporizado de fase/neutro), operam quando a corrente de entrada excede um valor pré-determinado no qual a corrente de entrada está inversamente relacionada ao tempo de operação (corrente alta tempo menor, corrente baixa tempo maior). São proteções de retaguarda local e remoto, atuam na falha do relé 87 e operam somente em disjuntores conectados nos terminais do transformador; **86** (Relé de Bloqueio), envia sinais de *trip* para todos os disjuntores conectados ao transformador em condição anormal, é um relé auxiliar com reinício manual por um operador local ou remoto.

5.2.1.4 Regras de proteção do Transformador

A tabela 5.2 refere-se às vinte regras com as seguintes classificações: as regras de número 1 a 10 são classificadas como FI; de 11 a 14 são classificadas como Falta Externa do

lado de Alta Tensão (FE_AT); de 15 a 18 são classificadas como Falta Externa do lado de Baixa Tensão (FE_BT) e de 19 a 21 são classificadas como NF. As proteções de retaguarda (*backup*) são denominadas como lado da AT (LD_AT) e lado da BT (LD_BT).

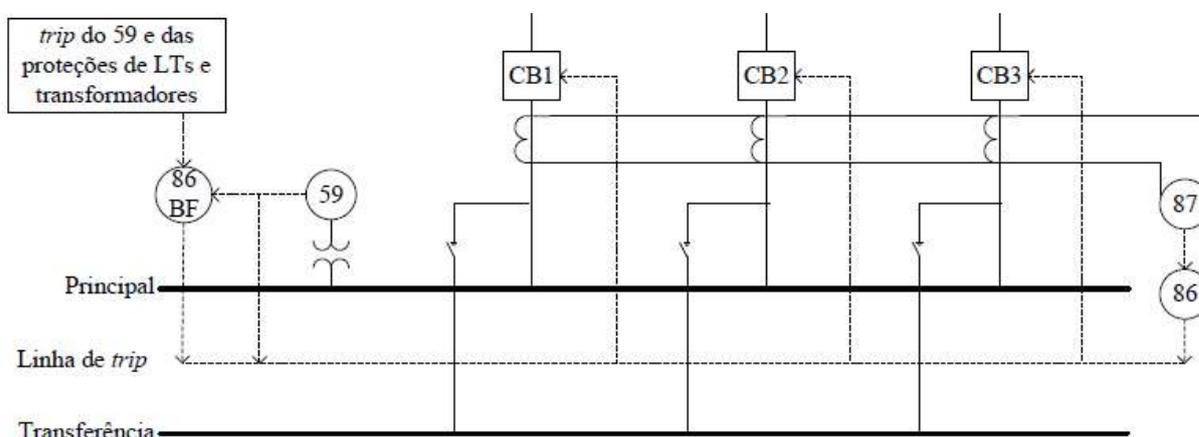
Tabela 5.2 – Regras da proteção do Transformador de Potência

Proteção	Alarmes	Regras																				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Seletiva	63C, 63T, 87	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Retaguarda LD_AT	51, 51N	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0
Retaguarda LD_BT	51, 51N	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
86	86	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
CB2	CB1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
CB1	CB2	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0
Classificação		FI					FE_AT					FE_BT					NF					

5.2.1.5 Filosofia de proteção da B

A figura 5.4 mostra a proteção de barras principal e de transferência de 230 kV composta de disjuntores (CB1, CB2 e CB3) e por três relés. O relé 86BF é uma proteção auxiliar que envia sinais de operação para todos disjuntores conectados à barra, a fim de manter os equipamentos associados inoperantes até que sejam reiniciados por um operador, local ou remotamente. Os relés 86 e 87 foram definidos nas subseções acima.

Figura 5.4 – Proteção da Barra



5.2.1.6 Regras de proteção da barra

A tabela 5.3 refere-se às dez regras de proteção com as seguintes classificações: as

regras de número 1 a 6 são classificadas como FI; de 7 a 8 são classificadas como FE; e de 9 a 10 são classificadas como NF. A definição “todos CBs abertos?” refere-se que quando uma falta ocorre na barra, todos os disjuntores conectados na barra devem ser abertos para isolar a falta. Nesse caso, “todos CBs abertos?” é igual a 1 para a barra isolada. Caso contrário, o valor é igual a 0.

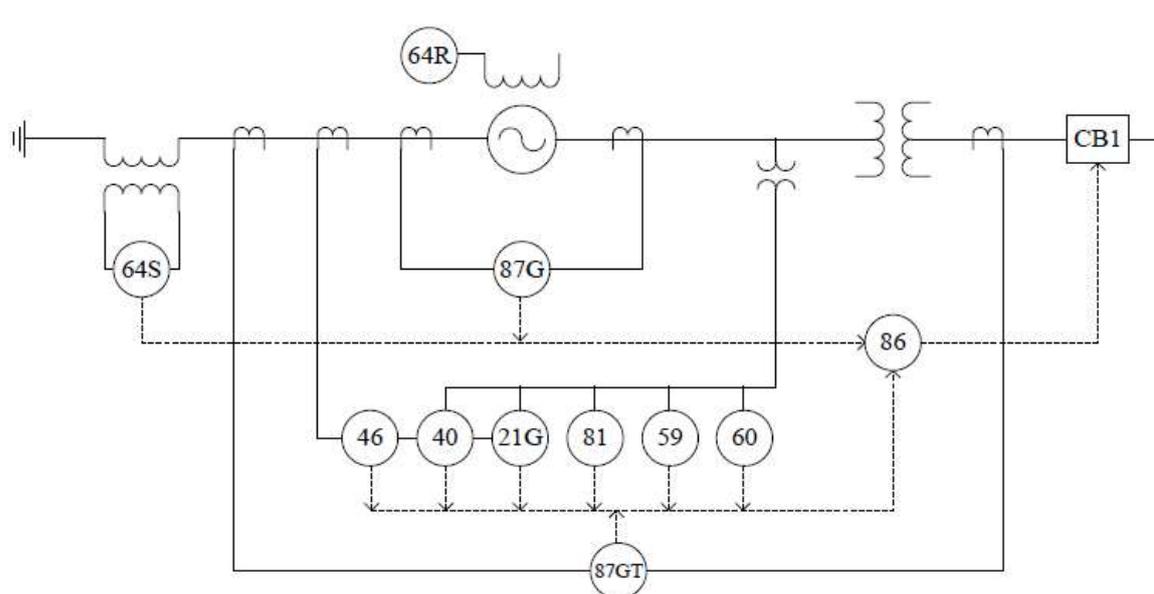
Tabela 5.3 – Regras da proteção da Barra

Proteção	Alarmes	Regras									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
87	87	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
86	86	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0
qualquer 86BF?	CB1 86BF, CB2 86BF, CB3 86BF, CB4 86BF	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1
todos CBs abertos?	CB1, CB2, CB3, CB4	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1
Classificação		FI					FE		NF		

5.2.1.7 Filosofia de proteção do gerador síncrono

A figura 5.5 mostra a proteção considerada para o gerador síncrono de 13,8 kV, composto por CB, TCs e 10 relés de proteção.

Figura 5.5 – Proteção do gerador



Fonte: (OLIVEIRA, 2016, p. 78)

Além da proteção do relé 87, 21 definido na subseção 5.2.1.1, os relés que também compõem a proteção do GR são definidos como: **64S / 64R** (Relé terra-estator / terra-rotor) proteções seletivas do isolamento da máquina. Opera em condições de falta monofásica decorrente de eventual contato do enrolamento do estator / rotor à terra; **46** (Relé reversão ou desbalanço de corrente), proteção de retaguarda operando em condições de correntes polifásicas com sequências de fase reversa ou desbalanceadas; **40** (Relé de campo), proteção seletiva operando em casos de falha de corrente de campo da máquina ou baixa corrente, ou ainda, em caso de uma anormal excitação baixa de campo; **81** (Relé de frequência), opera quando a frequência ou a sua taxa de variação excede ou é menor que um valor predeterminado; **59** (Relé de sobretensão), opera quando o valor da tensão de entrada elevar acima de um valor predeterminado; **60** (Relé de balanço de tensão ou corrente), opera com uma determinada diferença de tensão, ou correntes de entrada ou saída, de dois circuitos;

5.2.1.8 Regras de proteção do gerador síncrono de 13,8 kV

A tabela 5.4 refere-se às dez regras com as seguintes classificações: as regras de número 1 a 6 são classificadas como FI; de 7 a 8 são classificadas como FE; e de 9 a 10 são classificadas como NF.

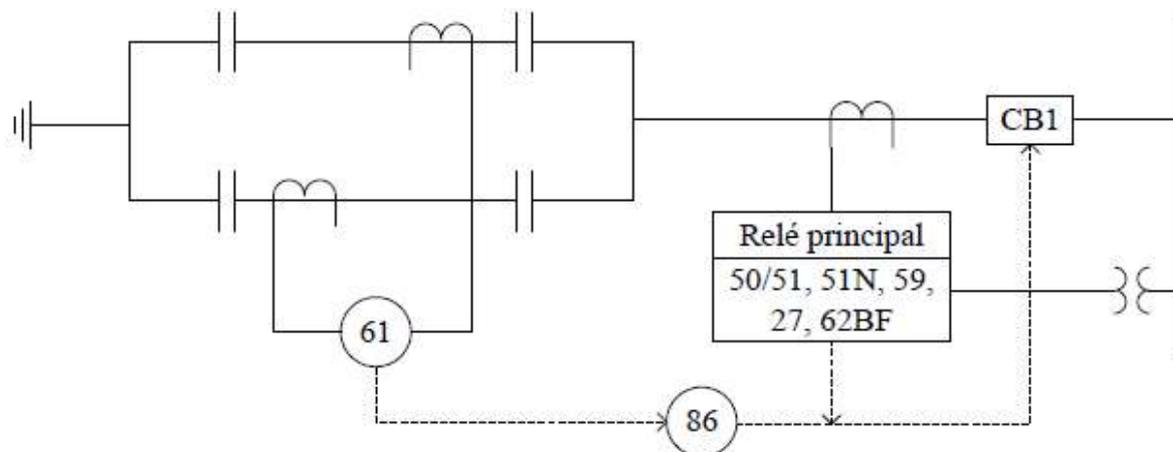
Tabela 5.4 – Regras da proteção do gerador síncrono

Proteção	Alarmes	Regras									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Seletiva	40, 46, 64, 87	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
Backup	21G, 59, 60, 81	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0
86	86	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0
CB1	CB1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1
Classificação		FI					FE			NF	

5.2.1.9 Filosofia de proteção do BC

A figura 5.6 mostra a proteção considerada para o BC composto por um CB, TCs e oito relés de proteção.

Figura 5.6 – Proteção do banco de capacitor



Fonte: (OLIVEIRA, 2016, p. 79)

Além da proteção dos relés 51, 51N, 62BF e 86 já definida, os relés que também compõem a proteção do BC são definidos como: **50** (Relé de sobre corrente temporizado), proteção seletiva, opera instantaneamente na ocorrência de valor excessivo de corrente; **27** (Relé de subtensão), opera quando o valor de tensão de entrada cair abaixo de um valor predeterminado; **61** (Relé de desbalanço de corrente), opera com uma determinada diferença de correntes de entrada ou saída, de dois circuitos.

5.2.1.10 Regras de proteções do banco de capacitor

A tabela 5.5 refere-se às vinte regras com as seguintes classificações: as regras de número 1 a 10 são classificadas como FI; de 11 a 16 são classificadas como FE e de 17 a 20 são classificadas como NF.

Tabela 5.5 – Regras da proteção do banco de capacitor

Proteção	Alarmes	Regras																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Seletiva	61	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Não seletiva	50, 50N, 51, 51N	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
sob/sobretensão	27, 59	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0
86	86	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CB1 62BF	62BF	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1
CB1	CB1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0
Classificação		FI										FE						NF			

5.2.1.11 Proteção do disjuntor

Todo disjuntor possui seus próprios mecanismos de proteção que possibilita verificar suas condições normais de operação própria. Os autores (OLIVEIRA, DE ARAÚJO, *et al.*, 2016) definiram as regras de proteção como: **Comando manual**, abertura por comando do operador; **Status do disjuntor**, abertura ou fechamento; **Proteção própria**, indica defeito interno no disjuntor a partir das leituras de baixo nível de óleo, pressão, distorção de polos, etc.

5.2.1.12 Regras de proteções dos disjuntores

A tabela 5.6 refere-se às oito regras de proteção com as seguintes classificações: as regras de número 1 a 4 são classificadas como Defeito (DF), já as regras de 5 a 8 são classificadas como Normal (NM).

Tabela 5.6 – Regras da proteção dos disjuntores

Proteção	Regras							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Controle Manual	0	0	1	1	0	0	1	1
Status	0	1	0	1	0	1	0	1
Proteção própria	1	1	1	1	0	0	0	0
Classificação	DF				NM			

5.2.2 Exemplo numérico da RAP–LPA2v

Nesta seção, é apresentado um exemplo mostrando, passo a passo, o funcionamento de e_1 , e_2 , e_3 e, posteriormente, o processamento da RAP–LPA2v. O exemplo foi desenvolvido considerando somente as regras de proteção da barra da

tabela 5.3 e um vetor binário de alarmes reportados no SCADA [0 1 1 1]. Seguindo os mesmos procedimentos da extração das evidências da subseção 2.5 e aplicando os mesmos procedimentos para as dez regras, obtêm-se as seguintes classificações conforme tabela 5.7.

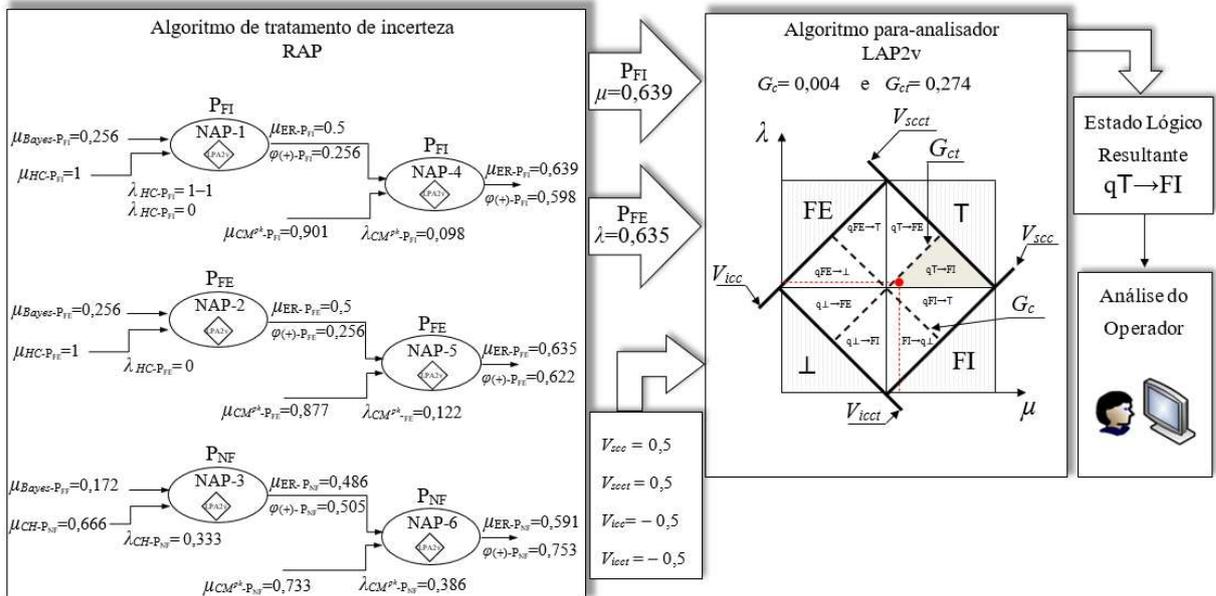
Tabela 5.7 – Classificações dos *especialistas* (RAP – LPA2v)

	Regras									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
e_1 (bayes)	0,005	0,003	0,003	0,008	0,005	0,256	0,172	0,256	0,115	0,172
e_2 (HC)	0,666	0,333	0,333	1	0,666	1	0,666	1	0,333	0,666
e_3 (CM ^{pk})	0,769	0,613	0,613	0,901	0,769	0,877	0,733	0,877	0,554	0,733
Classificação	FI						FE		NF	

Cada classificação da tabela é caracterizada por uma proposição (P_{FI} , P_{FE} e P_{NF}) e os valores de pertinências de cada proposição são estabelecidos a partir do maior valor de classificação. Assim, verifica-se na tabela 5.7 que nenhuma conclusão pode ser extraída, uma vez que todos os e resultaram em um empate numérico entre as proposições FI e FE, ou seja, existe um paradoxo entre FI e FE.

A figura 5.7 mostra o funcionamento do RAP–LPA2v e como esse paradoxo pode ser eliminado ou minimizado. A RAP–LPA2v divide-se em dois momentos: o primeiro momento, demonstra como os e estão interligados na NAP e o segundo momento demonstra o resultado da LPA2v.

Figura 5.7 – Exemplo numérico do funcionamento da RAP-LPA2v na B



O algoritmo de tratamento de incerteza (primeiro momento) é composto por seis redes de análises paraconsistentes (RAPs), cada qual, com seus respectivos sinais de entrada μ e λ . Assim tem-se que a NAP-1, NAP-2 e NAP-3 analisam as proposições P_{FI} , P_{FE} e P_{NF}

respectivamente. As saídas das NAPs 1, 2 e 3 compõem novas evidências e servem de entrada para as NAPs 4, 5 e 6. As saídas das NAPs 4, 5 e 6 compõem um novo conjunto de grau de evidência resultante real ($\mu_{ER-PFI} = 0,639$, $\mu_{ER-PFE} = 0,635$ e $\mu_{ER-PNF} = 0,591$). Os dois maiores valores do μ_{ER} compõem as entradas (μ e λ) da LPA2v onde, $\mu_{ER-PFI} = 0,639$ é a evidência favorável (μ) e $\mu_{ER-PFE} = 0,635$ é a evidência favorável (λ). Assim, as duas proposições analisadas pelo LPA2v são: PFI representado pela região extrema V e PFE representada pela região extrema F.

No segundo momento (imagem à direita da figura 5.7) mostra a LPA2v com os valores de entrada (μ e λ) e o estado lógico resultante. Observa-se que o estado lógico resultante apontou uma saída quase inconsistente tendendo a FI ($qT \rightarrow FI$) com $G_c = 0,004$ e $G_{ct} = 0,274$. Isso ocorre porque os e (Bayes, CH e CM^{pk}) que formam o RAP não trazem um alto grau de conhecimento para resultar na região extrema V. Para obter melhores resultados, são necessários novos e , ou flexibilizar os valores de controle.

A tabela 5.8 mostra os valores de controle com total flexibilização em $V_{scc} = 0,003$, $V_{icc} = -0,003$, $V_{sct} = 0,997$ e $V_{ict} = -0,997$.

Tabela 5.8 – Flexibilização dos valores de controles

Valores de entrada da RAP				Análise da LPA2v
e_1	0,256	0,256	0,172	
e_2	1	1	0,666	
e_3	0,877	0,877	0,733	
Proposições	FI	FE	NF	
Valores de entrada da LPA2v				
Proposições em análise	→	FI / FE		
Evidencia favorável	→	$\mu = 0,639$		
Evidencia desfavorável	→	$\lambda = 0,635$		

Embora os três e apontem paradoxos entre as classificações FI e FE (tabela 5.8, **Valores de entrada da RAP**), a RAP-LPA2v permitiu extrair algum resultado que seja plausível. Observa-se que a flexibilização dos valores de controle altera tão somente apenas a análise da LPA2v, permanecendo inalteradas as proposições em análise e os valores de entrada de PAL2v.

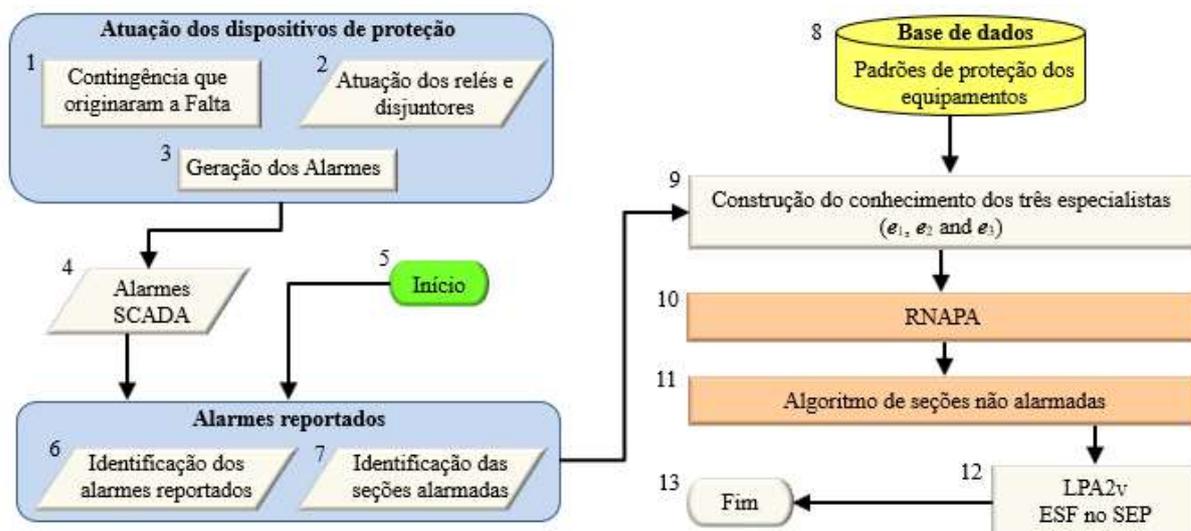
5.3 Aplicação da Metodologia RNAPA

A RNAPA é uma classe contemporânea de inteligência artificial (IA) para diagnóstico de faltas no SEP. Essa metodologia é uma IA robusta para tomada de decisão e pouco discutida na literatura. Diferentemente das redes neurais tradicionais que necessitam de treinamento e estabelecem decisões binárias (falta como 1 e não falta como 0), a RNAPA não necessita de treinamento e assim como a RAP-LPA2v também admite incertezas em seus resultados.

A RNAPA é uma evolução da RAP-LPA2v e sua inovação está no desenvolvimento de um mecanismo onde as funções heurísticas, APANN e um algoritmo de seções não alarmadas são complementares para o diagnóstico de falta. A figura 5.8 mostra como esses complementos estão interconectados. Da ocorrência de uma contingência (bloco 1) até a construção do conhecimento (bloco 9) seguem os mesmos princípios de funcionamento da RAP-LPA2v (figura 5.1). A base de dados contém as regras de proteção utilizadas na metodologia RNAPA.

A evolução desta metodologia está nos dois blocos laranja; o bloco 10 analisa o conhecimento de cada e para eliminar ou minimizar as incertezas. O bloco 11 é um algoritmo de seções não alarmadas, seu objetivo é identificar e estabelecer evidências μ e λ em seções que fazem parte de um cenário de contingência, mas que por algum motivo não alarmou. Por fim o bloco 12 analisa as evidências de todas as seções alarmadas e não alarmadas; o processo é finalizado no bloco 13.

Figura 5.8 – Fluxograma do diagnóstico de falta RNAPA



O algoritmo de seções não alarmadas (bloco 11 da figura 5.8) é desenvolvido a partir da criação de um conjunto de seções alarmadas e não alarmadas, mas candidatas a falta. Esses conjuntos fornecem evidências do sistema elétrico que possibilitem diagnosticar uma falta. Os conjuntos são denominados como:

- (1) Lab : conjunto de Linhas Alarmadas e classificadas como falta externa na direção da barra (FE_B);
- (2) B_{Lab} : conjunto de Barras estabelecido a partir da direção de Lab ;
- (3) SA_i : i -ésimo conjunto de Seções Alarmadas e conectadas em cada elemento do conjunto de B_{Lab} , incluindo B_{Lab} ;
- (4) S_{Lab_i} : i -ésimo conjunto de todas as Seções conectadas em cada elemento de B_{Lab} incluindo os próprios elementos de B_{Lab} ;
- (5) SNA_i : i -ésimo conjunto de Seções Não Alarmadas e conectadas em cada elemento de B_{Lab} (equação 5.1).

As equações 5.2 e 5.3 estabelecem as evidências μ_{SNA_i} e λ_{SNA_i} para cada seção de SNA_i . As variáveis μ_{SA_i} e λ_{SA_i} são compostas a partir das evidências extraídas das unidades neurais artificiais paraconsistente de extração máxima e mínima respectivamente. De outro modo, μ_{SA_i} é igual ao valor da UNAPE max definida como evidência da proposição FI, ao passo que λ_{SA_i} é igual ao da UNAPE min definida como evidência da proposição NF. Os numeradores das equações 5.2 e 5.3, são os números totais de elementos de cada S_{Lab_i} .

$$SNA_i = S_{Lab_i} \setminus SA_{LAB_i} \quad 5.1$$

$$\mu_{SNA_i} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{SA_i}}{\sum_{i=1}^n S_{Lab_i}} \quad 5.2$$

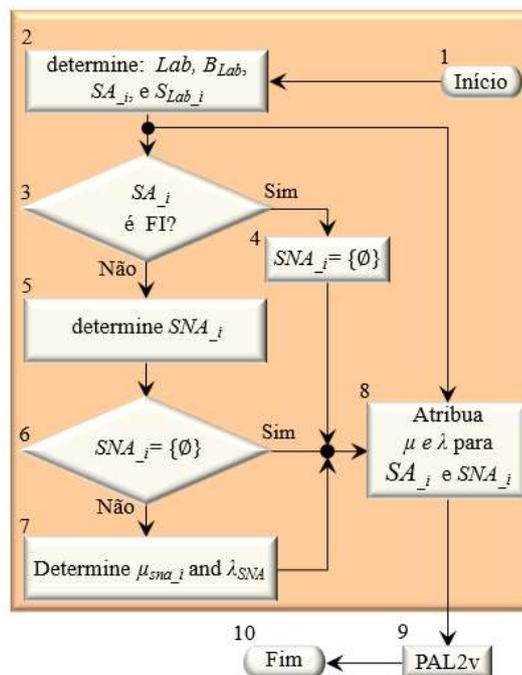
$$\lambda_{SNA_i} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_{SA_i}}{\sum_{i=1}^n S_{Lab_i}} \quad 5.3$$

A figura 5.9 mostra o fluxograma referente ao algoritmo de seções não alarmada. A

seguir, é descrita a rotina de cada bloco do algoritmo:

- ✓ Bloco 1: recebe as informações da RNAPA;
- ✓ Bloco 2: identifica todas as seções alarmadas e não alarmadas;
- ✓ Bloco 3: evita atribuir μ_{SNA_i} e λ_{SNA_i} , de modo que, se alguma seção SA_i for classificada como FI, então SNA_i deve ser vazio (Bloco 4), ou seja, SA_i já possui as evidências para o diagnóstico;
- ✓ Bloco 5: determina os elementos de SNA_i a partir da equação 5.1;
- ✓ Bloco 6: também evita atribuir μ_{SNA_i} e λ_{SNA_i} . No entanto, isso só ocorre se todas as seções SA_i forem diagnosticadas como NF e/ou EF_B. Nesse caso, todas as seções alarmaram conforme esperado;
- ✓ Bloco 7: determina μ_{SNA_i} e λ_{SNA_i} a partir das equações 5.2 e 5.3.
- ✓ Bloco 8: atribui as evidências μ e λ e suas proposições para cada elemento de SA_i e SNA_i (caso SNA_i não seja vazio);
- ✓ Blocos 9 e 10: as evidências são processadas pela LPA2v e seu diagnóstico finalizado.

Figura 5.9 – Fluxograma do algoritmo das seções não alarmadas



5.3.1 Regras de proteção empregadas na base de dados da RNAPA

A filosofia de proteção é a mesma adotada no trabalho de WANG, PENG, *et al.* (2019). Neste trabalho, os relés são denominados como principal de Linha ($L-xm$), principal de Barra (Bxm), retaguarda local de linha ($L-xb$) e retaguarda remoto de linha ($L-xs$). A sigla x representa o “endereço” do relé associado a cada B. Destaca-se que os autores não descrevem as especificações dos relés que foram utilizados para $L-xm$, $B-xm$, $L-xb$ e $L-xs$. As proteções L e B são descritas como:

- 1- Proteção de L: na ocorrência de uma falta em L, xm atua para desarmar cada CB correspondente a L. Na ocorrência de uma falha em xm , xb atua para desarmar cada CB correspondente a L. Além disso, na ocorrência de uma falta em uma seção adjacente a L e suas proteções, se deixarem de operar, todos os xs das seções adjacentes a operam para proteger a seção em falta;
- 2- Proteção de B: na ocorrência de uma falta na B, o xm atua para desarmar cada CB conectado a B. A B não possui proteções xb e xs . Quando o xm da B falha, os xs de todas as regiões adjacentes operam para desarmar cada CB da B.

A tabela 5.9 representa a regra de proteção da L. Do bit 1 ao 5 são considerados alarmes dos dispositivos de proteção da L. Já o bit 6 representa um conjunto de informações proveniente dos alarmes gerados nas linhas adjacentes, ou seja, “*todos o xs adjacente operaram*” é igual a 1, caso contrário, o valor é igual a 0.

Tabela 5.9 – Regras de proteção da L (WANG, PENG, *et al.*, 2019)

Bits	Alarmes	Regras										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	xm ou xb	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
2	$xs-d$	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0
3	$xs-p$	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1
4	$CB-d$	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0
5	$CB-p$	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1
6	<i>todos xs adjacentes operaram</i>	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1
Classificação		FI					FE_B-d			FE_B-p		

A tabela 5.10 abaixo representa a regra de proteção da barra. O bit 1 representa o alarme do relé principal da barra. O bit 2 representa um conjunto de informações proveniente

dos alarmes das linhas adjacentes, ou seja, “*todos os xs adjacente operaram*” é igual a 1, caso contrário, o valor é igual a 0. O bit 3 representa o alarme “*CBs abertos*”, ou seja, é a abertura devida de todos os disjuntores para isolar o defeito na barra. Desta forma, todos os disjuntores abertos é igual a 1, caso contrário é igual a 0. O bit 4 representa o alarme “*um CB abriu*”, é a abertura devida ou indevida de ao menos um disjuntor conectado a barra, de forma que, se ao menos um disjuntor abriu é igual a 1, caso contrário é igual a 0.

Tabela 5.10 – Regras de proteção da B (WANG, PENG, *et al.*, 2019)

Bits	Proteção	Regras						
		1	2	3	4	5	6	
1	<i>Xm</i>	1	1	1	1	0	0	
2	<i>todos xs adjacentes operaram</i>	1	1	0	0	1	0	
3	<i>CBs abertos</i>	1	0	1	0	0	0	
4	<i>um CB abriu</i>	1	0	1	1	0	0	
Classificação		FI						NF

5.3.2 Exemplo numérico da RNAPA

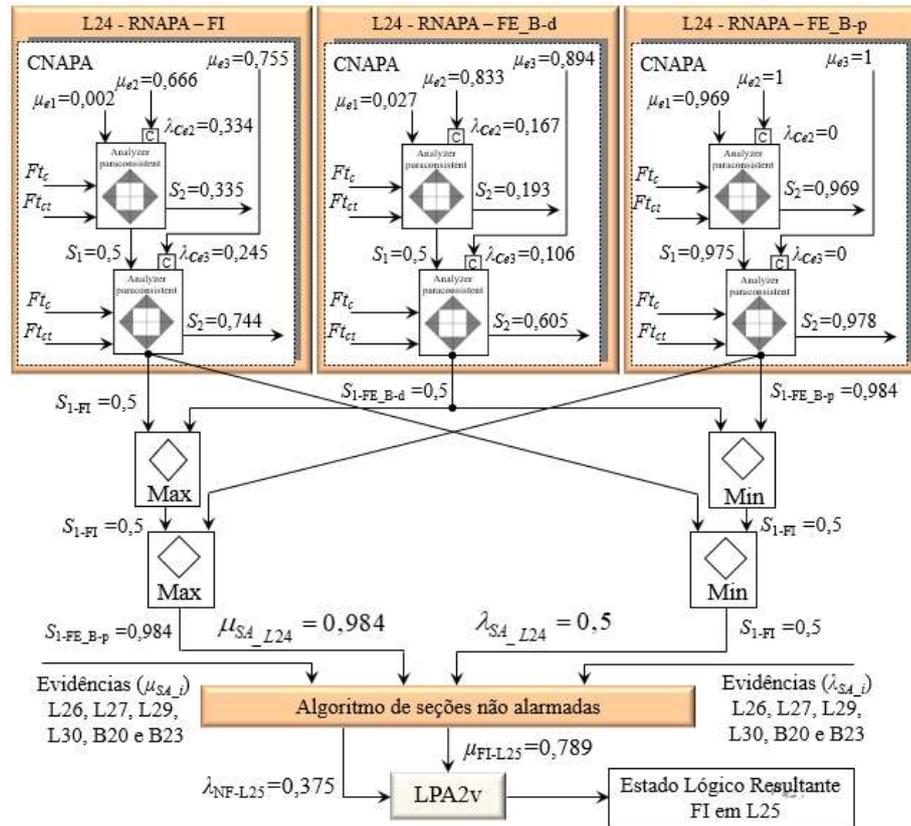
Nesta seção, é apresentado um exemplo mostrando, passo a passo, o funcionamento da RNAPA. O exemplo foi desenvolvido considerando os alarmes da L24 [0 1 0 1 0 0] do estudo de caso 8 da subseção 6.2. Seguindo os mesmos procedimentos da extração das evidências da subseção 2.5 e aplicando os mesmos procedimentos para as onze regras da tabela 5.9, obtêm-se as seguintes classificações conforme tabela 5.2 abaixo.

As classificações são caracterizadas pelas proposições P_{FI} , P_{FE_B-d} e P_{FE_B-p} . Novamente, os valores de pertinências de cada proposição são estabelecidos a partir do maior valor de classificação. Um exemplo do funcionamento desta metodologia é demonstrado na figura 5.10.

Figura 5.10 – Classificações dos *especialistas* (RNAPA)

	Regras										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
e_1 (<i>bayes</i>)	0,00	0,0	0,002	0,0	0,0	0,0	0,0	0,027	0,968	0,0	0,0
e_2 (<i>HC</i>)	0,5	0,5	0,666	0,333	0,333	0,333	0,333	0,833	1	0,666	0,166
e_3 (<i>CM^{pk}</i>)	0,755	0,67	0,75	0,5	0,5	0,5	0,612	0,894	1	0,816	0,447
Classificação	FI					FE_B-d			FE_B-p		

Figura 5.11 – Exemplo numérico do funcionamento da RNAPA na L25



A metodologia divide-se em quatro momentos. No primeiro, mostra três RNAPA com suas respectivas células neurais paraconsistente analítica (CNAPAs) conectadas em cascata e processando a mesma proposição. Da mesma forma, as CNAPAs possuem os mesmos fatores de tolerância à certeza e à contradição, sendo $F_{tc} = 0,4$ e $F_{ict} = 0,6$. No segundo momento, as UNAPE máx e UNAPE mín canalizam para dentro do algoritmo as evidências máxima e mínimo de todas as seções alarmadas a nível de sistema (L24, L25, L29, L30, B20 e B23). No terceiro momento, após o processamento das evidências das seções alarmadas, o algoritmo identifica que L25 é uma seção não alarmada, faz parte do cenário da contingência, e, por isso, fornece para a LPA2v as evidências μ para FI e λ para NF. Por último, no quarto momento a LPA2v estabelece um estado lógico resultante para L25 como FI.

A seguir, é demonstrado o exemplo numérico do algoritmo de seções não alarmadas. Os valores de evidências μ_{SA_i} e λ_{SA_i} das seções L24, L26, L27, L29, L30, B20 e B23 foram retirados da subseção 6.2, tabela 6.7 do estudo de caso 8.

$$Lab = \{EF_B20, EF_B20, EF_B20, EF_B23, EF_B23\};$$

$$Lab = \{EF_B20, EF_B23\};$$

$$B_{Lab} = \{B20, B23\};$$

$$SA_{B20} = \{L24, L26, L27, B20\}; \quad SA_{B23} = \{L29, L30, B23\};$$

$$S_{Lab_B20} = \{L24, L25, L26, L27, B20\}; \quad S_{Lab_B23} = \{L25, L29, L30, B23\};$$

$$SNA_{B20} = \{L24, L25, L26, L27, B20\} \setminus \{L24, L26, L27, B20\} = \{L25\};$$

$$SNA_{B23} = \{L25, L29, L30, B23\} \setminus \{L29, L30, B23\} = \{L25\};$$

$$\mu_{SNA_B20} = \frac{0,985 + 0,985 + 0,985 + 0,994}{1 + 1 + 1 + 1 + 1} = 0,789; \quad \mu_{SNA_B23} = 0,741$$

$$\mu_{SNA_i} = \{0,789 \quad 0,741\}$$

$$\lambda_{SNA_B20} = \frac{0,5 + 0,5 + 0,5 + 0,5}{1 + 1 + 1 + 1 + 1} = 0,4; \quad \lambda_{SNA_B23} = 0,375$$

$$\lambda_{SNA_i} = \{0,4 \quad 0,375\}$$

Conforme mencionado, o valor máximo de μ_{SNA_i} e o valor mínimo de λ_{SNA_i} consistem em μ e λ , respectivamente da LPA2v, bem como as respectivas proposições FI e NF da seção não alarmada L25. Assim, foram obtidos FI, NF, $\mu = 0,789$, $\lambda = 0,375$ e o estado lógico resultante FI.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Considerando que ao longo do desenvolvimento deste trabalho foram desenvolvidas duas metodologias, estas dividem-se em resultados e discussões da RAP-LPA2v (subseção 6.1) e da RNAPA (subseção 6.2). Ambas as subseções especificam: o computador utilizado na implementação; os parâmetros de ajustes; o sistema elétrico utilizado para os testes; as nomenclaturas dos dispositivos de proteção e equipamentos primários; as tabelas contendo as seções alarmadas e os alarmes reportados pelo SCADA. Por fim, para cada metodologia são descritas as considerações dos resultados obtidos e conclusões deste capítulo.

6.1 Resultados e discussões da RAP-LPA2v

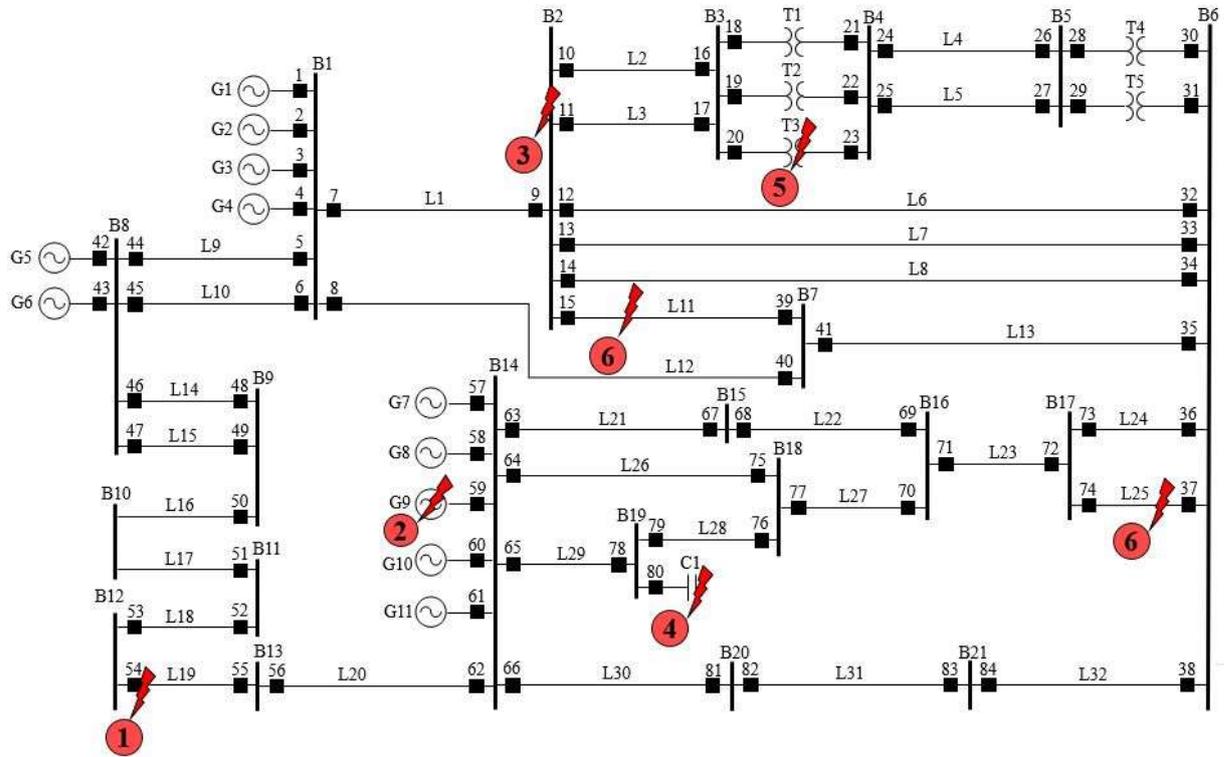
A RAP-LPA2v foi implementada em um computador Intel(R) Core(TM) i7 de 2,5 GHz com 8,0 GB de RAM e MATLAB 2R2014a. Para a simulação foi utilizado o mesmo subsistema empregado pelos autores OLIVEIRA, DE ARAÚJO, *et al* (2016). É um subsistema real brasileiro da Companhia Geradora de Energia Elétrica do Rio Grande do Sul (CEEE-GT), bem como, as filosofias de proteção utilizadas neste trabalho também são reais. O sistema é composto por 69 seções sendo: 21 barras (B1...21), 32 linhas de transmissão (L1...32), 11 unidades geradoras (G1...11), 5 transformadores de potência (T1...5), um banco de capacitor (C1) e 84 disjuntores (CB1...84). Além dos relés de proteção mencionados na subseção 5.2.1.

Vários testes foram realizados com dados históricos. No entanto, os eventos reais não apresentaram dificuldades para o FSE. Isso ocorreu devido ao correto funcionamento dos dispositivos de proteção. Assim, falhas hipotéticas foram criadas a fim de criar cenários de falhas desafiadoras para o método proposto. Além disso, os padrões de eventos da L, B, T, G, BC e CB que compõem a base de dados da RAP-LPA2v são os apresentados na subseção 5.2.1.

Foram considerados seis estudos de casos (ECs) que são: 1. defeito no CB54; 2. falha no gerador G9; 3. falha na barra B2; 4. falha no banco de capacitores C1; 5. falha no transformador T3; e 6. falha simultânea nas linhas L11 e L25. A figura 6.1 abaixo mostra o subsistema e a tabela 6.1 mostra os alarmes reportados pelo sistema SCADA.

Conforme mencionado acima, os alarmes da tabela 6.1 foram inseridos manualmente, uma vez que, este trabalho não contempla um processador que permita a reordenação cronológica e agrupamento dos alarmes por seção.

Figura 6.1 – Diagrama unifilar do subsistema de energia do sul do Brasil



Fonte: adaptado de OLIVEIRA , (2016, p. 153)

Tabela 6.1 – Alarmes do sistema SCADA da metodologia RAP-LPA2v

ECs	Seções	Alarmes reportados pelo SCADA			ECs	Seções	Alarmes reportados pelo SCADA			
		Disparo dos CBs	Relés de	B			Disparo dos CBs	Relés de Proteção	B	
1	-	-	CB54-low air	-	5	B3	CB20	-	-	
2	L20	-	21-3s	B13	B4	CB21, CB22, CB24, CB25	86BF	-	-	
	L21	-	21-3s	B15	B5	CB28 and CB29	-	-	-	
	L26	-	21-3s	B18	L2	-	21-3s	B2	B2	
	L29	-	21-3s	B19	L3	-	21-3s	B2	B2	
	B14	CB57, CB58, CB59, CB60 e CB61	-	-	L4	CB24	21-3s	B5	B5	
	G7	CB57	86 / 59	-	L5	CB25	21-3s	B5	B5	
	G8	CB58	86 / 59	-	T1	CB21	-	-	-	
	G9	CB59	86 / 87	-	T2	CB22	-	-	-	
	G10	CB60	86 / 21G	-	T3	CB20	86 / 87	-	-	
	G11	CB61	86 / 59	-	T4	CB28	51	B5	B5	
3	B2	CB9, CB10, CB12, CB13, CB14 e CB15	86 / 87 / 86BF	-	T5	CB29	51	B5	B5	
	B3	CB17	-	-	6	B2	CB15	-	-	
	L1	CB9	21-2s / 21-3s	B1		B6	CB36 e CB37	-	-	
	L2	CB10	21-2s / 21-3s	B3		B7	CB39	-	-	
	L3	CB17	21-2s / 21-2t / 21-3s	B3		B17	CB74	-	-	
	L6	CB12	21-2s / 21-3s	B6		L1	-	21-3s	B1	B1
	L7	CB13	21-2s / 21-3s	B6		L6	-	21-3s / 21-3s	B2 / B6	B2 / B6
	L8	CB14	21-2s / 21-3s	B6		L7	-	21-3s / 21-3s	B2 / B6	B2 / B6
	L11	CB15	21-2s / 21-3s	B7		L8	-	21-3s / 21-3s	B2 / B6	B2 / B6
	4	B19	CB80	-		-	L11	CB15 e CB39	21-1 / 21-2s / 21-3s / 21-1 / 21-2s / 21-3s	B2 / B7
C1		CB80	61 61N 86	-		L12	-	21-2s / 21-3s	B1	B1
L29		-	21-3s	B18	L23	-	21-3s	B16	B16	
					L24	CB36	21-2s / 21-2t / 21-3s	B6	B6	
					L25	CB37 e CB74	21-2s / 21-3s / 87L	B17	B17	
				L32	-	21-2s / 21-3s	B21	B21		

A tabela 6.2 mostra os ECs com suas respectivas seções candidatas a falta (exceto o disjuntor) e ESF. A RAP-LPA2v foi comparada com o modelo MIP e duas simulações foram realizadas para melhor demonstrar a sua eficácia. O primeiro (resultados da primeira simulação) tem os parâmetros de *bayes* ajustados conforme o modelo MIP, sendo $pC = 0,8975$, $pf = 0,025$ e $pi = 0,0775$ para L e $pC = 0,59$, $pf = 0,397$ e $pi = 0,013$ para T, B, BC e G. O segundo (resultados da segunda simulação) tem os parâmetros de *bayes* descaracterizados em $pC=pf=pi=0,333$ para todos os equipamentos. Sabe-se que essas probabilidades não refletem a realidade, mas o objetivo é demonstrar a eficácia da RAP-LPA2v, após a degradação das probabilidades de *bayes*.

Considerando que os valores de controle ajustados em $V_{scc} = 0,5$, $V_{icc} = -0,5$, $V_{sct} = 0,5$ e $V_{icct} = -0,5$ geram inconsistências em mais de 60% das seções candidatas a falta e considerando que o objetivo é o tratamento dessas inconsistências / incertezas, os valores de controle foram levemente flexibilizados em $V_{scc} = 0,4$, $V_{icc} = -0,4$, $V_{sct} = 0,6$ e $V_{icct} = -0,6$.

Tabela 6.2 – Resultados e comparações do modelo RAP-LPA2v

		Resultados da Primeira simulação								Resultados da segunda simulação		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
ECs	Seções candidatas a falta / CB	RAP μ	RAP λ	G_c	G_{ct}	Proposição em análise	RAP-LPA2v	Bayes	MIP / RAP-LPA2v	Bayes	Proposição em análise	RAP-LPA2v
1	CB54	0.786	0.585	0.201	0.371	Defect / NM	qT→Defect	Defect	CB54 Defect / qT→Defect	NM	Defect / NM	CB54 T→qDefect
2	L20	0.924	0.594	0.331	0.518	FE_B14 / NF	qT→FE_B14	FE_B14	G9	FI	FE_B14 / NF	G9
	L21	0.924	0.594	0.331	0.518	FE_B14 / NF	qT→FE_B14	FE_B14	FI /	FI	FE_B14 / NF	qT→FI
	L26	0.924	0.594	0.331	0.518	FE_B14 / NF	qT→FE_B14	FE_B14	qT→FI	FI	FE_B14 / NF	
	L29	0.924	0.594	0.331	0.518	FE_B14 / NF	qT→FE_B14	FE_B14		FI	FE_B14 / NF	
	B14	0.978	0.607	0.371	0.585	NF / FE	qT→NF	NF		FI	NF / FE	
	G7	0.700	0.640	0.060	0.339	FE / FI	qT→FE	FE		FI	FE / FI	
	G8	0.700	0.640	0.060	0.339	FE / FI	qT→FE	FE		FI	FE / FI	
	G9	0.713	0.599	0.114	0.313	FI / NF	qT→FI	FI		FE	FI / FE	
	G10	0.700	0.640	0.060	0.339	FE / FI	qT→FE	FE		FI	FE / FI	
	G11	0.700	0.640	0.060	0.339	FE / FI	qT→FE	FE		FI	FE / FI	
3	B2	0.700	0.520	0.179	0.220	FI / FE	qT→FI	FI	B2	NF	FI / EF	B2
	B3	0.978	0.607	0.371	0.585	NF / FE	qT→NF	NF	FI / qT→FI	FI	NF / FE	qT→FI
	L1	0.911	0.616	0.295	0.527	FE_B2 / NF	qT→FE_B2	FE_B2		FI	FE_B2 / NF	
	L2	0.921	0.616	0.304	0.537	FE_B2 / NF	qT→FE_B2	FE_B2		FI	FE_B2 / NF	
	L3	0.911	0.616	0.295	0.527	FE_B2 / NF	qT→FE_B2	FE_B2		FI	FE_B2 / NF	
	L6	0.921	0.616	0.304	0.537	FE_B2 / NF	qT→FE_B2	FE_B2		FI	FE_B2 / NF	
	L7	0.921	0.616	0.304	0.537	FE_B2 / NF	qT→FE_B2	FE_B2		FI	FE_B2 / NF	
	L8	0.921	0.616	0.304	0.537	FE_B2 / NF	qT→FE_B2	FE_B2		FI	FE_B2 / NF	
	L11	0.921	0.616	0.304	0.537	FE_B2 / NF	qT→FE_B2	FE_B2		FI	FE_B2 / NF	

Tabela 6.2 – Resultados e comparações do modelo RAP–LPA2v

		Resultados da Primeira simulação								Resultados da segunda simulação		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
ECs	Seções candidatas a falta / CB	RAP μ	RAP λ	G_c	G_{ct}	Proposição em análise	RAP–LPA2v	Bayes	ESF MIP / RAP–LPA2v	Bayes	Proposição em análise	RAP–LPA2v
4	B19	0.978	0.607	0.371	0.585	NF / FE	qT→NF	NF	C1	NF	NF / FE	C1
	C1	0.699	0.605	0.094	0.303	FI / NF	qT→FI	FI	FI /	FI	FI / NF	qT→FI
	L29	0.924	0.594	0.331	0.518	FE_B19 / NF	qT→FE_B19	FE_B19	qT→FI	FI	FE_B19 / NF	
5	B3	0.978	0.607	0.371	0.585	NF / FE	qT→NF	NF	T3	FI	NF / FE	T3
	B4	0.792	0.629	0.163	0.421	FE / NF	qT→FE	FE	FI /	FI	FE / NF	qT→FI
	B5	0.978	0.606	0.371	0.585	NF / FE	qT→NF	NF	qT→FI	FI	NF / FE	
	L2	0.924	0.594	0.331	0.518	FE_B3 / NF	qT→FE_B3	FE_B3		FI	FE_B3 / NF	
	L3	0.924	0.594	0.331	0.518	FE_B3 / NF	qT→FE_B3	FE_B3		FI	FE_B3 / NF	
	L4	0.921	0.616	0.304	0.537	FE_B4 / NF	qT→FE_B4	FE_B4		FI	FE_B4 / NF	
	L5	0.921	0.616	0.304	0.537	FE_B4 / NF	qT→FE_B4	FE_B4		FI	FE_B4 / NF	
	T1	0.787	0.634	0.153	0.421	NF / FE_BT	qT→NF	NF		FI	NF / FE_BT	
	T2	0.787	0.634	0.153	0.421	NF / FE_BT	qT→NF	NF		FI	NF / FE_BT	
	T3	0.767	0.612	0.155	0.379	FI / NF	qT→FI	FI		FI	FI / FE_AT	
	T4	0.673	0.639	0.035	0.312	FE_AT / FI	qT→FE_AT	FE_AT		FI	FE_AT / FI	
T5	0.673	0.639	0.035	0.312	FE_AT / FI	qT→FE_AT	FE_AT		FI	FE_AT / FI		
6	B2	0.978	0.607	0.371	0.585	NF / FE	qT→NF	NF	L11 e L25	FI	NF / FE	L11 e L25
	B6	0.978	0.607	0.371	0.585	NF / FE	qT→NF	NF	FI /	FI	NF / FE	qFI→T
	B7	0.978	0.607	0.371	0.585	NF / FE	qT→NF	NF	FI	FI	NF / FE	
	B17	0.978	0.607	0.371	0.585	NF / FE	qT→NF	NF		FI	NF / FE	
	L1	0.924	0.594	0.331	0.518	FE_B2 / NF	qT→FE_B2	FE_B2		FI	FE_B2 / NF	
	L6	0.683	0.683	0.000	0.366	FE_B6 / FE_B2	qT→FE_B6	FE_B6 / B2		FI	FE_B6 / FE_B2	
	L7	0.683	0.683	0.000	0.366	FE_B6 / FE_B2	qT→FE_B6	FE_B6 / B2		FI	FE_B6 / FE_B2	
	L8	0.683	0.683	0.000	0.366	FE_B6 / FE_B2	qT→FE_B6	FE_B6 / B2		FI	FE_B6 / FE_B2	
	L11	0.932	0.500	0.432	0.432	FI / FE_B7	FI	FI		FE_B7	FI / FE_B7	
	L12	0.924	0.594	0.331	0.518	FE_B7 / NF	qT→FE_B7	FE_B7		FI	FE_B7 / NF	
	L23	0.924	0.594	0.331	0.518	FE_B17 / NF	qT→FE_B17	FE_B17		FI	FE_B17 / NF	
	L24	0.911	0.616	0.295	0.527	FE_B6 / NF	qT→FE_B6	FE_B6		FI	FE_B6 / NF	
	L25	0.932	0.500	0.432	0.432	FI / FE_B17	FI	FI		FE_B17	FI / FE_B17	
L32	0.924	0.594	0.331	0.518	FE_B6 / NF	qT→FE_B6	FE_B6		FI	FE_B6 / NF		

Os resultados da primeira simulação (coluna 10 da tabela 6.2) mostram simultaneamente os resultados da ESF da MIP e da RAP–LPA2v. Observa-se que ambos convergiram para as mesmas ESF. Enquanto o MIP fornece diagnósticos certos e únicos em todos os estudos de casos, a RAP-LPA2v indica uma T nos casos 1 e 5 e um diagnóstico livre de T no caso 6. A existência da T não inviabiliza o diagnóstico, mas aponta que a composição final dos e traz um baixo grau de conhecimento ou conhecimentos similares. O caso 6 foi o único que não apresentou um T, resultando em uma região extrema do reticulado ($G_c \geq G_{ct}$).

Os resultados da segunda simulação refletem a eficácia da RAP–LPA2v. Após a descaracterização dos parâmetros, o teorema de *bayes* classificou quase todas as seções como FI, o que resultou em uma ineficiência em termos de capacidade de classificação (ver coluna 11). A RAP, por sua vez, não foi impactada pela ineficiência de *bayes*, pois manteve as mesmas proposições em análise apresentadas nas colunas 7 a 12. Os dois itens destacados em amarelo nas colunas 7 e 12 indicam uma divergência na segunda proposição; entretanto, essa divergência não impactou nos resultados, conforme demonstrado na coluna 13.

A tabela 6.3 abaixo mostra o resultado da seção B2 do estudo de caso 3 (coluna 13 da tabela 6.2). A parte à esquerda mostra as classificações de e_1 , e_2 , e_3 , a RAP e a LPA2v; a parte à direita mostra a localização do novo estado lógico resultante da LPA2v com os valores flexibilizados. Já a tabela 6.4 mostra que a flexibilização contribuiu para o tratamento das incertezas para os casos 3 e 6, enquanto os casos 1, 2, 4 e 5 permaneceram inalterados.

Tabela 6.3 – Demonstração do resultado da RAP–LPA2v do estudo de caso três

Valores de entrada da RAP			
e_1 (<i>Bayes</i>) $pC = pf = pi = 0.333$	0,1	0,1	0,1
e_2 (<i>HC</i>)	1	0,5	0,25
e_3 (MC^{pk})	0,25	0,554	0,414
Proposições	FI	FE	NF

Valores de entrada da LPA2v	
Proposições em análise →	FI / FE
Evidencia favorável →	$\mu = 0,646$
Evidence desfavorável →	$\lambda = 0,510$

Seção em análise B2

Tabela 6.4 – Demonstração dos resultados da RAP–LPA2v dos seis estudo de casos

ECs	Seções / CB	μ	λ	G_c	G_{ct}	Proposições em análises	RAP–LPA2v
1	CB54	0,646	0,575	0,071	0,222	Defect / NM	qT→Defect
2	G9	0,639	0,596	0,043	0,236	FI / NF	qT→FI
3	B2	0,646	0,510	0,136	0,157	FI / FE	FI
4	C1	0,646	0,594	0,052	0,241	FI / NF	qT→FI
5	T3	0,646	0,601	0,045	0,248	FI / NF	qT→FI
6	L11	0,646	0,500	0,146	0,146	FI / FE_B7	FI
	L25	0,646	0,500	0,146	0,146	FI / FE_B17	FI

6.1.1 Considerações dos resultados apresentados da RAP–LPA2v

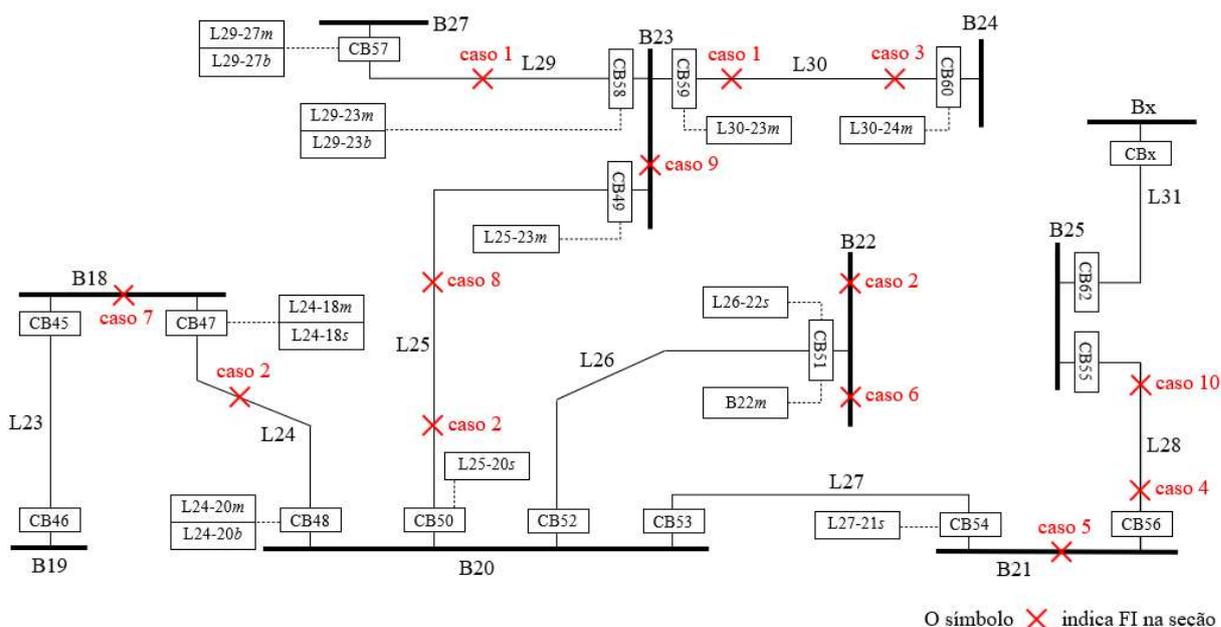
Analisando os resultados das simulações, é possível afirmar que a RAP–LPA2v é

estável na ESF, dispensando valores ideais em termos de probabilidades ou heurísticos. De outra forma, o processamento do conhecimento de três e proporciona uma estabilidade nos resultados, visto que um e , com baixo grau de conhecimento ou com baixa eficiência, pode ser corrigido por outros com maior grau de conhecimento e eficiência. A tabela 6.3 acima mostra claramente que e_1 possui um conhecimento altamente incerto, porém tal incerteza não interferiu na ESF, pois e_2 e e_3 juntamente com os valores de controle ajudaram no desempenho dos resultados. Por outro lado, pode-se observar que mesmo com três e e com a variação dos valores de controle, só foi possível tratar as incertezas nos testes 3 e 6. Os testes 1, 2, 4 e 5 permaneceram inalterados. Neste caso, faz-se necessária uma reanálise completa da contingência por parte do operador.

6.2 Resultados e discussões da RNAPA

A RNAPA foi implementada em um computador Intel(R) Core(TM) i7 de 2,5 GHz com 8,0 GB de RAM e MATLAB 2R2014a. Para a simulação foi utilizado o sistema teste de 345 kV dos autores WANG *et al.* (2019) conforme figura 6.2. O sistema é composto por 18 seções sendo: 10 barras (B18...27 e Bx), 9 linhas de transmissão (L23...31) e 18 disjuntores (CB45...62 e CBx). Além dos relés de proteção mencionados na subseção 5.3.1.

Figura 6.2 – Sistema de Transmissão de 345 kV



Fonte: adaptado de (WANG, PENG, *et al.*, 2019)

Foram considerados dez estudos de casos (ECs), os relés e disjuntores do sistema de transmissão da figura 6.2 acima representam os únicos estudos de caso 1 e 2 propostos por WANG, PENG, *et al.*, (2019). Para os estudos dos casos 1 à 6, foram consideradas faltas simples, ou seja, os relés principal e retaguarda, bem como os disjuntores operam conforme o esperado (exceto o caso 2 da L24, pois todos os xm , xb e xs operaram simultaneamente). Os casos 7 a 10 são consideradas faltas complexas com falhas simultâneas nos relés principal, backup e disjuntores, ou seja, falha em todos os dispositivos que protegem a seção. Abaixo são descritos os dez estudos de caso.

- ✓ **Caso 1:** falta múltipla nas seções L29 e L30. Para a seção L29, as unidades de disparo L29-27 m e L29-23 m operam para desarmar os dois disjuntores CB57 e CB58; no entanto, ambos os disjuntores falharam. Neste caso, as os relés L29-27 b e L29-23 b operaram para desarmar CB57 e CB58;
- ✓ **Caso 2:** falta tripla nas seções L24, L25 e B22. A seção L24 é um caso complexo porque, ou ambos os relés L24-18 m , L24-20 b e L24-18 s dispararam para desarmar o CB48, ou L24-20 b e L24-18 s são alarmes falsos;
- ✓ **Caso 3:** falta na L30, onde o relé L30-23 m é considerado em manutenção e operação correta em L30-24 m , L30-23 b , CB59 e CB60;
- ✓ **Caso 4:** falta na L28 com falha de operação em CB55 e CB56;
- ✓ **Caso 5:** falta na B21 com falha de operação em CB56;
- ✓ **Caso 6:** falta na B22 com falha de operação no relé B22-22 m ;
- ✓ **Caso 7:** falta complexa na B18 com falha de operação generalizada no relé B18-18 m e nos disjuntores CB45 e CB47;
- ✓ **Caso 8:** falta complexa em L25, tal cenário considera L25-20 m em manutenção, falha de operação no relé L25-20 b , nos disjuntores CB49 e CB50 e falha de comunicação nos relés L25-23 m e L25-23 b ;
- ✓ **Caso 9:** falta complexa na B23 com falha de operação no relé B-23 m , CB49, CB58 e CB59. O relé xs das linhas L25, L29 e L30 operaram corretamente para proteger a B23; porém devido a uma falha de comunicação, foram reportados somente os alarmes da abertura dos disjuntores CB50, CB57 e CB60;
- ✓ **Caso 10:** o último caso é uma falta complexa na L28, falha de operação nos relés L28-21 m , L28-21 b , L28-25 m e L28-25 b e falha nos disjuntores CB56 e CB55.

2 é “*todos xs adjacentes operam*” (0 ou 1); bit 3 é “*CBs abertos*” (0 ou 1) e bit 4 “*um CB abriu*” (0 ou 1). Não menos importante e conforme já mencionado, esta metodologia também não inclui um processador de alarmes que permita estabelecer automaticamente 0 ou 1 para os bits 1, 2, 3 e 4 das tabelas 5.9 e 5.10. Portanto, os alarmes da tabela 6.1 foram inseridos manualmente.

Tabela 6.5 – Alarmes reportados do sistema SCADA (metodologia RNAPA)

Casos	Seções	Proteção	CBs	Casos	Seções	Proteção	CBs
1	L25	L25-20s-p	CB50-p	7	L23	L23-18s-d, L23-19s-p e bit 2 (1)	CB46-p
	L29	L29-23b e L29-27b	CB57 e CB58		L24	L24-18s-d, L24-20s-p e bit 2 (1)	CB48-p
	L30	L30-23m e L30-24m	CB59 e CB60		B18	bit 2 (0), bit 3 (0) e bit 4 (0)	-
	B20	bit 2 (0), bit 3 (0) e bit 4 (1)	CB50		B19	bit 2 (0), bit 3 (1) e bit 4 (1)	CB46
	B23	bit 2 (0), bit 3 (0) e bit 4 (1)	CB58 e CB59	8	B20	bit 2 (0), bit 3 (0) e bit 4 (1)	CB48
	B24	bit 2 (0), bit 3 (1) e bit 4 (1)	CB60		L24	L24-18s-d	CB47-d
	B27	bit 2 (0), bit 3 (1) e bit 4 (1)	CB57		L26	L26-22s-d	CB51-d
2	L24	L24-18m, L24-20m, L24-20b e L24-18s-d	CB47-d e CB48	L27	L27-21s-p	CB54-p	
	L25	L25-23m	CB49	L29	L29-27s-d	CB57-d	
	L26	L26-22s-d	CB51-d	L30	L30-24s-d	CB60-d	
	L27	L27-21s-p	CB54-p	B18	bit 2 (0), bit 3 (0) e bit 4 (1)	CB47	
	B18	bit 2 (0), bit 3 (0) e bit 4 (1)	CB47	B20	bit 2 (0), bit 3 (0) e bit 4 (0)	-	
	B20	bit 2 (0), bit 3 (0) e bit 4 (1)	CB48	B21	bit 2 (0), bit 3 (0) e bit 4 (1)	CB54	
	B21	bit 2 (0), bit 3 (0) e bit 4 (1)	CB54	B22	bit 2 (0), bit 3 (1) e bit 4 (1)	CB51	
	B22	B22-22m, bit 2 (0), bit 3 (0) e bit 4 (1)	CB51	B23	bit 2 (0), bit 3 (0) e bit 4 (0)	-	
	B23	bit 2 (0), bit 3 (0) e bit 4 (1)	CB49	B24	bit 2 (0), bit 3 (1) e bit 4 (1)	CB60	
3	L30	L30-24m e L30-23b	CB59 e CB60	B27	bit 2 (0), bit 3 (1) e bit 4 (1)	CB57	
	B23	bit 2 (0), bit 3 (0) e bit 4 (1)	CB59	9	L25	L25-27s-d	CB50-d
	B24	bit 2 (0), bit 3 (1) e bit 4 (1)	CB60		L29	L29-27s-d	CB57-d
4	L27	L27-20s-d	CB53-d	L30	L30-27s-p	CB60-p	
	L28	L28-21m, L28-21b e L28-25m, L28-25b e bit 2 (1)	-	B20	bit 2 (0), bit 3 (0) e bit 4 (1)	CB50	
	L31	L31-xs-p	CBx-p	B24	bit 2 (0), bit 3 (1) e bit 4 (1)	CB60	
	B20	bit 2 (0), bit 3 (0) e bit 4 (1)	CB53	B27	bit 2 (0), bit 3 (1) e bit 4 (1)	CB57	
	B21	bit 2 (0), bit 3 (0) e bit 4 (0)	-	10	L27	L27-20s-d	CB53-d
	B25	bit 2 (0), bit 3 (0) e bit 4 (0)	-		L31	L31-xs-p	CBx-p
	Bx	bit 2 (0), bit 3 (0) e bit 4 (1)	CBx		B20	bit 2 (0), bit 3 (0) e bit 4 (1)	CB53
5	L28	L28-21s-d e L28-25s-p	CB55-d	B21	bit 2 (0), bit 3 (0) e bit 4 (0)	-	
	B21	bit 2 (0), bit 3 (0) e bit 4 (1)	CB54	Bx	bit 2 (0), bit 3 (1) e bit 4 (1)	CBx	
	B25	bit 2 (0), bit 3 (0) e bit 4 (1)	CB55				
6	L26	L26-22s-d e bit 2 (1)	CB51-d				
	B22	bit 2 (0), bit 3 (1) e bit 4 (1)	CB51				

A tabela 6.6 mostra os estudos de casos (coluna 1) com suas respectivas seções candidatas a falta (coluna 2). Os resultados dos diagnósticos de falta de cada modelo são demonstrados nas colunas 3 a 7. Os parâmetros de bayes ($pC = 0,8975$, $pf = 0,025$ e $pi = 0,0775$ para L e B) são os mesmos utilizados por RIBEIRO, CARDOSO JR., *et al.* (2021). Os valores de tolerância foram parametrizados em $F_{ic} = 0,4$ e $F_{ict} = 0,6$, o que resulta nos valores de controle $V_{scc} = 0,4$, $V_{icc} = -0,4$, $V_{sct} = 0,6$ e $V_{ict} = -0,6$. Esses parâmetros permitem uma

comparação totalmente equânime entre a RNAPA e RAP–LPA2v.

A tabela 6.7 mostra também as evidências das seções alarmadas a nível de sistema que foram utilizadas pelo algoritmo de seções alarmadas. Portanto, possibilitou estabelecer os diagnósticos dos estudos de casos 8, 9 e 10 (diagnósticos destacados em cinza).

Tabela 6.6 – Resultados e comparações (metodologia RNAPA)

		Resultados dos diagnósticos de cada modelo				
1	2	3	4	5	6	7
Casos	Seções	RNAPA	RAP–LPA2v (Ribeiro et al., 2021)	rWCFRSNPSs (Wang et al., 2020)	IVFSNP systems (Wang et al., 2019)	FL (Chin, 2003)
1	L29	FI	FI	FI	FI	NF
	L30	FI	FI	FI	FI	FI
2	L24	qFI→T	T→qFI	FI	FI	NF
	L25	FI	T→qFI	FI	FI	NF
	B22	FI	qFI→T	FI	FI	FI
3	L30	FI	FI	FI	FI	FI
4	L28	FI	T→qFI	FI	FI	FI
5	B21	FI	T→qFI	FI	FI	FI
6	B22	qFI→T	qFI→T	NF	NF	NF
7	B18	qFI→T	T→qFI	NF	NF	NF
8	L25	FI	-	-	-	-
9	B23	qFI→T	-	-	-	-
10	L28	qFI→⊥	-	-	-	-

Tabela 6.7 – Evidências das seções alarmadas a nível de sistema

Casos	Section	μ	λ	G_c	G_{ct}	LPA2v	Casos	Section	μ	λ	G_c	G_{ct}	LPA2v
8	L24	0,985	0.5	0,485	0,485	FE_B20	9	L25	0,985	0,5	0,485	0,485	FE_B23
8	L26	0,985	0.5	0,485	0,485	FE_B20	9	L29	0,985	0,5	0,485	0,485	FE_B23
8	L27	0,985	0.5	0,485	0,485	FE_B20	9	L30	0,985	0,5	0,485	0,485	FE_B23
8	L29	0,985	0.5	0,485	0,485	FE_B23	9	B23	0,739	0,375	0,364	0,114	qFI→T
8	L30	0,985	0.5	0,485	0,485	FE_B23	10	L27	0,985	0,5	0,485	0,485	FE_B21
8	B20	0,994	0.5	0,494	0,494	NF	10	L31	0,985	0,5	0,485	0,485	FE_B25
8	B23	0,994	0.5	0,494	0,494	NF	10	B21	0,994	0,5	0,485	0,485	NF
8	L25	0,789	0.375	0,415	0,165	FI	10	B25	0,994	0,5	0,485	0,485	NF
							10	L28	0,659	0,333	0,326	-	qFI→⊥

6.2.1 Considerações dos resultados apresentados da RNAPA

A tabela 6.6 acima, é possível extrair algumas considerações: **Casos 1, 2 e 3**, mesmo

com as falhas nos relés de retaguarda, todos os modelos produziram praticamente os mesmos diagnósticos de FI (exceto o modelo FL que diagnosticou nos casos 1 e 2, NF na L29 e NF nas L24 e L25 respectivamente). A RNAPA detectou T na L24 (caso 2), isso ocorreu devido a incerteza nos alarmes (L24-18*m*, L24-20*m*, L24-20*b* e L24-18*s-d*). O RAP-LPA2v não obteve a mesma eficiência, pois detectou T em todas as seções do caso 2; **Casos 4 e 5**, os relés principal e de retaguarda operaram corretamente. Embora os disjuntores CB55 e CB56 (caso 4) e CB56 (caso 5) tenham falhado em operar, os sistemas APANN, rWCFRSNPSs, IVFSNP e modelos FL produziram os mesmos diagnósticos FI. A RAP-LPA2v detectou T em todos os diagnósticos de FI; **Casos 6 e 7**, ocorreram falhas graves na proteção (caso 6 falha no B22-22*m* e caso 7 falha no B18-18*m*, CB45 e CB47). Neste caso, os sistemas rWCFRSNPSs, IVFSNP e modelos FL diagnosticaram como NF. A RNAPA e RAP-LPA2v diagnosticaram como FI mesmo na ocorrência de falha grave dos dispositivos de proteção; **Casos 8, 9 e 10** refletem claramente a evolução e contribuição desta metodologia. A falha generalizada dos dispositivos de proteção impossibilitou o funcionamento correto dos sistemas RAP-LPA2v, rWCFRSNPSs, IVFSNP e modelos FL. A RNAPA funcionou conforme o esperado diagnosticando como FI as seções não alarmadas. De outra forma, diante da ausência dos alarmes, o algoritmo de seções alarmadas utilizou as evidências das seções adjacentes para apresentar os diagnósticos.

6.3 Considerações finais

A subseção 6.1 mostrou uma filosofia de proteção mais ampla com diferentes relés de proteção principal e retaguarda protegendo diferentes equipamentos primários do SEP. Os estudos de casos mostraram que apesar da diferença de conceito entre as metodologias comparadas, a RAP-LPA2v mostrou ser tão eficiente quanto a MIP em termos de ESF. Uma das vantagens da MIP é a sua capacidade de informar os alarmes falsos e falhos. Por outro lado, a vantagem da RAP-LPA2v é disponibilizar ao operador diagnósticos incertos quando da ocorrência de alarmes falsos e falhos. A subseção 6.2 mostrou a evolução da RAP-LPA2v para a RNAPA, sendo tal evolução comparada com metodologias semelhantes, ou seja, métodos que utilizam valores de pertinência para tratar as incertezas das informações. Da mesma forma, apesar da simplicidade da filosofia de proteção, os estudos de casos mostraram que a RNAPA realizou um melhor tratamento das incertezas através de seus valores de tolerâncias à certeza e a contradição embutida em cada CNAPA. Finalizando o capítulo, foram apresentadas as considerações de cada um dos resultados obtidos pela metodologia RAP-LPA2v e RNAPA.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante da originalidade e dos resultados obtidos nas duas metodologias, serão apresentados, a seguir, as principais conclusões levantadas neste trabalho que estão divididas em duas subseções, sendo a primeira relacionada a RAP–LPA2v e a segunda a RNAPA. Posteriormente, serão propostas sugestões para realização de trabalhos futuros relacionados ao tema LPA2v. Finalizando as conclusões, serão apresentados os trabalhos publicados e submetido em revistas internacionais com alto fator de impacto.

7.1 Conclusões da metodologia RAP–LPA2v

Esta metodologia descreve um modelo contemporâneo que analisa quantitativamente cada proposição potencialmente relevante para detectar e tratar incertezas com o auxílio de três e e os valores de controle. Uma das vantagens do modelo é a possibilidade de integrar qualquer especialidade no RAP, desde que modelado para o valor lógico paraconsistente $[0, 1]$; estes podem ser: corrente, tensão, potência e frequência. A RAP–LPA2v mostra os resultados de um estado lógico resultante, forçando o operador a reanalisar as informações na presença de resultados incertos. A solução (estado lógico V – verdadeiro) só será alcançada quando o e tiver alto grau de conhecimento. A metodologia proposta neste estudo foi relativamente simples de implementar e oferece ao operador uma forma intuitiva e eficaz de identificar faltas nos equipamentos primários do SEP. Finalmente, a RAP–LPA2v pode ser customizada para melhorar sua resposta de classificação através da inclusão de novos e .

7.2 Conclusões da metodologia RNAPA

Esta metodologia apresentou um novo modelo de inteligência artificial também baseada na LPA2v para diagnóstico de faltas no SEP. Assim como a RAP–LPA2v, a RNAPA também usa multiagentes como e para processar as regras de proteção a fim de fornecer as evidências das seções alarmadas. Novamente, a utilização dos três e evita a dependência de números empíricos ou probabilísticos. Além disso, foi desenvolvida uma base de evidências que permite o diagnóstico de seções não alarmadas, mas candidatas a falta. Da mesma forma, a RNAPA, além de ser eficiente no tratamento de alarmes incertos, igualmente admite incerteza em seus resultados, o que garante maior confiabilidade no diagnóstico e na tomada de decisões.

A sua superioridade e evolução foi comprovada nos estudos de caso da subseção 6.2, pois demonstrou ser resiliente nos casos de faltas complexas de proteção dos relés principal e retaguarda, bem como, falha generalizada de comunicação dos dispositivos de proteção. Por fim, a RNAPA detecta T ou L somente quando ocorrem faltas complexas, Nos casos de faltas consideradas simples, ou seja, desempenho correto dos relés principal e retaguarda, a RNAPA estabelece um diagnóstico binário (FI). Em outras palavras, livre de incertezas.

7.3 Sugestões para trabalhos futuros

Novas pesquisas relacionadas a LPA2v estão evoluindo para incluir em trabalhos futuros:

- ✓ **Especialistas** analógicos como corrente, tensão, potência e tempo de disparo de relés e disjuntores. Com isso, é possível melhorar o processamento das informações temporais e conseqüentemente evoluir com a pesquisa;
- ✓ Integrar a LPA2v ao procedimento de manobras, a fim de auxiliar no reestabelecimento automática do SEP;
- ✓ Criar uma rede neural artificial paraconsistente de aprendizado participativo a fim de automatizar os parâmetros referentes à flexibilização dos valores de controle e os fatores de tolerância à certeza e contradição;

7.4 Publicações de artigo submetidos em revistas internacionais que fundamentaram esta pesquisa

1. RIBEIRO, J. C.; CARDOSO Jr, G.; da SILVA, V. B.; OLIVEIRA, A. L.; RICCIOTTI, A. C. D.; OLIVEIRA, P. T. C. **Paraconsistent analysis network for uncertainties treatment in electric power system fault section estimation.** International Journal of Electrical Power and Energy Systems, v. 134, p. 107317, 2022 jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107317>
2. RIBEIRO, J. C.; CARDOSO Jr, G.; OLIVEIRA, A. L.; da SILVA, V. B.; RICCIOTTI, A. C. D.; POETA e SILVA, I. R. R. **An analytical paraconsistent artificial neural network for fault diagnosis in electrical power systems.** Engineering Applications of Artificial Intelligence. Manuscript submitted in 1 may 2022.

8 Referências

- ABE, J. M.; HELDER, F. S. L.; NAKAMATSU, K. Paraconsistent neurocomputing and brain signal analysis. **Vietnam Journal of Computer Science**, 1, 2014. 219-230.
- ALMEIDA, G. F. B. et al. **Relatório de Análise de Desligamentos Forçados do Sistema de Transmissão Edição 2018**. ANEEL. Brasília, p. 1 - 687. 2018.
- ALVES, W. et al. A Hybrid Approach for Big Data Outlier Detection from Electric Power SCADA System. **IEEE Latin America Transactions**, v. 15, p. 57 - 64, jan. 2017. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee-org.ez47.periodicos.capes.gov.br/document/7827888>>. Acesso em: 11 jun. 2022.
- ANSI/ISA-18.2. **Management of Alarm Systems for the Process Industries**. International Society of Automation. USA. 2009.
- BAHRAMI, M.; FOTUHI-FIRUZABAD, M.; FARZIN, H. Reliability Evaluation of Power Grids Considering Integrity Attacks Against Substation Protective IEDs. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, p. 1035 - 1044, fev. 2020. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee-org.ez47.periodicos.capes.gov.br/document/8754701/references#references>>. Acesso em: 04 maio 2022.
- BALAN, S. et al. **Design of A Novel IEC 61850 Based Merging Unit for Substation Automation**. 2018 International CET Conference on Control, Communication, and Computing (IC4). Thiruvananthapuram, India: [s.n.]. 2018.
- C37.91-2008 - IEEE Guide for Protecting Power Transformers - Redline. **Power Engineering Society IEEE**, New York, p. 1 - 139, Maio 2008. <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=4534868>.
- CARDOSO JUNIOR, G. **ESTIMAÇÃO DA SEÇÃO EM FALTA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA VIA REDES NEURAIAS E SISTEMAS ESPECIALISTAS REALIZADA EM NÍVEL DE CENTRO DE CONTROLE**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina. [S.l.], p. 162. 2003.
- CASTELLO, P. et al. A New IED With PMU Functionalities for Electrical Substations. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 62, p. 3209 - 3217, dez. 2013. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee-org.ez47.periodicos.capes.gov.br/document/6558517>>. Acesso em: 04 maio 2022.
- CHEN, S.-J. et al. **Using Multi-vendor IEDs for IEC 61850 Interoperability and HMI-SCADA Applications**. 2012 International Symposium on Computer, Consumer and Control. Taichung, Taiwan: [s.n.]. 2012.
- CHEN, S.-M.; CHEN, J.-H. Fuzzy risk analysis based on similarity measures between interval-valued fuzzy numbers and interval-valued fuzzy number arithmetic operators. **Expert Systems with Applications**, v. 36, p. 6309 - 6317, abr. 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417408005654>>. Acesso em: 27 out. 2020.
- CHEN, W. H.; SHUN, T.; LIN, H.-I. Fault Section Estimation for Power Networks Using Logic Cause-Effect Models. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 26, p. 963 - 971, abr. 2011.
- CHIN, H. C. Fault section diagnosis of power system using fuzzy logic. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 18, p. 245 - 250, 19 fev. 2003.
- COELHO, M. S. et al. **Hybrid PI controller constructed with paraconsistent annotated logic**. Tese de Doutorado – Júlio César Ribeiro

- Control Engineering Practice** *journal*, v. 84, p. 112-124, mar. 2019.
- DA CRUZ, C. M. et al. **Application of Paraconsistent Artificial Neural Network in Statistical Process Control acting on voltage level monitoring in Electrical Power Systems**. 18th International Conference on Intelligent System Application to Power Systems (ISAP). Porto, Portugal: [s.n.]. 2015.
- DA SILVA FILHO, I. et al. **Annotated Paraconsistent Logic applied to an Expert System dedicated for supporting in an electric power transmission systems re-establishment**. IEEE PES Power Systems Conference and Exposition. Atlanta, GA, USA: [s.n.]. 2006.
- DA SILVA FILHO, J. I. Métodos de Aplicações da Lógica Paraconsistente Anotada de anotação com dois valores-LPA2v. **Revista Seleção Documental do GLPA**, Santos - SP, Março 2006. 18 - 25.
- DA SILVA FILHO, J. I. et al. **Electric Power Systems Contingencies Analysis by Paraconsistent Logic Application**. International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems. Toki Messe, Niigata, Japan: [s.n.]. 2007.
- DA SILVA FILHO, J. I. et al. Paraconsistent analysis network applied in the treatment of Raman spectroscopy data to support medical diagnosis of skin cancer. **Medical & Biological Engineering & Computing**, v. 54, p. 1453-1467, mar. 2016.
- DA SILVA FILHO, J. I. et al. Support at Decision in Electrical Systems of subtransmission through selection of Topologies by a Paraconsistent Simulator. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, p. 1993 - 1999, 02 jun. 2016.
- DA SILVA FILHO, J. I.; ABE, J. M.; LAMBERT-TORRES, G. **Inteligência Artificial com as Redes de Análises Paraconsistentes - Teoria e Aplicações**. 1. ed. [S.l.]: LTC, 2008. 328 p.
- DA SILVA FILHO, J. I.; ROCCO, A. **Power systems outage possibilities analysis by Paraconsistent Logic**. IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh, PA, USA: [s.n.]. 2008. p. 1932-5517.
- DA SILVA LOPES, H. F.; ABE, J. M.; ANGHINAH, R. Application of Paraconsistent Artificial Neural Networks as a Method of Aid in the Diagnosis of Alzheimer Disease. **Journal of Medical Systems**, p. 1073–1081, dez. 2010.
- DAI, R. et al. Novel Graph-Based Energy Management System. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 11, p. 1845 - 1853, maio 2020. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee.org.ez47.periodicos.capes.gov.br/document/8848613>>. Acesso em: 13 jun. 2022.
- DAS, N.; MODI, H.; ISLAM, S. **Investigation on architectures for power system communications between substations using IEC 61850**. Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC). Perth, WA, Australia: [s.n.]. 2014.
- DAVIDSON, E. M. et al. Applying Multi-Agent System Technology in Practice: Automated Management and Analysis of SCADA and Digital Fault Recorder Data. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS**, v. 21, p. 559 - 567, maio 2006. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1626359>>. Acesso em: 26 abr. 2022.
- DE DOMINICIS, C. M. et al. On the Use of IEEE 1588 in Existing IEC 61850-Based SASs: Current Behavior and Future Challenges. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 60, p. 3070 - 3081, 07 jul. 2011. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee.org.ez47.periodicos.capes.gov.br/document/5941003>>. Acesso em: 2022 maio 20.
- DE DOMINICIS, C. M. et al. On the Use of IEEE 1588 in Existing IEC 61850-Based SASs:

Current Behavior and Future Challenges. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 60, p. 3070 - 3081, 07 jul. 2011. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee.org.ez47.periodicos.capes.gov.br/document/5941003>>. Acesso em: 20 maio 2022.

DO AMARAL, F. et al. **Paraconsistent Extractor of Mammographic Images Applied in the Process of Diagnosis of Breast Cancer Assisted by Computer**. Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA). Thessaloniki, Greece: [s.n.]. 2018.

DOS SANTOS, A.; CORREIA DE BARROS, M. T.; CORREIA, P. F. Transmission line protection systems with aided communication channels—Part I: Performance analysis methodology. **Electric Power Systems Research**, v. 127, p. 332 - 338, out. 2015. Disponível em: <<https://www-sciencedirect.ez47.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0378779615001923>>. Acesso em: 14 jun. 2022.

DY LIACCO, T. E. The Adaptive Reliability Control System. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-86, p. 517 - 531, maio 1967.

DY LIACCO, T. E.; KRAYNAK, T. J. Processing by Logic Programming of Circuit-Breaker and Protective-Relaying Information. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER APPARATUS AND SYSTEMS**, v. PAS-88, p. 171 - 175, fev. 1969. Acesso em: 08 set. 2020.

ENGLERT, T. J.; CHOWDHURY, B. H.; GRIGSBY, E. A laboratory investigation of electro-optic Kerr effect for detection of electric transmission line faults. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 6, p. 979-985, 1991. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/85837/>>.

EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021 Ano base 2020**. Empresa de Pesquisa Energética. [S.l.]. 2022.

FERRARA, L. F. P. et al. **Forecaster of Loads Profile in Power Electric Systems Based on Paraconsistent Annotated Logic**. 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems. Curitiba, Brazil: [s.n.]. 2009.

FERREIRA, V. H. et al. A survey on intelligent system application to fault diagnosis in electric power system transmission lines. **Electric Power Systems Research**, v. 136, p. 135-153, 01 mar. 2016. Acesso em: 15 jul. 2020.

FONSECA, E. S. et al. Acoustic investigation of speech pathologies based on the discriminative paraconsistent machine (DPM). **Biomedical Signal Processing and Control**, v. 55, p. 101615, jan. 2020.

FRITZEN, P. C. **ESTIMAÇÃO DA SEÇÃO EM FALTA E PROCESSAMENTO DE ALARMES EM SISTEMAS DE POTÊNCIA UTILIZANDO UM SISTEMA HÍBRIDO FUNDAMENTADO NA HEURÍSTICA CONSTRUTIVA E NA PROGRAMAÇÃO INTEIRA**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Maria - UFSM. Santa Maria - RS, p. 130. 2012.

FRITZEN, P. C. et al. Hybrid system based on constructive heuristic and integer programming for the solution of problems of fault section estimation and alarm processing in power systems. **Electric Power Systems Research**, v. 90, p. 55-66, 05 maio 2012. Acesso em: 30 jul. 2020.

GUO, W. et al. An analytic model for fault diagnosis in power systems considering malfunctions of protective relays and circuit breakers. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 25, p. 1393-1401, 03 July 2010. Acesso em: 18 maio 2020-.

GUPTA, K. M.; MONTEZEMI, A. R. Empirical Evaluation of Retrieval in Case-Based

Reasoning Systems Using Modified Cosine Matching Function. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems.**, 27, Set 1997. 601 - 612.

HE, Z. et al. **Fault-section estimation in power systems based on improved optimization model and binary particle swarm optimization.** 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Calgary, AB, Canada: [s.n.]. 2009.

HUANG, S.-J. Application of immune-based optimization method for fault-section estimation in a distribution system. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 17, p. 779 - 784, nov. 2002. Acesso em: 11 set. 2020.

HUANG, Y.-C. Fault section estimation in power systems using a novel decision support system. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 17, p. 439 - 444, maio 2002. Acesso em: 15/09/2020.

HUSSAIN, S. S.; FAROOQ, S. M.; USTUN, T. S. Analysis and Implementation of Message Authentication Code (MAC) Algorithms for GOOSE Message Security. **IEEE Access**, v. 7, p. 80980 - 80984, 19 jun. 2019. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee.org.ez47.periodicos.capes.gov.br/document/8740995>>. Acesso em: 2022 maio 20.

IEC International Electrotechnical Commission. **Quem nós somos**, 2022. Disponível em: <<https://iec.ch/who-we-are>>. Acesso em: 14 maio 2022.

INGRAM, D. M. et al. Performance Analysis of IEC 61850 Sampled Value Process Bus Networks. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 9, p. 1445 - 1454, 3 ago. 2013. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee.org.ez47.periodicos.capes.gov.br/document/6359922/authors#authors>>. Acesso em: 16 maio 2022.

KANABAR, M. G.; SIDHU, S. Performance of IEC 61850-9-2 Process Bus and Corrective Measure for Digital Relaying. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 26, p. 725 - 735, 2 abr. 2011. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee.org.ez47.periodicos.capes.gov.br/document/5409526>>. Acesso em: 16 maio 2022.

LEÃO, F. B. **Metodologia para Análise e Interpretação de Alarmes em Tempo Real de Sistema da Distribuição de Energia Elétrica.** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Estadual Paulista, Campus Ilha Solteira. Ilha Solteira - SP, p. 1 - 345. 2011.

LEÃO, F. B.; PEREIRA, R. A. F.; MANTOVANI, J. R. S. Fault section estimation in electric power systems using an optimization immune algorithm. **Electric Power Systems Research**, v. 80, p. 1341 - 1352, jun. 2010. Acesso em: 11 set. 2020.

LEI, H.; SINGH, C.; SPRINTSON, A. Reliability Modeling and Analysis of IEC 61850 Based Substation Protection Systems. **IEEE Transactions on Smart Grid**, p. 2194 - 2202, 30 jul. 2014. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee.org.ez47.periodicos.capes.gov.br/document/6868302>>. Acesso em: 20 maio 2022.

LIM, S. A service interruption free testing methodology for IEDs in IEC 61850-based substation automation systems. **Electrical Power and Energy Systems**, v. 87, p. 65 - 76, maio 2017. Disponível em: <<https://www-sciencedirect.ez47.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0142061516307475?via%3Dihub#!>>. Acesso em: 04 maio 2022.

LIMA, D. R.; ROSATELLI, M. C. Uma abordagem para a recuperação e adaptação de casos em um Sistema. **XV Simpósio Brasileiro de Informática na Educação - SBIE**, Manaus, 2004.

- LIU, C. C.; DILLON, T. State-of-the-art of expert system applications to power systems. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 14, p. 86-96, jun. 1992. Acesso em: 29 jul. 2020.
- MAK, K.-H.; HOLLAND, B. L. Migrating electrical power network SCADA systems to TCP/IP and Ethernet networking. **Power Engineering Journal**, v. 16, p. 305 - 311, dez. 2002. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee.org.ez47.periodicos.capes.gov.br/document/1159872>>. Acesso em: 28 abr. 2022.
- MARTINS, H. G. **A Lógica Paraconsistente Anotada de Quatro Valores - LPA4v aplicada em Sistema de Raciocínio Baseado em Casos para o Restabelecimento de Subestações Elétricas**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Itajubá. Itajubá - MG, Brasil, p. 130. 2003.
- MIRANDA, J. C. **IEC-61850: Interoperabilidade e Intercambialidade entre Equipamentos de Supervisão, Controle e Proteção Atraves das Redes de Comunicação de Dados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo - USP. São Carlos - SP, p. 1 - 313. 2009.
- MÓDULO 8 – QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**. ANEEL. [S.l.], p. 53. 2008.
- MOORE, R.; MIDENCE, R.; GORAJ, M. **Practical experience with IEEE 1588 high Precision Time Synchronization in electrical substation based on IEC 61850 Process Bus**. IEEE PES General Meeting. Minneapolis, MN, USA: [s.n.]. 2010.
- NEIS, P.; WEHRMEISTER, M. A.; MENDES, M. F. Model Driven Software Engineering of Power Systems Applications: Literature Review and Trends. **IEEE Access**, v. 7, p. 177761 - 177773, dez. 2019. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee.org.ez47.periodicos.capes.gov.br/document/8926459>>. Acesso em: 13 jun. 2022.
- OLIVEIRA, A. D. L. **PROCESSADOR INTELIGENTE DE ALARMES E MODELOS DE PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA PARA DIAGNÓSTICO DE FALTAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria - RS, p. 203. 2016.
- OLIVEIRA, A. L. et al. A mixed integer programming model for optimal fault section estimation in power systems. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 77, p. 372 - 384, maio 2016.
- ONS. **ANÁLISE DA PERTURBAÇÃO DO DIA 10/11/2009 ÀS 22H 13MIN ENVOLVENDO O DESLIGAMENTO DOS TRÊS CIRCUITOS DA LT 765 KV ITABERÁ - AVAIPORÁ**. Operador Nacional do Sistema Elétrico. [S.l.]. 2009.
- ONS. **Entrevista Coletiva sobre a Perturbação de 21/03/2018**. Operador Nacional do Sistema Elétrico. [S.l.]. 2018.
- ONS. **ANÁLISE DA PERTURBAÇÃO DO DIA 03/11/2020 ÀS 20H48MIN COM INÍCIO NOS TRANSFORMADORES DE 230/69/13,8 kV DA SE MACAPÁ, COM DESLIGAMENTO DA UHE COARACY NUNES E DO SISTEMA AMAPÁ**. Operador Nacional do Sistema Elétrico. [S.l.]. 2020.
- ONS OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **ONS**, 2022. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/o-que-e-ons>>.
- OYAMA, T. **Fault Section Estimation in Power System Using Boltzmann Machine**. Proceedings of the Second International Forum on Applications of Neural Networks to Power

- Systems. Yokohama, Japão: [s.n.]. 1992.
- PAUL BARRINGER, P. E. Process and Equipment Reliability. **Maintenance & Reliability Technology Summit**, Chicago, p. 1 -11, Maio 2004.
- PENA, E. H. M. et al. Anomaly detection using the correlational paraconsistent machine with digital signatures of network segment. **Information Sciences**, v. 420, p. 313-328, dez. 2017.
- PENG, H. et al. Fuzzy reasoning spiking neural P system for fault diagnosis. **Information Sciences**, v. 235, p. 106 - 116, jun. 2013.
- PENG, H. et al. Fault Diagnosis of Power Systems Using Intuitionistic Fuzzy Spiking Neural P Systems. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 9, p. 4777 - 4784, 16 out. 2018. Acesso em: 25 jul. 2020.
- RIBEIRO, J. C. **LÓGICA PARACONSISTENTE ANOTADA DE TRÊS VALORES APLICADA EM RACIOCÍNIO BASEADO EM CASOS PARA DIAGNÓSTICO DE FALTA EM TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria - RS, p. 93. 2016.
- RIBEIRO, J. C. et al. Paraconsistent analysis network for uncertainties treatment in electric power system fault section estimation. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 134, p. 107317, 2022 jan. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107317>>.
- RIBEIRO, J. C.; JUNIOR, G. C.; OLIVEIRA, A. D. L. **Uma metodologia para a Classificação de Falhas em Sistemas Elétricos de Potência baseada na Teoria da Lógica Paraconsistente e Sistema de Raciocínio Baseado em Casos**. THE XI LATIN-AMERICAN CONGRESS ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION - CLAGTEE 2015. São José dos Campos - SP: [s.n.]. 2015.
- SALTON, G. Information dissemination and automatic information systems. **IEEE Journals & Magazines**, p. 1663 - 1678, dez. 1966.
- SOUSA, C. R. A. **Probabilidade Bayesiana: Conjecturas**. Dissertação (Mestrado em Matemática), Universidade Federal de Viçosa. Florestal - MG, p. 58. 2018.
- SUOZA, F. A. **Deteção de Falhas em Sistema de Distribuição de Energia Elétrica Usando Dispositivos Programáveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira - SP, p. 120. 2008.
- TORRES, C. R. **Sistema Inteligente Baseado na Lógica Paraconsistente Anotada Evidencial para Controle e Navegação de Robôs Móveis Autônomos em um Ambiente não Estruturado**. Tese (Doutorado em Automação e Sistema Elétricos), Universidade Federal de Itajubá. Itajubá - MG, p. 190. 2010.
- TORRES, C. R. et al. The Sensing System for the Autonomous Mobile Robot Emmy III, Taipei, Taiwan, Junho 2011. 2928 - 2933.
- VADIATI, M. et al. **Future trends of substation automation system by applying IEC 61850**. 43rd International Universities Power Engineering Conference. Padua, Italy: [s.n.]. 2008.
- VAISH, R. et al. Machine learning applications in power system fault diagnosis: Research advancements and perspectives. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 106, nov. 2021. Acesso em: 11 fev. 2022.
- VAZQUEZ, E.; CHACON, O. L.; ALTUVE, H. J. An online expert system for fault section diagnosis in power systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 12, p. 357 - 362, 01

fev. 1997.

WANG, J. et al. Interval-valued fuzzy spiking neural P systems for fault diagnosis of power transmission networks. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 82, p. 102-109, jun. 2019. Acesso em: 25 maio 2020.

WANG, L. et al. Knowledge representation and general Petri net models for power grid fault diagnosis. **IET Generation, Transmission & Distribution (Journals & Magazines)**, v. 9, p. 866 - 873, June 2015.

WANG, T. et al. Fault Diagnosis of Electric Power Systems Based on Fuzzy Reasoning Spiking Neural P Systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 30, p. 1182 - 1194, 03 maio 2015.

WANG, T. et al. A weighted corrective fuzzy reasoning spiking neural P system for fault diagnosis in power systems with variable topologies. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 92, p. 103680, jun. 2020. Acesso em: 25 jul. 2020.

WANGENHEIM, C. G. V.; WANGENHEIM, A. V. **RACIOCÍNIO BASEADO EM CASOS**. 1ª. ed. Barueri - SP: Manole LTDA, v. 297, 2003.

WEN, F.; CHANG, C. S.; SRINIVASAN, D. **Alarm processing in power systems using a genetic algorithm**. Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Evolutionary Computation. Perth, WA, Australia: [s.n.]. 1995.

WEN, F.; HAN, Z. Fault section estimation in power systems using a genetic. **Electric Power Systems Research**, v. 34, p. 165 - 172, fev. 1995. Acesso em: 09 set. 2020.

XIANGLI, D.; MENG, N.; YAJIE, C. **Research on fault element diagnosis in power system based on hierarchical model and switch temporal logic**. 2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). Beijing, China: [s.n.]. 2014.

XIONG, G. et al. A New Approach to Fault Diagnosis of Power Systems Using Fuzzy Reasoning Spiking Neural P Systems. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2013, p. 13, maio 2013.

XIONGA, G. et al. A binary coded brain storm optimization for fault section diagnosis of power. **Electric Power Systems Research**, p. 441 - 451, 24 jun. 2018. Acesso em: 30 set. 2020.

YU, M. et al. Fault diagnosis for electromechanical system via extended analytical redundancy relations. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, p. 5233 - 5244, 31 May 2018. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee.org.ez47.periodicos.capes.gov.br/document/8370129/authors#authors>>.

YU, W. et al. Fault Diagnosis of Power Systems Using ivFRSN P Systems Fault Diagnosis of Power Systems Using Fuzzy Reasoning Spiking Neural P Systems with Interval-valued Fuzzy Numbers. **ROMANIAN JOURNAL OF INFORMATION SCIENCE AND TECHNOLOGY**, v. 20, p. 5 - 17, 2017.

ZADEH, K.; LI, Z. Phasor measurement unit based transmission line protection scheme design. **Electric Power Systems Research**, v. 81, p. 421 - 429, fev. 2011. Disponível em: <<https://www-sciencedirect.ez47.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0378779610002427>>. Acesso em: 14 jun. 2022.

ZHANG, H. et al. **Fault Diagnosis of Power System Considering Communication System Information Transmission Error**. 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Portland, OR, USA: [s.n.]. 2018.

ZHAO, et al. **A Novel Alarm Processing and Fault Diagnosis Expert System Based on BNF Rules**. Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference. Dalian, China: [s.n.]. 2005.

ZHU, R. et al. Intrusion Detection Against MMS-Based Measurement Attacks at Digital Substations. **IEEE Access**, v. 9, p. 1240 - 1249, 24 dez. 2020. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee-org.ez47.periodicos.capes.gov.br/document/9306781>>. Acesso em: 20 maio 2022.