

MARCO ANTONIO DELGADO ZARZOSA

**ANÁLISE DE EVENTOS EM SISTEMAS DE ENERGIA
ELÉTRICA USANDO SINCROFASORES**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.
Orientador: Ildemar Cassana Decker, D. Sc.

Florianópolis
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

Zarzosa , Marco Antonio Delgado
Análise de Eventos em Sistemas de Energia Elétrica
usando Sincrofasores / Marco Antonio Delgado Zarzosa ;
orientador, Ildemar Cassana Decker - Florianópolis, SC,
2016.
171 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica.

Inclui referências

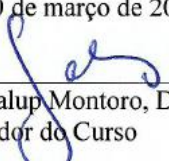
1. Engenharia Elétrica. 2. Sistemas de energia
elétrica. 3. Sistema de medição sincronizada de fasores. 4.
Análise de Eventos. 5. Redes Neurais Artificiais. I.
Decker, Ildemar Cassana. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
III. Título.

MARCO ANTONIO DELGADO ZARZOSA


**ANÁLISE DE EVENTOS EM SISTEMAS DE ENERGIA
ELÉTRICA USANDO SINCROFASORES**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas de Energia Elétrica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.

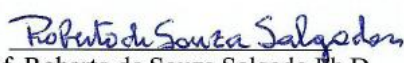
Florianópolis, 30 de março de 2016.


Prof. Carlos Galup Montoro, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:


Prof. Ildemar Cassana Decker, D. Sc.
Presidente e Orientador


Prof. Hans Helmut Zürn, Ph.D.


Prof. Roberto de Souza Salgado Ph.D.


Prof. Miguel Moreto, Dr. Eng.

Aos meus queridos familiares: Ela,
Miguel, Martha, Pepe, Richard,
Shelyn, Eduarda e aos meus queridos
avós que torcem por mim desde o céu.

AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente a Deus Todo Poderoso por me permitir cumprir um dos meus sonhos mais afeiçoados.

Meu agradecimento sincero para minha mãe Ela Zarzosa por suas palavras de alento e direcionamento espiritual, a meu irmão Richard, sua esposa Kiara e a minha sobrinha Jaqueline pela confiança depositada em mim.

Ao Jorge Mauricio Areiza e a Juan David Caicedo Aristizabal (Colômbia) por conduzir-me ao LabPlan e ao Geraldo Kindermann (UFSC), Carlos Portugal, Jorge Lafitte, Felix Gamarra e Luís Fernando Nuñez (Peru) por ter acreditado nas minhas aptidões.

Ao professor Ildemar Cassana Decker pela acertada orientação. O seu apoio incondicional, espírito científico e amizade, foi um desafio constante para lutar além da fadiga até atingir os objetivos propostos.

Aos membros da banca de avaliação, Professor Hans Helmut Zürn, Roberto de Souza Salgado e Miguel Moreto pelas ricas contribuições para o aperfeiçoamento do trabalho.

Ao Wilson Silva e ao Marcelo Siqueira da secretaria do PPGEEL pela amizade e pelo auxílio e suporte nas questões burocráticas durante meus retornos ao meu país durante o mestrado.

Aos professores de LABPLAN e LABSPOT, cientistas de primeira classe e alicerce do meu crescimento acadêmico. Em especial a Jacqueline Rolim e a Fernando Mendes de Azevedo, pelas contribuições para o desenho de um classificador de eventos baseado em RNAs.

Aos amigos do projeto sincrofasorial MedFasee: Valmor Zimmer, Marcelo Benetti, Paulo Sehn, Rodolfo Bialecki, Fábio Mantelli, Pedro Vieira, Jorge Gómez e Marcelo Agostini por ter a coragem de inovar em nossa área e pelas suas apreciações neste trabalho.

Aos amigos do ONS – Sudeste e Sul, ao Rui Jovita da Itaipu e ao Robson Schiefler da Copel GT pelas informações técnicas sob ocorrências no SIN, me demonstraram que nunca devemos deixar de tocar as portas quando temos um nobre propósito.

Ao professor Mladen Kezunovic da *Texas A&M University* pelas sugestões durante sua visita dentro do projeto: Novas Aplicações e Projeto robusto para Amostragem Sincronizada e para Sistemas de Proteção, Controle e Monitoramento de Sincrofasores, com identificador: 401420/2014-0.

Ao Penn Markham, Yilu Liu e Dao Zhou da *University of Tennessee Knoxville* por terem ajudado a resolver muitas dúvidas, ainda

sem me conhecerem em pessoa, vocês acreditam em um mundo mais unido para atingir grandes melhorias.

Aos amigos: Pablo Galvis, Edwin Giraldo e Dante Sifuentes, aos amigos da Igreja Matriz da Trindade: Ana Vanvossen e Regina Ribeiro, da Segunda Igreja Batista (SIB-Ilha) do Pantanal: Luiza Araújo, Bryan Paredes e Irenio Aragão por sua infinita paciência e pelo apoio moral/espiritual nos momentos de solidão.

Aos companheiros (as): Nelson Londoño, Francine Souza, Felipe Beltran, Dianne Desan, Diego Paez, Clarice Araujo, Roberta Cantarela, Marcia Fernandes, Andrés Martinez, Gustavo Rodriguez, Franciele Cicconet, Estone Ayikpa, Priscilla Saito, Jaime Cardona, Alex Dueñas, Nando, Carlos Rodrigues, Hector de la Hoz, Deysy Murillo e Juan Camilo porque foram a família mais próxima que eu tive.

Aos meus compatriotas: Magali Lopez, Giovanna Sánchez, Sheila Rabanal, Lila Tenorio, Lim Nalda, Jhonatan Ruiz, Johan Lobato, Mari e Ani Hernandez, Fernando Villena, Nadeira Gutierrez, Wiliam Carbajal, Hans Morote e Jose Valverde pelas dicas de crescimento e de manter o foco nesta etapa.

Agradeço finalmente ao Restaurante Universitário, CAPES e a FEESC pelo apoio financeiro, primordial para o contínuo desenvolvimento da minha pesquisa.

Somos construtores de um reino. Nosso pior inimigo é a impaciência. Precisamos de sabedoria para medir nossos limites e as dimensões do projeto. As armas da sabedoria são a paciência e a esperança!

(Ignacio Larrañaga, Livro: O silêncio de Maria, pág. 190. Ano 2010)

RESUMO

Na operação de Sistemas de Energia Elétrica (SEE) é extremamente importante o diagnóstico de eventos para a ativação efetiva de controles de emergência nos centros de operação, evitando-se problemas maiores como blecautes. Neste trabalho foram investigadas metodologias para a detecção, classificação, localização e estimação da carga/geração interrompida de eventos utilizando sincrofasores.

Para a detecção de eventos é proposto o emprego do filtro de média móvel com taxa de variação (FMMTV) e o uso de um limiar ajustável de detecção. Na classificação de eventos é proposto um sistema classificador automático de eventos em quatro tipos (perda de geração, rejeição de carga, desligamento de linhas de transmissão e oscilações) baseado em redes neurais artificiais. Na localização de eventos foi estudado e implementado um algoritmo que permite obter a região geográfica mais provável do evento baseado nas coordenadas geográficas das PMUs. Finalmente, na estimação da carga/geração interrompida foi investigada uma metodologia baseada na equação de oscilação.

As metodologias foram implementadas em ambiente Matlab e validadas usando dados de sincrofasores do SIN – Sistema Interligado Nacional do Brasil e do SIC – *Sistema Interconectado Central* do Chile. Os dados utilizados foram gerados a partir dos registros de eventos reais pelos Sistemas de Medição Sincronizada de Fasores, em baixa tensão, MedFasee Brasil e MedFasee Chile e, em alta tensão, MedFasee CTEEP.

Conclui-se que as metodologias implementadas foram efetivas na detecção, classificação, localização e estimação da carga/geração interrompida tanto para medições realizadas em subestações de alta tensão, quanto para medições realizadas em baixa tensão.

Palavras-chave: Análise de Eventos. Sincrofasores. FMMTV. Perceptron de Múltiplas Camadas. Coordenadas geográficas.

ABSTRACT

In modern power systems operation, it is extremely important a quick diagnosis of events for the effective activation of emergency controls in operation centers to prevent major problems like blackouts. In this work different methodologies for detection, classification, location and size estimation of events using synchrophasors were investigated.

For event detection, a moving average filter and rate of frequency change (MAF-RFC) with the use of an adaptive detection threshold is proposed. For event classification, an artificial neural network (ANN) – based classifier is presented that can separate four types of power system events (generation trip, load shedding, line trip and oscillation) based on their frequency signature. For event location, an algorithm to locate the most likely geographic region of the event based on the PMU geographical coordinates is presented. Finally, for size estimation, an algorithm to estimate the magnitude of the event is developed based on the swing equation.

The methodologies were implemented in Matlab environment and validated using Synchrophasor data of the SIN – *Sistema Interligado Nacional* of Brazil and the SIC – *Sistema Interconectado Central* of Chile. Synchronized Phasor Measurement Systems from low voltage (MedFasee Brazil and MedFasee Chile) and from high voltage (MedFasee CTEEP and CMFS Eletronorte) were used to extract the data from real event records.

Therefore, the implemented methodologies were successful in detection, classification, location and size estimation for measurements in high voltage substations, and for measurements at low voltage level.

Keywords: Event analysis. Synchrophasors. Moving average filter and rate of frequency change (MAF-RFC). Multilayer Perceptron. Geographical coordinates.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura básica dos SMSF.....	29
Figura 2 – SMSF MedFasee BT do Brasil.....	31
Figura 3 – Projeto FNET/GridEye da USA	32
Figura 4 – Projeto Campus WAMS do Japão	33
Figura 5 – Variações (verde) e eventos (laranja) no sinal da frequência do SIN no dia 20/6/2012	38
Figura 6 – Variações (verde) e eventos (laranja) no sinal da frequência do SIN no dia 7/6/2014	38
Figura 7 – Fenômenos dinâmicos em sistemas de potência.....	39
Figura 8 – Desarme do bipolo 1 do Elo Madeira (RO-SP) e back-to-back na SE Porto Velho (RO) com 3150 e 300MW, respectivamente	41
Figura 9 – DLT 500kV Peixe2/Peixe Angical C-1, com perda da UHE Peixe Angical, UG5 da UHE Tucuruí e UG5 da UHE Lajeado (980MW).....	42
Figura 10 – Desligamento da SE Messias (AL) 230kV com 573MW	42
Figura 11 – Desligamento da SE Adrianópolis (RJ) 138kV com 480MW	43
Figura 12 – DLT 500kV Serra Mesa 2/Luziânia C-1, Brasília – 10s.....	44
Figura 13 – Desligamento da SE Miracema 500kV (TO) com separação do SIN	44
Figura 14 – DLT 765kV Foz/Ivaiporã C3 com religamento automático (PR)..	45
Figura 15 – Perda de 550MW na UHE Santo Antonio e 85MW na UHE Jirau fornecidos ao Elo DC Madeira 600 kV (RO-SP).....	46
Figura 16 – Etapas da detecção de eventos.....	47
Figura 17 – Detecção ajustável de eventos – 20/6/2012, PG da UTE Termo Pernambuco com 530MW	48
Figura 18 – DLT 500kV Açailândia/Marabá e PG da UHE Estreito com 450MW (TO).....	49
Figura 19 – Subfrequência e desconexão da UHE Ney Braga, às.....	50
Figura 20 – Falsos eventos detectados durante uma rejeição de carga	51
Figura 21 – Passos típicos de um sistema de classificação	52
Figura 22 – Tipos de sistemas de classificação de eventos.....	52
Figura 23 – Classificador existente baseado em lógica condicional	53
Figura 24 – Neurônio biológico e modelo do neurônio artificial.....	56
Figura 25 – Funções de ativação logística e tangente hiperbólica	57
Figura 26 – Arquitetura de uma rede PCM.....	58
Figura 27 – Pesos sinápticos e limiares a atualizar em cada neurônio	58
Figura 28 – Métodos existentes na localização de eventos	60
Figura 29 – Pontos de interesse durante um evento sistêmico	65
Figura 30 – Processo manual da Detecção ajustável do Evento	69
Figura 31 – Projeto do Classificador Neural de Eventos	71
Figura 32 – Projetar o sistema: entradas e saídas.....	72
Figura 33 – Arquitetura da rede PMC proposta.....	76
Figura 34 – Fluxograma da metodologia adotada.....	78
Figura 35 – Propagação do evento sistêmico mostrado na Tabela 6.....	79

Figura 36 – Definição do problema de triangularização	80
Figura 37 – Mapa Eletroenergético do Brasil	82
Figura 38 – Divisão do globo terrestre em coordenadas geográficas	83
Figura 39 – Distribuição espacial das PMUs e longitude de arco.....	84
Figura 40 – Exemplo didático 1.....	88
Figura 41 –Exemplo didático 2.....	90
Figura 42 – Fluxograma para a determinação da Região do Evento	92
Figura 43 – Visualização mediante o Google Earth	93
Figura 44 – Visualização mediante o programa Plot_Google_Map.m	94
Figura 45 – Comportamento da frequência durante um evento sistêmico	96
Figura 46 – SEE generalizado	97
Figura 47 – Representação equivalente de um SEE generalizado	98
Figura 48 – GUI de detecção/localização implementada.....	105
Figura 49 – Rede neural para Classificação de Eventos	107
Figura 50 – SMSF MedFasee BT do Chile.....	109
Figura 51 – SMSF MedFasee CTEEP 440kV	109
Figura 52 – CMFS Tramo oeste da Eletronorte 230kV	110
Figura 53 – Análise 1.A: Frequência elétrica – PG Elo Itaipu 50 Hz.....	111
Figura 54 – Análise 1.A: a) detecção do evento e b) propagação sistêmica do evento	111
Figura 55 – Análise 1.A: a) região estimada do evento e b) zoom da região... 112	112
Figura 56 – Análise 1.A: $cond(J)$ para os casos a) com as 4 primeiras PMUs e b) com todas as PMUS.....	113
Figura 57 – PG UN Angra I com 640MW no RJ, 22/7/2015 às 3h57m	114
Figura 58 – Análise 1.B: Frequência elétrica – PG UTE Pecém I e II.....	115
Figura 59 – Análise 1.B: a) detecção do evento e b) propagação sistêmica do evento	116
Figura 60 – Análise 1.B: a) região estimada do evento e b) zoom da região... 116	116
Figura 61 – Análise 1.B: $cond(J)$ para os casos a) com as 4 primeiras PMUs e b) com todas as PMUS.....	117
Figura 62 – Análise 2: Frequência elétrica – RC no Belém de 300MW.....	118
Figura 63 – Análise 2.A: a) detecção do evento e b) propagação sistêmica do evento	118
Figura 64 – Análise 2.A: a) região estimada e b) zoom da região	119
Figura 65 – Análise 2.A: $cond(J)$ para os casos a) com as 11 primeiras PMUs e b) com todas as PMUS	119
Figura 66 – Análise 2.B: a) região estimada do evento e b) zoom da região ... 120	120
Figura 67 – Análise 3.A: Frequência – RC no Minas Gerais 300 MW	121
Figura 68 – Análise 3.A: Frequência – RC no Belém 300 MW	122
Figura 69 – Análise 3.A: Frequência – PG em Santa Catarina 335 MW.....	122
Figura 70 – Análise 3.A: Frequência – RC no Distrito Federal 390 MW.....	123
Figura 71 – Análise 3.B: Frequência– DLT 765kV Foz/Ivaiporã C3.....	124
Figura 72 – Análise 3.B: Propagação sistêmica do evento	124
Figura 73 – Análise 3.B: Região estimada do evento.....	125
Figura 74 – Análise 4.A: PG - casos reais do SIN extraídos	126

Figura 75 – Análise 4.A: RC - casos reais do SIN extraídos	127
Figura 76 – Análise 4.A: DLT - casos reais do SIN extraídos	127
Figura 77 – Análise 4.A: OS - casos reais do SIN extraídos.....	128
Figura 78 – Análise 4.B: Processo de treinamento da <i>ANN Toolbox</i>	129
Figura 79 – Análise 4.B: Curva de treinamento do PMC: Erro quadrático médio vs. # épocas.....	129
Figura 80 – Análise 5.1: Frequência elétrica – PG 1330 MW da UHE Itaipu 60 Hz	131
Figura 81 – Análise 5.2: Frequência elétrica – Desligamento do Elo 600kV Madeira com 2450 MW	133
Figura 82 – Análise 5.3: Chile – Frequência elétrica – PG da Usina <i>Bocamina II</i> com 310 MW	134
Figura 83 – Análise 5.3: Chile – Parque gerador do SIC: 01/12/2015 e 15/12/2015	135

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Extrato da listagem de Eventos PG no SIN.....	73
Tabela 2 – Extrato da listagem de Eventos RC no SIN	73
Tabela 3 – Extrato da listagem de Eventos DLT no SIN	73
Tabela 4 – Organização da Matriz de Treinamento-Entrada	75
Tabela 5 – Organização da Matriz de Treinamento-Saída	75
Tabela 6 – Evento 7/6/2014 às 14h12m: Desligamento Elo Itaipu	79
Tabela 7 – Coordenadas e tempo de detecção no Exemplo didático 1.....	89
Tabela 8 – Estimção do local do evento no Exemplo didático 1.....	89
Tabela 9 – Coordenadas e tempo de detecção no Exemplo didático 2.....	90
Tabela 10 – Estimção do local do evento no Exemplo didático 2.....	90
Tabela 11 – Exemplo ilustrativo sob a magnitude da inércia da máquina	99
Tabela 12 – Análise 1.A: Evolução da velocidade do evento	112
Tabela 13 – Análise 1.B: Evolução da velocidade do evento	117
Tabela 14 – Separação dos casos extraídos reais do SIN para cada tipo de evento	126
Tabela 15 – Análise 4.B: Matriz de confusão para avaliação do classificador de eventos 1 (PG) e 2 (RC).....	130
Tabela 16 – Análise 5.1: Estimativa da Inércia ξ do SIN mediante eventos históricos.....	132
Tabela 17 – Análise 5.2: Estimativa da Inércia ξ do SIN mediante eventos históricos.....	133
Tabela 18 – Análise 5.3: Estimativa da Inércia ξ do SIC mediante eventos históricos.....	135

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

δ	Ângulo de rotor do Gerador
ϕ	Longitude (em graus)
λ	Latitude (em graus)
ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
ANN	<i>Artificial Neural Network</i>
CAG	Controle Automático de Geração
CDEC	<i>Centro de Despacho Económico de Carga de Chile</i>
CGs	Coordenadas Geográficas
CMFS	Centro de Medição Fasorial Síncrona da Eletronorte
CPs	Coordenadas Policônicas
cond(J)	Condição numérica da matriz Jacobiana
DLT	Desligamento de Linha de Transmissão
ξ	Inércia Total do Sistema
FK	Filtro de Kalman
FMMTV	Filtro de Média Móvel da Taxa de Variação
FNET	<i>Frequency Monitoring Network</i>
OS	Oscilações (refere-se a grandes oscilações)
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IPDO	Informativo Preliminar Diário da Operação do ONS
MN	Método de Newton Raphson
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico do Brasil
PDC	<i>Phasor Data Concentrator</i>
PG	Perda de Geração
PMC	Perceptron de Múltiplas Camadas
PMU	<i>Phasor Measurement Unit</i>
Ponto A	Frequência pré-evento
Ponto C*	Frequência 4 segundos após o ponto A
Ponto B	Frequência no estado estacionário após o evento
Ponto C	Frequência no ponto de máximo desvio
PTI	Parque Tecnológico de Itaipu
p.u.	Por Unidade
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
RC	Rejeição de Carga
RDP	Registrador Digital de Perturbações
RNAs	Redes Neurais Artificiais
RPF	Regulação Primária da Frequência

SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SEE	Sistema de Energia Elétrica
SIGEL	Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico
SIN	Sistema Interligado Nacional do Brasil
SIC	<i>Sistema Interconectado Central do Chile</i>
SMSF	Sistema de Medição Sincronizada de Fasores
SOE	<i>Sequence of Events</i>
UTC	<i>Universal Time Coordinated</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	27
1.1 SISTEMAS DE MEDIÇÃO SINCRONIZADA DE FASORES	28
1.1.1 O SMSF MedFasee BT do Brasil	30
1.1.2 O Projeto FNET da USA	31
1.1.3 O Japan Campus WAMS	32
1.1.4 O WAMS Light da China	33
1.1.5 Outros Sistemas	34
1.2 ANÁLISE DE EVENTOS	34
1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO	35
1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	36
2 EVENTOS EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA	37
2.1 DEFINIÇÕES	37
2.2 TIPOS DE EVENTOS	39
2.2.1 Perda de Geração (PG)	40
2.2.2 Rejeição de Carga (RC)	42
2.2.3 Desligamento de Linha de Transmissão (DLT)	43
2.2.4 Oscilações (OS)	45
2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
3 ANÁLISE DE EVENTOS EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA	47
3.1 DETECÇÃO DE EVENTOS	47
3.2 CLASSIFICAÇÃO DE EVENTOS	51
3.2.1 Rede Neural Artificial – Perceptron Multicamadas.....	55
3.3 LOCALIZAÇÃO DE EVENTOS	59
3.3.1 Propagações de Ondas Eletromecânicas	62
3.4 ESTIMAÇÃO DA CARGA/GERAÇÃO INTERROMPIDA	63
3.4.1 Energia da Oscilação Sistêmica.....	64

3.4.2 Baseado na Resposta da Frequência	64
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
4 METODOLOGIA PROPOSTA	67
4.1 DETECÇÃO AJUSTÁVEL DE EVENTOS	67
4.2 CLASSIFICADOR NEURAL DE EVENTOS	70
4.2.1 Projetar o Sistema	71
4.2.2 Selecionar casos de eventos	72
4.2.3 Extrair (simular) seus dados	73
4.2.4 Executar pré-processamento dos dados	74
4.2.5 Seleção das amostras para o Treinamento.....	75
4.2.6 Configuração topológica da rede PMC	76
4.2.7 Treinamento, Validação e Teste.....	77
4.3 LOCALIZAÇÃO DE EVENTOS	77
4.3.1 Visualização da Propagação de um Evento Sistêmico	78
4.3.2 Região que contém o Evento	79
4.3.3 Singularidade da matriz Jacobiana	94
4.4 ESTIMADOR DA CARGA/GERAÇÃO INTERROMPIDA	96
4.4.1 Baseado na Equação de Oscilação	97
4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	100
5 RESULTADOS	103
5.1 AMBIENTES COMPUTACIONAIS DESENVOLVIDOS	103
5.1.1 Interface gráfica para a detecção/ localização.....	104
5.1.2 Ambiente para a classificação de eventos	107
5.1.3 Ambiente para a estimação da carga/geração	107
5.2 AMBIENTE DE EXPERIMENTAÇÃO	108
5.2.1 SMSF MedFasee BT do Brasil.....	108
5.2.2 Protótipo SMSF MedFasee BT do Chile.....	108
5.2.3 SMSF MedFasee CTEEP	109

5.2.4 CMFS da Eletronorte.....	110
5.3 ANÁLISE 1: QUALIDADE DA DETECÇÃO/LOCALIZAÇÃO	110
5.3.1 Caso A: Quando a região do evento é homogênea.....	110
5.3.2 Caso B: Quando a região do evento não é homogênea.....	113
5.4 ANÁLISE 2: QUANTO AS PMUS UTILIZADAS	117
5.4.1 Caso A: SMSF com informações redundantes	118
5.4.2 Caso B: SMSF sem informações redundantes	120
5.5 ANÁLISE 3: OUTROS TIPOS DE ANÁLISES	120
5.5.1 Caso A: Limiar de potência para a detecção/localização.....	121
5.5.2 Caso B: Localização de eventos tipo DLT	123
5.6 ANÁLISE 4: CLASSIFICADOR NEURAL DE EVENTOS	125
5.6.1 Caso A: Resultados Parciais.....	125
5.6.2 Teste utilizando a <i>toolbox</i> de Redes Neurais do Matlab.....	128
5.7 ANÁLISE 5: QUALIDADE DA ESTIMAÇÃO DA CARGA.....	130
5.7.1 Brasil: Evento PG do dia 11/03/2015	131
5.7.2 Brasil: Evento PG cascata do dia 21/03/2015.....	132
5.7.3 Chile: Evento PG no dia 15/12/2015	134
5.8 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	136
6 CONCLUSÕES	139
6.1 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES	141
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	141
REFERÊNCIAS	143
Apêndice A – Interface gráfica.....	149
Apêndice B – Eventos reais no SIN utilizados no Classificador Neural proposto.....	153
Apêndice C – Eventos reais no SIN utilizados na Estimação da Carga/Geração interrompida.....	159
Apêndice D – Eventos reais no SIC Chile utilizados na Estimação da Carga/Geração interrompida.....	163

Anexo A – Derivação do algoritmo Retropropagação do Erro.....165

1 INTRODUÇÃO

Os Sistemas de Energia Elétrica (SEE) atuais estão passando por uma evolução rápida para ambientes mais complexos onde o controle centralizado é cada vez mais difícil de se manter devido a novos cenários operacionais que abrangem a formação de SEE de porte continental.

Estes sistemas estão sujeitos a “Eventos¹”, os quais podem ocorrer em qualquer momento, sendo de diversas magnitudes, degradando a qualidade da energia elétrica (QEE) e podendo desencadear blecautes.

A análise de eventos é uma área bastante crítica para a manutenção da confiabilidade e operação contínua dos SEE. Esta área contempla a rápida detecção para posterior classificação e localização destes eventos.

Desde o ponto de vista da economia e da segurança, a importância de uma rápida ferramenta de detecção/localização de eventos é crescente. Também a classificação em tempo real destes eventos é essencial durante os estados de emergência.

Para tal fim, os operadores de SEE vêm utilizando a tecnologia baseada no Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (*Supervisory Control and Data Acquisition – SCADA*), a qual alimenta o Sistema de Gerenciamento de Energia (*Energy Management Systems – EMS*) que é o conjunto de aplicações, redes de computadores e interfaces homem-máquina que subsidiam os operadores na tomada de decisão em tempo real.

O procedimento clássico de análise de eventos em SEE está baseada na tecnologia SCADA e nos relés digitais resumindo-se em três pontos: analisar a sequência de eventos (*Sequence of Events – SOE*), analisar os registros oscilográficos dos Registradores Digitais de Perturbação (RDPs) e analisar os registros obtidos pelos relés de proteção.

Estas análises podem demandar várias horas ou dias pelo fato de que as medidas advindas do SCADA não são sincronizadas no tempo (ainda os status de disjuntores e alarmes sim sejam sincronizados) e principalmente pela grande quantidade de agentes no SEE com diferentes sistemas SCADA. Portanto, as decisões tomadas em tempo real passam a depender da experiência dos profissionais envolvidos. Outras limitações são: alta latência, dados com alto erro em condições dinâmicas, erros de modelagem e/ou falhas de comunicação (SOONE et al., 2015).

No Brasil, o Operador Nacional do Sistema (ONS) tem como missão garantir o suprimento de energia elétrica contínuo, econômico e

¹ Eventos será o termo utilizado neste texto para denotar uma falha ou distúrbio causado comumente pela abertura de um disjuntor em um SEE.

seguro no Sistema Interligado Nacional (SIN); a execução de sua função se faz mediante os procedimentos de rede organizados em 26 módulos dentre os quais o módulo 11 está focado nos requisitos de proteção e controle.

No módulo 11, submódulo 11.6 intitulado Registro de Perturbações, o ONS cita que os RDPs são úteis para o registro de perturbações de curta duração, principalmente curtos-circuitos. Contudo, no caso de registro de perturbações de longa duração, onde se encontram os principais eventos discutidos neste trabalho, o submódulo 11.6 do ONS descreve a necessidade de implantar um sistema que possa registrar grandezas fasoriais para fins de análise destes eventos de natureza lenta e decorrentes de transitórios eletromecânicos (ONS, 2009).

A abordagem da análise de eventos usando sincrofasores é possível, graças à crescente implantação de Sistemas de Medição Sincronizada de Fasores (SMSF) em diversos países. As medidas fasoriais sincronizadas (sincrofasores) permitem o monitoramento da dinâmica dos SEE, possibilitando o desenvolvimento de metodologias de identificação em tempo real de eventos que o afetam.

1.1 SISTEMAS DE MEDIÇÃO SINCRONIZADA DE FASORES

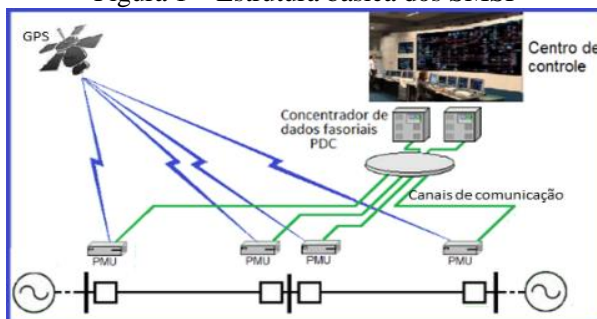
Os Sistemas de Medição Sincronizada de Fasores (SMSF) são compostos basicamente por unidades de medição fasorial (*Phasor Measurement Unit – PMU*), sincronizadas no tempo por um sinal de alta precisão, conectadas a um concentrador de dados (*Phasor Data Concentrator – PDC*), através de canais de comunicação. Tais sistemas podem operar com taxas de medição de até 60 sincrofasores/segundo, bem superiores às taxas utilizadas pelo sistema SCADA. Os elementos constituintes de um SMSF são:

Unidade de Medição Fasorial (PMU): A PMU é responsável pela aquisição das tensões e correntes das barras do sistema, processamento dos dados amostrados e cálculo dos fasores. É composta basicamente por um sistema de aquisição de dados e por um microprocessador que realiza os cálculos dos fasores. Cada PMU deve estar acoplada a um equipamento receptor de sinal GPS, o qual fornece sua sincronização temporal (IEEE, 2011a).

Concentrador de Dados Fasoriais (PDC): Trata-se de um equipamento que possui a função de coletar, concentrar, correlacionar e sincronizar os dados de diferentes PMUs e outros PDCs. Além disso, o PDC é responsável pela disponibilização dos dados para aplicações em tempo real e *off-line* que fazem uso deles (IEEE, 2011b).

Canais de Comunicação: meio utilizado para transmitir os dados desde as PMUs até o PDC, os tipos mais utilizados são Internet (VPN), PLC, fibras ópticas ou redes sem fio (wireless). O protocolo de conexão mais indicado para sistemas de tempo real é o UDP/IP (IEEE, 2011b). A Figura 1 ilustra um diagrama esquemático básico dos SMSF.

Figura 1 – Estrutura básica dos SMSF



Ao ser comparado o estado atual tecnológico de monitoramento dos SEE com as imagens de raios X, a tecnologia sincrofásorial fornece dados com qualidade de ressonância magnética MRI (PHADKE, 2009).

Atualmente existem SMSF implementados nos maiores sistemas de energia elétrica no mundo, como Estados Unidos (≈ 2000 PMUs), Europa continental (pela SWISSGRID), Índia, China (≈ 2400 PMUs) entre outros (OVERHOLT et al., 2015) (LU et al., 2015).

Os SMSF vêm sendo utilizados em diversas aplicações: análise de perturbações, identificação de oscilações eletromecânicas, localização de faltas, validação de modelos de simulação, supervisão da estabilidade de tensão, supervisão da segurança dinâmica, melhoria no desempenho da estimação de estados e aplicações mais ambiciosas como controle e proteção sistêmicos.

Por outro lado, a instalação de PMUs na rede de baixa tensão tem ganhado relevância desde o começo deste século devido a seu baixo custo e facilidade de instalação, ao não utilizar instalações de alta tensão (propriedade de empresas do setor elétrico), e pela inserção maior de geração distribuída, veículos inteligentes e cargas não-lineares; o que motiva que universidades no mundo vejam nos sincrofasores uma área ampla de pesquisa científica.

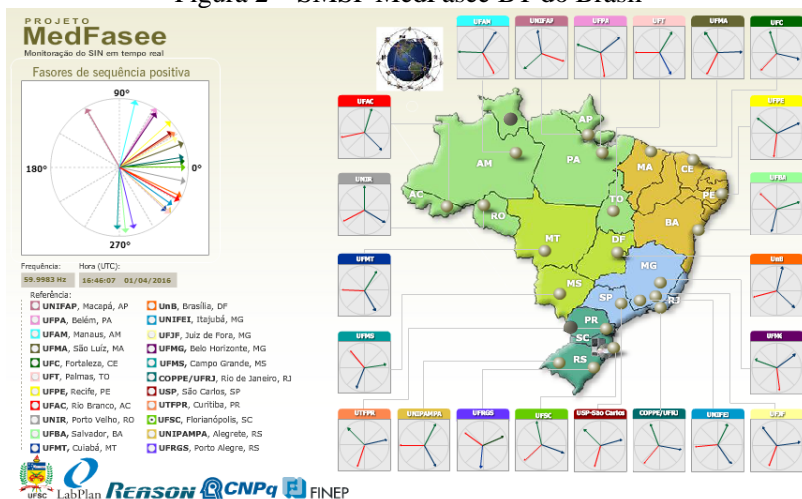
Destacam-se os projetos FNET (Estados Unidos, desde 2001), Campus WAMS (Japão, desde 2003), MedFasee (Brasil, desde 2003) e WAMS Light (China, desde 2012), entre outros.

1.1.1 O SMSF MedFasee BT do Brasil

Iniciou-se em 2003 com o objetivo de desenvolver, difundir e utilizar, em ambiente acadêmico, a tecnologia de medição sincronizada de fasores no Brasil. Dentre os principais desenvolvimentos do projeto MedFasee estão a implementação de um Sistema Nacional de Medição Sincronizada de Fasores em baixa tensão, o desenvolvimento de protótipos para os sistemas de transmissão da Eletrosul, em 525kV, da CTEEP, em 440kV, assim como um protótipo com medições em baixa tensão, para o monitoramento do sistema elétrico chileno. No campo das aplicações foram desenvolvidas metodologias e aplicativos para a análise de perturbações, identificação de oscilações eletromecânicas, validação de modelos de simulação, entre outros.

O SMSF MedFasee BT do Brasil conta atualmente com 23 PMUs, instaladas em universidades federais, 22 monitorando o SIN e uma delas instalada em um sistema isolado no estado de Roraima, sendo os dados enviados pela internet. A partir de 19/05/2014, são também recebidos e avaliados dados de sincrofasores de uma PMU desenvolvida pelo ITAI – Instituto de Tecnologia Aplicada e Inovação, e instalada no PTI – Parque Tecnológico de Itaipu, medindo tensões e correntes elétricas trifásicas associadas aos serviços auxiliares da UHE Itaipu. Na Figura 2 pode-se visualizar a localização das PMUs do SMSF MedFasee BT (ZIMMER et al., 2015).

Figura 2 – SMSF MedFasee BT do Brasil



Fonte: www.medfasee.ufsc.br (01/04/2016).

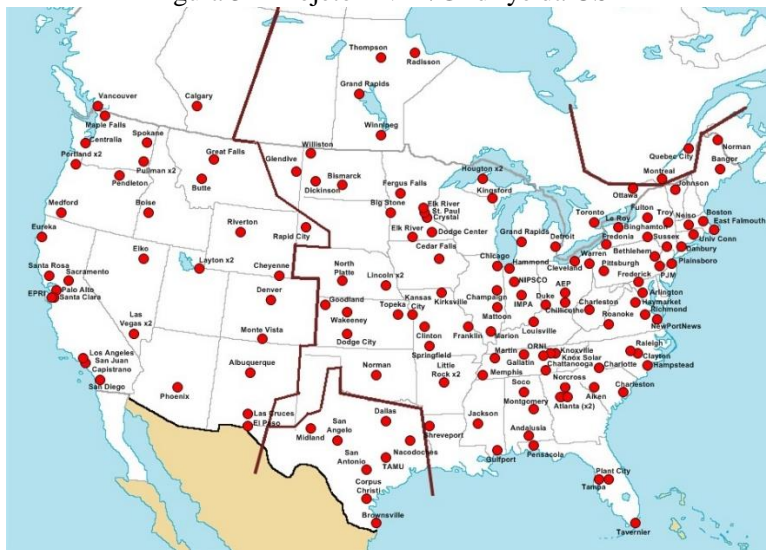
Desde 2014, o projeto MedFasee BT conta com um sistema de respaldo na nuvem da AWS (*Amazon Web Service*), isto é, todas as PMUs trabalham com fluxo espontâneo enviando seus dados ao PDC da nuvem e ao PDC-UFSC, protegendo assim a disponibilidade dos dados.

1.1.2 O Projeto FNET da USA

FNET é um SMSF, baseado na Internet, que coleta dados dos três SEE dos EUA (Sistema Leste, Sistema Oeste e Sistema Texas) usando registradores de distúrbios na frequência (*Frequency Disturbance Recorders – FDR*), instalados na rede de baixa tensão de 120V. São dispositivos de baixo custo e alta precisão que são uma versão monofásica de PMUs, com taxa de atualização de 10 fasores por segundo.

O projeto iniciou-se em 2001 no *Virginia Polytechnic Institute* até seu traslado ao Tennessee em 2010. Os sincrofasores são transmitidos ao PDC na Universidade de Tennessee, Knoxville para processamento e armazenamento de longo prazo. Atualmente, o sistema FNET é composto por cerca de 150 FDRs instalados nos Estados Unidos, conforme mostrado na Figura 3 e outros 50 instalados em todo o mundo (YE ZHANG, 2014).

Figura 3 – Projeto FNET/GridEye da USA



Fonte: <http://fnetpublic.utk.edu/> (maio de 2015).

No campo das aplicações em tempo real foram desenvolvidas metodologias para a visualização dos dados da frequência e contorno angular, localização e classificação de eventos com geração de relatórios, detecção de oscilações interárea e análise modal, estimação da frequência e taxa de amortecimento de dados ambientes, detecção de ilhamento e a construção de modelos baseado em medidas. No campo das aplicações *offline* foram desenvolvidas metodologias para reproduzir eventos, validação de modelos de simulação, mapas de velocidade eletromecânica, análise estatística do histórico de dados, entre outras.

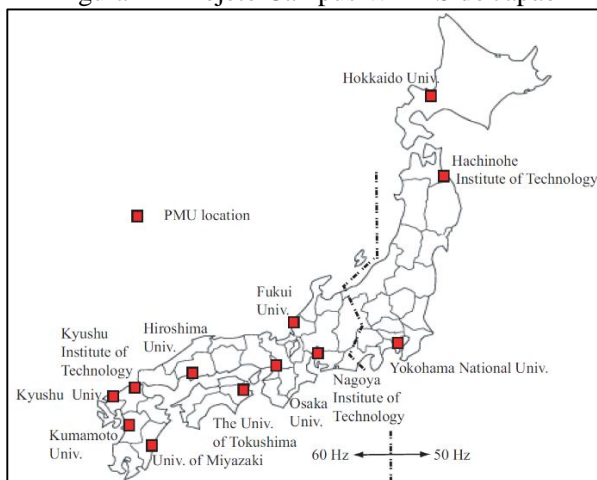
1.1.3 O Japan Campus WAMS

O Japan Campus WAMS iniciou-se em 2003, tendo atualmente 13 PMUs NCT2000 da Toshiba conectadas em baixa tensão (100V), instaladas em universidades, das quais 9 estão no sistema oeste japonês (60Hz) e as restantes no sistema leste japonês (50Hz), como é mostrado na Figura 4.

As PMUs utilizadas operam com taxa de amostragem de 96 amostras por ciclo da rede elétrica. As medições fasoriais de todas as PMUs são automaticamente enviadas a um servidor instalado no Instituto Tecnológico de Kyushu, pela Internet, com uma taxa de envio de 30

fatores por segundo. Entre as principais aplicações destaca-se o estudo de modos de oscilação interárea em SEE.

Figura 4 – Projeto Campus WAMS do Japão



Fonte: (HASHIGUCHI et al., 2012).

1.1.4 O WAMS Light da China

O projeto WAMS Light tem como objetivos principais a pesquisa da dinâmica local (rede de baixa tensão) e sistêmica (rede de alta tensão) do sistema elétrico chinês. Está constituído atualmente por mais de 30 PMUs instaladas em universidades chinesas, conectadas na rede de baixa tensão (220V), cobrindo quatro das cinco províncias da China.

Para isto desenvolveram uma PMU simplificada (PMU Light) com um sistema de sincronização temporal dual (GPS e BDS). Os dados coletados pelas PMUs possuem um meio de comunicação também dual (Internet e Wireless 3G) enviando os dados ao servidor localizado na Universidade de Shandong.

Entre as principais aplicações destacam-se: detecção de oscilações, estudo da distribuição espacial - temporal da frequência, detecção de desligamento de linhas de transmissão, análise estatística da regulação da frequência, validação de modelos e localização de eventos. Os dados de sincrofatores podem ser acessados pelas universidades que suportam as PMUs Light (ZHANG et al., 2015; ZHANG, 2015).

1.1.5 Outros Sistemas

No Reino Unido existe um sistema sincrofasorial que possui 3 PMUs instaladas em universidades, conhecido como FlexNET-WAMS (CAI et al., 2013).

Na Índia também existe um sistema sincrofasorial com 8 PMUs, cujo servidor se localiza no Instituto de Tecnologia de Bombay (SALUNKHE et al., 2012).

1.2 ANÁLISE DE EVENTOS

Eventos são distúrbios rápidos com um princípio e um fim que ocasionam a atuação de relés de proteção. A análise de eventos em SEE envolve quatro fases importantes: detecção, classificação, localização e estimação da carga/geração interrompida.

A **detecção de eventos** consiste em capturar a repercussão dos eventos nas grandezas elétricas. Dado que os registros de sincrofasores também podem ser obtidos a partir da rede elétrica em baixa tensão, diversas técnicas de pré-processamento foram desenvolvidas para obter um sinal indicador o mais semelhante possível ao registrado na rede de alta tensão (TSAI, 2005; GARDNER, 2005; ZUO et al., 2006). A técnica tradicional para a detecção consiste na ultrapassagem de um limiar estático, contudo o ajuste deste limiar não pode ser fixo porque não existem eventos idênticos em SEE (MARKHAM, 2012).

A **classificação de eventos** é feita a partir da extração da suas características particulares. A técnica tradicional de classificação se baseia na análise da resposta dinâmica do sistema elétrico considerando as principais características de cada evento (BYKHOVSKY et al., 2003; ZIMMER, 2013). Entretanto, métodos estatísticos estão se tornando mais relevantes devido à complexidade estatística dos dados de sincrofasores e a gigante base de dados de sincrofasores disponíveis (ZHENG, 2011a; e ZHENG et al., 2011b; MARKHAM 2012).

A **localização de eventos** consiste em estimar o local geográfico do evento ou estimar a região mais provável da perturbação utilizando o conceito de propagação de ondas eletromecânicas. A técnica tradicional de localização de eventos no SIN estima um epicentro a partir do mapeamento das PMUs em um mapa obtido a partir de uma projeção policônica (ZIMMER, 2013). Neste trabalho é proposta a estimação de uma região sem necessidade de realizar tal mapeamento e usando as coordenadas geográficas das PMUs utilizadas.

A **estimação da carga/geração interrompida** consiste em estimar o desbalanço de potência que provocou o evento. Estudos ainda em desenvolvimento mostraram que pode ser estimada a partir da energia da oscilação sistêmica (ZIMMER, 2013). Contudo, neste trabalho é investigada o emprego da equação de oscilação, sugerida em pesquisas anteriores (TERZIJA et al., 2002; YE ZHANG, 2014).

A motivação para o desenvolvimento desta pesquisa de análise de eventos, é auxiliar aos operadores de SEE na tomada de decisões após a ocorrência de perturbações utilizando sincrofasores, superando as dificuldades existentes decorrentes de diferentes sistemas SCADA de cada empresa do setor elétrico, como também superar as dificuldades existentes na abordagem inicial com sincrofasores, os quais são:

- As dificuldades existentes na forma tradicional de detectar eventos em SEE, a qual depende da utilização de limiares preestabelecidos para a detecção.
- As dificuldades existentes para a classificação de eventos, em particular no caso de desligamentos de linhas de transmissão e oscilações.
- A grande quantidade de dados reais de sincrofasores, em particular do SIN, armazenados durante o período 2010/2015, o qual nos permite explorar métodos de análise de eventos mais robustos.
- A necessidade de estudar técnicas que permitam fazer a classificação de eventos em tempo real.
- As dificuldades quando é estimado um ponto geográfico como local do evento e a dificuldade para esboçar a região mais provável que contém o evento.
- A falta do estudo de técnicas que permitam, a partir da magnitude do desvio da frequência, estimar a potência interrompida (MW). Esta estimação é útil quanto permite reduzir o espaço de busca, no caso de perdas de geração.

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

O presente trabalho tem como objetivo a investigação de metodologias para a detecção, classificação, localização e estimação da carga/geração interrompida de eventos com a utilização de sincrofasores.

Neste contexto, incluem-se a implementação computacional das metodologias selecionadas em ambiente Matlab® e a validação metodológica usando dados de sincrofasores do SIN – Sistema

Interligado Nacional do Brasil e do SIC – *Sistema Interconectado Central* do Chile.

Os dados utilizados foram gerados a partir dos registros de eventos reais pelos SMSF, em baixa tensão, MedFasee Brasil e MedFasee Chile e, em alta tensão, MedFasee CTEEP.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

No Capítulo 2 são apresentados elementos gerais sobre a definição de eventos, frequência elétrica e os tipos de eventos em SEE estudados.

No Capítulo 3 é apresentada a análise de eventos, o estado da arte das metodologias propostas em outros países com sincrofasores na baixa tensão, a metodologia existente no projeto MedFasee e as dificuldades existentes.

No Capítulo 4 são apresentados os desenvolvimentos metodológicos relacionados à detecção, classificação, localização e a estimação da carga/geração interrompida.

No Capítulo 5 são descritos os ambientes de validação das metodologias propostas, o ambiente computacional implementado, os resultados particulares para validar cada etapa, bem como uma discussão dos resultados obtidos.

Por fim, no Capítulo 6, são expostas as conclusões do trabalho, juntamente com as sugestões para trabalhos futuros.

2 EVENTOS EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

O objetivo deste capítulo é abordar os eventos que afetam os SEE. São definidos os principais conceitos utilizados na análise de eventos tais como frequência elétrica, transitórios que originam e os tipos de eventos que são ilustrados por meio de eventos históricos registrados pelo SMSF MedFasee BT.

2.1 DEFINIÇÕES

Existem duas definições para a frequência de sistemas elétricos. A primeira diz que a frequência é um parâmetro do sistema que representa a velocidade de sincronismo do sistema inteiro ou a velocidade de rotação dos geradores a qual é difícil de medir. A segunda diz que a frequência é um parâmetro da tensão que pode ser calculado diretamente em qualquer local do sistema (BOLLEN et al., 2006).

Isto é, o sistema elétrico possui a mesma frequência em toda a sua abrangência no estado estacionário, mas durante a ocorrência de eventos acontecem diferenças significativas na frequência entre locais diferentes (BOLLEN et al., 2006).

Como foi dito no capítulo 1, o SMSF MedFasee BT fornece os fasores (módulo e ângulo) das tensões fase-neutro das três fases medidas na rede de baixa tensão, assim como a frequência destas tensões. A vantagem da frequência elétrica é que permite tanto monitorar eventos sistêmicos como também eventos locais, dado que a frequência obtida pela PMU é calculada a partir do ângulo do fasor tensão.

Uma importante divisão no estudo da Qualidade da Energia Elétrica (QEE) é entre variações e eventos.

Como pode ser facilmente acompanhado na Figura 5, variações são distúrbios contínuos e naturais dentro da operação em estado estacionário do SEE devido à variação natural da carga. Entretanto, eventos são distúrbios rápidos, com um princípio e um fim, que provocam variações fortes no sinal da frequência ocasionando a atuação de relés de proteção (BOLLEN et al., 2006).

Para fazer a distinção entre eles é necessário um mecanismo de detecção, sendo o método mais comum a comparação de uma janela deslizante de medidas com um limiar preestabelecido. Na Figura 5, que corresponde à perda de geração da UTE Termo Pernambuco 530 MW (segundo o ONS), o limiar preestabelecido foi de $\pm 0,05$ Hz. Já na Figura

6, desligamento de um bipolo do Elo DC Foz/Ibiúna da UHE Itaipu 50 Hz com 2800 MW (ONS), de $\pm 0,12$ Hz.

Figura 5 – Variações (verde) e eventos (laranja) no sinal da frequência do SIN no dia 20/6/2012

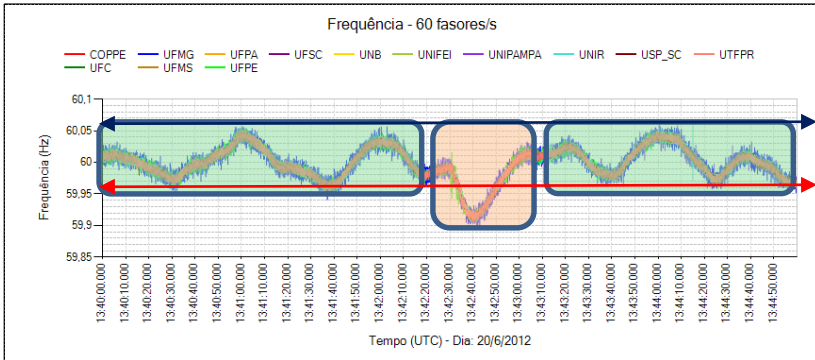
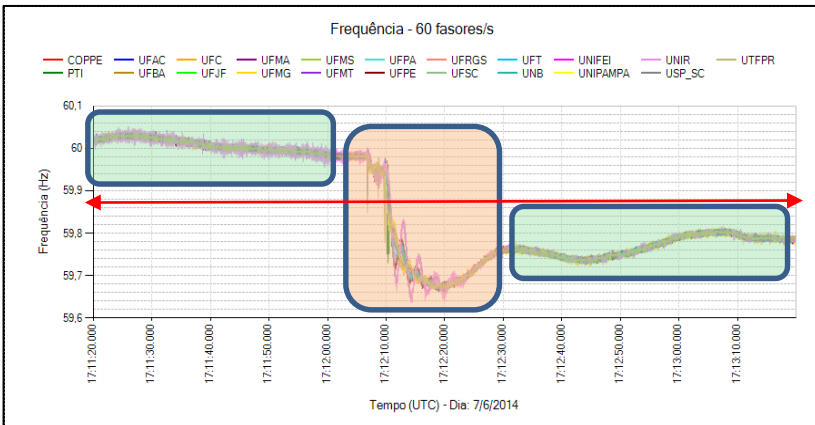


Figura 6 – Variações (verde) e eventos (laranja) no sinal da frequência do SIN no dia 7/6/2014



Contudo, quanto menor for o valor do limiar preestabelecido, maior será o número de detecções de falsos eventos (BOLLEN et al., 2006) e quanto maior for o valor do limiar, menor o número de eventos reais detectados.

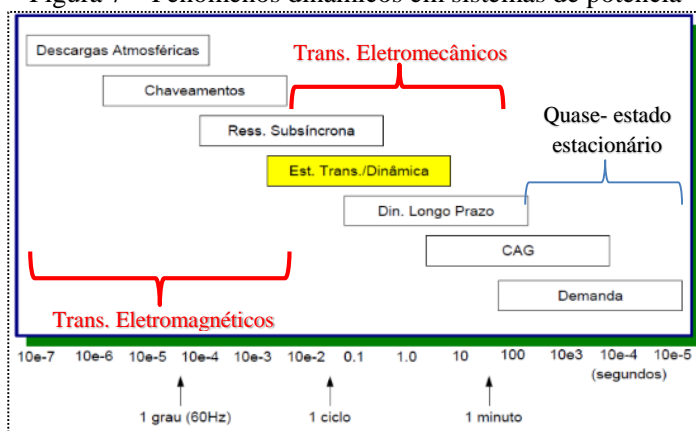
Baseado nos Procedimentos de Rede elaborados pelo ONS, neste trabalho o termo “evento” refere-se a qualquer distúrbio ocorrido em SEE. Já o termo “perturbação” é considerado como um conjunto de

eventos que caracterizam um distúrbio de grande impacto no SEE (ZIMMER, 2013). Essas perturbações podem dar lugar a uma série de eventos em cascata desencadeando blecautes ou sérias instabilidades de tensão.

2.2 TIPOS DE EVENTOS

Eventos podem ser classificados segundo o transitório que os origina, cujas faixas de atuação em SEE são ilustradas na Figura 7.

Figura 7 – Fenômenos dinâmicos em sistemas de potência



Fonte: (VANFRETTI, 2013).

Os transitórios eletromagnéticos correspondem às interações entre o campo elétrico de capacitores e o campo magnético das indutâncias do sistema. Por exemplo, um curto-circuito ou um chaveamento. Sua duração temporal é curta devido à atuação dos sistemas de proteção (aprox. 200 milissegundos). Estes transitórios podem desencadear transitórios eletromecânicos (VANFRETTI, 2013).

Os transitórios eletromecânicos correspondem as interações entre a energia elétrica armazenada no sistema e a energia mecânica armazenada nas inércias das máquinas rotativas. São sistêmicos e lentos em propagar-se pelo SEE (aprox. 1 segundo). Por exemplo, uma oscilação de potência (VANFRETTI, 2013).

A partir destes conceitos, os eventos em SEE são classificados em locais e sistêmicos.

Os Eventos locais são caracterizados pela presença de saltos na frequência seguidos de uma oscilação sistêmica, geralmente de pequena magnitude com uma duração aproximada de 9 segundos, no caso do SIN. Estes eventos geralmente são visíveis nas proximidades do local do evento sendo que sua visibilidade irá aumentar tanto quanto maior for o nível de tensão em que ocorreu. Um tipo de evento local corresponde ao desligamento de uma linha de transmissão, no caso de um sistema malhado.

Os Eventos sistêmicos são caracterizados por produzirem desvios na frequência que são observados em todo o sistema elétrico, como é o caso da perda de geração e da rejeição de carga. Como também podem provocar flutuações dinâmicas na frequência durante alguns segundos, como é o caso das oscilações sistêmicas.

A seguir são contextualizados e ilustrados mediante registros obtidos pelo SMSF MedFasee BT cada um destes tipos de eventos.

2.2.1 Perda de Geração (PG)

Os desvios entre geração e carga resultam em mudanças na frequência do sistema, a qual é governada pela segunda lei de Newton aplicada às massas rotativas. Em SEE esta relação é expressa pela equação de oscilação de cada máquina síncrona, descrita na equação (2.1)

$$2H \frac{d^2 \delta}{dt^2} + k_D \frac{d\delta}{dt} = p_m - p_e = p_a, \quad (2.1)$$

onde:

H: Inércia da máquina.

K_D : Constante de amortecimento.

δ : Ângulo do rotor da máquina.

p_m : potência mecânica exercida pela turbina.

p_e : potência elétrica entregue pelo gerador.

p_a : potência acelerante.

Desprezando-se a constante de amortecimento e considerando-se a velocidade angular do sistema ω (ω), tem-se:

$$2H \frac{d\omega}{dt} = p_m - p_e, \quad (2.2)$$

onde:

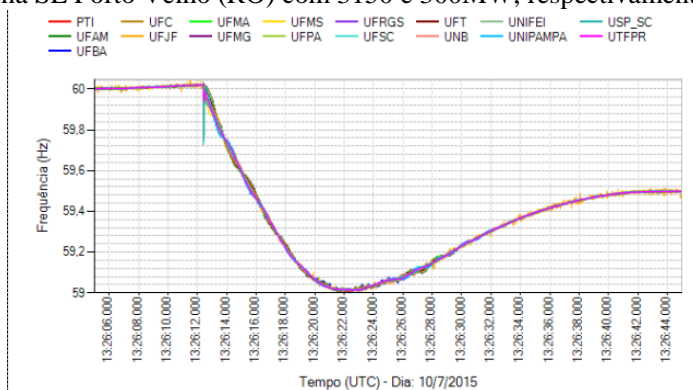
$$\omega = \frac{d\delta}{dt}. \quad (2.3)$$

Como representado pela equação (2.2), quando a geração excede a carga do sistema, geradores irão acelerar. Em contraste, quando a carga excede a geração do sistema, geradores irão desacelerar.

Normalmente, estes desvios são pequenos o suficiente para que os sistemas de controle primário de velocidade mantenham as máquinas muito próximas à velocidade nominal. As constantes de tempo do controle primário são da ordem de alguns segundos e sua atuação normalmente resulta em desvios de frequência (SIMÕES et al., 2006).

Em alguns casos, geradores são desligados do sistema rapidamente, usualmente pelas suas próprias proteções. No caso de um gerador de grande porte, como é mostrado na Figura 8, isto pode levar a uma redução drástica na frequência devido ao insuficiente nível de reserva girante no sistema, exigindo o total uso da potência das usinas que fazem parte do controle suplementar (Controle Automático de Geração - CAG), até o acionamento de unidades de geração de emergência, o qual pode levar o SEE a operar vários minutos com subfrequência.

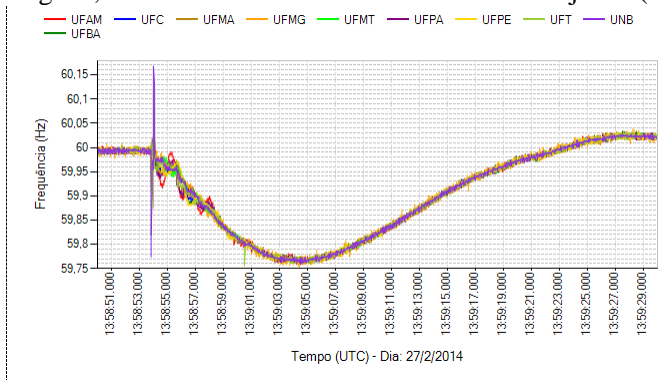
Figura 8 – Desarme do bipolo 1 do Elo Madeira (RO-SP) e back-to-back na SE Porto Velho (RO) com 3150 e 300MW, respectivamente



Na Figura 8, a frequência desceu até 59Hz, estabilizando-se em 59,5Hz. Neste exemplo a regulação primária da frequência (RPF) não foi suficiente para estabelecer a frequência dentro de suas condições normais de operação (entre 59,9Hz e 60,1Hz), sendo necessário uma maior participação do CAG para corrigir esse desvio nos minutos seguintes (ANEEL - PRODIST, 2015).

Na Figura 9 a frequência desceu até 59,77Hz, estabilizando-se em 60,02Hz. Neste exemplo a atuação predominante da RPF consegue estabelecer a frequência dentro de suas condições normais.

Figura 9 – DLT 500kV Peixe2/Peixe Angical C-1, com perda da UHE Peixe Angical, UG5 da UHE Tucuruí e UG5 da UHE Lajeado (980MW)



2.2.2 Rejeição de Carga (RC)

Se a frequência do sistema diminui muito, operadores do sistema elétrico podem recorrer à limitação de carga, que representa a desconexão temporal de um grande número de cargas. Além disso, a desconexão de subestações de distribuição ou transmissão pode ocasionar a interrupção súbita de carga. Isto faz com que a frequência do sistema aumente, uma vez que os geradores estão produzindo mais energia do que o sistema pode consumir. Alguns exemplos reais de rejeição de carga ocorridos no SIN são mostrados na Figura 10 e na Figura 11.

Figura 10 – Desligamento da SE Messias (AL) 230kV com 573MW

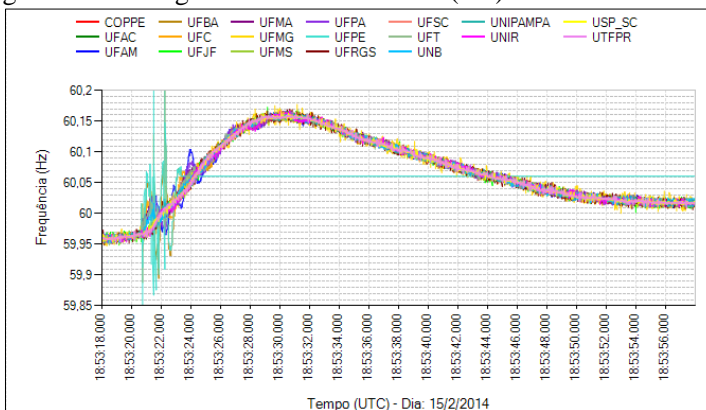
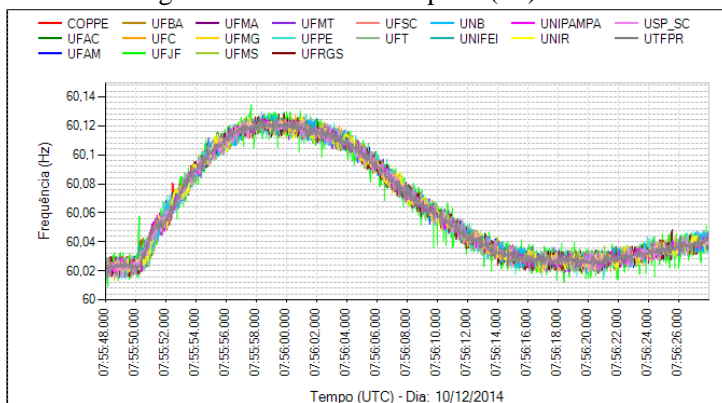


Figura 11 – Desligamento da SE Adrianópolis (RJ) 138kV com 480MW



Na Figura 10 a frequência alcançou 60,16Hz estabilizando-se em 60,02Hz. Na Figura 11 a frequência alcançou 60,12Hz estabilizando-se em 60,03Hz. Em ambos casos, ocorreu rapidamente o retorno da frequência do sistema à faixa normal de operação, por atuação predominante da RPF (ANEEL – PRODIST, 2015).

2.2.3 Desligamento de Linha de Transmissão (DLT)

Ao contrário da PG ou da RC que acontecem em um único nó do SEE, o desligamento de uma linha de transmissão (DLT) envolve a interrupção de potência entre dois nós, portanto, a resposta da frequência em ambas barras será mais complexa, dependendo do tipo de linha desligada.

Em um sistema malhado, este evento irá redistribuir os fluxos nas linhas remanescentes do sistema, portanto, irão ocorrer oscilações em torno da frequência nominal do sistema. Quando se trata de desligamentos de linhas de transmissão de alta tensão ($\geq 500\text{kV}$), com fluxo significativo, sua desconexão irá provocar um salto na frequência, seguido de uma oscilação de pequena magnitude. Estas características serão mais visíveis nas PMUs mais próximas ao evento, sendo caracterizado como um evento do tipo local, conforme ilustrado na Figura 12.

Se a linha desligada, for uma linha de intercâmbio entre áreas ou subsistemas, onde um terminal é um centro de geração, e o outro é um centro de carga, a área exportadora irá ter um aumento na frequência

devido à RC, entretanto, a área importadora irá ter uma redução na frequência devido à PG, conforme ilustrado na Figura 13.

Na Figura 14 podem ser visualizados saltos iniciais locais seguidos de uma oscilação sistêmica. A dinâmica registrada na PMU do PTI ainda não foi identificada, se corresponde ao registro de uma frequência natural de oscilação da linha de transmissão compensada de 765kV, ou a um problema de oscilação numérica gerada pelo algoritmo de cálculo dos fasores.

Figura 12 – DLT 500kV Serra Mesa 2/Luziânia C-1, Brasília – 10s

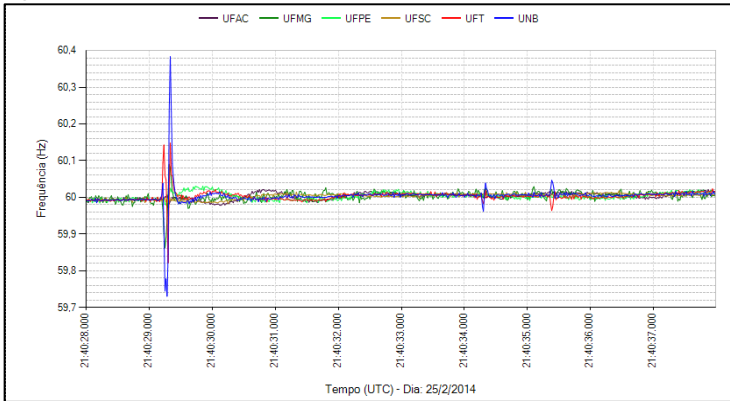


Figura 13 – Desligamento da SE Miracema 500kV (TO) com separação do SIN

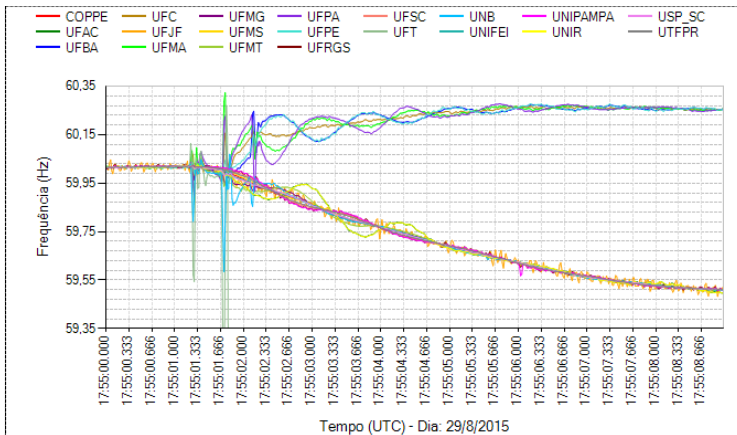
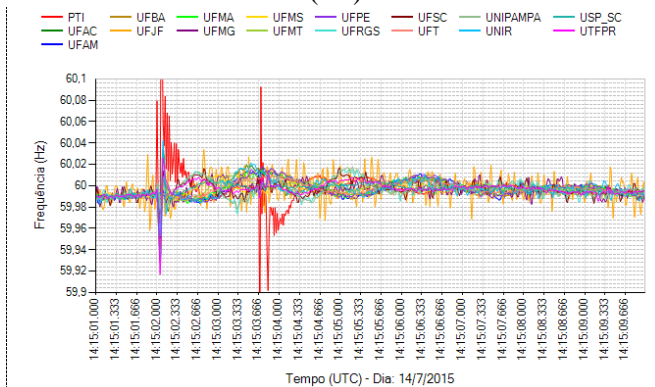


Figura 14 – DLT 765kV Foz/Ivaiporã C3 com religamento automático (PR)



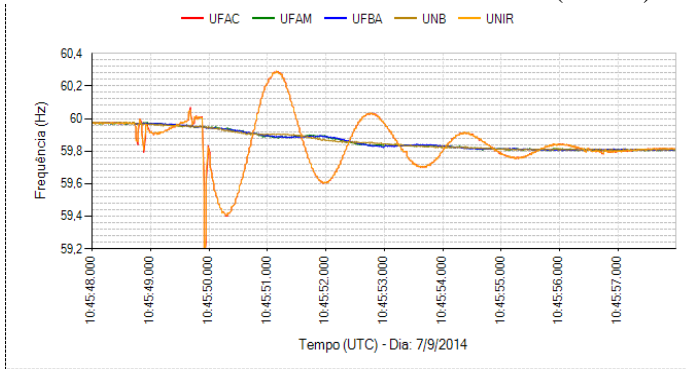
2.2.4 Oscilações (OS)

Perda de geração, faltas, rejeição de carga e problemas em controladores produzem oscilações sistêmicas devido à redistribuição das potências entre os geradores, contudo existem oscilações que não possuem um claro evento que o originou. Se estas oscilações não forem amortecidas, podem provocar ilhamentos, desligamentos de componentes ou blecautes devido às atuações das proteções do sistema.

O desligamento de um elo DC de corrente contínua traz oscilações de grande amplitude quando de sua desconexão por falha. No SIN, o Elo 600kV Madeira traz a geração dos complexos hidrelétricos Santo Antônio e Jirau ($\approx 6000\text{MW}$), localizados no Rio Madeira, região Norte, para a região Sudeste. Também existe um transformador provisório e um conversor *back-to-back*, instalados na SE Coletora Porto Velho 500kV, em Rondônia, para atender a carga do subsistema Acre-Rondônia (DE OLIVEIRA et al., 2015).

Justamente as PMUs UFAC e UNIR do projeto MedFase se localizam nas capitais dos estados de Acre e Rondônia. Estas PMUs têm registrado fortes oscilações eletromecânicas quando ocorrem bloqueios ou perdas de geração transportadas pelo Elo DC, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Perda de 550MW na UHE Santo Antonio e 85MW na UHE Jirau fornecidos ao Elo DC Madeira 600 kV (RO-SP)



2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente capítulo foram tratados os conceitos de frequência elétrica, variações, eventos, perturbação, transitórios eletromagnéticos e transitórios eletromecânicos para melhor entendimento dos tipos de eventos em SEE, que se classificam em eventos sistêmicos e locais.

Diversas perturbações que ocorreram no SIN e que foram registradas pelo SMSF MedFasee BT, foram empregadas para ilustrar os tipos de eventos sistêmicos: perda de geração (PG) e rejeição de carga (RC); e os tipos de eventos locais: desligamento de linha de transmissão (DLT) e oscilações locais (OS) devido a perturbações que afetam o complexo Madeira em Rondônia, como já foi tratado previamente.

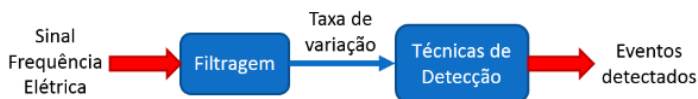
3 ANÁLISE DE EVENTOS EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

A análise de eventos envolve a detecção, classificação, localização e estimação da carga/geração interrompida e permite analisar o comportamento do SEE face as diferentes ocorrências que o afetam. A organização do texto neste capítulo segue a ordem: definição, métodos no contexto internacional, o método existente no projeto MedFasee com suas vantagens e dificuldades e finalmente, a proposta deste trabalho.

3.1 DETECÇÃO DE EVENTOS

Detectar um evento representa capturar a repercussão dos eventos nas grandezas elétricas, isto é capturar o momento em que o evento atinge cada PMU. Previamente às técnicas de detecção, existe uma primeira etapa de pré-processamento do sinal mediante a filtragem, como é mostrado na Figura 16.

Figura 16 – Etapas da detecção de eventos



A detecção de eventos em tempo real utilizando sincrofasores foi um tema de investigação da equipe FNET nos Estados Unidos. Em (ZUO et al., 2006) foi implementado um detector de eventos off-line que utiliza a média de todos os sinais para a detecção de eventos sistêmicos. Em (WANG, 2009), algoritmos estatísticos mais robustos para a detecção de eventos foram desenvolvidos baseados na distância de Mahalanobis e no reconhecimento de padrões.

Nos sincrofasores provenientes do projeto MedFasee BT, a presença de ruído, outliers e saltos na frequência elétrica ocorrem pelo fato de que as medidas são registradas na rede de baixa tensão. Desta forma foram desenvolvidas técnicas de pré-processamento de sinais para filtrar ruídos, atenuar os saltos e também as oscilações naturais do sistema e assim poder visualizar melhor a sequência de PMUs sensibilizadas pelo evento. Em (ZIMMER, 2013) foram implementados o Filtro de Média Móvel Passa Faixa (FMMPF), o Filtro de Média Móvel com Taxa de Variação (FMMTV) e o Filtro de Kalman (FK), destacando-se os dois últimos em uma série de análise de eventos.

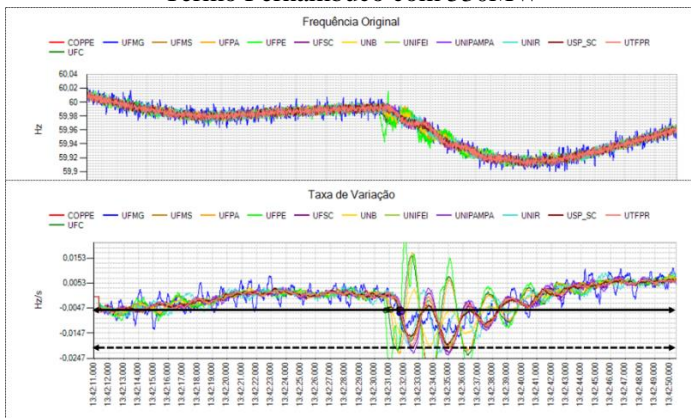
Em (ZANDONAI, 2014) foi implementado o filtro de *Butterworth*, o qual apresentou bons resultados na atenuação de ruído como de saltos.

Após o pré-processamento do sinal, realiza-se a detecção do evento onde uma técnica é utilizando um limiar estático, na qual a detecção do evento é realizada mediante a ultrapassagem de um limiar preestabelecido, visando capturar o instante exato que o evento atinge as PMUs. Esta metodologia foi abordada em (ZIMMER, 2013) considerando um limiar fixo.

Outra técnica interessante é a metodologia da derivada nula, na qual o instante de detecção é aquele no qual a variação no tempo do sinal indicador é inferior a um valor muito pequeno próximo a zero; esta metodologia foi abordada em (ZANDONAI, 2014), contudo uma limitação do algoritmo implementado é que ela somente detecta um evento, correspondendo em alguns casos a um falso evento.

Na Figura 17, a parte superior corresponde à frequência elétrica do evento ilustrado na Figura 5, e a parte inferior corresponde ao sinal de taxa de variação (após a filtragem pelo FMMTV), a linha tracejada é o limiar sugerido em (ZIMMER, 2013), já a linha contínua corresponde ao limiar ajustado para a detecção correta do evento.

Figura 17 – Detecção ajustável de eventos – 20/6/2012, PG da UTE Termo Pernambuco com 530MW



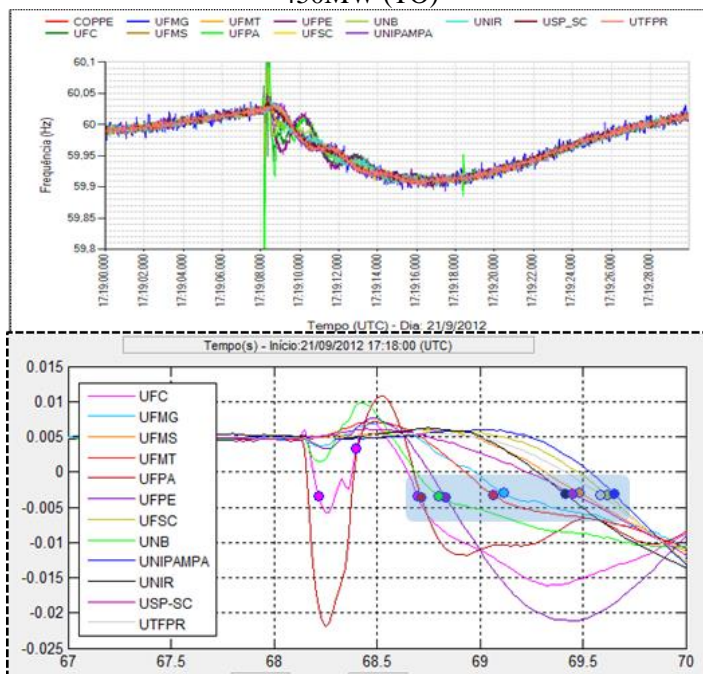
O sucesso desta técnica depende da forma da “assinatura” do evento no sinal da frequência. As principais dificuldades ocorrem quando a frequência pré-evento tem um comportamento não constante, o que motiva a redução do limiar, o que vai aumentar as falsas detecções. Estas dificuldades são descritas com mais detalhes na sequência.

Comportamento não constante da frequência pré-evento: O método do limiar de detecção fixo é eficiente quando a assinatura da frequência elétrica pré-evento for plana, isto é a taxa de variação da frequência pré-evento seja aproximadamente zero.

Na Figura 18, o aumento da frequência antecedente a PG, isto faz com que a taxa de variação pré-evento seja positiva (0.005) e o limiar de detecção (normalmente ajustado em 0.02) precise ser reduzido a um valor muito próximo a zero (0.003), aumentando as falsas sinalizações de eventos. Na Figura 19, no instante em que desligou a UHE Ney Braga, ocorria uma diminuição na frequência devido ao déficit de geração no SIN, por congestionamento da transmissão, então o evento ficou superposto a outros eventos dificultando a sua detecção pela metodologia existente.

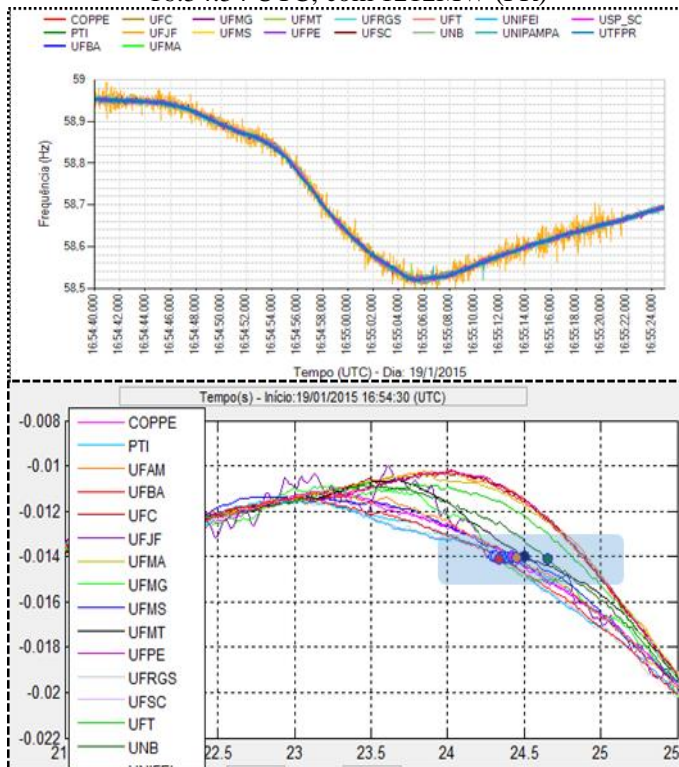
Em ambas figuras, foi utilizado o sinal do Filtro de Kalman no pré-processamento. A qual consiste da estimação da aceleração angular, mediante um método de correlação, implementado em (ZIMMER, 2013).

Figura 18 – DLT 500kV Açailândia/Marabá e PG da UHE Estreito com 450MW (TO)



(a) Frequência elétrica. (b) Aceleração angular via FK, limiar: $\pm 0,003$

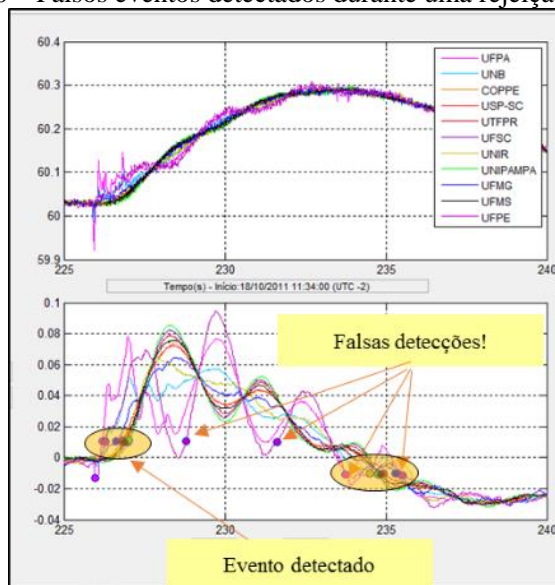
Figura 19 – Subfrequência e desconexão da UHE Ney Braga, às 16:54:54 UTC, com 1212MW (PR)



(a) Frequência elétrica. (b) Aceleração angular via FK, limiar: $\pm 0,014$

Deteção de falsos eventos – falsas sinalizações: conhecidos como falsos positivos, o número de falsas sinalizações pode aumentar drasticamente com a escolha de um limiar de detecção menor ao preestabelecido, estas falsas sinalizações correspondem a transitórios e regiões de operação normal do sistema. Este problema inviabiliza a implementação em tempo real da técnica de detecção mediante limiar estático. Na Figura 20 é mostrado um exemplo ilustrativo. O que é semelhante a probabilidade de falso alarme na estimação de estados: não é bom passar falsos eventos, tampouco deixar de detectar verdadeiros eventos (SIMÕES, 2006).

Figura 20 – Falsos eventos detectados durante uma rejeição de carga



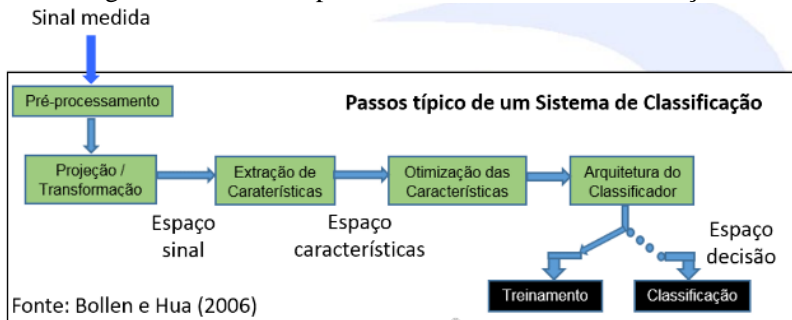
Estas dificuldades motivam o estudo de um detector ajustável de eventos. A metodologia de detecção existente envolve a utilização de limiares estáticos que são altamente irregulares e requer constante atenção e sintonização. Assim, uma metodologia robusta precisa levar em conta técnicas estatísticas como reconhecimento de padrões (WANG, 2009).

Neste trabalho, foi utilizado o FMMTV, por apresentar um bom desempenho em vários estudos de caso e por fornecer uma medida direta da taxa de variação da frequência. Posteriormente, foi utilizada uma variação do método proposto em (ZIMMER, 2013), sendo que ao invés de definir um limiar fixo na detecção, é considerado um limiar que pode ser ajustado para cada evento.

3.2 CLASSIFICAÇÃO DE EVENTOS

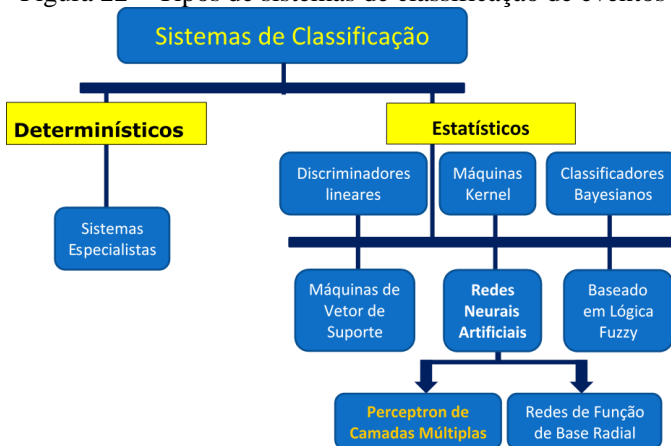
Classificar eventos é organizá-los a partir de suas características particulares de forma automática. Os métodos de classificação se dividem em dois tipos: determinísticos e estatísticos. Na Figura 21 estão esquematizados os passos típicos de um sistema de classificação.

Figura 21 – Passos típicos de um sistema de classificação



De acordo com o classificador, os passos mostrados na Figura 21 podem ser combinados ou substituídos. É desejável que a quantidade de características extraídas seja pequena. Estas características podem ser de natureza estática (invariante no tempo) ou dinâmica (variante no tempo) (BOLLEN et al., 2006). A Figura 22 mostra alguns dos tipos de sistemas de classificação de eventos em SEE.

Figura 22 – Tipos de sistemas de classificação de eventos



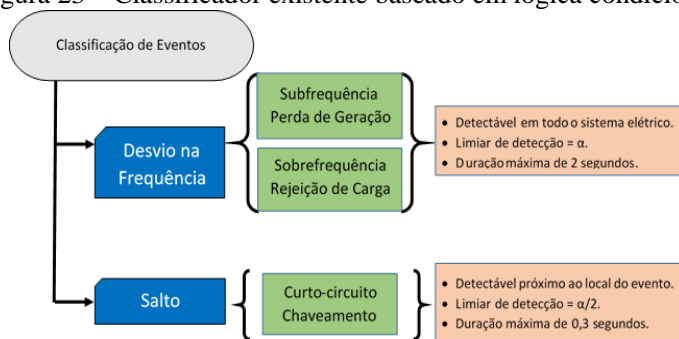
Fonte: Desenvolvido pelo autor

Entre os sistemas de classificação determinísticos têm-se os Sistemas Especialistas. Estes são baseados em regras de lógica condicional, são úteis quando se tem um número limitado de casos históricos e precisa-se de um suficiente conhecimento do sistema. O seu funcionamento requer um conjunto de limiares preestabelecidos.

Entre os sistemas de classificação estatísticos tem-se os discriminadores lineares, máquinas kernel, classificadores bayesianos, máquinas de vetor de suporte, redes neurais artificiais (RNAs) e classificadores baseados em lógica difusa. Eles requerem pesquisa interdisciplinar (para reduzir a distância de conhecimentos entre sistemas de potência e processamento de sinais), baseada no reconhecimento de padrões e de um alto número de registros para treinamento com boa qualidade.

O classificador de eventos existente no projeto MedFasee é baseado em um conjunto de regras implementadas utilizando lógica condicional. Na Figura 23, é apresentado o classificador existente com suas principais características (ZIMMER, 2013). Este tipo de classificador é similar a um sistema especialista sem memória de trabalho (ROLIM, 2014). Os classificadores baseados em sistemas especialistas são amplamente utilizado na literatura tradicional (BOLLEN et al., 2007).

Figura 23 – Classificador existente baseado em lógica condicional



Este classificador extrai informações das características dinâmicas dos eventos para sua classificação de modo empírico (a partir da experimentação de diversos casos reais). Para isto são sintonizados limiares que avaliam tanto a amplitude do evento como sua duração no tempo e que precisam ser ajustados previamente. Os eventos são classificados em:

- **Saltos**, característicos de curtos-circuitos e chaveamentos.
- **Desvio de frequência**, característicos de perda de geração e rejeição de carga.

Além de ajustar o limiar de detecção do evento, o módulo de classificação atual leva em conta os seguintes ajustes:

- máxima duração de evento do tipo salto.
- mínimo tempo de permanência abaixo do limite para indicação do fim do evento.
- máximo tempo entre terminais para indicar mesmo evento do tipo salto.
- máximo tempo entre terminais para indicar mesmo evento do tipo desvio de frequência.

O classificador de eventos existente tem bom funcionamento na análise de eventos sistêmicos. Entretanto, ele apresenta dificuldades nas seguintes situações:

- na identificação de saltos (característico de desligamento de linhas de transmissão), o classificador apresenta dificuldade uma vez que na filtragem, os saltos e ruídos são atenuados.
- na identificação de oscilações, o classificador os mal caracteriza como eventos do tipo perda de geração ou rejeição de carga em função da direção da primeira crista oscilatória.

Finalmente, a metodologia de classificação existente organiza as detecções do evento em listas sequenciais de modo a observar a propagação do evento. Contudo, não é fácil de acompanhar tais listas, porque exige conhecimento por parte do usuário da localização geográfica das PMUs.

No âmbito do projeto FNET a classificação automática de eventos tem sido um problema difícil de resolver, devido a que dois eventos nunca são exatamente iguais. O classificador existente precisava ser sintonizado manualmente para funcionar em cada interligação dos Estados Unidos e requer 20 segundos de dados para seu funcionamento.

Recentemente, classificadores de eventos, baseados em redes neurais artificiais, com arquitetura Perceptron de múltiplas camadas, têm sido desenvolvidos. Em (ZHENG, 2011a) foram simulados 200 casos para cada tipo de evento, a partir da construção de modelos matemáticos de eventos, logo foi utilizado o *toolbox* de redes neurais do Matlab para treinamento, validação e teste. Contudo, os resultados da aplicação desta metodologia não foram explicados em detalhes na referência.

MARKHAM (2012) realizou uma investigação utilizando sinais reais da frequência e propôs um classificador neural de eventos com uma eficiência de 97,7% na identificação de PG, RC e DLT na interligação leste, utilizando o *toolbox* de redes neurais do Matlab. Esta proposta vem sendo utilizada em razão de sua característica de trabalhar bem em tempo

real, com potencial de reconhecer eventos automaticamente após 2 segundos de ocorrido (LIU et al., 2015).

O uso da *toolbox* do Matlab facilita o desenvolvimento do classificador pelo fato de tratar a rede neural como uma caixa preta, porém limita o conhecimento do pesquisador sob RNAs.

SCOLARO (2009), em sua dissertação de mestrado no IEB-UFSC, realizou uma investigação utilizando sinais de eletroencefalografia (EEG) e a transformada wavelet. Sendo proposto um classificador baseado em RNAs para a identificação de eventos no cérebro com uma eficiência de 96,14%. Ainda se tratando de sinais de natureza biológica, em ambos casos é estudado um algoritmo para classificar padrões e além disso, é explicado passo a passo a arquitetura neural selecionada, a forma de implementar sem usar a *ANN Toolbox*, e de avaliar o desempenho do classificador mediante matriz de confusão ou tabelas de contingência.

A proposta do presente trabalho é projetar, implementar, treinar e utilizar um classificador baseado em redes neurais, a partir dos dados históricos de eventos do projeto MedFasee. Ressalta-se que uma das sugestões de trabalhos futuros em (ZIMMER, 2013) foi desenvolver um identificador de eventos que utilize técnicas de inteligência artificial.

3.2.1 Rede Neural Artificial – Perceptron Multicamadas

As RNAs são modelos computacionais inspirados no sistema nervoso dos seres vivos. As suas características são (SILVA et al., 2010):

1. adaptação por experiência, os parâmetros internos da rede são ajustados a partir da apresentação sucessiva de exemplos relacionados ao comportamento do processo.
2. capacidade de aprendizado, por intermédio da aplicação de um método de treinamento, a rede consegue extrair o relacionamento existente entre as diversas variáveis que a compõem.
3. organização de dados, possibilitando o agrupamento de padrões que apresentam particularidades em comum.
4. habilidade de generalização, tolerância a falhas e facilidade de prototipagem.

As potenciais áreas de aplicabilidade são (SILVA et al., 2010):

1. reconhecimento/classificação de padrões, consiste em associar um padrão de entrada para uma das classes previamente definidas.

- aproximador universal de funções, controle de processos, agrupamento de dados, sistemas de previsão, otimização de sistemas e memórias associativas.

3.2.1.1 O Neurônio Artificial

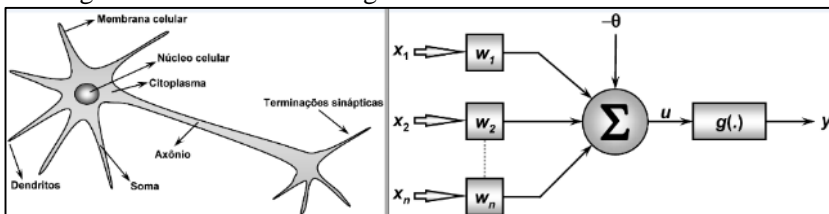
O neurônio é a célula elementar do sistema nervoso. Pode ser dividido em três partes principais, conforme a Figura 24:

- os dendritos captam os estímulos vindos de outros neurônios;
- o corpo celular processa as informações advindas dos dendritos e produz um potencial de ativação que indicara se o neurônio pode disparar um impulso elétrico ao longo do seu axônio;
- o axônio ira conduzir os impulsos elétricos para outros neurônios conectores via suas terminações sinápticas.

Já o modelo do neurônio artificial engloba as principais características de uma rede neural biológica: paralelismo e alta conectividade, sendo modelos bem simplificados dos neurônios biológicos. Seus elementos básicos, conforme a Figura 24, são:

- Sinais de entrada: $x_1; x_2; \dots; x_m$
- Pesos sinápticos: $W_{j,1}^L; W_{j,2}^L; W_{j,3}^L; \dots; W_{j,m}^L$
- Limiar de ativação: $W_{j,0}^L = \theta$
- Junção aditiva: $net_j = \sum_{k=1}^m W_{jk} \cdot x_k - \theta$
- Função de ativação: $g()$
- Sinal de saída: $y_j = g(net_j)$

Figura 24 – Neurônio biológico e modelo do neurônio artificial



3.2.1.2 Funções de Ativação

As funções de ativação mais comumente utilizadas como função de saída de um neurônio são: a função linear, a função logística e a função tangente hiperbólica.

Função linear:

$$y(x) = ax + b, \quad (3.1)$$

Função logística:

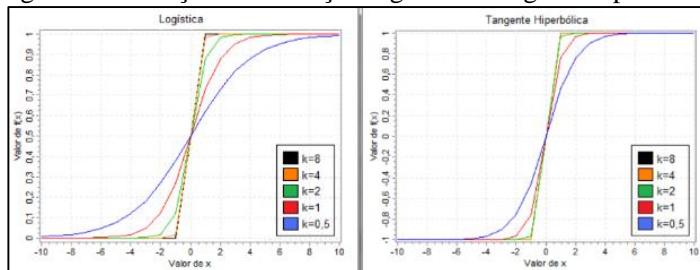
$$y(x) = \frac{1}{1 + e^{-kx}}, \quad (3.2)$$

Função tangente hiperbólica:

$$y(x) = \frac{e^{kx} - e^{-kx}}{e^{kx} + e^{-kx}}, \quad (3.3)$$

onde k é um escalar positivo. A Figura 25 ilustra ambas funções para diferentes valores de k .

Figura 25 – Funções de ativação logística e tangente hiperbólica



Fonte: (SCOLARO, 2009).

3.2.1.3 Perceptron de Múltiplas Camadas (PMC)

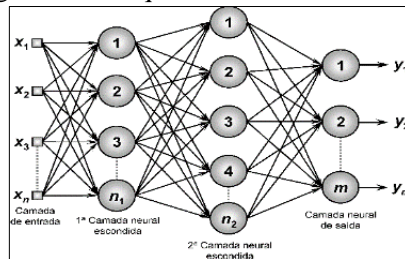
A arquitetura de uma rede neural define a forma como os seus neurônios estão dispostos uns em relação aos outros. Um PMC é constituído por três partes, como é mostrado na Figura 26.

- Camada de entrada: responsável pelo recebimento de informações, estas entradas são geralmente normalizadas em relação às faixas de variações dinâmicas produzidas pelas funções de ativação.
- Camadas escondidas: composta de neurônios responsáveis de extrair as características associadas ao processo a ser inferido.

- Camada de saída: responsável pela produção e apresentação dos resultados finais da rede.

As arquiteturas PMC são empregadas na solução de problemas relacionados à aproximação de funções, classificação de padrões, identificação de sistemas, otimização, robótica, controle de processos, etc.

Figura 26 – Arquitetura de uma rede PCM



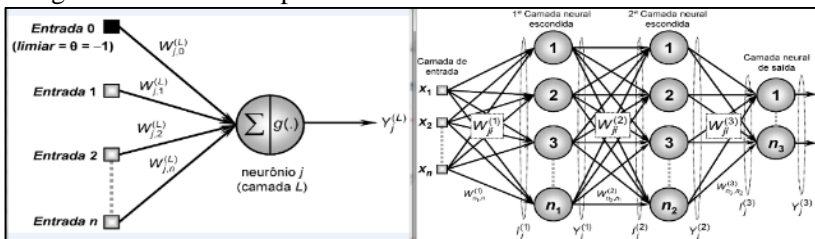
Fonte: (SILVA, et al. 2010).

O algoritmo de aprendizado utilizado em seu treinamento está baseado na retropropagação do erro ou *Error-backpropagation*.

3.2.1.4 Processo de Treinamento Supervisionado do PMC

O processo de treinamento supervisionado consiste da aplicação de passos ordenados para a sintonização dos pesos sinápticos e de limiares de seus neurônios, mostrados na Figura 27, tendo-se como objetivo final a generalização de soluções a serem produzidas pelas suas saídas, representativas do sistema físico em que estas estão mapeando (SILVA et al., 2010).

Figura 27 – Pesos sinápticos e limiares a atualizar em cada neurônio



Seu princípio de funcionamento é o seguinte:

- cada uma das entradas da rede será propagada uma a uma em direção à camada neural de saída do PMC;
- as camadas escondidas extraem a maioria das informações referentes ao seu comportamento, e as codificam por meio dos pesos sinápticos e limiares de seus neurônios;
- finalmente, os neurônios da camada de saída recebem os estímulos advindos dos neurônios da última camada escondida, produzindo um padrão de resposta que será a saída disponibilizada pela rede.

A especificação da configuração topológica da rede PCM, tais como o número de camadas escondidas e o número de neurônios em cada uma delas, dependerão da classe do problema, da disposição espacial das amostras de treinamento e dos valores iniciais atribuídos, tanto aos parâmetros de treinamento como às matrizes de pesos.

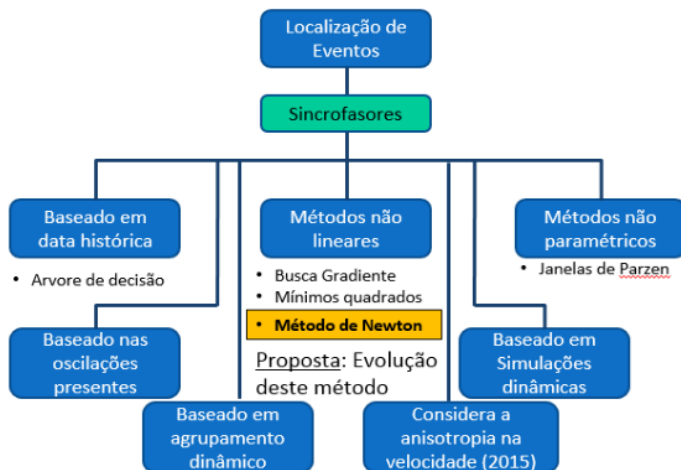
Os pesos sinápticos são atualizados por época, isto é, todos os padrões de treinamento são apresentados à rede, seus respectivos erros são acumulados e o erro médio da época é então avaliado. O erro médio da época é retropropagado pela rede, atualizando o peso das conexões sinápticas uma única vez por época, conforme mostrado no anexo A.

Neste trabalho, foi utilizado a *ANN Toolbox* do Matlab. O algoritmo de treinamento supervisionado padrão usado pela *Toolbox* é o algoritmo do gradiente conjugado escalar (*Training using scale conjugate gradient – trainscg*). Trata-se de uma versão aperfeiçoada e muito mais rápida do que o *Error-backpropagation* original.

3.3 LOCALIZAÇÃO DE EVENTOS

Consiste em estimar o local geográfico do evento ou estimar a região mais provável da perturbação. A utilização de sincrofasores para realizar esta tarefa é recente. Na Figura 28 é resumido o conjunto de metodologias de localização baseadas em dados de sincrofasores.

Figura 28 – Métodos existentes na localização de eventos



As metodologias de localização de eventos utilizam o conceito de propagação de ondas eletromecânicas, descrito ao final desta seção.

No âmbito da FNET, diversas pesquisas foram desenvolvidas na procura de uma solução mais robusta. Bank et al., (2006) implementou uma árvore de decisão baseada em dados históricos. Gardner et al., (2006a) implementou três métodos não lineares: mínimos quadrados, método de Newton e a Busca Gradiente. Em Gardner et al., (2006b) técnicas não paramétricas foram implementadas para obter a região que contém o epicentro do evento, destacando-se as janelas de Parzen. Em Zuo et al., (2007) foi estudada a relação da magnitude das oscilações na frequência com o local do evento. Em Kook et al., (2011) implementou-se um algoritmo que utiliza simulações dinâmicas e medições de sincrofasores. Já em Xia et al., (2007) a estratégia baseada no método de mínimos quadrados é implementada no servidor da FNET, sendo ela atualmente utilizada em tempo real. Em Zheng et al., (2012) é utilizada a distância ortodrômica² em coordenadas geográficas junto ao método de Gauss-Newton. Porém, não foram obtidas melhorias na redução do erro na estimativa do epicentro do evento.

Na Europa, duas pesquisas são relevantes. Em Sterpu et al., (2007) foi proposto um método de localização de eventos sistêmicos, mediante a interseção de circunferências produzidas partir de três PMUs adjacentes ao evento. Em Mei et al., (2008) foi investigado um método de

² O comprimento de arco entre dois pontos em uma superfície esférica.

agrupamento hierárquico que divide um SEE em grupos coerentes a partir do sinal da frequência elétrica de PMUs. Os registros de PMUs representativos são utilizados de modo online para obter o grupo mais provável a partir da qual o evento se originou.

Na China duas pesquisas também são relevantes. Qin et al., (2012) realizou um algoritmo de identificação e localização de eventos em SEE (curto-circuito, desligamento sem falta, perda de geração e rejeição de carga) a partir da análise das características dos fasores de corrente de sequência positiva, obtidas de PMUs localizadas na rede de alta tensão de SEE e um conjunto de regras.

Recentemente, em Zhang et al., (2015) foi proposta uma metodologia que utiliza uma transformação de coordenadas esféricas a planas, contudo sua principal contribuição é a consideração da anisotropia na velocidade da onda eletromecânica, via simulação, levando em conta a topologia atual da rede. Como resultado desta modificação, o erro de estimação no estudo de caso apresentado no artigo, diminuiu de 131km (resultado da metodologia com velocidade constante) a 45km.

Uma metodologia de localização de eventos em sistemas de água usando uma técnica de otimização baseada em grafos é apresentada em Srirangarajan et al., (2013). Esta metodologia utiliza os tempos de detecção de uma rede de vários sensores sincronizados no tempo e constitui-se de interesse para futuras metodologias que considerem a topologia da rede elétrica.

No Brasil, a localização de eventos utilizando sincrofasores é abordada no projeto MedFasee. É estimado o epicentro do evento a partir de um sistema de coordenadas planas mapeadas em um mapa do Brasil, com projeção policônica (chame-se a partir de agora como coordenadas policônicas - CPs). A estimativa obtida apresentou uma boa aderência com o local real do evento (erro da ordem de 250km), entretanto requeria o mapeamento das PMUs a CPs. (ZIMMER, 2013).

Esse mapeamento introduz outro erro na estimação do epicentro, e tampouco permite associar de forma direta o resultado com alguma usina/carga do SEE.

Neste trabalho é proposta a estimação da região mais provável da perturbação usando-se diretamente as coordenadas geográficas - CGs das PMUs e a teoria da propagação de ondas eletromecânicas.

3.3.1 Propagações de Ondas Eletromecânicas

Engenheiros de SEE, no passado, têm reconhecido que *eventos* em SEE propagam-se na rede com velocidade finita. Graças ao desenvolvimento da tecnologia SMSF foi possível ter medições simultâneas e sincronizadas dos fasores (módulo e ângulo) de tensão e corrente nas barras do SEE monitoradas pelas PMUs. Observações preliminares têm confirmado a existência de uma velocidade de propagação bem menor do que a velocidade da luz (THORP et al., 1998).

A partir da equação de oscilação da máquina síncrona, a relação entre o desequilíbrio da potência mecânica e a potência elétrica com a posição do ângulo do rotor do gerador é descrita como:

$$2H \frac{d^2 \delta}{dt^2} + k_D \frac{d\delta}{dt} = p_m - p_e = p_a, \quad (3.4)$$

onde H é a inércia da máquina, K_D é a constante de amortecimento e p_m , p_e e p_a são as potências mecânica, elétrica e acelerante, respectivamente. Esta potência acelerante é a que provoca alterações no ângulo e posteriormente na velocidade no rotor dos geradores.

Em (THORP et al., 1998), foi proposto um modelo contínuo para um SEE de grande porte e uniforme. A inércia e o amortecimento mecânico das máquinas síncronas, assim como as impedâncias das linhas de transmissão são representadas como uma função de parâmetros distribuídos, descritos em função de coordenadas espaciais.

A equação de oscilação passa a ser expressada da forma seguinte (equação de onda de segunda ordem hiperbólica):

$$\frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} + \mu \frac{\partial \delta}{\partial t} - v^2 \nabla^2 \delta + u^2 (\nabla \delta)^2 = P \quad (3.5)$$

A velocidade da propagação eletromecânica é expressada como:

$$v^2 = \frac{wV^2 \sin \theta}{2h|z|}, \quad (3.6)$$

onde:

w: velocidade angular nominal.

V: magnitude de tensão em p.u. no nó terminal da linha.

θ : ângulo da impedância da linha.

h: constante de inércia da máquina por longitude.

z: impedância da linha em p.u. por longitude.

A equação de oscilação para um meio contínuo (3.5) é a expressão da equação da onda eletromecânica, ela mostra que eventos em SEE se propagam pela rede como uma função do tempo e do espaço, onde o coeficiente do Laplaciano é o quadrado da velocidade de propagação da onda eletromecânica (3.6).

Contudo é interessante analisar este fenômeno quando se refere a SEE reais, os quais possuem uma distribuição não homogênea dos seus componentes. Em (PARASHAR et al., 2004), foi constatado, via modelagem do sistema *New England* – USA, utilizando informações espaciais da sua topologia, que a propagação sistêmica de um evento através de regiões com constantes de inércias elevadas é mais lenta que em regiões com constantes de inércia pequenas, devido a sua relação inversamente proporcional, visível na equação (3.6).

Por exemplo no caso do SIN, quaisquer eventos tais como uma PG ou um curto-circuito causa a *propagação de ondas eletromecânicas*, que produz a alteração no valor do ângulo do rotor, e conseqüentemente na frequência instantânea em cada máquina, sendo os ângulos das tensões das barras mais próximas ao local do evento, as primeiras variáveis a serem sensibilizadas.

A propagação de ondas eletromecânicas é o subsídio teórico na localização espacial de eventos eletromecânicos.

3.4 ESTIMAÇÃO DA CARGA/GERAÇÃO INTERROMPIDA

Significa estimar a potência interrompida (MW) que provocou o evento sistêmico. Esta potência interrompida está relacionada com eventos sistêmicos como perda de geração (PG) ou rejeição de carga (RC). Entre os métodos citados na literatura para fazer sua estimação, a partir de dados da frequência elétrica, estão: relação com a energia da oscilação sistêmica, resposta da frequência e a equação de oscilação.

Um benefício desta estimação é que, juntamente ao estimador do local do evento, permitiria sugerir com bastante precisão a usina/carga ou linha de transmissão causante da perturbação. Outro benefício bastante interessante é no desenvolvimento de um esquema adaptativo de rejeição de carga por mínima frequência (*Adaptive Underfrequency Load Shedding – AUFLS*) (TERZIJA et al., 2002).

A proposta deste trabalho é estimar a carga/geração interrompida baseada na equação de oscilação, o que será tratado no capítulo de desenvolvimentos metodológicos.

3.4.1 Energia da Oscilação Sistêmica

Este estudo iniciou-se em (ZIMMER, 2013), onde foram utilizados 22 eventos de RC, no período 16/2/ 2010 – 10/10/ 2012, cujas potências interrompidas variavam desde 306MW até 3960MW.

Os resultados obtidos mostraram que existe uma relação linear entre a energia da componente principal deste sinal (energia da oscilação sistêmica, com frequência entre 0,03 e 0,05Hz) e o montante da carga interrompida. São utilizados 20 segundos de dados, a partir do início do evento, com taxa de 60 fasores por segundo. É utilizada a análise pelo método de Prony - formulação multissinais.

A análise pelo método de Prony, é um método paramétrico baseado na reconstrução do sinal, utilizado na identificação de modos eletromecânicos em sinais de SEE. Mediante este método decompõe-se o sinal em um somatório de funções senoidais amortecidas, obtendo-se como resultados a frequência de oscilação, taxa de amortecimento, amplitude e fase dos seus componentes e energia.

A energia do *i-ésimo* modo de oscilação considerando-se um modelo discreto, pode ser obtida por meio da seguinte equação:

$$E_i = \int e^{-\xi_i \cdot 2\pi \cdot f_i \cdot t} Am_i \cdot \text{sen}(2\pi \cdot f_i \cdot t + \phi_i), \quad (3.7)$$

onde:

- $i = 1, 2, \dots, n$ (ordem do modelo)
- Am_i : amplitude do modo *i-ésimo*.
- f_i : frequência de oscilação do modo *i-ésimo*.
- ξ_i : amortecimento do modo *i-ésimo*.
- ϕ_i : fase do modo *i-ésimo*.

Porém, necessita-se de um número maior de eventos para a validação da proposta, como a utilização de eventos sistêmicos do tipo perda de geração (ZIMMER, 2013).

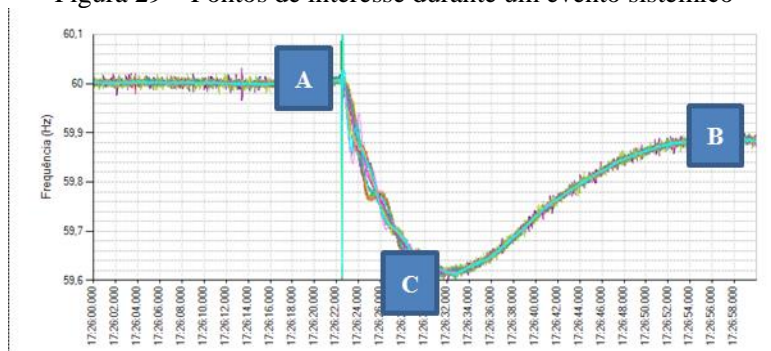
3.4.2 Baseado na Resposta da Frequência

A Corporação de Confiabilidade Elétrica dos Estados Unidos (*North American Electric Reliability Corporation – NERC*) definiu um padrão em relação a resposta da frequência, na qual identificou 3 pontos de interesse na assinatura de uma PG/RC, conforme mostrado na Figura 29, e listadas a seguir (NERC, 2011):

- ponto A: frequência pré-evento.

- ponto B: frequência no estado estacionário, após atuação da RPF e antes da atuação do CAG.
- ponto C: frequência no ponto de máximo desvio, devido à perda de energia cinética rotativa.

Figura 29 – Pontos de interesse durante um evento sistêmico



A diferença (A-B) é inversamente proporcional ao tamanho do sistema, quanto maior o sistema, maior será a sua inércia e menor o desvio em regime estacionário na frequência. o parâmetro de sensibilidade carga – frequência permite medir a resposta da frequência ante uma PG/RC:

$$\beta = -\frac{\Delta P}{\Delta f}, \quad (3.8)$$

onde:

ΔP = montante de geração/carga interrompida (MW).

Δf = desvio de frequência em regime permanente (A-B) (Hz).

Este parâmetro pode ser determinado a partir dos parâmetros dos geradores em operação no sistema e da sensibilidade da carga com a frequência, a partir da expressão seguinte:

$$\beta = 2\pi \left(D + \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \right) MW/Hz, \quad (3.9)$$

onde:

D: coeficiente de variação da carga do sistema com a frequência.

R_i : Estatismo ou regulação de velocidade do gerador i -ésimo.

n: número de geradores em operação síncrona no SEE.

O monitoramento do parâmetro β ao longo do tempo (afetada pelas variações sazonais da carga e pelas políticas de operação sob o parque gerador) em SEE é importante para o conhecimento da capacidade de reserva do sistema.

Em (XIA, 2009) foi desenvolvido um algoritmo para estimação da carga/geração interrompida no USA, que obtém os valores da frequência nos pontos A e B, utilizando os valores de tempo nos quais o comportamento transitório na frequência é atenuado.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente capítulo, a análise de eventos em SEE foi dividida em quatro etapas: detecção, classificação, localização e estimação da carga/geração interrompida. A detecção de eventos possui duas etapas: pré-processamento e técnica de detecção, nesta etapa é sugerida a utilização de métodos estatísticos. Dentro da seção de classificação de eventos foram descritas as vantagens e as deficiências do método de classificação existente, na sequência foi contextualizado de uma forma geral, as RNAs com foco na arquitetura PMC, dado que foi a técnica de inteligência artificial utilizada para a realização desta difícil tarefa. A seção de localização de eventos é baseada na teoria de propagação de ondas eletromecânicas. Finalmente, na seção de estimação de carga/geração interrompida, é descrita a técnica que o relaciona com a energia da oscilação sistêmica e a técnica baseada na resposta da frequência.

No capítulo seguinte, as propostas deste trabalho para a análise de eventos são tratadas com mais detalhes.

4 METODOLOGIA PROPOSTA

Neste capítulo apresentam-se os aspectos gerais da metodologia proposta no presente trabalho para a análise de eventos em SEE utilizando sincrofasores. A organização do capítulo respeita a sequência: detecção, classificação, localização e estimação da carga/geração interrompida.

A proposta na detecção de evento é a utilização do filtro de média móvel com taxa de variação (FMMTV) como técnica de pré-processamento e a utilização de um limiar ajustável de detecção.

A metodologia de classificação aqui desenvolvida é baseada em Redes Neurais Artificiais (RNA), a qual pertence ao grupo de classificadores estatísticos. Este classificador extrai as características de cada tipo de evento durante o treinamento a partir de uma grande quantidade de eventos históricos, para ser logo executada em tempo real para a classificação de novos eventos não usados no treinamento.

Já na localização de eventos, o ambiente computacional desenvolvido é constituído pela visualização automática da propagação sistêmica e pelo módulo que obtém a estimativa do epicentro do evento e pelo módulo que obtém a região mais provável do evento a partir de um conjunto de estimativas. A técnica matemática usada é o método de Newton, a qual precisa do cálculo da matriz Jacobiana a cada iteração. Assim, é monitorado também o comportamento da condição numérica da matriz Jacobiana ao longo das iterações para estudar casos de possível mau funcionamento do método de Newton.

A estimação da carga/geração interrompida é realizada a partir da sua relação quase proporcional com o desvio instantâneo na frequência, baseada na equação de oscilação. Esta metodologia permitiu estimar a magnitude da inércia total dos sistemas Brasileiro e Chileno em diversas configurações operativas, exposto no capítulo 5 de Resultados.

4.1 DETECÇÃO AJUSTÁVEL DE EVENTOS

Após o estudo das técnicas de detecção existentes foi selecionado o FMMTV por ter apresentado bom desempenho na atenuação de ruídos e chaveamentos em diversos análises de eventos, no período 2011-2015, e por fornecer a taxa de variação da frequência (df/dt), útil para a detecção de eventos em SEE. O FMMTV começa aplicando um filtro de média móvel de 20 pontos no sinal da frequência para cada PMU.

$$\hat{f}_t = \frac{1}{F} \sum_{k=1}^F f_{t-k} \quad (4.1)$$

onde:

F: ordem do filtro (= 20)

f_t : frequência registrada pela PMU no instante t

\hat{f}_t : frequência após a filtragem no instante t

Logo é calculada a taxa de variação da frequência filtrada a cada 60 pontos do sinal da frequência filtrada para cada PMU.

$$\frac{df}{dt} \approx \frac{\Delta \hat{f}}{\Delta t} = \frac{\hat{f}_{t+T} - \hat{f}_t}{T} \quad (4.2)$$

onde:

T: ordem da taxa de variação (= 60)

A detecção de eventos é realizada mediante a técnica do limiar de detecção fixo proposto por (ZIMMER, 2013).

$$se: \left| \frac{df}{dt} \right|_1; \left| \frac{df}{dt} \right|_2; \dots; \left| \frac{df}{dt} \right|_n \geq \sigma \Rightarrow \text{Evento detectado} \quad (4.3)$$

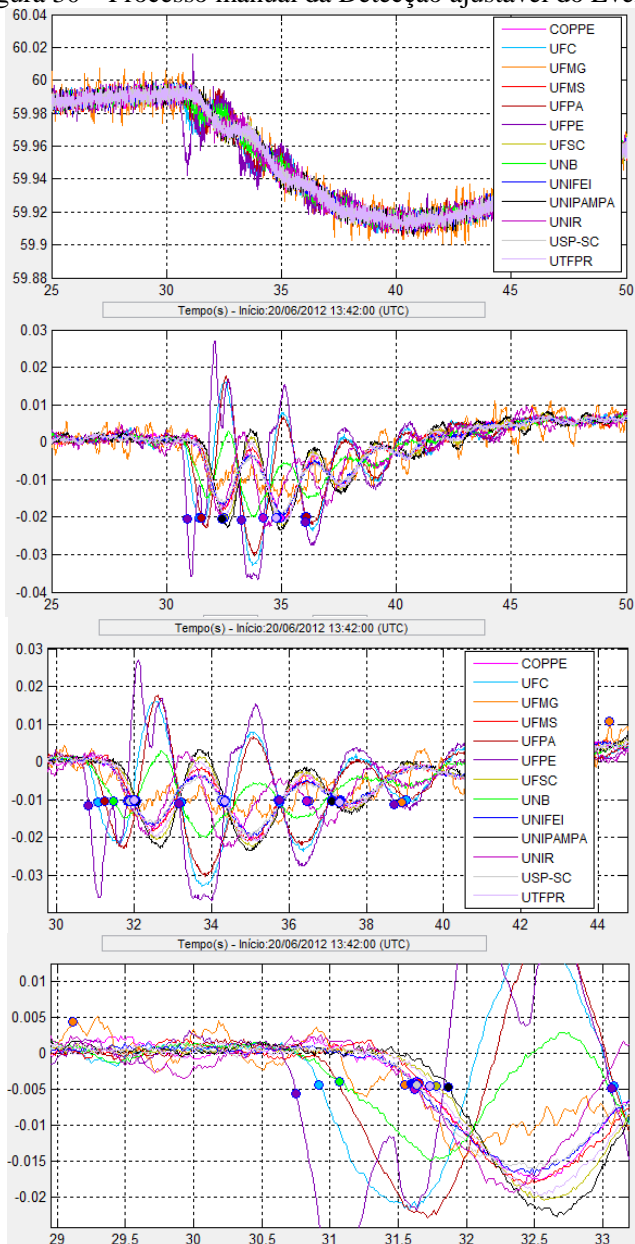
onde n é o total de PMUs que estavam online durante o evento.

Em (ZIMMER, 2013) foi definido o valor de $\sigma = \pm 0,02 \text{ Hz/s}$ para a detecção de eventos mediante o FMMTV. Como foi explicado na seção 3.1, este método irá funcionar bem quando o comportamento da frequência pré-evento seja plano e que se trate de um evento de grande escala ($> 900 \text{ MW}$ para o SIN), porém não irá funcionar corretamente para casos como os mostrados nas Figuras 17 e 18 ou onde a magnitude do evento é menor aos 900 MW , no caso do SIN.

Isto motiva a detecção ajustável de eventos, isto é, ter liberdade de alterar o valor do limiar de detecção (ZANDONAI, 2014) de modo a assegurar a detecção da propagação do evento. Um exemplo é apresentado na Figura 30 que corresponde à Figura 17.

A primeira figura corresponde ao registro da frequência elétrica nos segundos 25 – 50 onde o instante de detecção do evento foi logo do segundo 30. A segunda figura corresponde ao sinal indicador após a utilização do FMMTV. O terceiro e o quarto gráfico correspondem ao zoom no eixo do tempo do segundo gráfico.

Figura 30 – Processo manual da Detecção ajustável do Evento



Inicialmente é detectado o evento utilizando o limiar preestabelecido de 20mHz/s, contudo somente algumas PMUs atingiram esse valor. Em consequência, o limiar de detecção é reduzido a 10mHz/s, porém, a propagação eletromecânica também é influenciada por algumas oscilações e transitórios. Finalmente é ajustado o limiar a 5mHz/s, conseguindo-se capturar a repercussão do evento nas PMUs.

É importante ressaltar que um valor menor a este limiar, ficaria afetado pelo ruído existente no sinal indicador, o qual é impossível de atenuar. Também quanto menor for o valor do limiar de detecção, maior será a detecção de falsos eventos. Neste trabalho, isto não é automático constituindo-se em uma área muito interessante para futuras pesquisas.

4.2 CLASSIFICADOR NEURAL DE EVENTOS

A classificação dos eventos requer a extração das características do sinal elétrico de forma a identificar a sua classe pertencente, o que torna esse problema bem complexo. A extração via a utilização de regras no classificador existente dá bons resultados na maioria dos casos, com a desvantagem de precisar de extensas e complexas linhas de código, e a sintonização de limiares para seu efetivo funcionamento, visto que quaisquer dois eventos não são exatamente iguais.

Um dos principais desafios do projeto MedFasee é a implementação de uma metodologia de classificação de eventos a partir dos registros da frequência. O intuito desta proposta é a sua utilização em tempo real mediante o uso de janelas deslizantes, dando origem a duas questões. A primeira relacionada a possibilidade de classificar eventos a partir do reconhecimento da sua assinatura na frequência. A segunda questão é, sendo afirmativa a primeira questão, então: Qual deveria ser o tamanho da janela de dados?

Assim sendo, a utilização de redes neurais artificiais (RNAs) para a classificação de eventos a partir de dados da frequência torna-se justificável, pelos motivos seguintes (SILVA, et al. 2010):

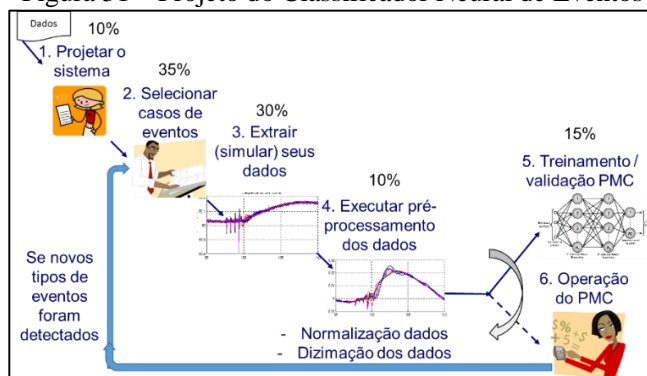
- sua habilidade em classificar padrões, sendo testado com sucesso em diversos problemas do mundo real;
- sua habilidade de generalização: após o processo de treinamento da rede, esta é capaz de generalizar o conhecimento adquirido possibilitando estimar soluções até então desconhecidas;
- sua tolerância a falhas: incluso quando os dados de entrada apresentam ruído ou estejam incompletos, o que é o caso de alguns eventos registrados no projeto MedFasee;

- sua facilidade de prototipagem: pois após o processo de treinamento, os seus resultados são normalmente obtidos por algumas operações matemáticas elementares;
- sua eficiência para tratar diversos problemas não-lineares.

Um requisito para utilizar redes neurais é ter casos suficientes para realizar o seu treinamento, podendo ser casos reais ou simulados. Casos simulados, porém, precisam ter o sistema elétrico modelado. Casos reais são mais vantajosos por evidenciar o real comportamento do sistema. A qualidade dos dados de casos reais é melhorada quando utilizadas técnicas de pré-processamento, neste caso muito útil devido às medidas serem tomadas da rede de distribuição.

O treinamento exitoso de uma RNA depende da qualidade e da quantidade de casos de eventos históricos previamente classificados. Neste contexto o projeto MedFasee tem uma base de dados histórico online desde julho de 2010. Esses dados podem ser extraídos a partir do software MedPlot (LEANDRO et al., 2013), uma vez conhecendo-se o horário do evento. A seguir são descritos os passos do projeto conforme a Figura 31. Os valores percentuais indicados representam uma ponderação para ressaltar o nível de dificuldade de cada passo, ressaltando os passos 2 e 3.

Figura 31 – Projeto do Classificador Neural de Eventos



Fonte: Desenvolvido pelo autor

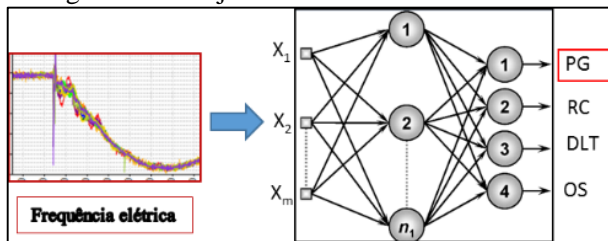
4.2.1 Projetar o Sistema

Significa definir as entradas e as saídas da RNA. As entradas referem-se à quantidade de características a serem inseridas na rede

neural. Neste trabalho é utilizado uma janela de dados de 20 segundos com 1 segundo pré-evento e aproveitando a taxa de amostragem de 60 fasores por segundo. Isto é, 1200 dados de entrada ($x_1, x_2, \dots, x_{1200}$) inicialmente.

As saídas referem-se ao número de classes na qual serão organizados os eventos quando forem apresentados à rede neural. Neste trabalho são definidos 4 tipos de classes de eventos: perda de geração (PG), rejeição de carga (RC), desligamento de linha de transmissão (DLT) e oscilações (OS), já contextualizados na seção 2.2. Na Figura 32 é mostrado em conjunto a forma geral do projeto do sistema

Figura 32 – Projetar o sistema: entradas e saídas



4.2.2 Selecionar casos de eventos

Foi dedicado um longo tempo para a organização de uma base de dados de eventos ocorridos no SIN, e armazenamento automático devido à falta de um algoritmo automático de detecção de eventos. Isto tornou este passo exaustivo e não trivial.

Assim, todos os eventos considerados neste trabalho correspondem àqueles informados pelo Operador do Sistema (ONS) no seu informativo preliminar diário da operação (IPDO e pelo Informativo Diário do Desempenho do SMSF (IDDS) do projeto MedFasee BT.

Foi criada uma base de dados de Eventos em Excel onde estão organizados todos os eventos reais ocorridos no SIN, entre julho de 2010 e julho de 2015. Cada evento contém informações relativas a hora exata, o desvio na frequência, a potência interrompida, o local do evento e outras observações relevantes. As Tabelas 1 – 3, são respectivamente, extratos das tabelas completas relativas a PG, RC e DLT apresentadas no apêndice B.

Tabela 1 – Extrato da listagem de Eventos PG no SIN

N	Data	Horário UTC	Tipo	Busca (s)	$T_{detecção}$	Δf (Hz)	ΔP Inf (MW)	Local Informado	OBSERVAÇÕES
25	20140511	13:53:15.6	PG	60	14,7	0,27	NãoInf	Região Sul	7 PMUs do MedFasee.
26	20140523	18:38:43.7	PG	60	12,7	0,15	722	Região Nordeste	19 PMUs do MedFasee. Sinal do PTI ruidosa. Sem registros da UFPE
27	20140528	07:31:49	PG	60	10	0,25	NãoInf	Não informado	18 PMUs do MedFasee.
28	20140607	17:12:9.7	PG	600	66	0,31	2800	Paraná - São Paulo	21 PMUs do MedFasee.
29	20140612	06:46:48.5	PG	60	9,5	0,25	NãoInf	São Paulo	18 PMUs do MedFasee.
30	20140613	14:27:26	PG	60	10,9	0,19	NãoInf	Elo DC Madeira	19 PMUs do MedFasee. Com oscilacao na área de Acre-Rorônia

Tabela 2 – Extrato da listagem de Eventos RC no SIN

Data (UTC)	Horário (UTC)	Tipo	Busca (s)	$T_{detecção}$ na Consulta	Δf (Hz)	ΔP Inf (MW)	Local Informado	OBSERVAÇÕES
20120229	18:48:29.1	PC	180	88	0,28	896	MA	13 PMUs do MedFasee inclui Nordeste. Bons resultados
20120609	16:32:58.8	PC	120	57,7	0,12	400	PA	12 PMUs do MedFasee. UNB com dados incompletos
20120611	22:50:43.2	PC	180	42,2	0,11	437	RJ	12 PMUs do MedFasee.
20121010	11:27:52	PC	120	51	0,26	984	RS	14 PMUs do MedFasee.
20121023	13:28:39.9	PC	180	95	0,13	480	SP	16 PMUs (MedFasee BT + MedFasee Cleep)

Tabela 3 – Extrato da listagem de Eventos DLT no SIN

Data	Horário (UTC)	Tipo	Estado Informado	Local Informado	PMUs sensibilizadas	F1_max	F2_Max	Desvio frequência	OBSERVAÇÕES
20140225	21:40:29.3	DLT	GO	LT 500kV SerraMesa2/ Luziania C-1	UNB	59,73	60,38	0,65	Provoca posterior oscilação sistêmica de 11seg. Interessa também o módulo da Tensão.
					UFT	60,14	59,82	0,32	
					UFMG	59,86	60,09	0,23	
20140313	15:55:34.3	DLT	CE	LT 500kV Pecem/ FortalezaII	UFC	59,22	60,36	1,14	
					UFMA	59,85	60,11	0,26	
					PTI	60,34	59,64	-0,7	
20140605	20:02:39	DLT	PR	LT 765kV Foz-vaipora C1	UNIFEI	59,95	60,1	0,15	
					UTFPR	59,95	60,1	0,15	
					PTI	59,97	60,26	0,29	
20140605	20:03:14.7	DLT	PR	LT 765kV Foz-vaipora C2	UNIFEI	59,97	60,03	0,06	Oscilação dos Modos N-S e SE-S
					UTFPR	59,97	60,03	0,06	
					PTI	60,23	59,61	-0,42	
20140924	09:37:51.8	DLT	PR	LT 765kV Foz-vaipora C3	UTFPR	59,92	60,11	0,19	
					UNIFEI	59,97	60,09	0,12	

Um benefício desta base de dados é que permite conhecer a quantidade total de casos existentes para cada tipo de evento permitindo avaliar a existência ou não de casos suficientes para se treinar uma RNA.

4.2.3 Extrair (simular) seus dados

A partir do conhecimento de um evento, as informações das PMUs armazenadas no PDC são extraídas mediante o aplicativo MedPlot (LEANDRO et al., 2013), criando uma pasta que contém as informações de cada PMU em formato ASCII. Com o processamento de outro programa existente “medfasee.m”, a pasta obtida anteriormente é condensada em um arquivo base (arquivo Matlab “.mat”). Dito arquivo base contém aproximadamente 7MB por reunir informações fasoriais de tensão, diferenças angulares e frequências durante um evento. O tamanho deste arquivo é diretamente proporcional ao tamanho da janela de tempo dos dados extraídos.

Uma ferramenta de extração automática de dados foi implementada em Matlab, o algoritmo desenvolvido extrai unicamente os

dados requeridos para o treinamento: nome das PMUs e suas frequências respectivas à máxima resolução (60 fasores por segundo) salvando os dados extraídos em formato Excel, com uma dimensão da ordem de 500KB. Esta ferramenta também salva um gráfico da frequência elétrica durante o evento, útil para visualizar cada evento.

Cada arquivo é armazenado em uma pasta que indica o tipo de evento que ele representa. Esta organização é útil porque facilita o processo de treinamento das RNAs estudadas. O período de tempo dos dados extraídos para cada tipo de evento é de 20 segundos, contudo eventos como DLT e OS apresentam oscilações que são amortecidas em 7-9 segundos. A frequência extraída possui 1 segundo de dados de frequência pré-evento seguido dos 19 segundos posteriores do evento. Isto para que a RNA aprenda a diferenciar o comportamento da frequência pré-evento, durante o evento e após o evento.

A extração dos dados é automática, sendo manual a seleção do arquivo do evento (.mat) e o instante de tempo (em segundos) em que começou o evento dentro deste arquivo.

Durante a extração de dados, foram excluídos registros de PMUs que perderam a comunicação com o PDC durante o evento (muitas vezes próximas ao local do evento), isto porque não oferecem informações úteis para o treinamento da RNA.

4.2.4 Executar pré-processamento dos dados

A etapa de pré-processamento tem como objetivo estudar a redução do número de entradas da RNA. As RNAs precisam que os dados de entrada sejam normalizados previamente. Destaca-se que arquiteturas híbridas, associando técnicas de processamento de sinais e RNAs estão em destaque recentemente (SILVA et al., 2010).

Uma ferramenta foi implementada em Matlab para a leitura dos arquivos excel resultado do passo anterior, e posterior criação das matrizes de cada tipo de evento. O vetor coluna de cada matriz representa uma amostra de treinamento com 1200 dados cada um.

A arquitetura de RNA utilizada é do tipo *feedforward* Perceptron de múltiplas camadas (PMC). O algoritmo de aprendizado utilizado em seu treinamento é o *Error-Backpropagation*.

A execução da etapa de treinamento requer duas matrizes: A matriz Treinamento_Entrada (*training_input*) é de ordem $m \times n$, onde m é o número de dados que contém a amostra e n é o total de amostras a serem utilizadas. A matriz Treinamento_Saida (*training_output*) é de ordem $k \times n$, onde k é o número de classes e n é novamente o total de amostras de

treinamento. A Tabela 4 e a Tabela 5 mostram a estrutura de ambas as matrizes, para fácil ilustração foram consideradas 20 dados de entrada ao invés dos 1200 dados.

Tabela 4 – Organização da Matriz de Treinamento-Entrada

Entradas (Segundos)	PG	RC	DLT	OS
1	60,00	60,00	60,00	60,00
2	59,98	60,02	60,30	60,60
3	59,97	60,03	59,70	59,40
5	59,86	60,14	60,15	60,30
7	59,75	60,25	59,85	59,70
8	59,78	60,22	60,00	59,80
13	59,86	60,14	60,00	59,85
18	59,94	60,06	60,00	59,87
19	59,95	60,05	60,00	59,88
20	59,95	60,05	60,00	59,90

Tabela 5 – Organização da Matriz de Treinamento-Saída

Saídas	PG	RC	DLT	OS
PG	1	0	0	0
RC	0	1	0	0
DLT	0	0	1	0
OS	0	0	0	1

4.2.5 Seleção das amostras para o Treinamento

Um tempo significativo foi dedicado à seleção apropriada dos casos de treinamento. A ideia era pegar aqueles eventos que repercutiram na assinatura do evento no sinal da frequência, a qual possui variações lentas próprias dos contínuos desbalanços de geração-carga do sistema.

Foi assim que se utilizaram amostras de PG com desvio da frequência maior que 0,08Hz (aprox. 530MW), amostras de RC com desvio de frequência maior que 0,07Hz (aprox. 440MW). Nas amostras de DLT, foram selecionados registros de PMUs próximas ao evento, porque mostram o salto inicial na frequência seguido de uma oscilação devido à redistribuição do fluxo de potência nas linhas remanescentes.

No caso das amostras de OS foram selecionados registros de fortes oscilações inter-área, visíveis nas PMUs UFAC e UNIR, devido à repercussão do desligamento do Elo DC Madeira na região Acre – Rondônia. Já os registros das outras PMUs do SIN foram usados nos conjuntos das amostras PG, porque o desligamento do Elo DC acarreta a

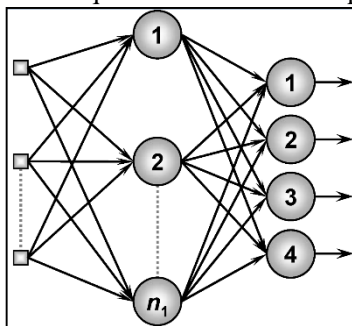
perda de geração do complexo hidrelétrico do Madeira (UHEs Jirau e Santo Antonio) para o sistema.

Dada a natureza sistêmica dos eventos PG e RC e a natureza local dos eventos DLT e OS, é esperado que se tenha um número maior de amostras de eventos sistêmicos. Os casos que não apresentaram um comportamento similar ao tipo de evento ao qual correspondiam, foram excluídas do conjunto de treinamento.

4.2.6 Configuração topológica da rede PMC

A rede PMC proposta tem a configuração mostrada na Figura 33.

Figura 33 – Arquitetura da rede PMC proposta



Esta rede PMC está constituída pela camada de entrada, a camada neural escondida e a camada neural de saída.

Na camada de entrada, inicialmente são mostrados 1200 dados que correspondem a varredura de 20 segundos à taxa de 60 fasores por segundo, constituído por 1 segundo pré-evento e 19 segundos após o evento. O tempo de treinamento das RNAs é proporcional a quantidades de dados de entrada desta, isto motiva a estudar o máximo fator de dizimação dos dados de entrada e o mínimo tamanho da janela de dados de entradas.

Na camada neural escondida é importante estudar o número de neurônios que esta irá possuir (n_1). Isto é determinado mediante tentativa/erro observando o desempenho global da rede PMC. Neste trabalho, foi considerado 20 neurônios, devido a ela ter dado bons resultado em uma pesquisa similar (MARKHAM, 2012).

Na camada neural de saída, várias redes neurais foram criadas. Uma com as quatro saídas (PG, RC, DLT e OS), outra com três saídas (PG, RC e DLT), outras duas redes PMC com duas saídas (PG e RC)

(DLT e OS) e, finalmente, redes especializadas para cada saída. O critério de seleção da melhor arquitetura a usar na operação da rede PMC é a partir do valor do seu desempenho global.

Os outros parâmetros internos da rede PMC: pesos sinápticos e bias iniciais; função de ativação na camada neural escondida; função de ativação na camada neural de saída; taxa de aprendizado e tipo de treinamento (algoritmo do gradiente conjugado escalar – *trainscg*) foram utilizados os valores padrão da *ANN Toolbox* do Matlab.

4.2.7 Treinamento, Validação e Teste

Uma vez que as matrizes Treinamento-Entrada e Treinamento-Saída foram criadas, o treinamento utilizando a *ANN Toolbox* (Pacote *Artificial Neural Network*) do Matlab é bastante simples. O *toolbox* requer o número de neurônios na camada neural escondida e a separação dos casos a serem usados nos grupos de treinamento, validação e teste. Validação, refere-se a medida do grau de generalização da rede PMC. Se, durante o treinamento, a capacidade de generalização da rede começa a piorar, o processo de treinamento é abortado para evitar a sobre especialização da rede PMC (SILVA, et al. 2010).

Um algoritmo foi codificado em Matlab para criar, treinar e testar as diferentes redes PMC implementadas no passo anterior, utilizando a *ANN Toolbox*.

4.3 LOCALIZAÇÃO DE EVENTOS

A partir da detecção oportuna de eventos, uma aplicação bastante interessante é a localização do epicentro de eventos sistêmicos, isto permite a rápida identificação da área elétrica que originou o desvio na frequência, facilitando a realização de ações pós-eventos mais efetivas para o sistema elétrico.

Como foi explicado na seção 3.3.1, os desbalanços de potência após um evento sistêmico, como uma PG, originam uma onda eletromecânica que se propaga no espaço e no tempo de modo uniforme, quando a inércia e a topologia do sistema estejam homoganeamente distribuídas. Trata-se de uma hipótese razoável para a modelagem do problema, embora não seja precisamente o comportamento dos SEE reais.

O presente trabalho representa uma evolução da metodologia de localização existente, baseado em fazer um melhor uso do total de PMUs

que detectaram o evento, melhorando também a rapidez do algoritmo. Nesse contexto, as principais contribuições foram:

- a visualização automática da propagação sistêmica de eventos.
- a visualização automática da região geográfica mais provável que contém o epicentro do evento.
- o monitoramento do condicionamento numérico da matriz Jacobiana.

4.3.1 Visualização da Propagação de um Evento Sistêmico

Como indicado na metodologia de classificação existente na seção 3.2, após a detecção de um evento, era apresentado uma tabela chamada “sequência de eventos” com informações do nome da PMU e o atraso de tempo (em segundos) na detecção com relação à primeira PMU sensibilizada. Porém, esta forma de apresentação não permite identificar intuitivamente a região onde ocorreu o evento, porque exige um conhecimento geográfico da localização das PMUs indicadas na tabela.

Um programa de visualização geográfica foi implementado em Matlab, que utiliza um mapa do Brasil, as principais linhas de transmissão do SIN e o atraso de tempo (em milissegundos) que a PMU detectou o evento com relação a primeira PMU sensibilizada.

O sistema de transmissão de energia elétrica do SIN foi obtido a partir do arquivo “Transmissão.kmz” de livre acesso no sítio web do Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico - SIGEL desenvolvido pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (ANEEL, SIGEL). Este arquivo contém o mapeamento do sistema de transmissão do SIN considerando as coordenadas geográficas aproximadas das subestações do SIN, com cada nível de tensão identificado por uma cor respectiva. Na Figura 34 é esquematizado o algoritmo implementado, e um exemplo ilustrativo é mostrado na Tabela 6 e na Figura 35.

Figura 34 – Fluxograma da metodologia adotada

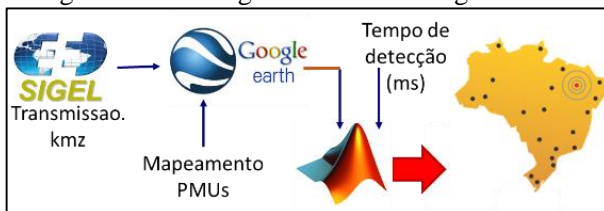


Tabela 6 – Evento 7/6/2014 às 14h12m: Desligamento Elo Itaipu

Evento 2 subfrequência no terminal UTFPR aos 69.867 s atraso de 0.000
Evento 2 subfrequência no terminal UNIFEI aos 69.967 s atraso de 0.100
Evento 2 subfrequência no terminal UFSC aos 69.983 s atraso de 0.117
Evento 2 subfrequência no terminal USP-SC aos 69.983 s atraso de 0.117
Evento 2 subfrequência no terminal COPPE aos 70.017 s atraso de 0.150
Evento 2 subfrequência no terminal PTI aos 70.017 s atraso de 0.150
Evento 2 subfrequência no terminal UFJF aos 70.067 s atraso de 0.200
Evento 2 subfrequência no terminal UFMS aos 70.067 s atraso de 0.200
Evento 2 subfrequência no terminal UFRGS aos 70.067 s atraso de 0.200
Evento 2 subfrequência no terminal UNIPAMPA aos 70.083 s atraso de 0.217
Evento 2 subfrequência no terminal UFMG aos 70.117 s atraso de 0.250
Evento 2 subfrequência no terminal UNB aos 70.233 s atraso de 0.367
Evento 2 subfrequência no terminal UFMT aos 70.267 s atraso de 0.400
Evento 2 subfrequência no terminal UFT aos 70.350 s atraso de 0.483
Evento 2 subfrequência no terminal UFMA aos 70.433 s atraso de 0.567
Evento 2 subfrequência no terminal UFPA aos 70.450 s atraso de 0.583
Evento 2 subfrequência no terminal UFBA aos 70.467 s atraso de 0.600

Figura 35 – Propagação do evento sistêmico mostrado na Tabela 6



4.3.2 Região que contém o Evento

A estimativa rápida e automática da região onde ocorreu um evento permite agilizar as tomadas de decisões em tempo real e também a análise de eventos. Quando ocorre um evento local (DLT ou OS), sua localização está associada às PMUs que foram sensibilizadas. No caso de eventos

sistêmicos (PG e RC), não está clara a localização onde ocorreu. A seguir é explicitado o algoritmo que permite obter a região do evento sistêmico.

4.3.2.1 Definição do Problema

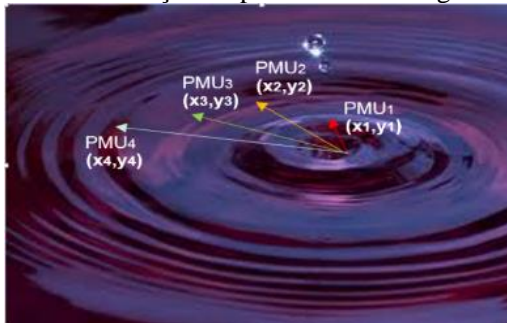
Evento sistêmicos englobam: PG, RC e oscilações sistêmicas. As hipóteses consideradas na formulação do problema são:

- o sistema elétrico é considerado um meio homogêneo, isto é, são desconsiderados os efeitos da rede elétrica na propagação de ondas eletromecânicas. Assumindo-se uma velocidade da propagação eletromecânica constante em todas as direções.
- a curvatura da terra é desprezada, isto é, a superfície onde se encontra o SEE é plana.

Com bases nestas hipóteses, a rede elétrica é desprezada e apenas as coordenadas das PMUs e o atraso de tempo em que o evento as atinge são consideradas. O problema, pode ser modelado em função da velocidade, distância e tempo, conhecido como Triangularização.

Baseado na condição de meio contínuo de propagação, podemos utilizar a Figura 36 para comparar este fenômeno com um corpo que atinge a superfície de um lago em repouso, provocando ondas que se deslocam em todas as direções (ZIMMER, 2013).

Figura 36 – Definição do problema de triangularização



Fonte: Adaptado de (XIA, 2009).

As variáveis desconhecidas são as coordenadas do local do evento (x_e, y_e), o instante em que ocorreu o evento com relação à primeira PMU em detectá-la (t_e) e a velocidade de propagação da onda eletromecânica (V_e) que está sendo considerada constante. A distância entre o epicentro

do evento e a i -ésima PMU (x_i , y_i) considerando que o espaço de propagação é um plano é:

$$L_i = \sqrt{(x_i - x_e)^2 + (y_i - y_e)^2} \quad (4.4)$$

Esta distância pode ser obtida de igual maneira como o produto da velocidade de propagação, considerada constante, e o tempo que o evento levou até atingir a i -ésima PMU:

$$L_i = V_e \cdot (t_i + t_e) \quad (4.5)$$

A partir das duas expressões é obtido um sistema de equações não lineares sobre dimensionado, onde o sub índice “ i ” representa a i -ésima PMU que detectou o evento.

$$V_e^2 (t_i + t_e)^2 = (x_i - x_e)^2 + (y_i - y_e)^2 \quad (4.6)$$

Em consequência, para um SMSF composto por m PMUs, as equações podem ser escritas conforme a equação (4.7).

$$\begin{cases} \sqrt{(x_1 - x_e)^2 + (y_1 - y_e)^2} = V_e \cdot (t_1 + t_e) \\ \sqrt{(x_2 - x_e)^2 + (y_2 - y_e)^2} = V_e \cdot (t_2 + t_e) \\ \vdots \\ \sqrt{(x_m - x_e)^2 + (y_m - y_e)^2} = V_e \cdot (t_m + t_e) \end{cases} \quad (4.7)$$

Isto é um sistema de equações não-lineares sobre dimensionado. Na sequência, é contextualizado o tratamento feito sob as coordenadas geográficas das PMUs.

4.3.2.2 Modelagem e Formulação matemática

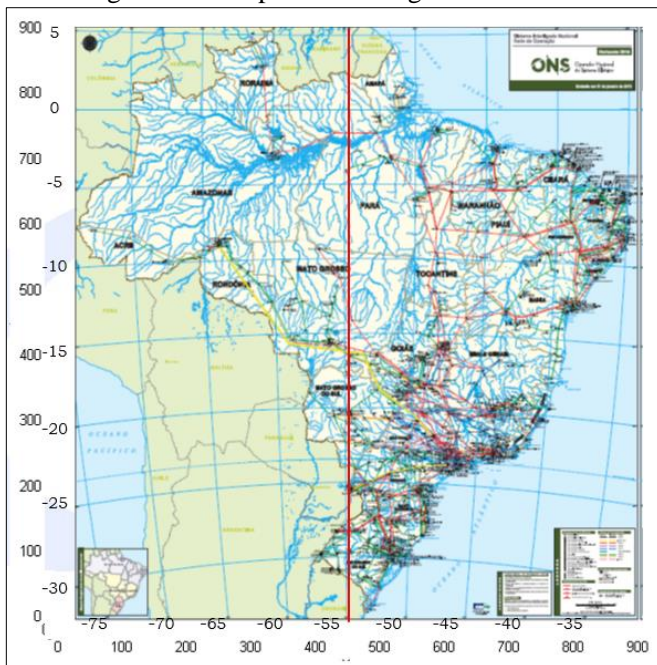
Existem erros quando uma superfície esférica é representada em um plano. Pesquisas na área da cartografia estudaram diversos tipos de projeções, com o intuito de escolher a melhor representação geográfica para cada país. Assim no Brasil, a projeção policônica é a mais favorável. Caracteriza-se pelo emprego de mais de uma superfície cônica de projeção para aumentar o contato com a superfície de referência, e diminuir assim as deformações. Elas possuem pequena deformação próxima ao centro do sistema, onde os paralelos são representados por

círculos concêntricos e os meridianos por linhas retas que convergem para os polos (ALMEIDA, 2010).

A modelagem do problema usando coordenadas policônicas (ZIMMER, 2013) considera:

- sistema de coordenadas planas.
- projeção policônica da superfície do Brasil com eixo no meridiano 54° Oeste do meridiano base (de traço vermelho na Figura 37).
- necessidade de realizar um mapeamento das PMUs (das suas coordenadas geográficas a coordenadas policônicas), e da estimativa obtida (de coordenadas policônicas para coordenadas geográficas).

Figura 37 – Mapa Eletroenergético do Brasil

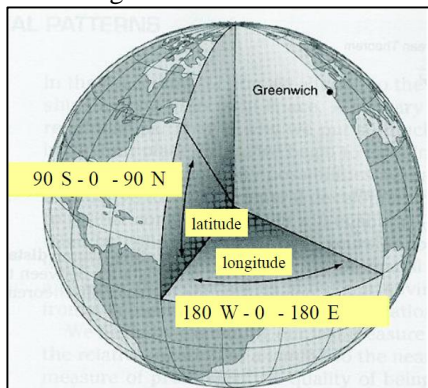


Fonte: (ONS, 2015).

Da Figura 37, percebe-se que as coordenadas geográficas são vistas como curvilíneas, em consequência estaremos inserindo uma distorção no mapa a considerar a projeção policônica como coordenadas

planas. Na Figura 38, são apresentadas as coordenadas geográficas (CGs) no globo terrestre.

Figura 38 – Divisão do globo terrestre em coordenadas geográficas



Fonte: (ALMEIDA, 2010).

A modelagem do problema usando CGs considera:

Latitude: é o ângulo formado entre a normal elipsoidal do ponto considerado e sua projeção no plano equatorial. Varia desde 0 até 90° tanto ao Sul como para o norte.

Longitude: é o ângulo entre o plano do meridiano do Greenwich (meridiano base) e o meridiano que passa pelo ponto considerado. Varia desde 0 até 180° tanto para leste como oeste.

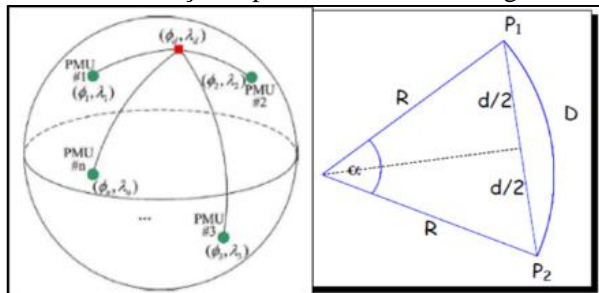
As vantagens da representação em CGs são:

- **Maior precisão:** As CGs localizam um ponto da superfície da terra com uma precisão da 4ª casa decimal, maior que as coordenadas planas existentes que trabalha com valores de ordem das centenas.
- **Fácil obtenção:** São utilizadas as CGs das PMUs, disponibilizadas de forma automática pelo receptor GPS, evitando-se assim a necessidade de mapeamento.
- **Fácil associação:** O resultado obtido em CGs é fácil de associar com cargas e usinas próximas a ele.

A superfície terrestre é elipsoidal. Contudo, a diferença entre o maior e o menor raio desta elipsoide é pequeno (ZHANG et al., 2015). Isto permite considerá-la como uma superfície esférica. O raio utilizado foi o raio equatorial (6378km) devido a sua proximidade com o Brasil.

A seguir, com apoio na Figura 39, é obtida a modelagem do problema de triangularização usando coordenadas geográficas.

Figura 39 – Distribuição espacial das PMUs e longitude de arco



Fonte: (ZHANG, et al. 2015; SUROWSKI, 2011)

Em (SUROWSKI, 2011) foi demonstrada a distância entre dois pontos na superfície da terra a partir de funções trigonométricas. Inicialmente, é calculada a distância euclidiana entre os dois pontos em coordenadas esféricas, finalmente, é estimado o valor do ângulo α utilizando a função haverseno. A distância curvilínea “ L_i ” entre dois pontos numa superfície esférica é:

$$L_i = R\alpha = 2R \sin^{-1} \left(\sqrt{\text{haversen } \alpha} \right) \quad (4.8)$$

$$\text{haversen } \alpha = \text{haversen}(\lambda_i - \lambda_e) + \cos \lambda_i \cos \lambda_e \cdot \text{haversen}(\phi_i - \phi_e)$$

$$\text{haversen } A = \text{sen}^2(A/2) = \frac{1 - \cos A}{2} \quad (4.9)$$

$$\cos A = 1 - 2\text{haversen } A \quad (4.10)$$

onde:

L_i : distância esférica entre a i -ésima PMU e o epicentro do evento.

(Φ_e, λ_e) : Longitude e latitude do epicentro do evento.

(Φ_i, λ_i) : Longitude e latitude da i -ésima PMU.

$i = 1, 2, \dots, n^\circ$ PMUs

O que após expansões trigonométricas, resulta em:

$$L_i = R \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \arccos \left[\text{sen} \lambda_i \text{sen} \lambda_e + \cos \lambda_i \cos \lambda_e \cos(\phi_i - \phi_e) \right] \quad (4.11)$$

A expressão (4.11) combinada com a expressão (4.5) resulta:

$$R \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \arccos \left[\sin \lambda_i \sin \lambda_e + \cos \lambda_i \cos \lambda_e \cos(\phi_i - \phi_e) \right] = V_e(t_i - t_e) \quad (4.12)$$

Todos os ângulos estão expressos em graus sexagesimais. Conforme a equação (4.12), a consideração formal das coordenadas geográficas nos leva a um sistema sobredimensionado de equações fortemente não-lineares devido à presença de termos trigonométricos. Esta equação é chamada de distância ortodrômica. Contudo, pesquisas similares que utilizaram dita formulação, não reduziram o erro na estimação do epicentro (ZHENG et al., 2012).

É importante ressaltar que o algoritmo de localização de eventos, aqui proposto, resolve a estimação do epicentro (o local onde se tem a suspeita que se originou o evento) em termos de coordenadas cartesianas (x_e, y_e) .

Portanto, foram mapeadas as CGs de cada PMU (latitude e longitude) como se elas fossem cartesianas. Esta suposição resultou em bons resultados na estimação do epicentro. Cabe salientar que esta hipótese já tinha sido sugerida em trabalhos similares (GARDNER, 2006a).

A exatidão em mapear mediante coordenadas geográficas uma subestação do SIN, é da ordem de milésimos de graus. Por exemplo, a localização da SE Araraquara 600kV no São Paulo está na faixa: [(-21,830 -48,344); (-21,835 -48,350)]. Isto sugere que sejam utilizadas apenas 3 ou 4 casas decimais, ao invés das 7 casas decimais fornecidas pelo receptor GPS. Esta decisão é útil toda vez que o Matlab tem um limite máximo no tamanho das variáveis de cálculo, dependendo se o Matlab utilizado é de 32 ou 64 bits.

A distância entre o epicentro do evento e a i -ésima PMU é expressado como:

$$L_i = R \times \frac{\pi}{180} \times \sqrt{(\phi_i - \phi_e)^2 + (\lambda_i - \lambda_e)^2} \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, N^o \text{ PMU} \quad (4.13)$$

onde:

$$R_{\text{Terra}} = 6378 \text{ km}$$

L_i : distância esférica aproximada entre a i -ésima PMU e o epicentro do evento.

(Φ_e, λ_e) : Longitude e latitude do epicentro do evento, em graus sexagesimais.

(Φ_i, λ_i) : Longitude e latitude da i -ésima PMU, em graus sexagesimais.

Combinando (4.13) com (4.5) resulta:

$$R \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \sqrt{(\phi_i - \phi_e)^2 + (\lambda_i - \lambda_e)^2} = V_e(t_i - t_e) \quad (4.14)$$

Em consequência, para um SMSF composto por m PMUs, as equações utilizando CGs e a consideração realizada, permite que possam ser escritas conforme a equação (4.15).

$$\left\{ \begin{array}{l} \sqrt{(\phi_1 - \phi_e)^2 + (\lambda_1 - \lambda_e)^2} = v \cdot (t_1 + t_e) \\ \sqrt{(\phi_2 - \phi_e)^2 + (\lambda_2 - \lambda_e)^2} = v \cdot (t_2 + t_e) \\ \vdots \\ \sqrt{(\phi_m - \phi_e)^2 + (\lambda_m - \lambda_e)^2} = v \cdot (t_m + t_e) \end{array} \right. \quad (4.15)$$

onde:

v : velocidade em graus sexagesimais/segundo.

A seguir é detalhado o método de solução do problema formulado mediante o método de Newton. Ressalta-se que em (ZIMMER, 2013) foi estudado o método de mínimos quadrados sendo que não foram obtidos bons resultados, isto devido a que a reformulação do problema para aplicar esta técnica precisa fixar a velocidade. Em (XIA, 2009) o método de mínimos quadrados, utilizando todas as PMUs que detectaram o evento, dá bons resultados no sistema leste norte-americano pela maior homogeneidade desse sistema elétrico.

4.3.2.3 Solução pelo Método de Newton Raphson

A formulação do método de Newton consiste na realização sucessiva de iterações utilizando a equação (4.14):

$$x^{(k)} = x^{(k-1)} - [J(x^{(k-1)})]^{-1} F(x^{(k-1)}), \quad (4.14)$$

onde $x^{(k)}$ e $x^{(k-1)}$ são vetores das incógnitas ϕ_e , λ_e , v e t_e , nas iterações “ k ” e “ $k-1$ ”. $J(x^{(k-1)})$ é a matriz Jacobiana, e $F(x^{(k-1)})$ corresponde à função da equação (4.15), ambas utilizando o valor das incógnitas na iteração “ $k-1$ ”.

$$F_i = (\phi_i - \phi_e)^2 + (\lambda_i - \lambda_e)^2 - v^2(t_i + t_e)^2, \quad (4.15)$$

onde: $i : 1, 2, \dots, m$ (n° PMUs).

Algumas considerações sob a função F e a variável x :

$$F(x) = 0$$

$$F(x) = [F_1 \ F_2 \ \dots \ F_m]^t; m \geq 4 \quad (4.16)$$

$$x = [\phi_e \ \lambda_e \ t_e \ v]^t$$

A expressão matemática para calcular a matriz Jacobiana é:

$$J(x) = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \phi_e} & \frac{\partial F_1}{\partial \lambda_e} & \frac{\partial F_1}{\partial t_e} & \frac{\partial F_1}{\partial v} \\ \frac{\partial F_2}{\partial \phi_e} & \frac{\partial F_2}{\partial \lambda_e} & \frac{\partial F_2}{\partial t_e} & \frac{\partial F_2}{\partial v} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial F_m}{\partial \phi_e} & \frac{\partial F_m}{\partial \lambda_e} & \frac{\partial F_m}{\partial t_e} & \frac{\partial F_m}{\partial v} \end{pmatrix}_{m \times 4} \quad (4.17)$$

Ressalta-se que são necessárias pelo menos 4 PMUs para poder resolver o problema normalmente. A expressão matemática das derivadas parciais da função F com relação a cada incógnita do problema é:

$$\frac{\partial F_i}{\partial \phi_e} = 2(\phi_e - \phi_i) \quad ; \quad \frac{\partial F_i}{\partial \lambda_e} = 2(\lambda_e - \lambda_i);$$

$$\frac{\partial F_i}{\partial t_e} = -2v^2(t_i + t_e) \quad ; \quad \frac{\partial F_i}{\partial v} = -2v(t_i + t_e)^2$$

Substituindo na equação (4.17) temos:

$$J(x) = \begin{pmatrix} 2(\phi_e - \phi_1) & 2(\lambda_e - \lambda_1) & -2v^2(t_1 + t_e) & -2v(t_1 + t_e)^2 \\ 2(\phi_e - \phi_2) & 2(\lambda_e - \lambda_2) & -2v^2(t_2 + t_e) & -2v(t_2 + t_e)^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 2(\phi_e - \phi_m) & 2(\lambda_e - \lambda_m) & -2v^2(t_m + t_e) & -2v(t_m + t_e)^2 \end{pmatrix}_{m \times 4} \quad (4.18)$$

Dado que a matriz Jacobiana é uma matriz retangular, será utilizado a pseudoinversa para a obtenção da inversa da matriz jacobiana.

$$J_{(x)}^\dagger = [J_{(x)}^t J_{(x)}]^{-1} J_{(x)}^t \quad (4.19)$$

J^t representa a transposta da matriz J . A pseudoinversa do Jacobiano é da ordem “4 x m” e representa a solução com menor comprimento. O método de Newton é um método iterativo. Por tanto, uma condição inicial e um critério de parada deveram ser indicados no algoritmo.

Condição inicial:

Local inicial (x_e, y_e): ponto equidistante às 2 primeiras PMUs afetadas.

Instante inicial (t_e): 0,1seg antes de atingir a primeira PMU.

Velocidade inicial (V_e): 18 graus sexagesimais/segundo, de acordo com experiências prévias.

Critério de Convergência:

O critério de convergência considerado é que o problema consegue ser resolvido de modo que duas iterações consecutivas não estejam afastadas mais de 50m tanto em suas latitudes bem como suas longitudes.

$$6378km \times \frac{\pi}{180} \times (\Delta\phi, \Delta\lambda) \leq 50m \quad (4.20)$$

$$(\Delta\phi, \Delta\lambda) \leq 0,5 \times 10^{-3} \text{ Graus sexagesimais}$$

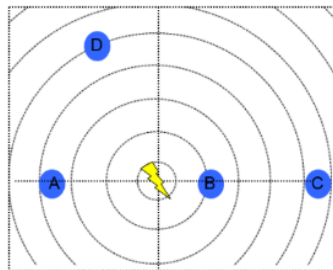
Então, o algoritmo alcança a convergência quando o incremento das incógnitas não ultrapassa os seguintes patamares:

$$[\Delta\phi_e; \Delta\lambda_e; \Delta t_e; \Delta v] < [1; 1; 20; 10] \cdot 5 \cdot 10^{-4} \quad (4.21)$$

A fim de compreender o método não linear de Newton, consideremos os exemplos didáticos mostrados na sequência.

Exemplo 1 – Considerando um meio de propagação homogênea, mostrado na Figura 42.

Figura 40 – Exemplo didático 1



Considere-se um evento cujo epicentro está na origem de coordenadas, e 4 PMUs detectaram a propagação uniforme do evento em todas as direções conforme a Tabela 7.

Tabela 7 – Coordenadas e tempo de detecção no Exemplo didático 1

PMU	Longitude X (u)	Latitude y (u)	Tempo de Detecção com relação à 1ra PMU (0,1seg)
B	5,0	0,0	0,0
D	-6,5	6,5	4,2
A	-13,0	0,0	8,0
C	15,0	0,0	10,0

Considerou-se o passo inicial $(x_0, y_0, t_0, V_0) = (-0.75; 3.25; 1; 1.33)$. Os resultados ao longo das iterações, são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 – Estimação do local do evento no Exemplo didático 1

Iteração	Xe (u)	Ye (u)	te (0,1seg)	Ve (u/0,1seg)	cond (I)
0	-0,750	3,250	1,00	1,33	53
1	0,070	-0,266	3,99	0,96	99
2	0,005	-0,030	5,26	0,99	99
3	0,000	-0,012	5,00	1,00	97
4	0,000	-0,011	5,00	1,00	

Conclui-se que o epicentro estimado do evento condiz com o local real do mesmo. A coordenada espacial “x” convergiu mais rapidamente do que a coordenada “y”, devido a ter um maior número de sensores no eixo “x”. Note-se que somente foram necessárias 4 iterações até atingir a convergência. O número de condição da matriz Jacobiana foi aproximadamente 100. Em quanto maior seja este valor, mais próxima a singularidade fica a matriz Jacobiana, sendo pior a qualidade dos resultados obtidos (ABUR et al., 2013).

Exemplo 2 – Considerando um meio de propagação não homogêneo em uma direção, mostrado na Figura 41 **Figura 42.**

Considere-se um evento cujo epicentro está na origem de coordenadas. O meio de propagação é uniforme nas direções norte, sul e leste. Contudo na direção oeste o evento consegue se propagar com maior rapidez. Os dados da posição dos sensores e seus tempos de detecção com relação ao primeiro sensor são mostrados na Tabela 9.

Figura 41 –Exemplo didático 2

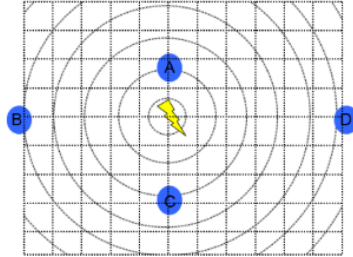


Tabela 9 – Coordenadas e tempo de detecção no Exemplo didático 2

PMU	Longitude X (u)	Latitude y (u)	Tempo de Detecção com relação à 1ra PMU (0,1seg)
A	0,0	1,0	0,0
B	-4,0	0,0	0,77
C	0,0	-2,5	1,5
D	4,5	0,0	3,5

O resultado da aplicação do método de Newton para estimar o local do evento é mostrado na Tabela 10.

Tabela 10 – Estimação do local do evento no Exemplo didático 2

Iteração	Xe (u)	Ye (u)	te (0,1seg)	Ve (u/0,1seg)	cond (J)
0	-2,0000	0,5000	0,50	1,60	19
1	-1,4947	0,7249	1,14	1,25	20
2	-1,5260	0,6421	1,23	1,28	19
3	-1,5260	0,6419	1,22	1,28	19

O local real do evento é a origem (0, 0), porém a estimativa obtida foi o ponto (-1,526; 0,642); isto é, em direção ao sensor B que causou a discrepância, no caminho onde o evento se propagou mais rapidamente. Na tentativa de ver a influência da condição inicial com o local estimado foi alterado seu valor, porém o epicentro estimado foi o mesmo. Note-se que o valor da cond (J) não evidencia um erro na solução obtida.

Em Zandonai (2014), foi sugerido utilizar de 4 a 6 PMUs próximos ao local do evento, infelizmente não é conhecido a priori o epicentro real do evento. Porém, estudos no sistema norte-americano apontaram que a 1ª PMU em detectar o evento é a mais próxima dele (XIA, 2009), o que constitui a principal premissa na análise de qualquer solução.

A partir de observações é visto que as unidades que estão distantes do local do evento irão detectá-lo ao final da sua propagação. Em atenção

a este fenômeno, chega a ser imperativo dar maior credibilidade na estimação obtida com as primeiras unidades em vez de estimativas que utilizam todos os terminais de medição. A continuação é proposta um algoritmo que permite definir a região mais provável da perturbação.

4.3.2.3 Algoritmo proposto e Visualização automática

Porque é melhor estimar a região que contém o epicentro do evento? Anteriormente a este estudo, as metodologias de localização de eventos forneciam como resultado as coordenadas planas de um ponto, porém este não coincidia com o epicentro real do evento, trazendo erros globais de 250km aproximadamente (ZIMMER, 2013).

O erro global da estimação de um epicentro é afetado principalmente por: a topologia do sistema elétrico, a densidade de PMUs instaladas, a exatidão nos tempos de detecção, os saltos na frequência elétrica, entre outros. Sendo mais vantajoso trabalhar dentro de uma região de atração do evento.

Também é importante diferenciar entre a localização de faltas e a localização de eventos em SEE. A localização de faltas, por exemplo em uma linha de transmissão, requer alta precisão para que o equipamento em falha possa ser isolado, e equipes de manutenção possam reparar no menor tempo possível o ativo. No caso da localização de eventos, não é necessária tanta exatidão, a região estimada pode ser utilizada para reduzir o espaço de busca do evento, e para a execução de ações de controle. Por exemplo, pode ser mais benéfico cortar uma carga ou acrescentar a geração na mesma área onde se teve a perda de um gerador e assim evitar sobrecarregar as interligações (MEI et al., 2008).

Em (ZIMMER et al., 2013), foram apresentados resultados que além da estimação do epicentro, definiam uma região circular com centro no epicentro estimado. O raio do círculo, variável em cada evento, era obtido via a comparação do instante em que a frente de onda deveria ter atingido o terminal com o instante que realmente o atingiu, conforme as equações:

$$raio = \max(erro_i) \cdot V_e \quad (4.22)$$

$$erro_i = t_{si} - (t_i + t_e) \quad (4.23)$$

$$t_{si} = \sqrt{\frac{(x_i - x_e)^2 + (y_i - y_e)^2}{V_e^2}} - t_e, \quad (4.24)$$

onde:

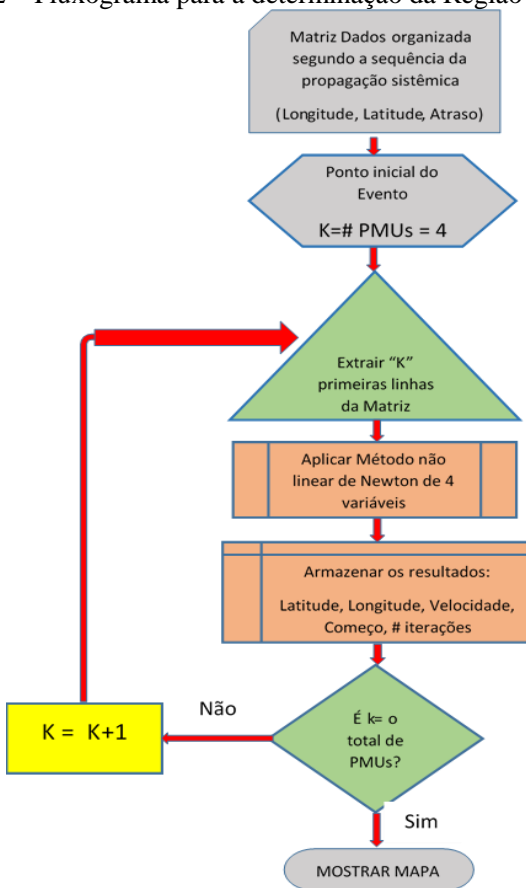
(x_e, y_e, V_e, t_e) : são as variáveis estimadas.

(x_i, y_i, t_i) : são as CGs e o atraso de tempo da i -ésima PMU.
 t_{si} : é o tempo de detecção estimado para a i -ésima PMU.

Contudo, a magnitude do raio desta região é bastante grande tal que a região estimada envolve um número grande de usinas/cargas dificultando a associação com o local real do evento.

A proposta aqui exposta consiste em obter um conjunto de epicentros mediante “Janelas de Propagação”. O fluxograma para a obtenção destes epicentros é mostrado na Figura 42.

Figura 42 – Fluxograma para a determinação da Região do Evento



Uma vez que são utilizadas as coordenadas geográficas, foi necessário pesquisar uma forma de apresentar estes resultados, sendo exploradas duas formas de visualização.

Uma forma de visualização foi mediante o sítio web do Google Map, sendo desenhado os epicentros a mão. Logo com o intuito de fazer automático o processo, foi explorado o programa Google Earth. Este programa permite visualizar múltiplas cartografias e pontos sob a superfície da terra, mediante as coordenadas geográficas e com base na fotografia de satélite. Como foi mencionado na seção 4.3.1, foi possível carregar o sistema de transmissão do Brasil no Google Earth. Mediante o sítio web “Earth Point” os dados de saída do algoritmo proposto eram exportados rapidamente a um arquivo “.kml”, para ser logo carregados no Google Earth. Esta forma de visualização é quase automática, porém, ele é viável de ser automatizado, a saída é mostrada na Figura 43.

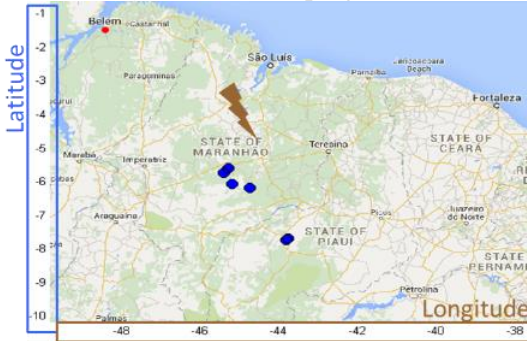
Figura 43 – Visualização mediante o Google Earth



Entretanto foi obtido, no sítio web da Mathworks, um algoritmo de livre uso que permite a visualização de mapas geográficos no Matlab.

O Plot_Google_Map, foi desenvolvido por Zohar Bar Yehuda, este programa utiliza as propriedades estáticas dos mapas de Google para traçar um mapa geográfico no fundo da figura atual no Matlab. O nível de zoom do mapa pode ser atualizado automaticamente visualizando a área geográfica com melhor detalhamento (ZOHAR, 2010). Esta característica ao fazer zoom, não existia com o mapa eletroenergético do Brasil, utilizado em pesquisas anteriores (ZIMMER, 2013). Também a saída do programa, mostra os eixos coordenados de longitude e latitude, sua execução é totalmente automática, como mostrado na Figura 44.

Figura 44 – Visualização mediante o programa Plot_Google_Map.m



4.3.3 Singularidade da matriz Jacobiana

O primeiro caso de singularidade da matriz Jacobiana, ocorreu quando o método de Newton era aplicado de forma automática a um conjunto de eventos detectados, entre eles falsos eventos (similar ao caso da Figura 20, os quais não representam a propagação eletromecânica de algum evento). Isto motivou a modificação do algoritmo de localização existente, localizando unicamente o evento real, selecionado pelo usuário.

Já que o método de Newton, precisa da inversão da matriz Jacobiana, é interessante ilustrar os eventuais problemas numéricos que poderiam existir.

No SMSF MedFasee BT, tem-se uma PMU por local geográfico. Já no âmbito de operadores de SEE, se tem mais de uma PMU em um mesmo local geográfico ou subestação, como é o caso do caso do SMSF MedFasee CTEEP.

Isto fez com que o estudo de possível mau condicionamento da matriz Jacobiana, quando na sua estrutura existam linhas idênticas, advindas de PMUs localizadas na mesma subestação, surja como um tema de investigação dentro da localização de eventos mediante sincrofasores.

Neste trabalho, foi realizado um estudo de caso de uma rejeição de carga em Belém no dia 27/4/2015, onde se utilizaram dados de sincrofasores redundantes do SMSF MedFasee CTEEP, e de outros terminais disponibilizados pelo ONS, detalhado na seção 5.4.

A seguir, é definido o condicionamento numérico de uma matriz, que é o instrumento matemático para monitorar a singularidade da matriz Jacobiana.

4.3.3.1 Condição Numérica da Matriz Jacobiana - $\text{cond}(J)$

A análise da qualidade dos resultados pode ser feita a partir do valor do condicionamento numérico da matriz jacobiana. A condição de uma matriz é uma propriedade que nos brinda informação acerca da qualidade do resultado quando da utilização de meios computacionais.

Os problemas computacionais surgem devido à precisão finita das variáveis em ponto flutuante, utilizadas para armazenar valores numéricos. Diz-se que um problema é mal condicionado, se pequenas perturbações em seus parâmetros produzem grandes mudanças nos resultados. Na solução de equações lineares, este fenômeno decorre do fato da matriz de coeficientes estar próxima da singularidade (BEZ, 2013).

Dada uma sequência de números reais $a_k = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, a condição numérica nos indica a convergência desta sequência, e ela é calculada a partir de alguma norma (1, 2 ou a norma infinita).

Corolário: Se uma matriz for bem condicionada utilizando qualquer destas normas, então ela será bem condicionada para qualquer norma utilizada.

A condição de uma matriz J , utilizando uma norma p (qualquer das três já referidas) é definida como:

$$\text{cond}(J, p) = \|J\|_p \times \|J^{-1}\|_p \quad (4.20)$$

Isto é, o produto da norma p da matriz J multiplicado pela norma p da inversa da matriz J .

No caso da solução de sistemas do tipo $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$, onde \mathbf{A} é uma matriz definida positiva, o número de condicionamento é dado por (que corresponde a uma simplificação da expressão 4.20):

$$\text{cond}(J) = \frac{\lambda_M}{\lambda_m} \quad (4.21)$$

onde λ_M é o máximo autovalor e λ_m é o mínimo autovalor da matriz J .

Corolário: Quanto maior o valor do condicionamento da matriz J , pior é o condicionamento.

Em caso que a matriz J for retangular, que é o caso da matriz Jacobiana do problema de localização, podemos obter seu condicionamento numérico a partir da expressão:

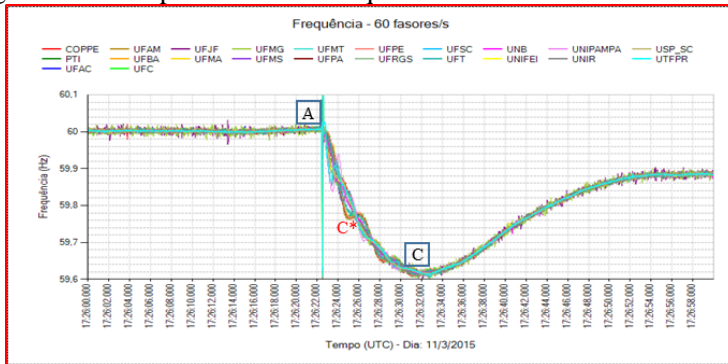
$$\text{cond}(J^t J) = [\text{cond}(J)]^2 \quad (4.22)$$

Em resumo, uma forma de avaliar a precisão dos epicentros estimados é a partir do comportamento da sua condição numérica.

4.4 ESTIMADOR DA CARGA/GERAÇÃO INTERROMPIDA

O comportamento da frequência elétrica após um evento, como uma perda de geração, irá provocar um decaimento na frequência. A recuperação da frequência é devido à resposta da carga-frequência (ou resposta da carga) e da resposta dos governadores, como é mostrado na Figura 45.

Figura 45 – Comportamento da frequência durante um evento sistêmico



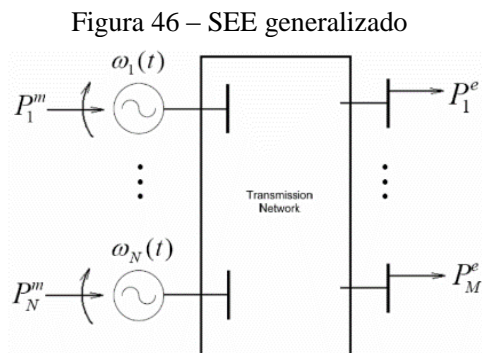
Foi visto em uma série de dados históricos de eventos no SIN, que a recuperação da frequência elétrica ocorreu nos 7-9 segundos seguintes ao começo do evento.

A característica da carga com a frequência irá afetar a mudança na frequência durante um breve momento, mas seu efeito é quase desprezível comparado com a resposta dos governadores. Contudo, a interação entre ambas respostas é ligeiramente diferente para cada SEE (XIA, 2009).

No desenvolvimento de um método para a estimação da carga/geração interrompida, é explorado o valor inicial da taxa de variação da frequência df/dt após um evento. Esta taxa de variação da frequência após o evento é proporcional ao desbalanço de carga e também depende da inércia do SEE (TERZIJA et al., 2002).

4.4.1 Baseado na Equação de Oscilação

A magnitude de um evento pode ser eficientemente estimada utilizando a equação de oscilação no instante $t=0^+$ (ponto A) até o ponto C, devido que nesse intervalo a taxa de variação da frequência não é afetada predominantemente pela resposta das turbinas, governadores, e controles suplementares como o CAG. Em um SEE real, um conjunto de máquinas alimentam várias cargas mediante um sistema de transmissão, como é ilustrado na Figura 46.



Para o i -ésimo gerador:

$$\frac{2H_i}{f_n} \frac{df_i}{dt} = p_{mi} - p_{ei} = \Delta p_i, \quad (4.23)$$

onde:

p_{mi} : potência mecânica da turbina (pu).

p_{ei} : potência elétrica (pu).

Δp_i : desbalanço carga – geração.

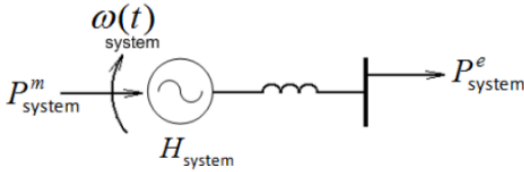
H_i : constante de inércia (s).

f_i : frequência (Hz).

f_n : valor nominal da frequência (no SIN é 60Hz).

Este sistema pode ser reduzido a um sistema de uma máquina equivalente como é mostrado na Figura 47.

Figura 47 – Representação equivalente de um SEE generalizado



A equação de oscilação equivalente para um SEE:

$$\Delta p = \sum_{i=1}^N \Delta p_i = \frac{2 \sum_{i=1}^N H_i}{f_n} \frac{df_c}{dt} = \xi \cdot \frac{df_c}{dt} \quad (4.24)$$

$$f_c = \frac{\sum_{i=1}^N H_i \cdot f_i}{\sum_{i=1}^N H_i} \quad (4.25)$$

$$\xi = \frac{2}{f_n} \cdot \sum_{i=1}^N H_i \quad (4.26)$$

onde:

f_c : frequência do centro de inércia equivalente do SEE.

ξ : coeficiente que representa a inércia total do SEE.

Num primer momento, o parâmetro ξ é experimentalmente determinado mediante:

- O valor inicial da taxa de variação da frequência df/dt , obtido a partir dos registros dos SMSF utilizando os pontos A e C ou A e C*.
- O valor real do desbalanço de potência elétrica após a ocorrência do evento, obtido mediante consultas com os operadores de SEE.

Uma vez conhecidos os valores df/dt e Δp , o coeficiente ξ é calculado conforme segue:

$$\xi = \frac{\Delta p}{df_c/dt} \quad (4.27)$$

No segundo momento da metodologia. A carga/geração interrompida é obtida diretamente do produto do parâmetro ξ com a taxa de variação da frequência.

Desde um ponto de vista conceitual, a inércia total do sistema, irá depender das características do parque gerador, que por sua vez depende da estação, do dia e do horário do evento.

Esta métrica é utilizada também pela equipe FNET para estimar a potência interrompida durante eventos sistêmicos no sistema Norte-americano (YE ZHANG, 2014).

A Inércia da Máquina corresponde à massa do gerador - turbina acopladas mediante um eixo sob rotação, matematicamente é definido como a relação entre a energia rotacional a velocidade nominal w_0 , e a potência base S_b :

$$H = \frac{W_k}{S_b} = \frac{\frac{1}{2} J \cdot w_0^2}{S_b} = \left[\frac{MW \cdot seg}{MVA} \right] = [seg], \quad (4.28)$$

Com relação à capacidade da própria máquina, a inércia de máquinas hidráulicas é maior do que inércia de máquinas térmicas. Máquinas eólicas não contribuem com a inércia do sistema.

Com relação à capacidade do SEE, a inércia do sistema depende das características do parque gerador. No SIN, devido a sua predominância hídrica, a inércia das máquinas hidráulicas é maior do que a inércia das máquinas térmicas. Na Tabela 11, são mostrados alguns valores para ilustrar esta afirmação.

Tabela 11 – Exemplo ilustrativo sob a magnitude da inércia da máquina

Unit	S_{mach}	W_k	H_{mach} $= W_k / S_{mach}$	H_{sys} $= W_k / S_{sys}$ $S_{sys} = 100$
H1	9	23.5	2.61	0.235
H9	86	233	2.71	2.33
H18	615	3166	5.15	31.7
F1	25	125.4	5.02	1.25
F11	270	1115	4.13	11.15
F21	911	2265	2.49	22.65

Fonte: (MC CALLEY, 2009)

O cálculo da inércia da máquina na base do sistema é:

$$H_{maq-SEE} = H_{maq} \cdot \frac{S_{maq}}{S_{SEE}} \quad (4.29)$$

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente capítulo foram apresentadas as propostas deste trabalho na análise de eventos usando sincrofasores, as quais constituem uma abordagem interessante comparada à tradicional abordagem mediante a tecnologia SCADA, sendo dividido em propostas na detecção, classificação, localização e na estimação da carga/geração interrompida.

No campo da detecção de eventos, foi proposto um detector ajustável de eventos. Sendo utilizado o FMMTV na etapa de pré-processamento, seguido do método do limiar estático na etapa de detecção, enriquecido com a possibilidade de alterar o valor do limiar, prezando assim detectar a propagação do evento.

No campo da classificação de eventos, é proposto um classificador automático baseado em um PMC. Esta técnica foi escolhida por suas habilidades em classificar padrões, generalizar o conhecimento adquirido e tolerar dados incompletos, o que é o caso dos dados obtidos pelos SMSF atuais. Os passos necessários para o desenvolvimento do classificador neural de eventos foram agrupados em 7 blocos: projetar o sistema, selecionar casos de eventos, extrair (ou simular) seus dados, executar um pré-processamento dos dados, configurar a rede PMC, realizar o treinamento - validação da rede, e por fim testar a rede PMC. Como resultados adicionais obtidos, ressaltam-se a criação de uma base de dados de eventos históricos do tipo PG, RC, DLT e OS no período 7/2010 – 7/2015. Ressalta-se que a metodologia aqui proposta é independente da metodologia de detecção de eventos exposto no parágrafo anterior.

No campo da localização de eventos, foram propostas três contribuições. A primeira é um programa de visualização automática da propagação sistêmica do evento. A segunda é a implementação de um algoritmo para determinar a região mais provável do evento, usando as coordenadas geográficas das PMUs, e outro algoritmo para a visualização automática desta região. A última corresponde ao estudo da singularidade da matriz Jacobiana do problema de localização, quando utilizado o algoritmo em um SEE real onde se tem redundância de PMUs por local geográfico. Este estudo foi abordado mediante o monitoramento da condição numérica da matriz Jacobiana.

No campo da estimação da carga/geração interrompida, uma técnica de estimação baseada na equação de oscilação do sistema é

abordada. O estimador de carga/geração interrompida proposto, estima este valor a partir do produto da taxa de variação da frequência (usando os pontos A e C da curva, ou os 4 primeiros segundos após o evento) com o parâmetro ξ , que é uma estimativa da inércia total do sistema, e que é ajustado a partir de dados históricos para um SEE específico.

O processo de validação das metodologias implementadas é descrito no próximo capítulo.

5 RESULTADOS

Neste capítulo é realizado uma síntese dos principais resultados computacionais utilizando dados reais de SMSF. Inicialmente são apresentados os ambientes computacionais desenvolvidos que contemplam as metodologias propostas. A seguir, são descritos os ambientes de experimentação, constituídas por SMSF instalados tanto na baixa como na alta tensão de SEE reais.

As metodologias propostas foram testadas em inúmeros eventos ocorridos no período 01/2014 até 09/2015. Os principais resultados na detecção/localização são organizados de forma a avaliar:

- A homogeneidade da rede elétrica.
- A utilização de PMUs redundantes.
- O limiar de potência (MW) para a utilização da metodologia.
- A localização de eventos do tipo DLT.

A análise 4 inicialmente mostra o conjunto de padrões extraídos para o treinamento da rede neural, formado por eventos reais do SIN e finalmente avaliar o classificador de eventos implementado utilizando a *toolbox* de redes neurais do Matlab (*ANN Toolbox*) para a classificação de eventos do tipo PG/RC.

Por fim, a última análise é dedicada a avaliar a qualidade da estimação da carga/geração interrompida mediante a proposta baseada na equação de oscilação equivalente sendo aplicado em dados do SIN Brasil e do SIC Chile.

5.1 AMBIENTES COMPUTACIONAIS DESENVOLVIDOS

Algumas considerações são feitas de modo a delimitar o escopo dos experimentos:

- A metodologia de detecção de eventos utiliza o FMMTV para o pré-processamento do sinal, logo utiliza o método de detecção mediante uso de limiares ajustáveis, prezando a detecção da propagação eletromecânica do evento.
- O localizador da região utiliza de forma direta as coordenadas geográficas das PMUs e os tempos de detecção da onda eletromecânica, que é resultado do algoritmo de detecção.
- O classificador neural de eventos é completamente independente do algoritmo de detecção de eventos proposto.

Para a obtenção de resultados, foi utilizado a *ANN Toolbox* do Matlab2011a de 64 bits.

- A estimação da carga/geração interrompida é feita mediante o produto da inércia do sistema e da taxa de variação da frequência, este último calculado utilizando os pontos A e C da curva da frequência elétrica.

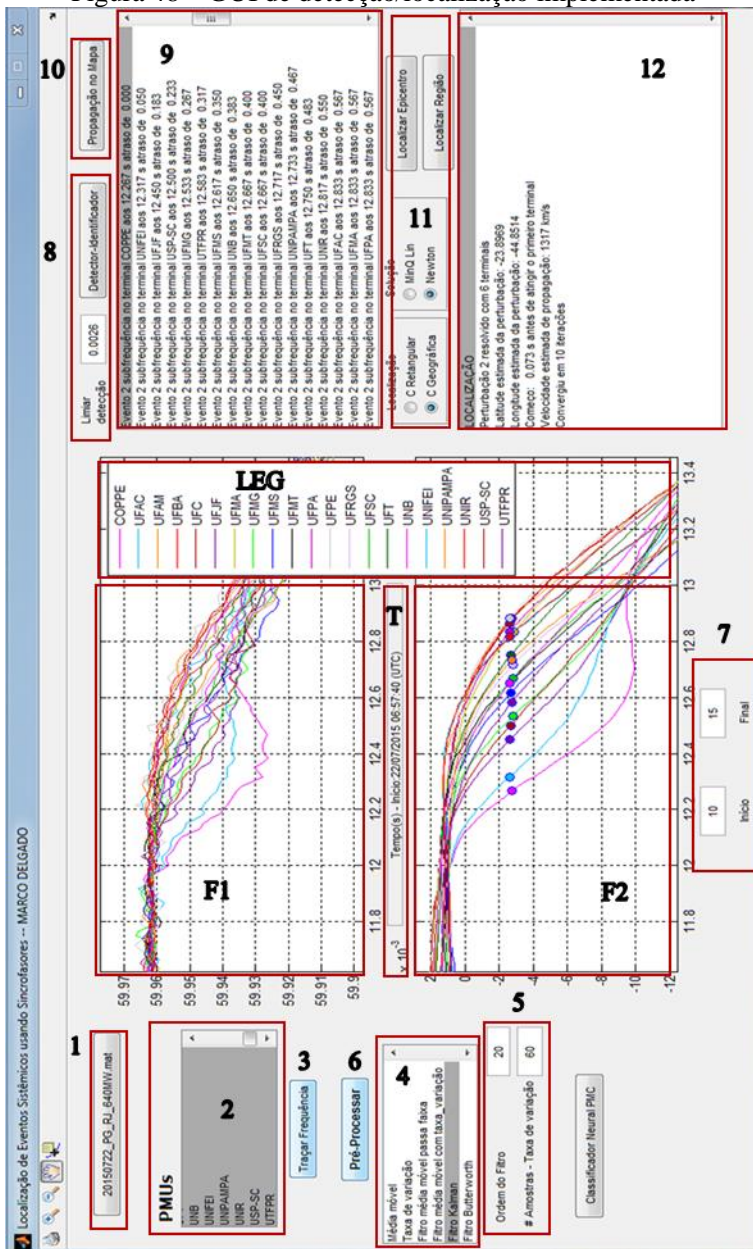
5.1.1 Interface gráfica para a detecção/ localização

As metodologias de detecção e localização propostas foram integradas em uma interface gráfica de usuário (*Graphical User Interface* - GUI) implementada em linguagem Matlab®. Além disso, esta GUI contempla também os desenvolvimentos anteriores a este trabalho:

- (ZIMMER, 2013): média móvel (MM), taxa de variação (TV), FMMPF, FMMTV, FK, limiar de detecção, identificador baseado em regras e a estimativa do epicentro.
- (ZANDONAI, 2014): filtro de *Butterworth* (FB), detecção via critério da derivada nula, limiar ajustável de detecção.
- As contribuições deste trabalho: carregamento de PMUs da consulta extraída, seleção das PMUs de interesse, técnicas de pré-processamento, alteração direta do FMMTV, seleção do evento a analisar, visualização da propagação do evento, localização em coordenadas geográficas do epicentro ou da região mais provável e monitoração da condição numérica.

A seguir é descrito como funciona a GUI implementada de acordo com a Figura 48.

Figura 48 – GUI de detecção/localização implementada

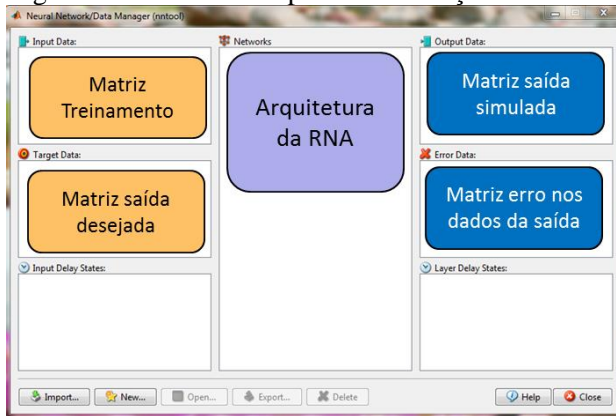


- (1) *Carregar consulta* – o arquivo .mat criado com o programa medfasee.m é carregado para análise.
- (2) *Lista de PMUs* – todas as PMUs que compõem a consulta são apresentadas, podendo conter dados advindos de diferentes SMSF. Esta tabela dá flexibilidade ao analista de selecionar as PMUs para análise.
- (3) *Traçar gráfico da frequência* – carregado no campo F1.
- (4) *Filtragem* – As três técnicas de pré-processamento propostas por (ZIMMER, 2013) e o Filtro de Butterworth (ZANDONAI, 2014) são listadas para selecionar a técnica para gerar o sinal indicador.
- (5) *Parâmetros do FMMTV* – possibilidade de alteração direta de seus parâmetros.
- (6) *Botão para executar o pré-processamento da frequência* – carregado no campo F2. A identificação da PMU com as figuras F1 e F2 é mostrada no campo legenda LEG.
- (7) *Ajuste do zoom do eixo temporal* – facilidade para ajuste do zoom horizontal de ambos gráficos.
- (8) *Limiar ajustável de detecção de eventos* – útil para a detecção correta da propagação eletromecânica do evento. Após a execução do botão Detector-Identificador é executado o identificador existente (baseado em regras) sendo mostradas o total de eventos detectados no campo 9, onde a maioria destes correspondem a falsos eventos.
- (9) *Seleção do evento a localizar* – neste campo o analista seleciona o evento real do seu interesse.
- (10) *Visualização automática da propagação sistêmica* – Em um mapa geo-elétrico do Brasil é apresentado os instantes de detecção do evento pelas PMUs permitindo ao analista entender a propagação eletromecânica do evento.
- (11) *Região mais provável do evento* – permite selecionar as coordenadas a serem usadas na metodologia de localização, e se é desejado obter um epicentro ou uma região. É mostrado um mapa com a localização e as PMUs utilizadas. No caso da opção *epicentro*, é mostrado o comportamento da condição numérica da matriz Jacobiana até a convergência.
- (12) *Relatório do resultado da localização* – é mostrado os valores das incógnitas obtidas variando o # de PMUs.

5.1.2 Ambiente para a classificação de eventos

O ambiente de treinamento, validação e teste do classificador neural proposto foi possível utilizando o *toolbox* de redes neurais do Matlab (*ANN Toolbox*). O problema aqui tratado é de reconhecer o tipo do evento a partir do reconhecimento do padrão característico do evento na frequência elétrica, sendo usado uma arquitetura Perceptron de múltiplas camadas (PMC). A Figura 49 mostra a interface gráfica existente na *ANN Toolbox*, que é executado mediante o comando *nntool*.

Figura 49 – Rede neural para Classificação de Eventos



A camada de entrada possui 1200 entradas como explicado na seção 4.2.1. A camada neural escondida está conformada por 20 neurônios, cujo número foi selecionado devido a ter um bom desempenho em (MARKHAM, 2012). A camada neural de saída está composta, neste caso particular por 2 neurônios, já que esta rede PMC foi treinada para reconhecer unicamente eventos tipo PG e RC. O número de neurônios da camada neural de saída poderá mudar de 1 a 4, quando forem tratados todos os tipos de eventos.

5.1.3 Ambiente para a estimação da carga/geração

Fórmulas bem simples foram implementadas em um arquivo Excel, para a estimação da carga interrompida após um evento do tipo PG ou RC. A estimativa da taxa de variação da frequência precisa da obtenção da frequência no ponto A, e no ponto C*. O coeficiente ξ_{SIN}

representa a inércia total do sistema, é obtido a partir de uma média de estimativas de eventos históricos recentes da forma seguinte:

No SIC – Chile, são utilizados valores de ξ_{SIN} com um mês de atraso com relação ao evento.

No SIN – Brasil, são utilizados valores de ξ_{SIN} com três meses de atraso com relação ao evento.

A fórmula de estimação da carga interrompida proposta é a seguinte:

$$\Delta P = 100 \cdot \xi_{SIN} \cdot \frac{df_c}{dt} = 100 \cdot \xi_{SIN} \cdot \left| \frac{f_A - f_{C^*}}{t_A - t_{C^*}} \right| \quad (5.1)$$

onde:

f_A : frequência do sistema prévio ao evento.

f_{C^*} : frequência do sistema 4 segundos após f_A .

ξ_{SIN} : Inércia total do sistema.

Os “ t_A ” e “ t_{C^*} ” correspondem ao instante temporal (em segundos) correspondentes às frequências utilizadas na formulação.

5.2 AMBIENTE DE EXPERIMENTAÇÃO

O ambiente de experimentação onde foram validadas as implementações computacionais desenvolvidas no presente trabalho, é composta pelos SMSF, instalados na baixa e na alta tensão, que conformam o projeto MedFasee, sendo estes descritos sucintamente na seqüência.

5.2.1 SMSF MedFasee BT do Brasil

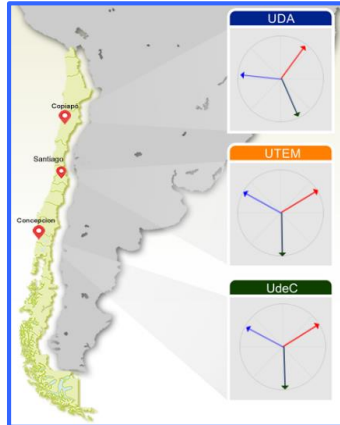
Como já mencionado no capítulo 1, conta atualmente com 22 PMUs e também recebe os dados da PMU do PTI, possuindo um total de 23 pontos para o monitoramento da dinâmica do SIN.

5.2.2 Protótipo SMSF MedFasee BT do Chile

O protótipo SMSF MedFasee BT do Chile conta atualmente com 3 PMUs instaladas em universidades nas cidades de Copiapó, Santiago e Concepción, permitindo o monitoramento da dinâmica do SIC – Sistema

Interconectado Central Chileno, conforme mostrado na Figura 50. Cabe ressaltar que a frequência nominal no Chile é 50Hz.

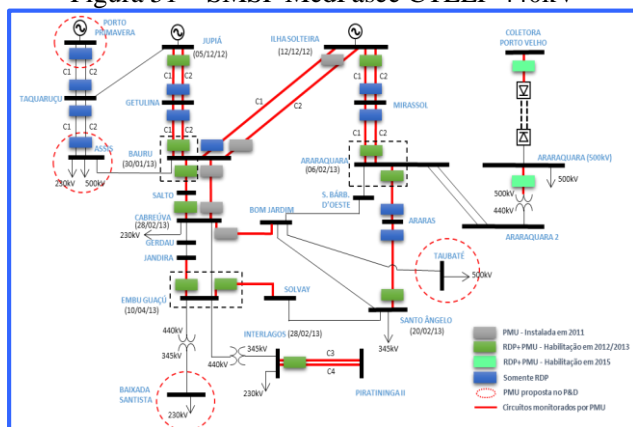
Figura 50 – SMSF MedFasee BT do Chile



5.2.3 SMSF MedFasee CTEEP

Trata-se de um protótipo de SMSF instalado no sistema de transmissão de 440kV da CTEEP – Companhia Transmissora do Estado de São Paulo. Neste trabalho, foram utilizados os dados da frequência elétrica registrada por 2 PMUs na SE Bauru e 2 PMUs na SE Cabreúva. Este protótipo é mostrado na Figura 51.

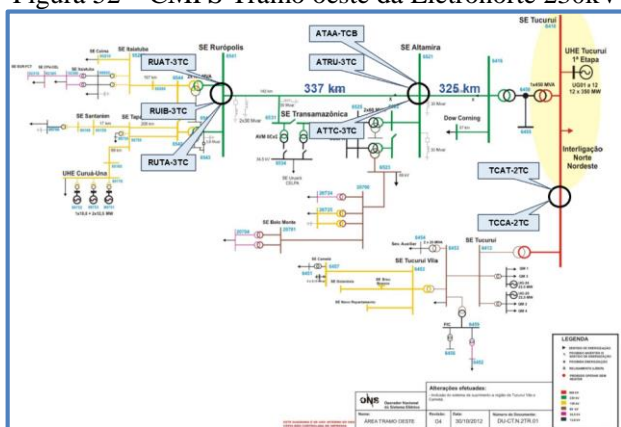
Figura 51 – SMSF MedFasee CTEEP 440kV



5.2.4 CMFS da Eletronorte

O centro de medição fasorial síncrona (CMFS) trata-se de um protótipo de SMSF instalado no sistema de transmissão de 230kV da área Tramo Oeste da empresa Eletronorte (BERNARDES, et al. 2015). Neste trabalho foram utilizados os dados da frequência elétrica registrada por 2 PMUs na SE Tucuruí, 3 PMUs na SE Altamira e 3 PMUs na SE Rurópolis, conforme mostrado na Figura 52. Estes dados foram obtidos mediante consultas realizadas ao PDC ONS em maio 2015.

Figura 52 – CMFS Tramo oeste da Eletronorte 230kV



5.3 ANÁLISE 1: QUALIDADE DA DETECÇÃO/LOCALIZAÇÃO

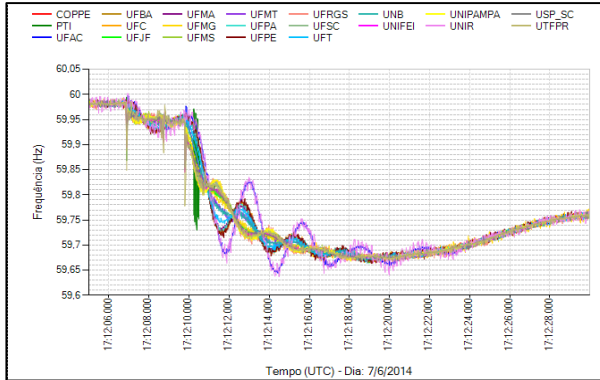
O objetivo desta análise é avaliar a melhoria na estimação do epicentro quando ao invés de usar todas as PMUs que registraram o evento, é usado a metodologia da região do evento proposta na seção 4.3.2.3. Isto nos permitirá vislumbrar qual de todas as estimativas é a mais próxima ao local do evento e qual é a dependência da estimativa com a homogeneidade do sistema elétrico na região onde ocorreu o evento. A taxa de medição é de 60 sincrofasores por segundo.

5.3.1 Caso A: Quando a região do evento é homogênea

No dia 7/6/2014 às 14h12m (hora de Brasília) houve o desligamento automático do Bipolo 1 do Elo CC Foz/Ibiúna (Eletrobrás Furnas) devido à queda das torres 317 e 318 da LT 600kV Foz de

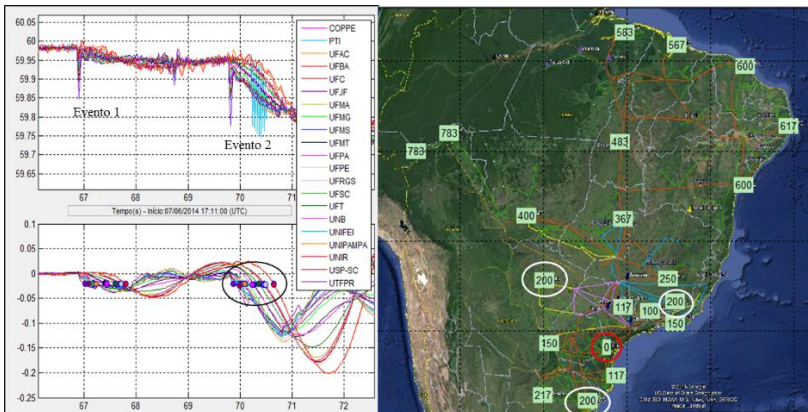
Iguaçu/Ibiúna C1 e C2. Como consequência a transmissão no ELO CC Foz/Ibiúna ficou limitada ao valor de 2800MW por critério de segurança operativa do SIN. Na Figura 53 é apresentado o comportamento da frequência do SIN.

Figura 53 – Análise 1.A: Frequência elétrica – PG Elo Itaipu 50 Hz



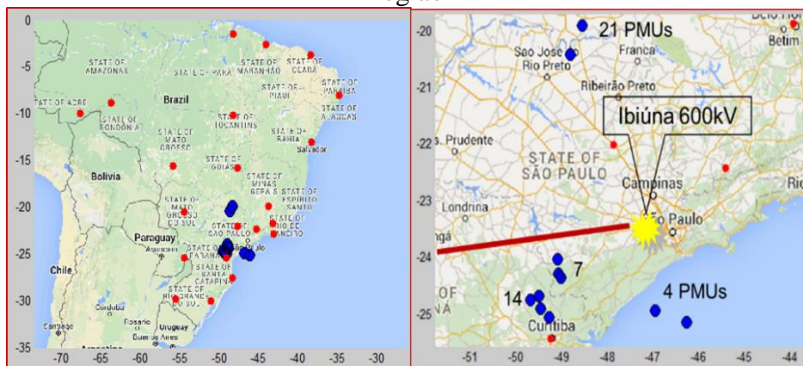
O evento foi registrado por 21 PMUs, incluindo a PTL. Na Figura 54 é mostrado o resultado após a etapa de detecção e os tempos de propagação sistêmica do evento em milissegundos no SIN (evento 2). O pré-processamento é mediante o FMMTV. A detecção do evento, por tratar-se de um evento de grande porte ($\approx 2800\text{MW}$), é mediante o limiar preestabelecido.

Figura 54 – Análise 1.A: a) detecção do evento e b) propagação sistêmica do evento



A metodologia de detecção de eventos detectou dois eventos, o primeiro corresponde a chaveamentos, e o segundo evento (dentro do círculo preto) corresponde a perda do bipolo, sendo este último o evento analisado. Observa-se que o evento de interesse atingiu inicialmente a UTFPR (Curitiba, PR) e aos 200ms já tinha afetado os subsistemas Sul e Sudeste. Na Figura 55 é mostrado a estimativa da região do evento.

Figura 55 – Análise 1.A: a) região estimada do evento e b) zoom da região



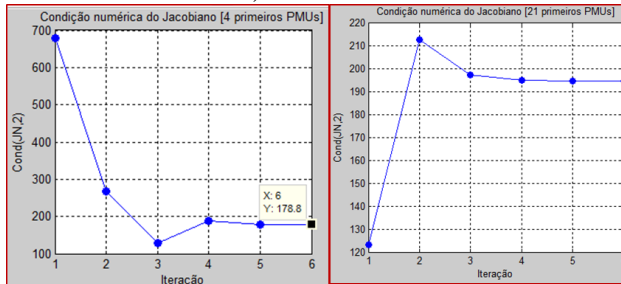
As melhores soluções foram obtidas ao utilizar as primeiras 9 PMUs. A solução utilizando as 4 primeiras PMUs obteve um epicentro a 140 km de distância do local real do evento (SE Ibiúna). A solução utilizando todas as PMUs obteve um epicentro a 460km. Na Tabela 12 é mostrada a evolução da velocidade de propagação do evento.

Tabela 12 – Análise 1.A: Evolução da velocidade do evento

# PMUs considerada na solução	Velocidade (km/s)	Observação
4 e 5	650	PMUs do Paraná e São Paulo
7, 8 e 9	3300	PMUs dos subsistemas Sul e Sudeste
11, 12, 13 e 14	3100	PMUs dos subsistemas Sul, Sudeste e Centro Oeste
20 e 21	2622	Todas as PMUs do SIN

O comportamento da condição numérica da matriz Jacobiana, $cond(J)$, para as soluções que utilizaram 4 e 21 PMUs é mostrado na Figura 56. O número de condição da solução com 4 PMUs foi reduzindo até 179 após 6 iterações. No caso com todas as PMUs aumentou até 195 na 6ª iteração. A solução com 4 PMUs foi a mais bem condicionada.

Figura 56 – Análise 1.A: $cond(J)$ para os casos a) com as 4 primeiras PMUs e b) com todas as PMUS



Finalmente, o tempo computacional gasto pela interface gráfica na execução desta análise 1.A. é de 1'15", sendo que maior parte desse tempo é utilizado em carregar a consulta, seleccionar as PMUs, ajustar o eixo temporal e configurar a localização do evento.

5.3.2 Caso B: Quando a região do evento não é homogênea

Estudos iniciais para estimar a localização de eventos consideraram como premissa que a velocidade de propagação eletromecânica do evento é constante em todas as direções, desconsiderando a topologia elétrica e as inércias do sistema. Porém, os SEE reais são unicamente homogêneos em determinadas regiões (XIA, 2009). Na Figura 57 é estudada a propagação sistêmica de ocorrências reais no SIN, a partir do algoritmo de visualização da propagação de um evento sistêmico.

Figura 57 – PG UN Angra I com 640MW no RJ, 22/7/2015 às 3h57m



Na Figura 57 desligou a UN Angra I no Rio de Janeiro (RJ) com 640MW. Duas observações podem ser extraídas deste evento:

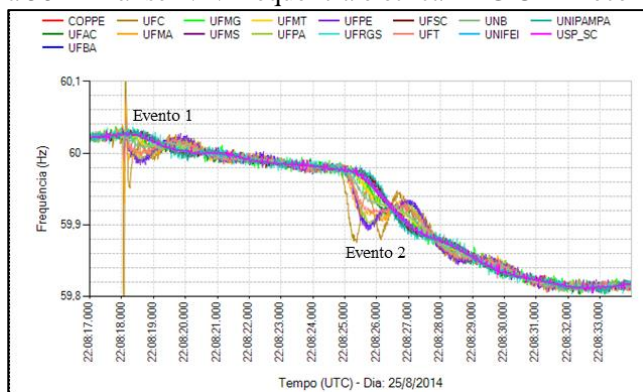
- A UFJF (Juiz de Fora – MG) detectou o evento aos 183 ms, e a UNIFEI (Itajubá – MG) aos 50 ms. Ainda ambas localidades estejam a distancias próximas do local real do evento, o evento se propaga mais rápido até UNIFEI por existirem linhas em 500kV, enquanto o caminho até a UFJF é composto por linhas em 345kV.
- Aos 400 ms após a detecção do evento pela COPPE (Rio de Janeiro – RJ) o evento foi detectado de forma simultânea pelos terminais UFMT (Cuiabá – MT) e UFSC (Florianópolis – SC). A rapidez com que o evento se propagou até Cuiabá é devido a menor inércia concentrada nessa região comparada com a maior inércia existente até Santa Catarina.

Conforme a equação (3.6), a velocidade da propagação eletromecânica, é afetada pela distribuição da inércia das máquinas e da impedância da rede vista no nó elétrico da PMU. Em conclusão, a propagação de ondas eletromecânicas após um evento sistêmico no SIN tem natureza heterogênea.

No dia 25/08/2014 às 19h8m18s (hora de Brasília), houve a desconexão da UTE Pecém I com 365MW, como consequência a

frequência elétrica do SIN desceu até 59,98Hz. Posteriormente às 19h8m25s houve a desconexão da UTE Pecém II com 720MW, com uma redução na frequência até 59,81Hz. O local do evento é próximo à cidade de Fortaleza, no estado do Ceará. Na Figura 58 é apresentada a frequência durante o evento.

Figura 58 – Análise 1.B: Frequência elétrica – PG UTE Pecém I e II

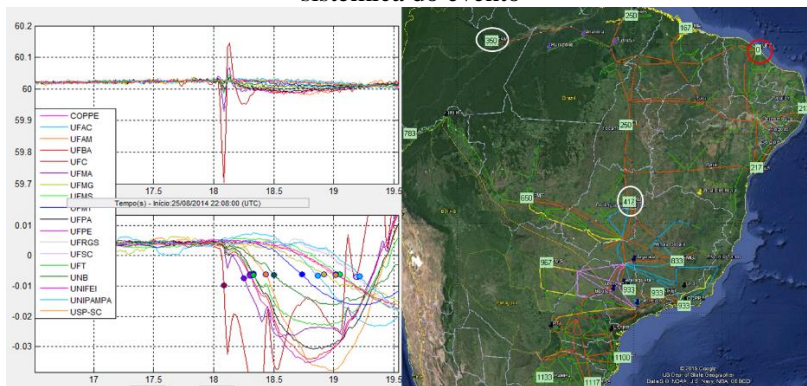


O evento foi registrado por 17 PMUs. O evento analisado é o evento 1, a qual corresponde à PG de 365MW.

Na Figura 59 é mostrado o resultado após a etapa de detecção e os tempos (em milissegundos) de propagação sistêmica do evento. O pré-processamento é mediante o FMMTV. A detecção do evento, por tratar-se de um evento pequeno onde a frequência pré-evento não era plana, foi mediante um limiar ajustado em 0,006.

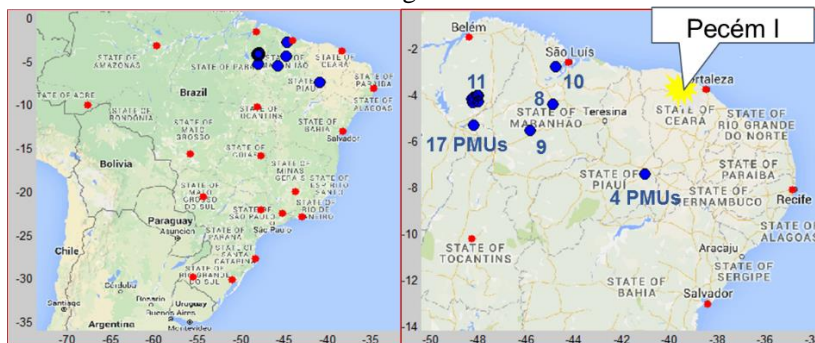
Foram detectadas 27 falsas sinalizações em uma janela de tempo de 3 minutos. Destas 27, um total de 14 foram detectadas por um número maior ou igual a 4 PMUs, as quais iriam produzir resultados de mau condicionamento numérico se fosse executado o algoritmo de localização proposto.

Figura 59 – Análise 1.B: a) detecção do evento e b) propagação sistêmica do evento



Observa-se que o evento, atingiu inicialmente a UFC (Fortaleza, CE) e aos 350ms já tinha afetado os subsistemas Nordeste e Norte. Na Figura 60 é mostrado a estimativa da região do evento.

Figura 60 – Análise 1.B: a) região estimada do evento e b) zoom da região



A topologia da região Nordeste e a pouca presença de PMUs nesta região dificultam a localização do evento. A melhor solução, utilizando as 4 primeiras PMUs, obteve um epicentro a 493 km de distância do local real do evento (SE Pecém). A solução utilizando todas as PMUs obteve um epicentro a 1000km de distância. Todos os epicentros apontam na região compreendida entre o leste do Pará, Maranhão e o Piauí.

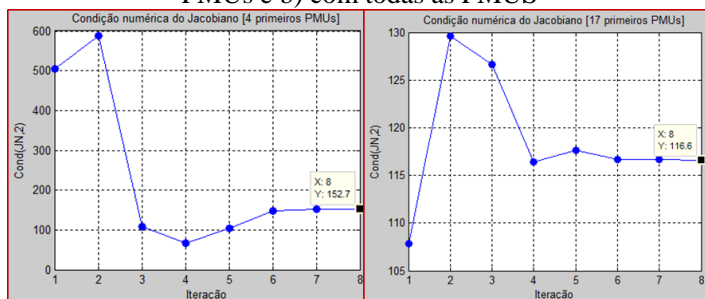
Na Tabela 13 é mostrada a evolução da velocidade de propagação do evento.

Tabela 13 – Análise 1.B: Evolução da velocidade do evento

# PMUs consideradas na Solução	Velocidade (km/s)	Observação
4	902	PMUs do subsistema Nordeste
8	2673	PMUs dos subsistemas NE e Norte e DF
9	1486	PMUs dos subsistemas NE, N e Centro Oeste
10	2776	PMUs dos subsistemas NE, N, CO e Acre - Rondônia
[11 - 17]	1557	Todas as PMUs do SIN

O comportamento da condição numérica da matriz Jacobiana, $cond(J)$, para as soluções que utilizaram 4 e 21 PMUs é mostrado na . O número de condição da solução com 4 PMUs foi reduzindo até 153 após 8 iterações. No caso com todas as PMUs estabilizou em 117 na 8ª iteração.

Figura 61 – Análise 1.B: $cond(J)$ para os casos a) com as 4 primeiras PMUs e b) com todas as PMUS



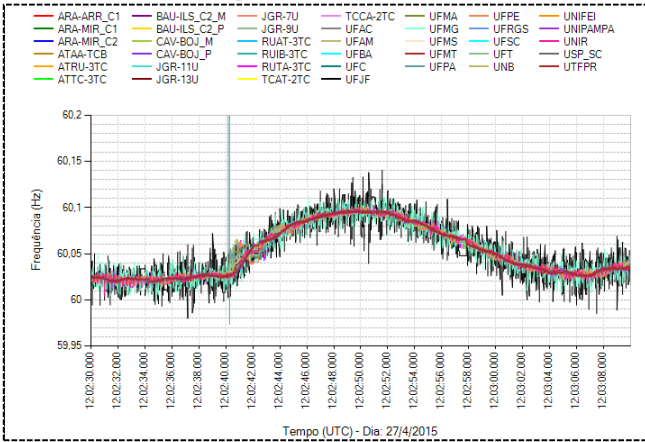
Finalmente, o tempo computacional gasto pela interface gráfica na execução desta análise 1.B. é de 1'35". O aumento com relação ao caso 1.A. é causado pelo maior número de iterações requeridas.

5.4 ANÁLISE 2: QUANTO AS PMUS UTILIZADAS

Um estudo de caso é realizado para avaliar o efeito que tem a utilização de PMUs redundantes na estimativa da região do evento. A taxa de medição para todos os casos é de 60 fasores por segundo.

No dia 27 de abril de 2015, às 9h2m40.25s (hora de Brasília) ocorreu o desligamento automático da subestação Utinga 230kV (Eletrobrás Eletronorte), no estado de Pará. Como consequência, foram interrompidos aproximadamente 300MW de carga da CELPA na região metropolitana de Belém. Na Figura 62 é apresentado o comportamento da frequência do SIN.

Figura 62 – Análise 2: Frequência elétrica – RC no Belém de 300MW

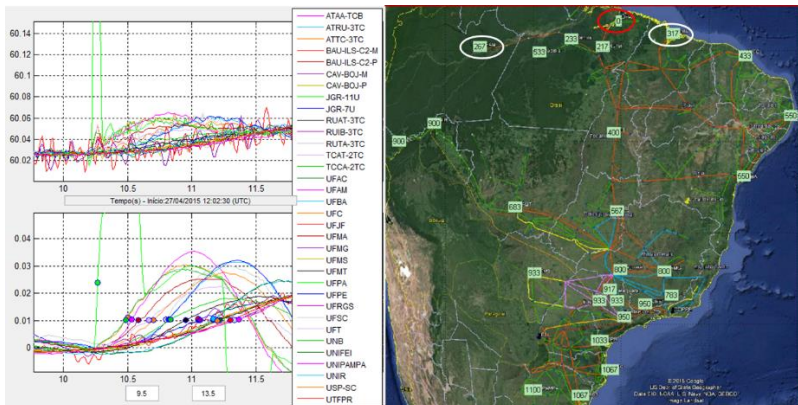


5.4.1 Caso A: SMSF com informações redundantes

O evento foi registrado por 36 PMUs, 2 PMUs em Bauru, 2 em Cabreúva, 2 em Jaguará no São Paulo (Sudeste) e 2 em Tucuruí, 3 em Altamira e 3 em Rurópolis no Pará (Norte).

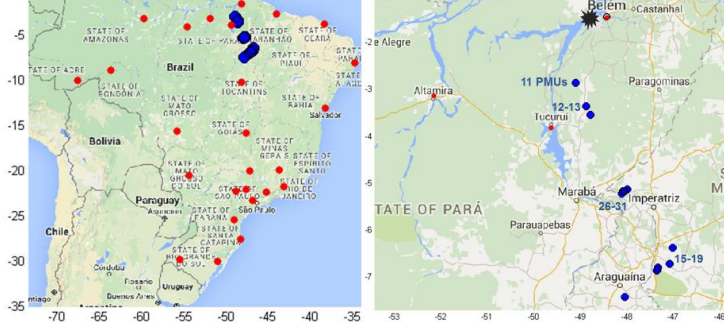
Na Figura 63 é mostrado o resultado após a etapa de detecção e os tempos de propagação sistêmica do evento no SIN. O pré-processamento é mediante o FMMTV. A detecção do evento, por tratar-se de um evento pequeno, foi com um limiar ajustado em 0,01.

Figura 63 – Análise 2.A: a) detecção do evento e b) propagação sistêmica do evento



Observa-se que o evento, atingiu inicialmente a UFPA (Belém, PA) e aos 400 ms já tinha afetado o subsistema Norte. Na Figura 64 é mostrado a estimativa da região do evento.

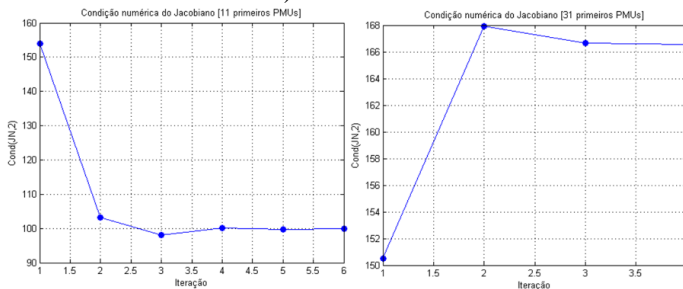
Figura 64 – Análise 2.A: a) região estimada e b) zoom da região



Quando foram utilizados as primeiras 4 - 10 PMUs ocorreu mau condicionamento numérico da matriz Jacobiana, inviabilizando a obtenção de estimativas nesse intervalo. A solução utilizando as 11 primeiras PMUs obteve um epicentro a 200 km de distância do local real do evento (SE Utinga). A solução utilizando todas as PMUs obteve um epicentro a 430 km.

O comportamento da condição numérica da matriz Jacobiana, $cond(J)$, para as soluções que utilizaram 11 e 31 PMUs é mostrado na Figura 65. O número de condição da solução com 11 PMUs foi reduzindo até 100 após 6 iterações. No caso com todas as PMUs aumentou até 167 na 2ª iteração. A solução com 11 PMUs foi a mais bem condicionada.

Figura 65 – Análise 2.A: $cond(J)$ para os casos a) com as 11 primeiras PMUs e b) com todas as PMUs

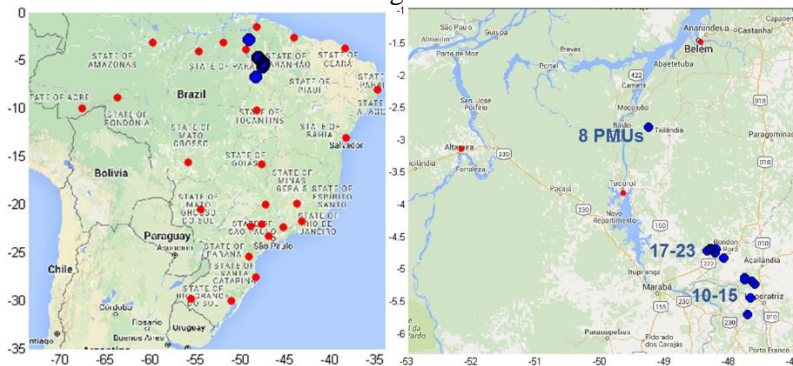


Finalmente, o tempo computacional gasto pela interface gráfica na execução desta análise 2.A. é de 2'30", o aumento expressivo no tempo é causado principalmente pelo maior número de PMUs utilizado.

5.4.2 Caso B: SMSF sem informações redundantes

O algoritmo da região sinalizou mau condicionamento numérico da matriz Jacobiana quando são utilizadas as primeiras 4 PMUs. O motivo disto é a topologia elétrica radial até a UFAM cujo tempo de detecção foi bastante rápido pela pouca inércia existente comparado ao resto do SIN. Na Figura 66 é mostrado a estimativa da região do evento.

Figura 66 – Análise 2.B: a) região estimada do evento e b) zoom da região



A utilização de mais de uma PMU no exemplo apresentado não trouxe benefícios, no que tange a redução do erro de estimação na localização ou no tempo de processamento computacional. Isto foi confirmado em outros eventos do SIN no ano 2015.

Finalmente, o tempo computacional gasto pela interface gráfica na execução desta análise 2.B. é de 1'15", metade do tempo gasto na análise do caso 2.A.

5.5 ANÁLISE 3: OUTROS TIPOS DE ANÁLISES

Um estudo interessante a realizar, era estudar o valor mínimo da interrupção de carga/geração capaz de criar uma onda eletromecânica que pudesse se propagar pelo SIN, e ser detectável e localizável pela metodologia. Outro tema interessante era testar a metodologia de

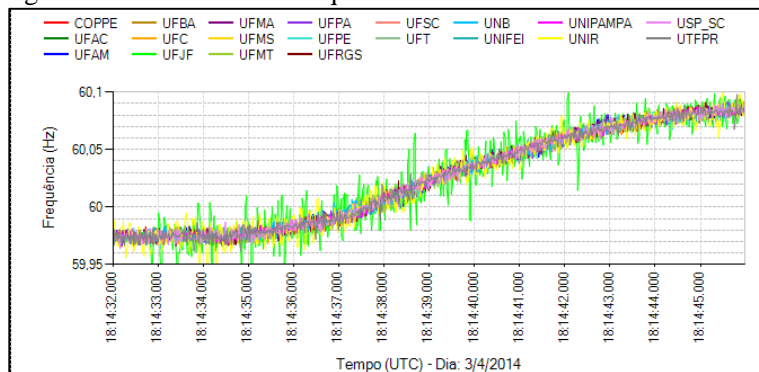
detecção/localização em eventos do tipo Desligamento de linha de transmissão (DLT). Estes dois estudos são detalhados a seguir. A taxa de medição para todos os casos é de 60 fasores por segundo.

5.5.1 Caso A: Limiar de potência para a detecção/localização

Para isto, foram analisados eventos de pequeno porte, para visualizar seu impacto no sinal da frequência elétrica registrada mediante um SMSF. Os valores da carga do SIN, foram obtidos a partir de informações disponibilizadas pelo ONS.

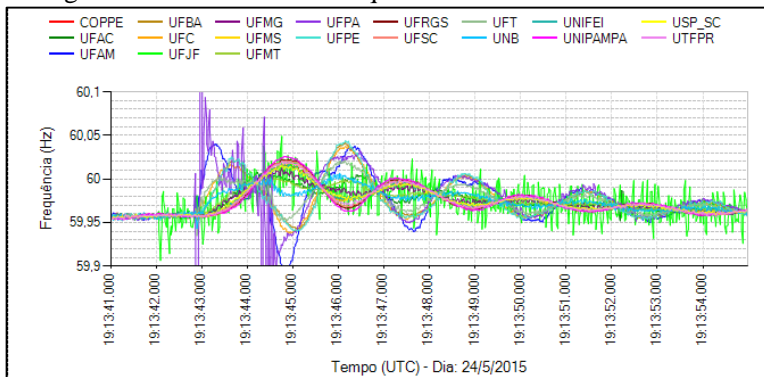
Quinta-feira 3/4/2014 às 15:14:35 (hora de Brasília): desligamento automático dos transformadores da SE Pirapora 2 e o desligamento da LT 138kV Pirapora1/Várzea da Palma, interrompendo-se 300MW de carga em Minas Gerais (Sudeste), equivalente a 0,39% da carga do SIN nesse momento. Na Figura 67 é apresentado o comportamento da frequência do SIN. O evento NÃO foi detectável.

Figura 67 – Análise 3.A: Frequência – RC no Minas Gerais 300 MW



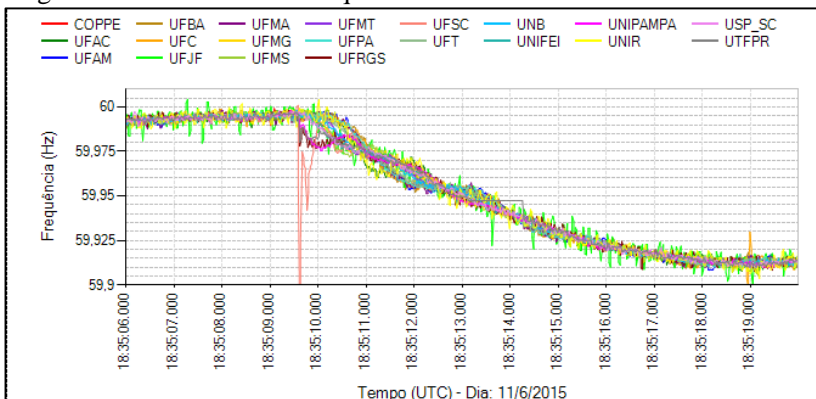
Domingo 24/5/2015 às 16h13m43s (hora de Brasília): desligamento dos transformadores da SE Guamá e TR-2 e da SE Utinga, interrompendo-se 300MW de carga em Belém (Norte), equivalente a 0,47% da carga do SIN. Na Figura 68 é apresentado o comportamento da frequência do SIN. O evento foi detectável/localizável.

Figura 68 – Análise 3.A: Frequência – RC no Belém 300 MW



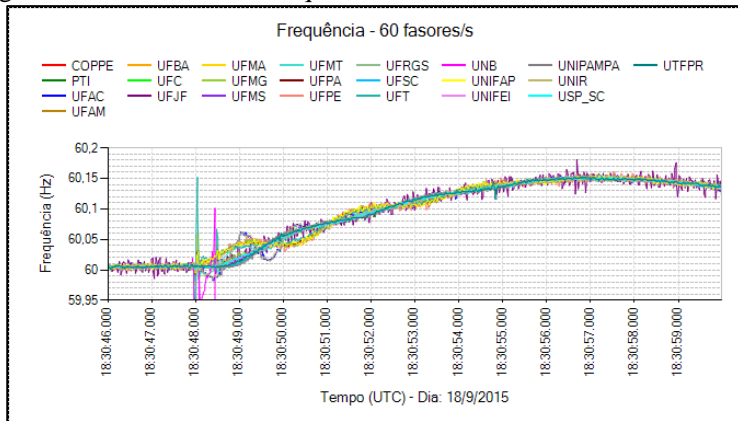
Quinta feira 11/6/2015 às 15:35 (hora de Brasília): interrupção de 335MW de geração na UTE Jorge Lacerda no Santa Catarina (Sul), equivalente a 0,5% da carga. Na Figura 69 é apresentado o comportamento da frequência do SIN. O evento foi detectável/localizável.

Figura 69 – Análise 3.A: Frequência – PG em Santa Catarina 335 MW



Sexta feira 18/9/2015 às 15:30:48 (hora de Brasília): rejeição de 390MW de carga no DF (Centro Oeste). Equivalente a 0,52% da carga do SIN nesse dia. Na Figura 70 é apresentado o comportamento da frequência do SIN. O evento foi detectável/localizável.

Figura 70 – Análise 3.A: Frequência – RC no Distrito Federal 390 MW



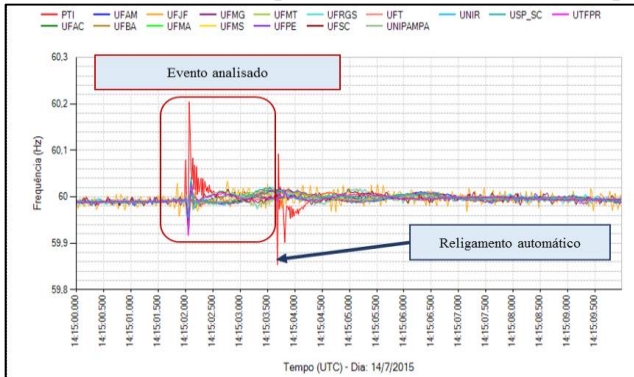
Em conclusão, nas regiões Norte/Sul são factíveis detectar eventos sistêmicos no sinal da frequência, quando o montante de carga interrompida for superior ao 0,47% da carga do sistema nesse momento (usualmente cargas superiores a 300MW). Nas regiões Sudeste/Centro Oeste são factíveis detectar eventos sistêmicos no sinal da frequência, quando o montante de carga interrompida for superior ao 0,52% da carga do sistema nesse momento (usualmente cargas superiores a 400MW).

Isto devido a elevada inércia de máquinas e carga concentrada no centro do Brasil, comparado com os extremos, a qual afeta a propagação eletromecânica do evento.

5.5.2 Caso B: Localização de eventos tipo DLT

No dia 14 de julho de 2015 às 11h15m (hora de Brasília), ocorreu o desligamento automático da LT 765kV Foz/Ivaiporã C3 do sistema de transmissão de 765kV da UHE Itaipu 60Hz com posterior religamento automático, como é mostrado na Figura 71. Esta perturbação produziu uma oscilação sistêmica bem amortecida que se propagou pelo SIN.

Figura 71 – Análise 3.B: Frequência– DLT 765kV Foz/Ivaiporã C3



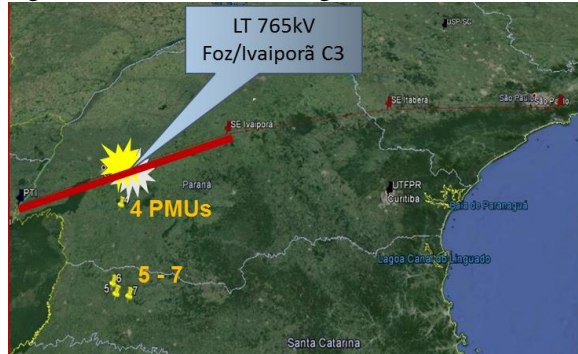
O evento foi registrado por 17 PMUs. A visualização da propagação sistêmica é mostrada na Figura 72. O evento atingiu inicialmente a PTI (Foz, PR), aos 317 ms já tinha afetado toda a região Sul e aos 1,33 s todo o SIN.

Figura 72 – Análise 3.B: Propagação sistêmica do evento



A velocidade de propagação do evento obtido foi de 730 km/s, a qual corresponde a velocidade de propagação na região Sul. Na Figura 73 são visualizados os epicentros estimados e o local real do evento.

Figura 73 – Análise 3.B: Região estimada do evento



O melhor resultado obtido foi a solução utilizando as 4 primeiras PMUs a quase **72km** do trajeto da LT Foz/Ivaiporã C3. O tempo computacional gasto pela interface gráfica na execução desta análise foi de: 1'45".

5.6 ANÁLISE 4: CLASSIFICADOR NEURAL DE EVENTOS

Esta análise visa vislumbrar a qualidade do classificador de eventos proposto. É importante salientar que o trabalho se encontra em fase de andamento, onde resultados parciais já foram obtidos. Estes resultados são mostrados na sequência.

5.6.1 Caso A: Resultados Parciais

O conjunto de eventos utilizados no treinamento da rede neural com arquitetura *feed forward* PMC, foram extraídos dos servidores do SMSF MedFasee selecionando eventos reais no SIN, que ocorreram no período 03/2010 – 07/2015. A maioria destes eventos foram confirmados com os agentes do SIN. A lista de todos os eventos detectados e extraídos mediante as ferramentas computacionais desenvolvidas neste trabalho são mostrados na Tabela 14.

Tabela 14 – Separação dos casos extraídos reais do SIN para cada tipo de evento

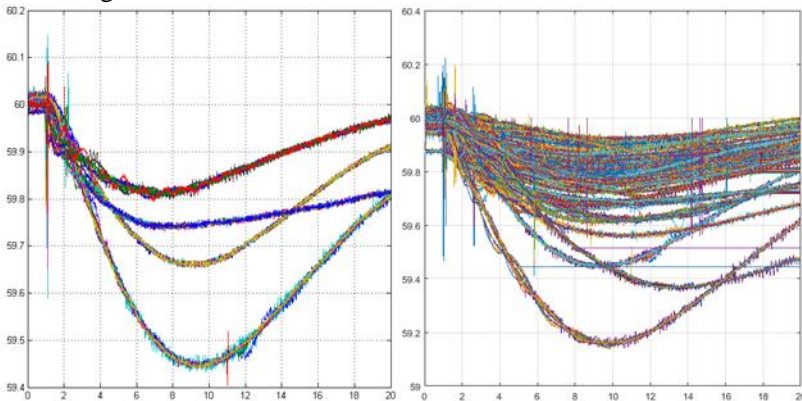
Tipo de Evento	Abrev.	# Eventos	# Casos de Treinamento
Perda de Geração	PG	55	876
Rejeição de Carga	RC	29	421
Desligamento de Linha de Transmissão	DLT	17	46
Bloqueio do Elo 600kV DC Madeira	OS	7	14
Total de Eventos e Registros para treinar a rede:		108	1357

O conjunto de casos de treinamento é constituído pelos registros de todas as PMUs que detectaram o evento. O total de casos extraídos são 1357, distribuídos: PG (65%), RC (31%), DLT (3%) e OS (1%).

O elevado número de casos PG/RC é devido a sua natureza sistêmica, sendo detectado em média por 16 PMUs. O reduzido número de casos DLT/OS são devidos a que seu efeito na frequência é visualizado próximo ao local do evento, sendo detectado em média por 3 PMUs.

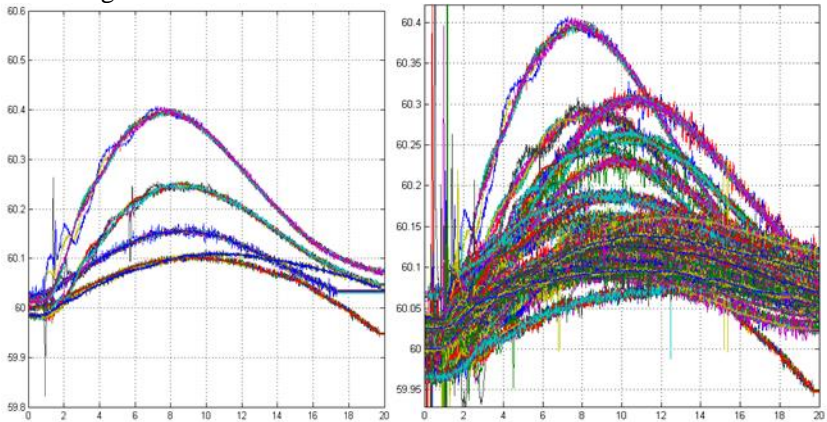
Foram gerados gráficos de todos os casos de treinamento para cada tipo de evento. Cada caso de treinamento tem amplitude diferente e correspondem a registros reais de eventos no SIN Brasil. Os 876 casos PG são mostrados na Figura 74 e obedecem a eventos reais com perda de geração intempestiva $\geq 450\text{MW}$. A maioria deles confirmado mediante comunicação direta com o ONS.

Figura 74 – Análise 4.A: PG - casos reais do SIN extraídos



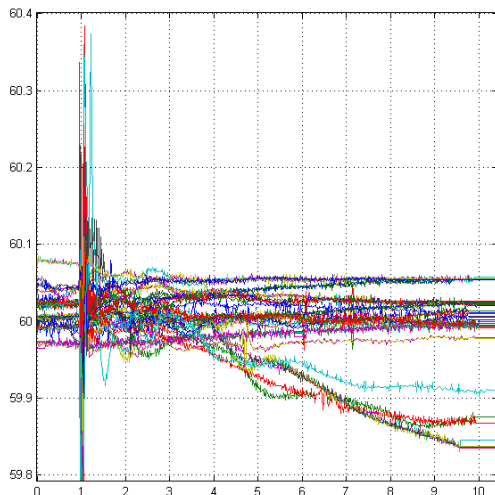
Os 421 casos RC são mostrados na Figura 75 e obedecem a eventos reais, informados no IPDO do ONS, com rejeição de carga $\geq 300\text{MW}$.

Figura 75 – Análise 4.A: RC - casos reais do SIN extraídos



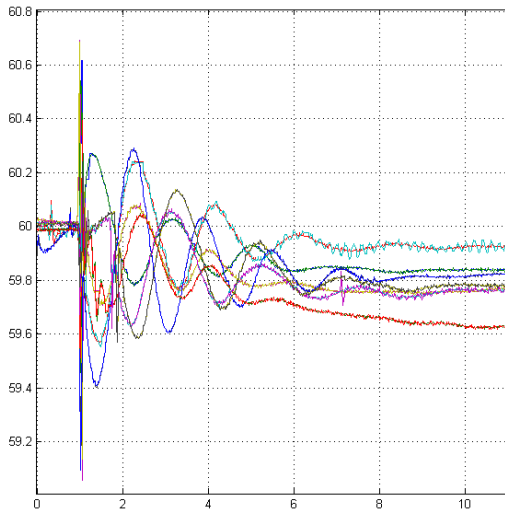
Os 46 casos DLT mostrados na Figura 76 e obedecem a eventos reais, informados no IPDO, de linhas de transmissão com nível de tensão $\geq 500\text{kV}$. O 47% dos casos correspondem à linha 765kV da UHE Itaipu.

Figura 76 – Análise 4.A: DLT - casos reais do SIN extraídos



Os 14 casos OS são mostrados na Figura 77 e obedecem a eventos reais de oscilações interárea no subsistema Acre/Rondônia, causadas pelo bloqueio do Elo 600kV Madeira. Alguns informados no IPDO e outros confirmados via comunicação direta com o ONS.

Figura 77 – Análise 4.A: OS - casos reais do SIN extraídos



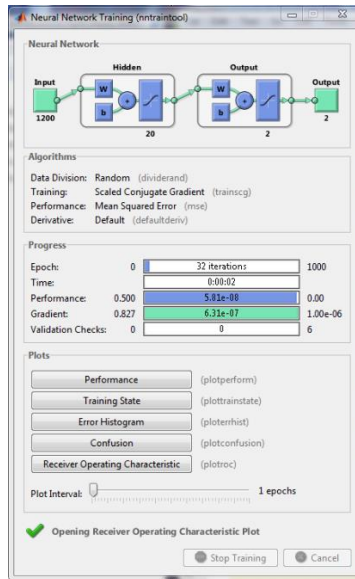
5.6.2 Teste utilizando a *toolbox* de Redes Neurais do Matlab

Neste trabalho foi usada uma única camada neural escondida com 20 neurônios. O total de casos extraídos foi dividido em 3 conjuntos todos diferentes entre si: treinamento (70%), validação (15%) e teste (15%). Esta divisão dos dados é bastante empregada no treinamento de redes PMC, com o objetivo de dar maior percentagem de casos para o treinamento da rede e assim ela possa extrair as características internas destes casos.

Os valores dos outros parâmetros internos como pesos sinápticos, tipo de função de ativação e algoritmo de treinamento são aqueles em que a *toolbox* tem configuração padrão. Foi utilizada a função *patternnet* (*pattern recognition network*) do Matlab, para classificar eventos do tipo PG e RC. Ela utiliza como função de ativação padrão, a tangente hiperbólica tanto na camada neural escondida como na camada neural de saída.

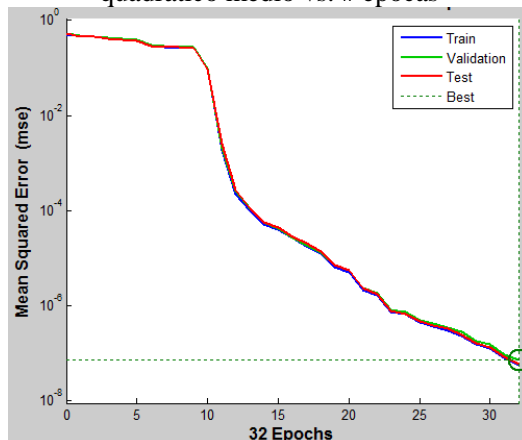
Foi utilizado a versão de 64 bits do Matlab 2011a porque quando utilizado a versão de 32 bits do Matlab 2013a, ocorreu um problema de explosão de dados. Durante o processo de treinamento, a *ANN Toolbox* apresenta a época, o tempo de execução, o valor do desempenho e do gradiente a cada iteração, conforme a Figura 78.

Figura 78 – Análise 4.B: Processo de treinamento da ANN Toolbox



A rede PMC treinada convergiu em 32 épocas, a curva de aprendizagem atualizada a cada época é mostrada na Figura 79.

Figura 79 – Análise 4.B: Curva de treinamento do PMC: Erro quadrático médio vs. # épocas



A avaliação do classificador é feita por meio da comparação entre o resultado obtido na classificação e a indicação real do tipo de evento ao qual corresponde. Esta Tabela 15 é conhecida como matriz de confusão.

Tabela 15 – Análise 4.B: Matriz de confusão para avaliação do classificador de eventos 1 (PG) e 2 (RC)

		Training Confusion Matrix			Validation Confusion Matrix		
Output Class		Target Class			Target Class		
		1	2		1	2	
1		602 66.4%	0 0.0%	100%	135 69.2%	0 0.0%	100%
2		0 0.0%	305 33.6%	100%	0 0.0%	60 30.8%	100%
		100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%

		Test Confusion Matrix			All Confusion Matrix		
Output Class		Target Class			Target Class		
		1	2		1	2	
1		139 71.3%	0 0.0%	100%	876 67.5%	0 0.0%	100%
2		0 0.0%	56 28.7%	100%	0 0.0%	421 32.5%	100%
		100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%

O resultado mostrado na Tabela 15 indica que o classificador PG/RC consegue efetivamente diferenciar entre PG e RC em 100% de todos os casos de treinamento, validação e teste.

5.7 ANÁLISE 5: QUALIDADE DA ESTIMAÇÃO DA CARGA

Nesta seção são apresentados os resultados de estudos da estimação da carga interrompida em eventos do tipo PG e RC ocorridos no SIN – Brasil e no SIC - Chile.

No caso do SIN foram analisados eventos ocorridos no período janeiro de 2014 – setembro de 2015. A montante da carga interrompida é obtida do informativo IPDO do operador do sistema ONS. Este informe comparte informações de RC/PG divulgadas somente quando a ocorrência envolve corte de carga. Isto motivou que o autor realizasse algumas visitas previamente coordenadas com funcionários do agente, a fim de conseguir uma base de dados suficiente para a avaliação desta proposta.

Os dados de geração interrompida são mais confiáveis que os dados de carga interrompida. Isto porque eventos de geração interrompida

envolvem uma unidade geradora específica de um agente, e eventos de carga interrompida pode comprometer várias subestações envolvendo diversos agentes do setor elétrico. O informativo IPDO não indica a distribuição horária do parque gerador, útil para ter uma ideia da inércia total do sistema.

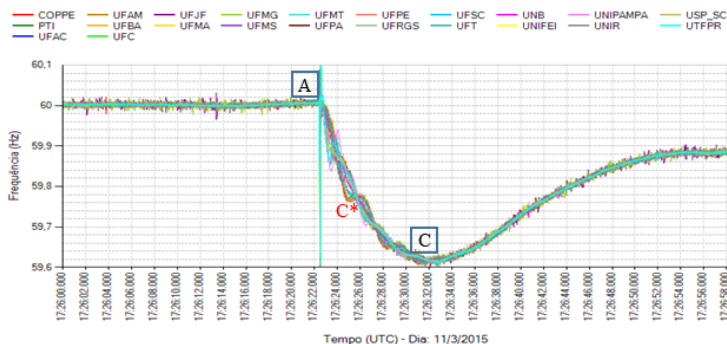
No caso do SIC – Chile, o montante da carga interrompida é obtida do informativo do operador do CDEC-SIC. Além disso, este informativo indica em um gráfico a distribuição horária do parque gerador, o que nos permite ter uma ideia da magnitude de inércia diária presente no sistema chileno. Os eventos começam desde o dia 16/9/2015, já que foi em setembro de 2015 que começaram a ser registrados eventos reais neste SEE, conforme mostrado no Apêndice D. A frequência nominal do Chile é 50Hz.

A seguir são mostrados dois estudos de caso no SIN e um estudo de caso no SIC-Chile para validar a metodologia aqui proposta.

5.7.1 Brasil: Evento PG do dia 11/03/2015

Na quarta-feira 11/03/2015 às 14h26m (hora de Brasília), desligaram-se duas unidades geradoras da UHE Itaipu 60Hz com um total de 1330MW (fonte: Itaipu), de acordo com a Figura 80.

Figura 80 – Análise 5.1: Frequência elétrica – PG 1330 MW da UHE Itaipu 60 Hz



Considerando os pontos A (aos 22,5'') e C (aos 32''), a taxa de variação da frequência obtida foi de 0,041Hz/s.

Para a estimativa da inércia total do SIN durante o evento, foram utilizados 4 eventos confirmados de PG que ocorreram durante dias da

semana e em horários próximos ao horário do evento, conforme mostrado na Tabela 16.

Tabela 16 – Análise 5.1: Estimativa da Inércia ξ do SIN mediante eventos históricos

Dia	Fecha	Horario UTC	ΔP (MW)	df/dt (Hz/s)	ξ (MJ/0,01Hz)	Usina / Local do Evento
segunda-feira	19/01/2015	16h49m	634	0,025	254	UN Angra I - Rio de Janeiro
segunda-feira	19/01/2015	16h54m	1212	0,028	439	UHE Ney Braga (Segredo) - Paraná
segunda-feira	19/01/2015	18h23m	697	0,018	379	Desligamento Elo Madeira - RO / SP
terça-feira	03/02/2015	19h29m	1627	0,054	302	UHE Itaipu 60Hz - Paraná

A inércia utilizada foi a média aritmética das inércias dos dias mostrados na tabela, ou seja 343 MJ/0,01Hz. O montante de carga estimado durante o evento foi:

$$\Delta P = 0,041 \frac{Hz}{s} \cdot 343 \frac{MJ}{0,01Hz} = 1399MW$$

O erro absoluto na estimativa com relação a geração real interrompida foi de 5%.

Se for usado a média ponderada das inércias, temos:

$$\xi_{average} = \frac{\sum_{i=1}^4 \xi_i \times \Delta P_i}{\sum_{i=1}^4 \Delta P_i} = 347MJ / 0,01Hz$$

O montante de carga estimada durante o evento foi:

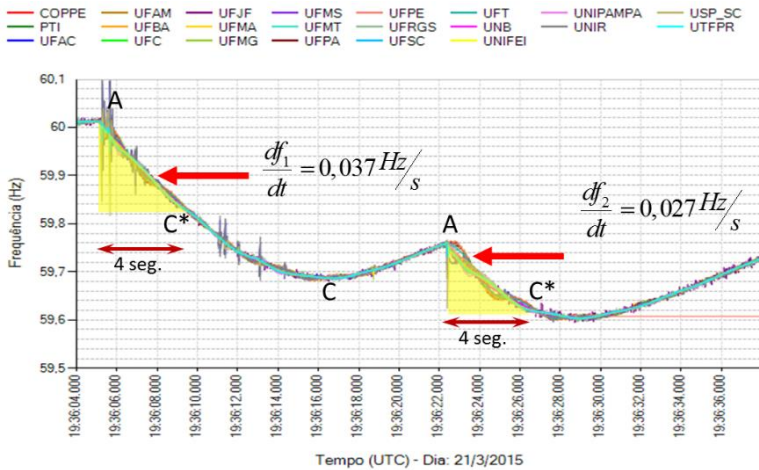
$$\Delta P = 0,041 \frac{Hz}{s} \cdot 347 \frac{MJ}{0,01Hz} = 1423MW$$

O erro absoluto na estimativa com relação a geração real interrompida foi de 7%.

5.7.2 Brasil: Evento PG cascata do dia 21/03/2015

No sábado 21/03/2015 às 16h36m (hora de Brasília), desligou-se o Elo Madeira DC 600kV Porto Velho (RO) / Araraquara (SP), com um total de 2450MW (fonte: ONS). Na Figura 81 é apresentado o comportamento da frequência do SIN durante a perturbação.

Figura 81 – Análise 5.2: Frequência elétrica – Desligamento do Elo 600kV Madeira com 2450 MW



Da Figura 81 é observável que a redução da potência trazida pelo Elo Madeira foi em dois blocos, o primeiro aos 5,35s e o segundo aos 22,4s, ressalta-se pela Figura 81 que a primeira redução de potência foi maior que a segunda redução. Ao invés de utilizar o ponto C, iremos substituí-lo pelo ponto C*, com isto um cálculo mais exato do valor inicial da taxa de variação da frequência df/dt após o evento é obtido. Isto porque o ponto C é afetado tanto pela inércia como pela sensibilidade da carga com a frequência.

Considera-se o ponto A (aos 5,35s) e o ponto C* (4s após o ponto A). De maneira similar para a outra perda de geração, considera-se o ponto A (aos 22,4s). As taxas de variação da frequência obtida, a partir dos registros sincrofásoriais, foram 0,037 Hz/s no 1º evento e 0,027 Hz/s no 2º evento. Para a estimativa da inércia total do SIN, foram utilizados 3 eventos históricos, que ocorreram anteriormente no mesmo mês de março, conforme mostrado na Tabela 17.

Tabela 17 – Análise 5.2: Estimativa da Inércia ξ do SIN mediante eventos históricos

Dia	Fecha	Horario UTC	ΔP (MW)	df/dt (Hz/s)	ξ (MJ/0,01Hz)	Usina / Local do Evento
quarta-feira	11/03/2015	17h26m	1330	0,041	326	UHE Itaipu 60Hz - Paraná
sexta-feira	13/03/2015	18h1m	626	0,015	405	SE Alcantara 138kV - Rio de Janeiro
segunda-feira	16/03/2015	22h32m	972	0,026	370	UTE Gov. Leonel Brizola - Rio de Janeiro

A inércia utilizada, considerando a média das inércias dos dias mostrados na Tabela 17 foi 367 MJ/0,01Hz.

O montante de carga estimada durante o 1º evento foi:

$$\Delta P = 0,0368 \frac{\text{Hz}}{\text{s}} \cdot 367 \frac{\text{MJ}}{0,01\text{Hz}} = 1350\text{MW}$$

O montante de carga estimada durante o 2º evento foi:

$$\Delta P = 0,0274 \frac{\text{Hz}}{\text{s}} \cdot 367 \frac{\text{MJ}}{0,01\text{Hz}} = 1005\text{MW}$$

O valor estimado da potência total interrompida é: 2355MW. O erro absoluto na estimativa foi de 4%.

Se for usado a média ponderada das inércias, temos:

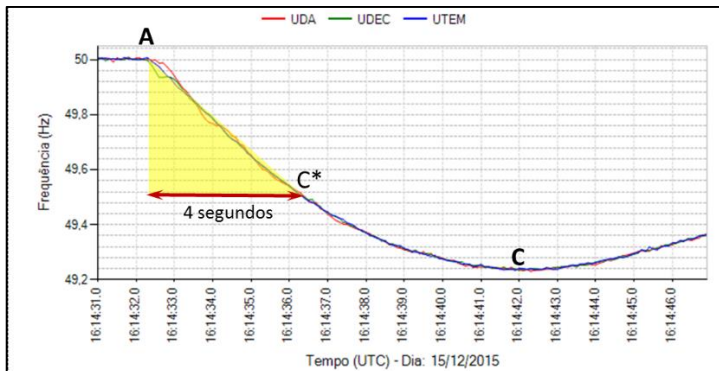
$$\xi_{average} = 358\text{MJ} / 0,01\text{Hz}$$

Os montantes de carga estimada durante o 1º e 2º evento foram: 1317 e 980 MW. O valor estimado da potência total interrompida é: 2297 MW. O erro absoluto na estimativa foi de 6,2%.

5.7.3 Chile: Evento PG no dia 15/12/2015

No dia terça feira 15/12/2015 às 13h15m (hora de Santiago), ocorreu o desligamento da usina *Bocamina II* com 310MW (fonte: CDEC). O evento foi registrado pelo protótipo conforme mostrado na Figura 82.

Figura 82 – Análise 5.3: Chile – Frequência elétrica – PG da Usina *Bocamina II* com 310 MW



Dos registos sincrofasoriais são obtidos o ponto A (aos 32,4''): 50,001 Hz; e o ponto C (aos 42''): 49,242 Hz. A taxa de variação da frequência calculada, usando esses pontos, foi de 0,079Hz/s.

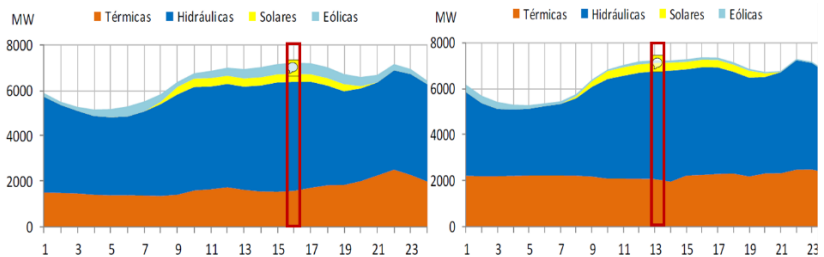
Para a estimação da inércia total do SIC durante o evento, foi considerado o valor de 276 MJ/0,1Hz, que corresponde à inércia do SIC estimado durante o evento da terça feira 01/12/2015, conforme mostrado na Tabela 18. Foi selecionado este evento por ter ocorrido o mesmo dia e num horário próximo ao horário do evento.

Tabela 18 – Análise 5.3: Estimativa da Inércia ξ do SIC mediante eventos históricos

Dia	Fecha	Horario UTC	ΔP (MW)	df/dt (Hz/s)	ξ (MJ/0,1Hz)	Central/Carga
Terça-feira	01/12/2015	18h53m	95	0,034	276	Central Los Pinos

A estimativa de carga interrompida foi de 219MW, distante da magnitude real da perda de geração (310MW). Foi então sugerido o estudo da inércia do sistema, a fim de descobrir se existiram mudanças significativas devido à proximidade com o feriado do Natal e Ano Novo. A comparação do parque gerador do SIC nos dias 1 e 15/12/2015, obtido do informativo do operador, é mostrado na Figura 83.

Figura 83 – Análise 5.3: Chile – Parque gerador do SIC: 01/12/2015 e 15/12/2015



O quadro vermelho corresponde ao horário do evento. A carga do SIC em ambos dias foi semelhante. Da figura do parque gerador no dia 15/12/2015, é perceptível que existia maior inércia devido ao desligamento de usinas eólicas e operação de um maior número de usinas térmicas (cor laranja). Considerando um incremento em 40% da inércia

total, o montante de carga estimada foi de 306MW, o erro absoluto na estimação com relação a geração real interrompida foi de 1%.

De maneira similar, na estimação da carga interrompida na ocorrência do dia 17/12/2015 às 11h14m (usina Ventanas 2 com 170MW), foi considerado um incremento em 50% no valor da inércia do SIC em um dia similar, sendo obtido 168MW, com um erro absoluto de 1%.

5.8 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo foram validadas as metodologias de detecção, classificação, localização e estimação da carga propostas no Capítulo 4.

Inicialmente foram tratados os ambientes computacionais desenvolvidos. A avaliação conjunta das metodologias de detecção e localização é realizada mediante uma interface gráfica (GUI) desenvolvida em Matlab. A avaliação do conjunto de dados a usar no treinamento foi abordada mediante a utilização da *toolbox* de Redes neurais do Matlab (*ANN Toolbox*), a arquitetura de rede neural utilizada é a PMC com uma única camada neural escondida. Ressalta-se o esforço executado para selecionar casos adequados de eventos, extrair esses dados, criação de uma matriz única para cada tipo de evento para finalmente criar a matriz de treinamento que é o principal dado de entrada para a utilização de redes neurais. Para a avaliação da metodologia proposta de estimação da carga/geração interrompida, foram implementadas fórmulas simples em um arquivo Excel que permitem estimar a potência interrompida a partir do ingresso dos pontos A e C (ou C*) com o qual estima-se a taxa de variação da frequência, o que é multiplicado pela inércia total do sistema, que é estimada a partir de uma média de registros históricos de eventos já processados.

Logo foram contextualizados os ambientes de experimentação utilizados, sendo eles dois SMSF instalados na rede de baixa tensão (MedFasee BT Brasil e MedFasee BT Chile) e dois SMSF instalados na rede de alta tensão (MedFasee CTEEP e CMFS Eletronorte).

Na primeira análise foram realizados estudos de caso para avaliar a melhoria na estimativa, a dependência do resultado com a homogeneidade do SIN, o tamanho da região, a evolução da velocidade de propagação do evento e a evolução do cond(J) ao longo das iterações.

Em conclusão, a estimativa do local do evento utilizando as primeiras PMUs, é mais próxima ao local do evento comparado com a estimativa que utiliza todas as PMUs. Interessante ressaltar que em eventos que ocorreram no Sudeste foi obtido um erro de 141km e que em

eventos no Nordeste o erro aumentou a 450km. O motivo disto é o efeito da natureza heterogênea e menos malhada do sistema Nordeste.

Das Tabelas 12 e 13 podemos concluir que eventos no Sudeste se propagam mais lentamente que eventos no Nordeste. E que quando alcançam todo o SIN, é visto que eventos do Sudeste se propagam mais rapidamente pelo Nordeste e eventos do Nordeste se propagam mais lentamente pelo Sudeste. Já a cond (J) quando utilizadas poucas PMUs é melhor condicionada do que quando utilizadas todas as PMUs, isto ao comparar o valor inicial (1ª iteração) com o valor final (última iteração).

Na segunda análise foram realizados dois estudos de caso do mesmo evento, de pequeno porte, no Norte para avaliar o efeito de usar mais de 1 PMU por local geográfico. Essa análise foi possível de se realizar graças às informações de PMUs redundantes do SMSF da rede de alta tensão. Neste exemplo, assim como em outras análises de eventos do SIN utilizando os SMSF aqui mencionados, a utilização de informações redundantes não gerou um benefício na localização do evento. Além disso, a utilização de PMUs redundantes vai aumentar o tempo computacional do programa e a incrementar o número de falsos alarmes de mau condicionamento numérico da localização.

A análise 3 envolve duas análises. A 1ª análise, é o cálculo do valor mínimo do desbalanço de potência em eventos sistêmicos (PG ou RC) capaz de criar uma onda eletromecânica que consiga se propagar pelo SIN. O achado principal é que em eventos no Norte/Sul, é necessário que a potência interrompida seja maior aos 300MW, e em eventos no Sudeste/Centro Oeste potências superiores a 400MW, isto devido à maior inércia existente no Sudeste. Na 2ª análise foi com sucesso detectado e localizado um evento do tipo DLT com um erro na estimação de apenas 72km. Cabe ressaltar que este evento corresponde à linha de transmissão 765kV da UHE Itaipu.

Na quarta análise foram mostrados resultados parciais do classificador neural proposto. Um conjunto de casos de treinamento para classificar eventos sistêmicos e locais no SIN foram extraídos, etiquetados e armazenados em uma matriz. Um teste inicial envolvendo eventos sistêmicos (PG/RC) foi implementada utilizando algumas funções da *ANN Toolbox*. A rede convergiu em apenas 32 épocas (iterações), diferenciando satisfatoriamente todos os casos utilizados.

Na última análise, a estimação da carga interrompida foi avaliada utilizando o total de eventos detectados no SIN (2014-2015) e no SIC-Chile (9-12/2015). O erro absoluto na estimação em casos do 2015 no Brasil foi de 14%, enquanto que no caso Chileno foi de 3%. Isto devido

principalmente às dificuldades existente pelos agentes do SIN para estimar a potência interrompida em eventos do tipo RC, a não publicação de eventos do tipo PG. Um fator favorável ao SIC-Chile, é o tamanho do seu sistema comparado ao SIN. Esta metodologia, permitiu também conhecer a característica do parque gerador do SIC-Chile.

A interface gráfica de detecção/localização implementada consegue reduzir o tempo de processamento necessário, mediante o uso de variáveis globais e mediante a seleção do evento a ser analisado. A GUI existente executava a localização para todos os eventos detectados, entre eles falsas detecções; além disso a execução da localização e visualização no mapa começava desde carregar o arquivo da consulta, recalculando novamente os tempos de detecção.

Outro resultado do presente trabalho foi a confirmação de eventos reais ocorridos no SIN, com os agentes do sistema elétrico no período 2014 –2015, gerando-se uma importante base de dados.

6 CONCLUSÕES

A utilização dos SMSF já se encontra em uma etapa de maturidade onde depois dos grandes avanços na monitoração em tempo real dos SEE, agora se embarca no desenvolvimento e melhoria de aplicações tais como: análise de eventos, identificação de oscilações eletromecânicas, validação de modelos, entre outros.

A evolução dos SEE para sistemas de tamanho continental, permitirá que eventos que ocorrem em uma região se propagem por todo o SEE, sendo necessário que os engenheiros eletricitas procurem meios para poder entender estes fenômenos e agir antes do efeito devastador de um blecaute.

A enorme quantidade de dados registrados pelos SMSF precisa ser convertida em informação rápida e eficaz, onde as técnicas de mineração de dados e aprendizado de máquinas irão jogar um rol importante.

A luz deste trabalho é contribuir com a análise de eventos realizados pelos agentes que operam os SEE, que na atualidade, pode levar várias horas de análise. Graças aos SMSF, é viável implementar uma ferramenta computacional que possa detectar, identificar, quantificar e indicar a origem destes eventos em poucos segundos (*online*).

Como a análise de eventos foi dividida em quatro fases, as conclusões foram agrupadas segundo a fase correspondente.

Na Detecção de Eventos:

A proposta deste trabalho na detecção de eventos consiste na utilização do FMMTV como técnica de pré-processamento, por fornecer a taxa de variação como sinal indicador, e a utilização de um limiar ajustável na detecção do evento. Neste trabalho o ajuste deste limiar é manual.

Na Classificação de Eventos:

Um projeto de classificador neural de eventos foi iniciado e se encontra, ainda, em fase de andamento, porém, com resultados parciais obtidos.

A classificação *online* de eventos é uma ferramenta muito importante para uma melhor consciência situacional dos eventos que ocorrem em SEE, com capacidade de funcionar em tempo real.

O classificador de eventos tipo PG/RC testado utilizando a *ANN Toolbox*, apresentou uma ótima capacidade de generalização.

O projeto de implementação deste classificador de eventos, exigiu a criação de uma base de dados de eventos no SIN, muitos destes eventos foram confirmados com os agentes do setor elétrico. Esta base de dados pode ser utilizada para o estudo de outras aplicações.

Na Localização de Eventos:

Eventos em SEE criam transitórios eletromecânicos que se propagam pelo SEE com velocidades mensuráveis, entretanto esta velocidade de propagação não é constante.

Foi proposta a utilização das coordenadas geográficas das PMUs, substituindo as coordenadas policônicas. Contudo, esta mudança não significou uma melhoria na estimativa do local do evento, que é mais influenciada pelo comportamento da velocidade na rede elétrica.

A solução utilizando as primeiras PMUs que detectaram o evento, ficou mais próxima do local real do evento. Em trabalhos anteriores, o erro da localização estimada era de 250km, neste trabalho foi obtido um erro menor aos 140km, com menor tempo computacional, já que unicamente nos concentramos no evento de interesse.

Em locais como a região Nordeste onde o erro da localização estimada era de 1000km, a proposta conseguiu reduzir este erro a 450km, isto devido ao efeito da topologia elétrica deste subsistema.

Para ter uma melhoria notável no resultado, é preciso uma maior quantidade de PMUs o que permitiria ter um estudo bem detalhado da velocidade de propagação por regiões pré-definidas.

Foi estudada o limiar de potência do evento sistêmico possível de ser detectado/localizado, destacando que irá depender do local onde se origine este evento. Eventos PG/RC, com potência interrompida ≥ 300 MW no Norte/Sul e eventos PG/RC com potência interrompida ≥ 400 MW no Sudeste/Centro oeste. Ou superior a 0,5% da carga do sistema.

Na Estimação da carga/geração Interrompida:

A proposta deste trabalho é baseada na equação de oscilação de um sistema multimáquinas. A estimativa obtida, passa a depender da exatidão dos dados sincrofasoriais como também da exatidão no valor de potência interrompida informada pelos agentes do setor elétrico.

Foi contextualizada a estimativa da carga interrompida baseada na resposta natural da frequência. É preciso estimar previamente o valor do

parâmetro β “sensibilidade carga – frequência” a qual depende do coeficiente de variação da carga do sistema e da característica de regulação dos governadores dos geradores conectados ao sistema.

Também foi contextualizada a estimação baseada na relação desta com a energia da oscilação sistêmica. Trata-se de uma proposta que pode ser avaliada com a base de dados de eventos fornecida neste trabalho.

6.1 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

As principais contribuições deste trabalho são:

- Base bibliográfica de eventos sistêmicos confirmados no SIN no período 2014 – setembro 2015. Assim como uma base de dados das coordenadas geográficas e potência (MW) das principais usinas e cargas do SIN.
- Proposta de uma metodologia de classificação de eventos (locais e sistêmicos) baseado em inteligência artificial (RNAs – PMC), a qual ainda se encontra em andamento.
- Interface gráfica para a detecção/localização de eventos quase em tempo real.
- Prototipação de uma metodologia de localização de eventos sistêmicos utilizando coordenadas geográficas e que fornece a região mais provável do evento.
- Aplicação da metodologia de localização de eventos quando são utilizadas PMUs redundantes, a partir do estudo da singularidade da matriz Jacobiana, através da $\text{cond}(J)$.
- O estimador da carga/geração interrompida baseado na equação de oscilação.
- Estudo do parque gerador do SIC – Chile no período setembro 2015 – dezembro 2015.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros citam-se:

- Estudar um detector automático de eventos baseado em RNAs. Sendo necessário treinar ela com casos normais (sem contingência).
- O estudo de outras técnicas de inteligência artificial na detecção de eventos, como por exemplo a lógica *fuzzy*.

- A utilização de técnicas estatísticas como a distância de *Mahalanobis* na detecção de eventos (WANG, 2009).
- Estudar e implementar a detecção *online* de eventos utilizando um limiar fixo e posteriormente substituí-la por um limiar que se adapte à magnitude da carga/geração interrompida estimada.
- Uma ferramenta automática que percorra todas as consultas dos eventos armazenados e possa extrair as frequências para seu uso posterior, será bastante útil para o estudo de técnicas de mineração de dados.
- Incrementar o número de casos de eventos do tipo DLT e OS para enriquecer o classificador neural de eventos.
- Fazer um estudo para a melhoria na localização de eventos no subsistema Nordeste modelando sua natureza heterogênea, considerando a topologia elétrica e apoiando-se de uma tabela com as coordenadas das principais inércias (usinas e centros de carga).
- Estudar a localização de eventos considerando uma velocidade de propagação por região. A ideia é dividir o SIN em pequenas regiões que possuam uma velocidade quase constante, como realizado recentemente no SEE da China (ZHANG et al., 2015).
- Retomar a investigação da localização de eventos usando o método dos mínimos quadrados.
- Implementar a metodologia proposta para a estimação da carga/geração interrompida dentro de um ambiente computacional *online*.

REFERÊNCIAS

ABUR, A.; EXPOSITO, A.G. **Power system state estimation: Theory and Implementation**. Marcel Dekker, Inc. New York USA, CRC Press, 2004.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST: Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica** – pag. 31, Revisão 6. Data de vigência, 01 de janeiro de 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, **SIGEL, Sistema de Informações Geo. - referenciadas do Setor Elétrico:**
<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=780>

ALMEIDA, R. **Aula 1 de cartografia-2010**. Disponível em: <<http://www.igc.usp.br/pessoais/renatoalmeida/MapSed/Aula1%20cartografia.pdf>>. Acesso em: 1 de abril de 2015.

BERNARDES, B.C.; BEZERRA, U.H.; VIEIRA, J.P.A.; MARTINS, D.A.; TARANTO, G.N. e ALMEIDA, C.R. **Novas investigações sobre a Avaliação da Margem de Estabilidade de Tensão na área Tramo Oeste usando dados reais de Sincrofasores**. XXIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE. Foz de Iguaçu – PR, outubro 2015.

BANK, J.N.; GARDNER, R.M.; WANG, J.K.; ARANA, A.J.; and LIU, Y. **Generator Trip Identification using Wide-Area Measurements and Historical Data Analysis** in *PSCE Power system conference and Exposition*, 2006, pp. 1677-1681.

BOLLEN, M.H.J.; GU, I.Y.H. **Signal Processing of Power Quality Disturbances**. IEEE Press Series on Power Engineering, Mohamed E. El-Hawary, Series Editor. Piscataway, NY, USA, 2006.

BOLLEN, M.H.J.; GU, I.Y.H.; AXELBERG, P.G.V. and STYVAKTAKIS, E. **Classification of Underlying Causes of Power Quality Disturbances: Deterministic versus Statistical Methods** in *EURASIP Journal on advances in signal processing*, volume 2007, article ID 79747, 17 pages.

BYKHOVSHKY A. e CHOW J.H. **“Power system disturbance identification from recorded dynamic data from Northfield Substation”** *Int. J. Elect. Power Energy Syst*, vol. 25, no. 10, pp. 787-795, Dec 2003.

CAI, D.; REGULSKI, P.M.; OSBORNE, M.; and TERZIJA, V.; **Wide Area Inter-Area Oscillation Monitoring Using Fast Nonlinear Estimation Algorithm** in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 3, pp. 1721-1731. September 2013.

DE OLIVEIRA, D.B.; ALVES, T.M.T.S.; NOHARA, A.A.; QUINTÃO, P.E.M. e SARDINHA, S.L.A. **Análise de Perturbação envolvendo o Sistema Madeira com Reflexos para a área Acre e Rondônia**. XXIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE. Foz de Iguaçu – PR, outubro 2015.

GARDNER, R.M. **Conditioning of FNET Data and Triangulation of Generator Trips in the Eastern Interconnected System**. 29 of July 2005. (Master of Science). Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia U.S.A.

GARDNER, R.M., WANG, J.K. and LIU Y., **Power System Event Location Analysis using Wide-Area Measurements** in *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2006a, pp. 1-7.

GARDNER, R.M., BANK, J.N., WANG, J.K., ARANA A.J., and LIU Y., **Non-Parametric Power System Event Location using Wide-Area Measurements** in *IEEE Power System Conference and Exposition*, 2006b, pp. 1668-1675.

HASHIGUCHI, T.; WATANABE, M.; GODA, T.; MITANI, Y.; SAEKI, O.;HOJO, M. and UKAI, H.; **Estimation Method of Center of Inertia Frequency Based on Phasor Measurement Data** in *Journal of Energy and Power Engineering* 6 (2012) pp. 434-445.

IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems. IEEE Std C37.118.1™-2011 (Revision of IEEE Std C37.118™-2005), p. 1-61, December 2011a.

IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems. IEEE Std C37.118.2™-2011 (Revision of IEEE Std C37.118™-2005), p. 1-53, December 2011b.

KOOK, K.S., and LIU, Y.; “**Wide-area Frequency-based Tripped Generator Locating Method for Interconnected Power Systems**” in *Journal of Electrical Engineering & Technology* (Korean Institute), vol. 6, n. 6, pp. 776-785, 2011.

LEANDRO, R.B.; ZIMMER, V.; JEREMIAS, T. DECKER, I.C. **Ambiente Computacional de Análise do Desempenho Dinâmico de Sistemas Elétricos utilizando Sincrofasores**. XXII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE. Brasília – DF, 2013.

LIU, Y.; ZHAN, L.; ZHANG, Y.; MARKHAM, P.N.; ZHOU, D.; GUO, J.; LEI, Y.; KOU, G.; YAO, W.; CHAI, J.; and LIU, Y. **Wide-Area Measurement System Development at the Distribution Level: an FNET/GridEye Example** in *IEEE Transactions on Power Delivery*, volume PP Issue 99, Date of Publication: March 16 2015, pp. 1-11.

LU, C.; SHI, B.; WU, X. and SUN H., **Advancing China's Smart Grid: Phasor Measurement Units in a Wide-Area Management System** in *IEEE Power & Energy Magazine*, 2015, vol. 13, pp. 60-71.

MC CALLEY, JIM; **EE 554: Power System Dynamics**. Harpole Professor of Electrical & Computer Engineering. Iowa State University - spring 2009. Available at: <http://home.eng.iastate.edu/~jdm/ee554/SwingEquation.pdf>

MARKHAM P. **Data Mining and Machine Learning Applications of Wide-Area Measurement Data in Electric Power Systems**. December 2012. (Doctoral Dissertation). The University of Tennessee, Knoxville, U.S.A.

MEI, K.; ROVNYAK, S.M.; and ONG, C.M.; **Clustering-Based Dynamic Event Location using Wide-Area Phasor Measurements** in *IEEE Transactions Power System*, vol. 23, no 2, pp. 673-679, May 2008.

NERC, North American Electric Reliability Council. **Balancing and Frequency Control**, 1/26/2011.

ONS. **Mapa Eletroenergético do Sistema Interligado Nacional – Horizonte 2015**. Disponível: http://www.ons.org.br/conheca_sistema/mapas_sin.aspx

ONS. Procedimentos de Rede 2009. Disponível em: http://apps05.ons.org.br/procedimentorede/procedimento_rede/procedimento_rede.a_spx.

OVERHOLT, P.; ORTIZ, D. and SILVERSTEIN, A.; **Synchrophasor Technology and the DOE** in *IEEE Power & Energy Magazine*, 2015, vol. 13, pp. 14-17.

PARASHAR, M.; THORP, J.S. and SEYLER, C.E., **Continuum modeling of Electromechanical Dynamics in Large-Scale Power Systems** in *IEEE Transactions on Circuits and Systems –I: Fundamental theory and Applications*, vol. 51, no 9, pp. 1848-1858, September 2004.

PHADKE, A.G., <http://www.metering.com/synchrophasors-under-test-at-dominion-virginia-power/> November 2009.

QIN, X, LI, B, and TIANSHU, B, **Study on Power System Disturbance Identification and Location based on WAMS** in *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2012, pp. 1-6.

ROLIM, J.G.; **EEL-6360: Sistemas baseados em Conhecimento aplicado à Sistemas de Potência**. Notas de aula. Florianópolis-SC, 2014.

SALUNKHE, K.A.; and KULKARNI, A.M.; **Observation of Power System Dynamic Phenomena using a Wide Area Synchronized Frequency Measurement System** available at: <http://103.7.128.82/rwafms/wafms/#>. 2012.

SCOLARO, G.R. **Classificação de Eventos Epileptiformes em Sinais de Eletroencefalografia utilizando Classificador Neural.** (Dissertação de Mestrado) – IEB - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, novembro 2009.

SILVA, I.N.; SPATTI D.H. e FLAUZINO R.A.; **Redes Neurais Artificiais para a Engenharia e Ciências Aplicadas.** Editora ArtLiber, 2010.

SIMÕES COSTA, A.J.A.; **Planejamento de Operação de Sistemas de Energia Elétrica.** Notas de aula. Florianópolis-SC, 2006.

SOONEE, S.K.; AGRAWAL, V.K.; AGARWAL, P.K. et al., **The View from the Wide Side: Wide-Area Monitoring Systems in India** in *IEEE Power & Energy Magazine*, 2015, vol. 13, pp. 49-59.

SRIRANGARAJAN, S.; and PESCH, D.; **Source Location using Graph-based Optimization Technique** in *IEEE Wireless Communications and Networking Conferences (WCNC): Networks*, 2013.

STERPU, S.; ROSSIGNOL, S.; and PRESTAT, B.; **Detection and Location of Generator Trips in Large transmission Grids** in *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2007, vol. no, pp. 1-6, 24-28 June 2007.

SUROWSKI, D.; **Distance between Points on the Earth's** University of Kansas (EUA), 2011, available: <<https://www.math.ksu.edu/~dbski/writings/haversine.pdf>>

TERZIJA, V.; and KOGLIN, H.J.; **“Adaptive Underfrequency Load Shedding integrated with a Frequency Estimation Numerical Algorithm”** in *IEEE Proceedings - Generation, transmission and distribution*, vol. 149, pp. 713-718, November 2002.

THORP, J.S. SEYLER, C.E.; and PHADKE, A.G.; **“Electromechanical Wave Propagation in Large Electric Power Systems”** in *IEEE Transactions on Circuits and Systems –I: Fundamental theory and Applications*, vol. 45, pp. 614-622, June 1998.

TSAI Shu-Jen S. **Study of Global Power System Frequency behavior based on Simulations and FNET Measurements.** July 2005. (Doctor of Philosophy). Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia U.S.A.

VANFRETTI, L. **Applying Modelica and FMI Technologies for Power System Modelling, Validation and Calibration using PMU Data** in the 2nd Workshop: The use of Synchrophasor in Power Systems. *Rio de Janeiro, Brazil.* Dec 4, 2013.

WANG, J.K. **Identification, Analysis, and Control of Power System Events using Wide-Area Frequency Measurements.** January 2009. (Doctor of Philosophy). Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia U.S.A.

XIA T., ZHANG. H., GARDNER R.M., BANK J., DONG J., ZUO J., LIU Y., BEARD L., HIRSCH P., ZHANG G. and DONG R., **Wide Area Frequency Based Event Location Estimation** in *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2007, pp. 1-6.

XIA, T. **Frequency Monitoring Network (FNET) Algorithm Improvements and Application Development**. December 2009. (Doctor of Philosophy). Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia U.S.A.

YE ZHANG. **Frequency Monitoring Network (FNET) Data Center Development and Data Analysis**. December 2014. (Doctor of Philosophy). The University of Tennessee, Knoxville, U.S.A.

ZANDONAI, L. **Desenvolvimento de uma metodologia de detecção de Eventos no Sistema Interligado Nacional usando Medição Fasorial Sincronizada**. TCC (Trabalho de conclusão de curso). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2014.

ZHANG, H.; SHI, F.; LIU, Y.; and TERZIJA, V. **Adaptive Online Disturbance Location Considering Anisotropy of Frequency Propagation Speeds** in *IEEE Transactions on Power Systems*, volume PP Issue 99, Date of Publication: May 12nd 2015, pp. 1-11.

ZHANG, H. **WAMS Light and its Applications** in the 1st International Symposium on Smart Grid methods, Tools and Technologies. *Jinan, Shandong, China*. May 17 – 20, 2015.

ZHENG. G , **Classification of Power system disturbances based on wide-area frequency measurements** in Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2011 *IEEE PES*, pp. 1-4, 17-19 January, 2011a.

ZHENG. G and CRAVEN. R, **Multiclass Support Vector Machines for Power system disturbances classification based on wide-area frequency measurements** in Southestcon, 2011 Proceedings of *IEEE*, pp. 68-72, March, 2011b.

ZHENG. G, LIU. Y and RADMAN. G, **Wide Area Frequency based Generation Trip Event Location Estimation** in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2012, pp. 1-6.

ZIMMER, V.; DECKER, I.C.; AGOSTINI, M.N. **Disturbance Location in the Brazilian Electric Power System using Synchronphasors**. In: IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LA), April 2013.

ZIMMER, V. **Detecção, Identificação e Localização de Eventos Sistêmicos**. (Dissertação de Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, julho 2013.

ZIMMER, V.; VIEIRA, P.C.C.; ZARZOSA, M.A.D.; AGOSTINI, M.N. e DECKER, I.C. **Aplicativo Computacional para a Caraterização de Eventos em Sistemas Elétricos usando Sincrofasores**. XXIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE. Foz de Iguaçu – PR, outubro 2015.

ZOHAR BAR YEHUDA, **plot_google_map.m**. 16 de maio de 2010, disponível em: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/27627-zoharby-plot-google-map>.

ZUO J., ZHONG. Z., GARDNER R.M., ZHANG H. and LIU Y., **Use of Off-Line Event Filter for the Wide Area Frequency Measurements** in *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2006, pp. 1-6.

ZUO J., BALDWIN. M., ZHANG. H., DONG. J., KOOK. K.S. and LIU Y., **Use of Frequency Oscillation to improve Event Location Estimation in Power System** in *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2007, pp. 1-7.

Apêndice A – Interface gráfica

Em ZANDONAI (2014) foram implementadas duas interfaces gráficas no ambiente GUI do Matlab, conforme mostrado nas Figuras seguintes:

Figura A.1 – Interface gráfica 1, proposta do (ZIMMER, 2013)

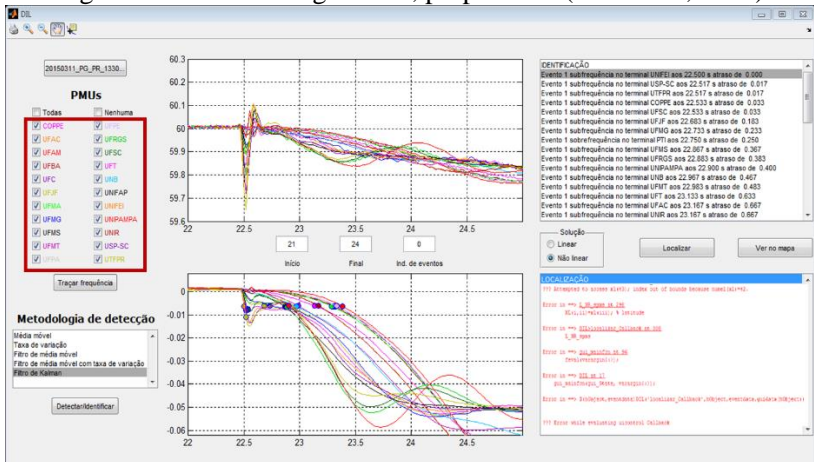
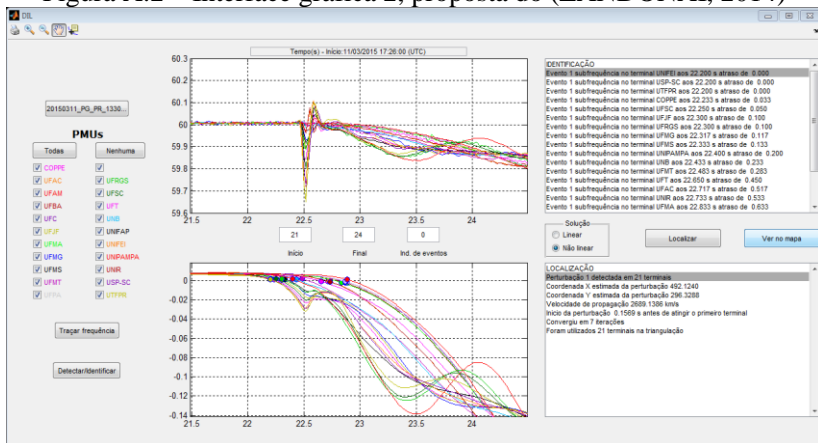


Figura A.2 – Interface gráfica 2, proposta do (ZANDONAI, 2014)



Na Figura A.1, o algoritmo de localização não funciona para a consulta tinha dados da PMU do PTI e esta GUI foi desenhada para

trabalhar unicamente com aquelas PMUs do SMSF MedFasee BT, mostradas como botões na parte superior esquerda da figura.

Já na Figura A.2, o algoritmo de localização funciona, porém, o erro da estimativa foi 431km (considerando a SE Itaberá 765kV como local do evento), devido a ser usado todas as PMUs na localização.

A realização desta pesquisa, o aumento de PMUs e o objetivo de reduzir o tempo de processamento, exigiu as seguintes melhorias:

- Depuração de contínuos *alarmes* na tela de *command Windows* do Matlab devido a linhas não necessárias de código no algoritmo de detecção de eventos (*filtfilt()*: filtro digital de fase zero).
- Habilitação da visualização do horário da consulta de dados (data time e hora UTC), para acompanhar os gráficos da frequência original e do sinal indicador.
- Devido à disponibilidade e necessidade de estudo utilizando medições fasoriais de outras PMUs, foi alterada a forma de trabalho com as PMUs (ver canto superior esquerdo da Figura A.1) removendo os botões “checkbox” para uma caixa “listbox”, possibilitando utilizar todos os PMUs disponíveis na consulta do PDC e não unicamente aquelas do projeto SMSF MedFasee BT.
- Integração de todas as metodologias de detecção existentes em uma única interface gráfica.
- Foi segmentada a execução do botão “*Deteção/Identificação*” em 3 execuções: Pré-processamento, seleção do limiar e detecção com visualização gráfica e relatório. De esta forma e possível avaliar o resultado de cada execução por separado, já que a anterior interface mostrava os resultados das três execuções ao mesmo instante.

O programa final implementado simplificou bastante o processo de localização de eventos, reduzindo drasticamente a quantidade de código escritas no programa original. Além disso, análise de eventos com dados advindos de novas PMUs podem ser facilmente realizados após a substituição dos *checkbox* para cada PMU por uma *listbox* com todas as PMUs. Outra importante vantagem de utilizar *listbox* e que ela permite selecionar as PMUs com os quais o usuário quiser fazer a sua análise.

Vale ressaltar que a interface gráfica desenhada ter caráter integrador. Isto é, que as contribuições dos trabalhos anteriores (ZIMMER, 2013) (ZANDONAI, 2014) foram mantidas junto às contribuições realizadas neste trabalho em uma única interface gráfica.

Recomenda-se assim que posteriores melhorias sejam adicionadas a esta interface para a obtenção de um programa mais robusto.

Quando era utilizada a primeira interface gráfica, a *checkbox* somente funcionava na visualização do sinal indicador, entretanto as metodologias de detecção, identificação e localização empregavam todas as PMUs existentes na consulta. Um problema disto é que muitas vezes quando eram feitas buscas de dados no PDC eram extraídas também dados de PMUs que estão em sistemas isolados, a análise delas em conjunto trazia erros grosseiros na metodologia de identificação e localização. Então, foi escrito um programa para selecionar as PMUs. Porém, criar um *checkbox* para cada PMU demandava muito espaço na GUI e foi por isso que se optou por utilizar *listbox*.

Apêndice B – Eventos reais no SIN utilizados no Classificador Neural proposto

N	Data	Horario UTC	Tipo	Δf (Hz)	ΔP Inf (MW)	Local informado	OBSERVAÇÕES
1	20100623	13:28:52	PG	0,36	1350	UH Porto Primavera	6 PMUs do MedFasee. Limiar 0,018
2	20100707	00:10:08	PG	0,26	900	Eloí-Itaipu HVDC	9 PMUs do MedFasee
3	20110322	14:56:24	PG	0,56	1700	UH São Simão	14 PMUs do MedFasee. Limiar 0,028.
4	20111113	12:05:13	PG	0,19	700	UH Ilha Solteira	13 PMUs do MedFasee (excluído UFPA por presença alta de ruído)
5	20120215	19:18:40	PG	0,15	NãoInf	N-S	14 PMUs do MedFasee.
6	20120318	08:10:56	PG	0,22	NãoInf	PR	11 PMUs do MedFasee
7	20120611	12:39:11	PG	0,13	NãoInf	SP	12 PMUs do MedFasee
8	20120620	13:42:30	PG	0,08	530	TermoPernam	13 PMUs do MedFasee
9	20120921	17:19:08	PG	0,12	450	UH Estreito MA	12 PMUs do MedFasee. Forte oscilação no Pará.
10	20120928	19:47:05	PG	0,12	NãoInf	SP-MS	14 PMUs do MedFasee. Não informado. P.Primeira?
11	20121003	23:55:06	PG	0,31	981	Foz 500kV PR	14 PMUs do MedFasee. Amostra de treinamento importante
12	20121019	14:56:13,5	PG	0,24	NãoInf	Norte	12 PMUs do MedFasee
13	20121122	16:54:36,7	PG	0,21	820	SC-RS	13 PMUs do MedFasee
14	20130225	19:52:21,2	PG	0,12	NãoInf	Norte	13 PMUs do MedFasee. Região geográfica do E.vento
15	20130506	10:37:18	PG	0,17	640	RJ	14 PMUs do MedFasee
16	20130628	03:06:47,9	PG	0,19	NãoInf	SP-MS	19 PMUs do MedFasee
17	20130704	14:57:39,7	PG	0,10	480	RJ	17 PMUs do MedFasee
18	20130717	21:08:50	PG	0,24	566	SC	18 PMUs do MedFasee. Com 6 primeiros terminais da melhor resultado
19	20140213	06:04:25	PG	0,19	NãoInf	Norte	18 PMUs do MedFasee.
20	20140216	20:00:51,6	PG	0,16	700	TO	18 PMUs do MedFasee. Com presença de Oscilações amortecidas no sinal UNIR e UFAC.
21	20140227	13:58:53,8	PG	0,23	984	RJ	20 PMUs do MedFasee. Alta presença de ruído na UNB e UFT (evidência Saltos)
22	20140228	06:18:23	PG	0,13	640	RJ	10 PMUs do MedFasee. Interessante propagação do evento.
23	20140324	17:46:15	PG	0,17	NãoInf		21 PMUs do MedFasee.
24	20140417	00:40:9,65	PG	0,19	NãoInf		21 PMUs do MedFasee.
25	20140511	13:53:15,6	PG	0,27	NãoInf	Região Sul	7 PMUs do MedFasee.
26	20140523	18:38:43,7	PG	0,15	722	Região Nordeste	19 PMUs do MedFasee. Sinal do PTI ruidosa. Sem registros da UFPE
27	20140528	07:31:49	PG	0,25	NãoInf	Não informado	18 PMUs do MedFasee.
28	20140607	17:12:9,7	PG	0,31	2800	Paraná - São Paulo	21 PMUs do MedFasee.

N	Data	Horário UTC	Tipo	Δf (Hz)	ΔP Inf (MW)	Local Informado	OBSERVAÇÕES
29	20140612	06:46:48.5	PG	0,25	NãoInf	São Paulo	18 PMUs do MedFasee.
30	20140613	14:27:26	PG	0,19	NãoInf	Elo DC Madeira	19 PMUs do MedFasee. Com oscilação na área de Acre-Rondônia
31	20140613	17:10:17	PG	0,09	NãoInf		19 PMUs do MedFasee. Com oscilação Ac-RO. Mode shape de 0,59Hz
32	20140614	05:19:00	PG	0,27	NãoInf		16 PMUs do MedFasee. Com oscilação amontecida no AcRo 0,6Hz.
33	20140614	08:38:45.9	PG	0,14	1152	RO	16 PMUs do MedFasee. UFAC encontrava-se em Sistema Isolado.
34	20140615	20:30:22.3	PG	0,27	1326	RO	15 PMUs do MedFasee. UFAC encontrava-se em Sistema Isolado.
35	20140616	08:26:35.5	PG	0,18	NãoInf	RO	17 PMUs do MedFasee. incremento pré-evento de 0,02Hz na frequência.
36	20140724	11:32:17.6	PG	0,35	1780	Bipolo 1 Elo Madeira	19 PMUs do MedFasee. Sem considerar UNIFAP e UFRR.
37	20140810	16:58:22.8	PG	0,29	740	CE	17 PMUs do MedFasee.
38	20140812	17:49:56.4	PG	0,25	1260	SP - Ibiúna	17 PMUs do MedFasee. 6 Saltos. Mode shape 0,312Hz
39	20140813	12:53:58.4	PG	0,17	NãoInf	Não Inf	17 PMUs do MedFasee. Immitv default deu bom resultado?
40	20140825	22:08:24.9	PG	0,21	1085	CE	18 PMUs do MedFasee. Tentar Localização de grafos.
41	20140907	10:45:48.7	PG	0,17	635	Elo Madeira	17 PMUs do MedFasee. Oscilações
42	20141002	12:51:3.5	PG	0,35	1213	Bipolo 1 Elo Madeira	19 PMUs do MedFasee. Oscilação forte em Ac, Ro e leve UFMT
43	20141017	20:04:26.9	PG	0,26	NãoInf	RO	19 PMUs do MedFasee. Oscilações.
44	20141018	18:45:29.7	PG	0,24	NãoInf		20 PMUs do MedFasee.
45	20141107	17:26:33.2	PG	0,38	NãoInf	PR	19 PMUs do MedFasee. Existe saltos pelo DLT.
46	20141122	01:40:18.7	PG	0,29	1366	RJ	19 PMUs do MedFasee.
47	20141227	11:22:51	PG	0,25	1200	PA	16 PMUs do MedFasee.
48	20150103	01:41:5.5	PG	0,20	750	SC	16 PMUs do MedFasee. 1er Ev as 1:40:55. 2Ev as 1:41:5.5 (PG Maior)
49	20150119	18:23:12.1	PG	0,19	697	Bipolo 1 Elo Madeira	21 PMUs do MedFasee.
50	20150203	19:29:16	PG	0,65	1627	PR-SP	21 PMUs do MedFasee. PG com DLTs 765kV Irapora-Itabera 1 e 2.
51	20150221	06:59:24.5	PG	0,85	2640	RO-Elo Madeira	37 pmus (19 medfasee.5 cteep.12 eletrornte.1 pti)
52	20150307	10:19:37.7	PG	0,27	1123	CE	21 PMUs do MedFasee.
53	20150309	02:15:18.5	PG	0,13	520	BA	19 PMUs do MedFasee. 08/março as 23:15 Hora Brasília.
54	20150311	17:26:22.4	PG	0,39	1330	Irapu60Hz	22 PMUs do MedFasee. Localização com 39PMUs: (-19.7496,-51.0536)
55	20150316	22:32:29.8	PG	0,21	972	RJ	22 PMUs do MedFasee.

N	Data (UTC)	Horário (UTC)	Tipo	Δf (Hz)	ΔP Inf (MW)	Local Informado	OBSERVAÇÕES
1	20100316	13:28:53.2	RC	0.13	450	DF	9 PMUs do MedFasee. Um deles PUC-RS
2	20100318	23:34:49	RC	0.11	340	MG	9 PMUs do MedFasee. Um deles PUC-RS
3	20100806	16:07:40.2	RC	0.27	1205	MA	
4	20100910	13:51:21.8	RC	0.38	1720	PA	9 PMUs do MedFasee.
5	20101005	13:00:22.1	RC	0.12	350	RJ	10 PMUs do MedFasee.
6	20101122	19:42:54.5	RC	0.07	440	Noite SP	10 PMUs do MedFasee.
7	20110728	22:06:13.6	RC	0.10	435	SP	11 PMUs do MedFasee. pequeno
8	20110728	22:11:08	RC	0.10	435	SP	11 PMUs do MedFasee. pequeno
9	20111018	11:37:45.9	RC	0.26	937	MA	11 PMUs do MedFasee. Limiar de 0,01.
10	20120124	12:39:55.8	RC	0.30	1490	RJ	13 PMUs do MedFasee.
11	20120229	18:48:29.1	RC	0.28	896	MA	13 PMUs do MedFasee inclui Nordeste. Bonus resultados
12	20120509	16:32:58.8	RC	0.12	400	PA	12 PMUs do MedFasee. UnB com dados incompletos
13	20120611	22:50:43.2	RC	0.11	437	RJ	12 PMUs do MedFasee.
14	20121010	11:27:52	RC	0.26	984	RS	14 PMUs do MedFasee.
15	20121023	13:28:39.9	RC	0.13	480	SP	16 PMUs (Medfasee BT + MedFasee Cteep)
16	20121129	18:02:15.6	RC	0.13		Não inf	Com DLT.
17	20140104	14:39:12	RC	0.18	450	SP	12 PMUs do MedFasee. Sem UNIPAMPA e UFAC.
18	20140215	18:53:20.6	RC	0.19	573	AL	19 PMUs do MedFasee.
19	20140307	17:47:54.8	RC	0.14	783	SP	19 PMUs do MedFasee.
20	20140311	16:37:16	RC	0.09	437	SP	19 PMUs do MedFasee.
21	20140424	17:00:47.9	RC	0.15	1000	Nordeste	19 PMUs do MedFasee. Modulo da Tensao UFPE desceu ate 0.65pu
22	20140618	16:37:17.6	RC	0.12	450	PA	19 PMUs do MedFasee. Modulo da Tensao UFPA desceu ate 0.5pu
23	20140702	15:45:36	RC	0.08	90	BA-Carnaqari IV	18 PMUs do MedFasee. Tensao UFBA desceu à 0.57pu
24	20141210	07:55:50.1	RC	0.10	480	RJ	20 PMUs do MedFasee.
25	20150123	22:00:47	RC	0.11	487	RJ	20 PMUs do MedFasee.
26	20150123	22:06:6.8	RC	0.09	455	RJ	20 PMUs do MedFasee.
27	20150313	18:01:8.5	RC	0.14	626	RJ	22 PMUs do MedFasee. localização com fmmtv e default/2
28	20150426	11:38:11	RC	0.07	279	GO	Limiar 0.007. 20 PMUs do MedFasee. Sem COPPE, PTI.
29	20150427	12:02:40	RC	0.07	300	PA	39 PMUs, caso para estudo Cond(f) e para estimar carga.

N	Data	Horario (UTC)	Tipo	Estado	Local Informado	PMUs sensibilizadas	FL_max	FZ_Max	Desvio frequência	OBSERVAÇÕES
1	20100828	04:24:40	DLT	SP	LT 440kV de CTEEP	USP-SC	59,94 59,95	60,1 60,11	0,16 0,16	Evidencia DLT 440kV
2	20120215	19:18:39	DLT	TO-GO	LT Peixe2 - Serra da Mesa2	UNB UFT	59,97 59,75	60,14 60,01	0,27 0,26	Trouxe um relacomoado na geração do SIN.
3	20121003	23:55:03	DLT	Foz (PR)	Foz Iguaçu 500kV	UNIFEI	60,107 59,81	59,74 60,38	0,37 0,30	
4	20140225	21:40:29.3	DLT	GO	LT 500kV SerraMesa2/ Luziania C-1	UNB UFT UFMG	59,73 60,14 59,86	60,38 59,82 60,09	0,65 0,32 0,23	Provoca posterior oscilação sistêmica de 11seg. Interessa tambem o módulo da Tensão.
5	20140313	15:55:34.3	DLT	CE	LT 500kV Pecemil/ Fortalezall	UFC	59,22	60,36	1,14	
6	20140422	01:39:34.6	DLT	PR	LT 765kV Foz-Iaiporã C1	UNFEI UFTPR	59,85 59,97	60,11 60,05	0,26 0,08	Provoca oscilação no sistema AcRoMh
7	20140605	20:02:39	DLT	PR	LT 765kV Foz-Iaiporã C1	PTL	59,97	60,06	0,09	
8	20140605	20:03:14.7	DLT	PR	LT 765kV Foz-Iaiporã C2	UNIFEI UFTPR	59,95 59,97	60,1 60,03	0,15 0,15	
9	20140802	20:01:40	DLT	PR	LT 765kV Foz-Iaiporã	UNIFEI USP-SC UNIR UFSC	59,97 59,85 59,88 59,92	60,26 60,03 60,13 60,19	0,29 0,06 0,28 0,21	Oscilação dos Modos N-S e SE-S
10	20140924	09:37:50.2	DLT	PR	LT 765kV Foz-Iaiporã c3	PTL	60	60,21	0,21	
20140824	09:37:51.8	DLT	PR	PR	LT 765kV Foz-Iaiporã C3	UFTPR	60,01	60,06	0,05	
20141107	01:05:04	DLT	PR	PR	LT 765kV Foz-Iaiporã c3	UNIFEI	60,23	59,81	-0,42	
20150203	19:29:1.66	DLT	PR	PR	LT 765kV Iteberã c1	UNIFEI	59,92	60,09	0,12	
20150714	14:16:1.85	DLT	PR	PR	LT 765kV Foz-Iaiporã 3	UNIFEI	59,79	60,23	0,44	Com oscilação do modo S
20150714	10:32:20	DLT	PR-SC	PR-SC	LT 525kV SaltoSantiago/Ita	UNIFEI	60,103	59,973	-0,13	Com posterior oscilação
20150721	17:55:44	DLT	PA	PA	LT 500 kV Jurupari/Oriximina C1	PTL	60,2	59,94	0,26	
20150113	02:52:43	DLT	PA	PA	LT 500kV Xingu/Jurupari c1-c2	UFTPR USP-SC	59,92 59,93	60,03 60,01	0,11 0,08	Melhor res ullado com 4 Pmus
20120921	0,72162037	DLT	TO	TO	LT 500kV Açailandia-Mareba C1	UNPAMPA UFRGS UFSC UFTPR	60,15	59,8	0,35	
20150721	17:55:44	DLT	PA	PA	LT 500 kV Jurupari/Oriximina C1	UFTPR				
20150113	02:52:43	DLT	PA	PA	LT 500kV Xingu/Jurupari c1-c2	UFAM UFPA				
20120921	0,72162037	DLT	TO	TO	LT 500kV Açailandia-Mareba C1	UFMA UFT UFPA				Desinterligo o sistema Manaus-Macapa do SIN

N	Data	Horario (UTC)	Tipo	Origem	Local Informado	PMUs	Com PG?	ΔP Inf (MW)	f osc. (Hz)	Taxa de amort.
1	20140216	20:00:52	OS	Elo 600kV Madeira	Acre e Rondônia	UFAC UNIR	Sim	700	0,54	15%
2	20140613	17:10:16	OS	Elo 600kV Madeira	Acre e Rondônia	UFAC UNIR	Sim	NãoInf	0,53	14%
3	20140614	05:19:00	OS	Elo 600kV Madeira	Acre e Rondônia	UFAC UNIR	Sim	NãoInf	0,57	13%
4	20140907	10:45:49	OS	Elo 600kV Madeira	Acre e Rondônia	UFAC UNIR	Sim	635	0,61	12%
5	20141002	12:51:03	OS	Elo 600kV Madeira	Acre e Rondônia	UFAC UNIR	Sim	1213	0,61	14%
6	20141017	20:04:27	OS	Elo 600kV Madeira	Acre e Rondônia	UFAC UNIR	Sim	NãoInf	0,48	18%
7	20141018	18:45:29	OS	Elo 600kV Madeira	Acre e Rondônia	UFAC UNIR	Sim	NãoInf	0,52	16%

Apêndice C – Eventos reais no SIN utilizados na Estimação da Carga/Geração interrompida

N	Dia	Fecha	Horario Brasilia	ΔP (MW)	frequencia inicial (Hz)	frequencia final (Hz)	Tempo final (s)	Tempo inicial (s)	df/dt (Hz/s)	ξ (MI/ 0,01Hz)	Tipo Evento	Usina / Local do Evento
1	quarta-feira	17/07/2013	18h8m	115	60,00	60,03	43,05	36,13	0,005	212	PC	SE Xanxerê - Santa Catarina
2	quarta-feira	17/07/2013	18h8m	681	60,03	59,79	58,00	50,33	0,032	213	PG	UHE Foz de Chapéu e Quebra Queixo - Santa Catarina
3	sabado	04/01/2014	12h39m	450	60,02	60,19	20,00	12,00	0,021	212	PC	SE Nordeste - São Paulo
4	sabado	15/02/2014	15h53m	573	59,97	60,16	30,00	21,20	0,021	271	PC	SE Messias - Alagoas
5	Domingo	16/02/2014	17h00m	700	59,98	59,84	59,00	51,68	0,020	358	PG	Desligamento Elo Madeira - Rondonia / São Paulo
6	quinta-feira	27/02/2014	10h58m	984	60,00	59,77	63,22	54,00	0,024	408	PG	UHES Peixe Angical, Tucuruí e Lajeado - Tocantins
7	sexta-feira	28/02/2014	3h18m	640	59,94	59,82	31,00	23,00	0,015	434	PG	UN Angral - Rio de Janeiro
8	sexta-feira	07/03/2014	15h47m	783	60,08	60,19	62,05	55,47	0,017	468	PC	SE Campinas 138 e 245kV - São Paulo (2 Rejeições)
9	terça-feira	11/03/2014	13h37m	437	60,03	60,12	25,00	16,33	0,010	421	PC	Evento Bom, São Paulo
10	quinta-feira	24/04/2014	14h00m	1000	60,01	60,16	58,00	48,27	0,015	676	PC	Estados do Paraíba, Pernambuco, Alagoas e Sergipe
11	sexta-feira	23/05/2014	16h38m	722	60,00	59,85	53,40	44,23	0,016	441	PG	UTES Termopernambuco e Suape II - Pernambuco
12	sabado	07/06/2014	14h12m	2800	59,99	59,67	18,00	10,00	0,040	700	PG	Desligamento Polo1 do Elo Itaipu - Paraná / São Paulo
13	sabado	14/06/2014	5h38m	1152	60,00	59,87	52,00	46,00	0,022	512	PG	Desligamento Elo Madeira - Rondonia / São Paulo
14	Domingo	15/06/2014	17h30m	1326	59,98	59,73	30,00	22,60	0,034	385	PG	Desligamento Elo Madeira - Rondonia / São Paulo
15	quarta-feira	18/06/2014	13h37m	450	59,97	60,08	26,50	18,00	0,013	348	PC	SEs Guamá e Utinga, Belém - Pará

N	Dia	Fecha	Horario Brasília	ΔP (MW)	frecuencia inicial (Hz)	frecuencia final (Hz)	Tempo inicial (s)	Tempo final (s)	Tempo inicial (s)	df/dt (Hz/s)	ξ (MVA/0,01Hz)	Tipo Evento	ξ estimado (MVA/0,01Hz)	ΔP Est (MW)	Error (%)	Usina / Local do Evento
16	quarta-feira	02/07/2014	12h45m	90	60,03	60,10	43,50	37,00	0,011	0,043	81	PC	348	385	-	Desligou TR1 Camaçari IV. Redução carga Dow Química em 90MW - Bahia. Também houve redução de cargas na área Sul do Nordeste.
17	quinta-feira	24/07/2014	8h32m	1780	59,96	59,61	25,67	17,80	0,043	0,043	410	PG	408	1773	0	Desligamento Elo Madeira - Rondonia / São Paulo
18	Domingo	10/08/2014	13h58m	740	59,97	59,74	34,00	26,33	0,030	0,030	245	PG	-	-	-	UTES Pecém II, Maracanaú, Fortaleza e Termoceará - Ceará. Também corte de carga
19	terça-feira	12/08/2014	14h50m	1260	60,02	59,77	19,00	11,00	0,031	0,031	403	PG	-	1679	33	Desligamento Elo 2 da Itaipu 50Hz
20	segunda-feira	25/08/2014	19h8m18s	365	60,02	59,98	25	18	0,007	0,007	544	PG	-	100	-	UTE Pecém II / Ceará
21	segunda-feira	25/08/2014	19h8m	720	59,98	59,81	32,22	25,38	0,025	0,025	291	PG	-	-	-	Desligamento Elo Madeira - Rondonia / São Paulo
22	Domingo	07/09/2014	7h45m	635	59,97	59,81	56,00	48,82	0,023	0,023	282	PG	-	-	-	Desligamento Elo Madeira - Rondonia / São Paulo
23	quinta-feira	02/10/2014	9h51m	1213	59,99	59,63	13,11	3,58	0,037	0,037	327	PG	410	1517	25	Desligamento Elo Madeira - Rondonia / São Paulo
24	segunda-feira	02/11/2014	5h50m	1364	60,02	59,79	19,00	8,00	0,022	0,022	633	PG	-	-	-	Desligamento Elo Madeira - Rondonia / São Paulo
25	sexta-feira	21/11/2014	23h40m	1366	59,97	59,68	26,48	18,88	0,037	0,037	367	PG	291	1084	21	UN Angra 2 - Rio de Janeiro
26	sabado	22/11/2014	23h37m	1084	60,01	59,73	61,35	53,88	0,038	0,038	287	PG	-	-	-	Desligamento Elo Madeira - Rondonia / São Paulo
27	quarta-feira	10/12/2014	5h55m	480	60,02	60,12	58,00	50,00	0,012	0,012	400	PC	633	760	58	Niterói- Rio de Janeiro
28	sabado	27/12/2014	09h22m	1200	60,02	59,77	59,00	51,30	0,033	0,033	365	PG	282	925	23	UHE Tucuruí - Pará

N	Dia	Fecha	Horario Brasilia	ΔP (MW)	frecuencia inicial (Hz)	frecuencia final (Hz)	Tempo inicial (s)	Tempo final (s)	df/dt (Hz/s)	ξ (MJ/ 0,01Hz)	Tipo Evento	ξ estimado (MJ/ 0,01Hz)	ΔP Est (MW)	Error (%)	Usina / Local do Evento
29	sexta-feira	02/01/2015	23h:41m	750	59,95	59,75	14	5,85	0,025	304	PG	287	708	6	UHE Barra Grande e Garibaldi - Santa Catarina
30	segunda-feira	19/01/2015	14h:49m	634	59,17	59,07	42	38	0,025	254	PG	304	760	-20	UN Angra I - Rio de Janeiro
31	segunda-feira	19/01/2015	14h:54m	122	58,80	58,52	65,65	55,55	0,028	439	PG	279	770	36	UHE Ney Braga (Segredo) - Paraná
32	segunda-feira	19/01/2015	16h:23m	697	59,87	59,69	22	12,266	0,038	379	PG	346	637	9	Desligamento Elo Madeira - Rondonia / São Paulo
33	sexta-feira	23/01/2015	20h:00m	487	60,02	60,13	55	46,716	0,014	353	PC	342	471	3	Companhia Ampla - Rio Janeiro
34	terça-feira	03/02/2015	17h:29m	1627	60,02	59,37	28,283	16,2	0,054	302	PG	346	1864	-15	UHE Itaipu 60Hz - Paraná
35	sábado	21/02/2015	04h:59m	2640	60,01	59,16	33,02	24,52	0,100	264	PG	282	2820	-7	Desligamento Elo Madeira - Rondonia / São Paulo
36	sábado	07/03/2015	7h:19m	1123	60,02	59,75	46	38,66	0,037	305	PG	284	1045	7	Blecaute em Fortaleza - Ceará
37	Domingo	08/03/2015	23h:15m	520	59,99	59,86	26	18,583	0,018	288	PG	291	526	-1	Usinas das SES Barreiras e Igarorá 138kV - Bahia
38	quarta-feira	11/03/2015	14h:26m	1330	60,01	59,62	32	22,43	0,041	326	PG	343	1399	-5	UHE Itaipu 60Hz - Paraná
39	sexta-feira	13/03/2015	15h:11m	626	60,00	60,14	18	9	0,015	405	PC	340	525	16	SE Alcantara 138kV - Rio de Janeiro
40	segunda-feira	16/03/2015	19h:32m	972	59,99	59,78	38	30	0,026	370	PG	353	927	5	UTE Gov. Leonel Brizola - Rio de Janeiro
41	sábado	21/03/2015	16h:36m	1416	59,961	59,814	10	6	0,037	385	PG	351	1289	9	Desligamento Elo Madeira - Rondonia / São Paulo
42	sábado	21/03/2015	16h:36m	1034	59,731	59,621	26,45	22,433	0,027	378	PG	351	961	7	Desligamento Elo Madeira - Rondonia / São Paulo

N	Dia	Fecha	Horario Brasilia	ΔP (MW)	frecuencia inicial (Hz)	frecuencia final (Hz)	Tempo inicial (s)	Tempo final (s)	df/dt (Hz/s)	ξ (MJ/ 0,01Hz)	Tipo Evento	ξ estimado (MJ/ 0,01Hz)	ΔP Est (MW)	Error (%)	Usina / Local do Evento
42	Domingo	26/04/2015	8h:38m	279	60,024	60,092	18,516	11,533	0,010	287	PC	305	297	-6	LT 230kV Aguas Lindas/Barro Alto - Goias
43	segunda-feira	27/04/2015	9h:2m	300	60,027	60,093	48	40,5	0,009	341	PC	361	318	-6	Belém - Pará
44	quarta-feira	06/05/2015	4h:3m	690	59,979	59,92	21	17	0,015	468	PG	341	503	27	Desligamento Elo Madeira - Rondonia / São Paulo
44	quarta-feira	06/05/2015	4h:3m	1290	59,941	59,828	39	35	0,028	457	PG	341	963	25	Desligamento Elo Madeira - Rondonia / São Paulo
45	Domingo	24/05/2015	6h:19m	700	59,972	59,829	39,5	33,2	0,023	308	PG	287	650	7	UHE Tucuruí - Pará
46	quinta-feira	11/06/2015	15h:35m	335	59,996	59,914	18	10	0,010	327	PG	357	366	-9	UTE J. Lacerda C - Santa Catarina
47	quarta-feira	01/07/2015	8h:56m	229	60,03	60,11	62,9	54,0	0,008	287	PC	334	267	-17	SE Scharlau 138kV - Porto Alegre - RS
48	sexta-feira	10/07/2015	10h:26m	3450	60,02	59,02	21,6	12,5	0,110	314	PG	318	3490	-1	Desligamento Elo Madeira - Rondonia / São Paulo
49	segunda-feira	20/07/2015	5h:20m	630	59,98	60,14	62,0	55,3	0,025	255	PC	314	774	-23	Conv. Garabi 2 - Rio Grande do Sul
50	terça-feira	21/07/2015	14h:59m	180	59,98	60,03	62,0	54,5	0,006	293	PC	327	200	-11	SE Altamira 230kV - Pará
51	quarta-feira	22/07/2015	3h:57m	640	59,96	59,83	58,0	52,2	0,023	275	PG	255	593	7	UN Angra I - Rio de Janeiro
52	sexta-feira	24/07/2015	2h:24m	1070	60,01	59,71	68,0	58,0	0,030	357	PG	265	796	26	Desligamento Elo Madeira - Rondonia / São Paulo
53	quinta-feira	30/07/2015	14h:54m	175	60,01	60,05	52,0	47,0	0,007	243	PC	310	223	-28	LT 230kV Porto velho/Abunã - Acre
54	sexta-feira	18/09/2015	15h:30m	390	60,00	60,15	56,9	48,5	0,018	216	PC	268	485	-24	LT 345kV Brasilia Sul/Sambambaia C1-C2 - Brasilia DF
55	terça-feira	22/09/2015	11h:36m	2200	60,01	58,62	18,0	1,3	0,083	264	PG	289	2409	-10	UHE Itaipu 60Hz - Paraná
56	terça-feira	22/09/2015	11h:36m	640	59,04	58,85	48,3	39,0	0,020	314	PG	289	589	8	UN Angra I - Rio de Janeiro

Apêndice D – Eventos reais no SIC Chile utilizados na Estimação da Carga/Geração interrompida

N	Dia	Fecha	Horario Chile	ΔP (MW)	frecuencia ponto A (Hz)	frecuencia ponto C (Hz)	Tempo ponto C (s)	Tempo ponto A (s)	df/dt (Hz/s)	ξ (MJ/0,1Hz)	Tipo Evento	ΔP _Est (MW)	Error (%)	Central/Carga
1	miércoles	16/09/2015	20h21m	275	50,051	49,427	36,0	30,0	0,104	264	PG			C. Nueva Ventanas
2	martes	10/11/2015	0h58m	113	50,005	50,324	27,5	21,0	0,049	230	RC			S.E. Diego de Almagro
3	sábado	14/11/2015	1h45m	97	50,038	49,758	21,0	15,0	0,047	208	PG			P.E. El Arrayán
4	sábado	14/11/2015	9h56m	166	49,933	49,642	54,0	48,0	0,048	342	PG			P.Fv. Luz del Norte
5	sábado	14/11/2015	20h14m	277	50,012	49,539	9,0	4,0	0,095	293	PG			C. Pehuende U-2
6	martes	24/11/2015	9h38m	269	50,025	49,156	44,0	36,0	0,109	248	PG	272	1%	C. Nueva Ventanas
7	martes	01/12/2015	15h53m	95	50,005	49,730	19,0	11,0	0,034	276	PG	85	10%	C. Los Pinos
8	sábado	05/12/2015	17h44m	283	49,947	49,272	7,0	-0,4	0,091	310	PG	267	6%	C. Bocamina II
9	martes	15/12/2015	13h15m	310	50,001	49,242	42,0	32,4	0,079	392	PG	306	1%	C. Bocamina II
10	jueves	17/12/2015	11h14m	170	49,913	49,610	38,3	31,6	0,045	376	PG	168	1%	C. Ventanas 2
11	viernes	18/12/2015	0h34m	100	49,990	49,722	10,0	2,7	0,037	272	PG	101	1%	C. Ventanas 1

Anexo A – Derivação do algoritmo Retropropagação do Erro

Em (SILVA et al., 2010) a derivação do algoritmo de retropropagação do erro ou *Backpropagation* é explicado em detalhe. Ele é comumente realizado mediante as aplicações sucessivas de duas fases:

Fase Forward ou Propagação adiante, na qual os sinais $[x_1, x_2, \dots, x_n]$ de uma amostra do conjunto de treinamento são inseridos na rede e são propagados até a produção da respectivas saídas, os valores atuais dos pesos sinápticos e limiars de seus neurônios permanecerão inalterados durante a execução desta fase.

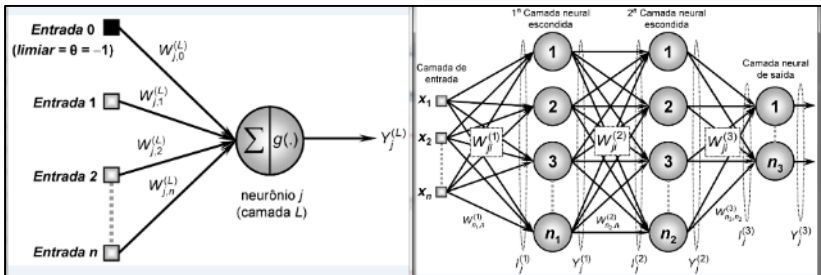
Logo em seguida, as respostas produzidas serão comparadas com as respetivas respostas desejadas.

Assim, em função desses valores de erros, aplica-se em seguida, a **fase Backward ou “propagação reversa”**. Diferentemente da anterior, as alterações dos pesos sinápticos e limiars de todos os neurônios da rede são executadas no decorrer desta fase.

Em suma, as aplicações sucessivas de ambas fases fazem com que os pesos sinápticos e limiars dos neurônios se ajustem automaticamente em cada iteração, junto à gradativa diminuição da soma dos erros produzidos pelas respostas da rede frente aquelas desejadas.

Apresentam-se na Figura A.3 as variáveis e parâmetros que norteiam a derivação do algoritmo.

Figura A.3 – Pesos sinápticos e Limiars a ser atualizados em cada neurônio



Onde:

W_{ji}^L : são matrizes de pesos cujos elementos denotam o valor do peso sináptico conectando o j -ésimo neurônio da camada (L) ao i -ésimo neurônio da camada ($L-1$).

I_j^L : são vetores cujos elementos denotam a entrada ponderada em relação ao j-ésimo neurônio da camada neural (L), definidos por:

$$I_j^L = \sum_{i=0}^n W_{ji}^L \cdot x_i \Leftrightarrow I_j^L = W_{j0}^L \cdot x_0 + W_{j1}^L \cdot x_1 + \dots + W_{jn}^L \cdot x_n \quad (\text{A.1})$$

Y_j^L : são vetores cujos elementos denotam a saída do j-ésimo neurônio em relação à camada L, definidos por:

$$Y_j^L = g(I_j^L) \quad (\text{A.2})$$

$L = 1, 2, 3.$

Uma vez que é feita o primeiro passo forward, as respostas produzidas serão comparadas com as respectivas respostas desejadas, para isto é definida a função erro quadrático como função representativa do erro de aproximação, ou seja:

$$E(k) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{n3} (d_j(k) - Y_j^3(k))^2 \quad (\text{A.3})$$

$Y_j^3(k)$ é o valor produzido pelo j-ésimo neurônio de saída da rede considerando-se a k-ésima amostra de treinamento, em quanto que $d_j(k)$ é o seu respectivo valor desejado.

Considerando um conjunto de treinamento composto por p amostras, a medição da evolução do desempenho global do algoritmo backpropagation é efetuada mediante o erro quadrático médio:

$$E_M = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p E(k) \quad (\text{A.4})$$

O algoritmo backpropagation usado neste trabalho é baseado na aprendizagem mediante lote de padrões (off-line) em relação à expressão anterior (3.4), fazendo-se também uso de método baseado no gradiente da função erro quadrático dada em (2.10x).

Ajuste dos pesos sinápticos da camada neural de saída: consiste em ajustar a matriz de pesos W_{ji}^3 , a fim de minimizar o erro ou desvio entre a saída produzida e à respectiva saída desejada, em relação à k-ésima amostra de treinamento referente ao j-ésimo neurônio da camada de saída, a partir do gradiente e da regra de diferenciação em cadeia, tem-se:

$$\nabla E^3 = \frac{\partial E}{\partial W_{ji}^3} = \frac{\partial E}{\partial Y_j^3} \cdot \frac{\partial Y_j^3}{\partial I_j^3} \cdot \frac{\partial I_j^3}{\partial W_{ji}^3} \quad (\text{A.5})$$

Mediante as definições anteriores, tem-se:

$$\frac{\partial I_j^3}{\partial W_{ji}^3} = Y_i^2 \quad (\text{A.6})$$

$$\frac{\partial Y_j^3}{\partial I_j^3} = g'(I_j^3) \quad (\text{A.7})$$

$$\frac{\partial E}{\partial Y_j^3} = -(d_j - Y_j^3) \quad (\text{A.8})$$

Obtem-se:

$$\frac{\partial E}{\partial W_{ji}^3} = -(d_j - Y_j^3) \cdot g'(I_j^3) \cdot Y_i^2 \quad (\text{A.9})$$

Logo, o ajuste da matriz de pesos deve ser feito em direção oposta ao gradiente para garantir a minimização do erro afetada pela taxa de aprendizagem. Em notação algorítmica, é obtida a expressão seguinte:

$$W_{ji}^3 \leftarrow W_{ji}^3 + \eta \cdot \delta_j^3 \cdot Y_i^2 \quad (\text{A.10})$$

$$\delta_j^3 = (d_j - Y_j^3) \cdot g'(I_j^3) \quad (\text{A.11})$$

η : taxa de aprendizagem do algoritmo backpropagation.

A expressão (A.10) ajusta os pesos dos neurônios da camada neural de saída levando em conta a diferença observada entre as respostas produzidas por suas saídas em relação aos valores desejados.

Ajuste dos pesos sinápticos das camadas intermediárias, A desvantagem em relação ao ajuste dos pesos sinápticos da camada de saída é que aqui não se tem acesso de forma direta aos valores desejados para as suas saídas. Nesta situação, os ajustes de seus pesos sinápticos são efetuados por intermédio de estimativas dos erros de saída produzidos pelos neurônios da camada imediatamente superior, já calculados previamente.

E assim que é baseada a essência do algoritmo backpropagation, numa primeira instância, tem-se ajustado os pesos sinápticos dos neurônios da camada de saída mediante valores verdadeiros dos desvios observados na sua resposta. Em segunda instância, este desvio é retro-

propagado para os neurônios das camadas anteriores, ponderando-se os mesmos pelos valores de pesos sinápticos que já foram previamente ajustados na camada posterior.

Ajuste dos pesos sinápticos da segunda camada escondida, A fim de minimizar o erro entre a saída produzida pela rede em relação a retropropagação do erro advindo dos ajustes dos neurônios da camada neural de saída. Tem-se:

$$\nabla E^2 = \frac{\partial E}{\partial W_{ji}^2} = \frac{\partial E}{\partial Y_j^2} \cdot \frac{\partial Y_j^2}{\partial I_j^2} \cdot \frac{\partial I_j^2}{\partial W_{ji}^2} \quad (\text{A.12})$$

Mediante as definições anteriores:

$$\frac{\partial I_j^2}{\partial W_{ji}^2} = Y_i^1 \quad \{\text{Obtido a partir de (A.1)}\} \quad (\text{A.13})$$

$$\frac{\partial Y_j^2}{\partial I_j^2} = g'(I_j^2) \quad \{\text{Obtido a partir de (A.2)}\} \quad (\text{A.14})$$

$$\frac{\partial E}{\partial Y_j^2} = \sum_{k=1}^{n3} \frac{\partial E}{\partial I_k^3} \cdot \frac{\partial I_k^3}{\partial Y_j^2} = \sum_{k=1}^{n3} \frac{\partial E}{\partial I_k^3} \cdot w_{kj}^3 = \sum_{k=1}^{n3} p_1 \cdot p_2 \quad (\text{A.15})$$

$$\frac{\partial E}{\partial Y_j^2} = - \sum_{k=1}^{n3} \delta_k^3 \cdot w_{kj}^3 \quad (\text{A.16})$$

Substituindo (A.13), (A.14) e (A.16) em (A.12), tem-se:

$$\nabla E^2 = \frac{\partial E}{\partial W_{ji}^2} = - \left(\sum_{k=1}^{n3} \delta_k^3 \cdot w_{kj}^3 \right) \cdot g'(I_j^2) \cdot Y_i^1 \quad (\text{A.17})$$

Logo, o ajuste da matriz de pesos W_{ji}^2 será efetuada na direção oposta ao gradiente a fim de minimizar o erro. Então o ajuste dos pesos dos neurônios da segunda camada escondida, levando-se em conta dita retropropagação do erro advinda a partir dos neurônios da camada de saída, em notação algorítmica é conseguida da forma seguinte:

$$W_{ji}^2 \leftarrow W_{ji}^2 + \eta \cdot \delta_j^2 \cdot Y_i^1 \quad (\text{A.18})$$

$$\delta_j^2 = \left(\sum_{k=1}^{n3} \delta_k^3 \cdot w_{kj}^3 \right) \cdot g'(I_j^2) \quad (\text{A.19})$$

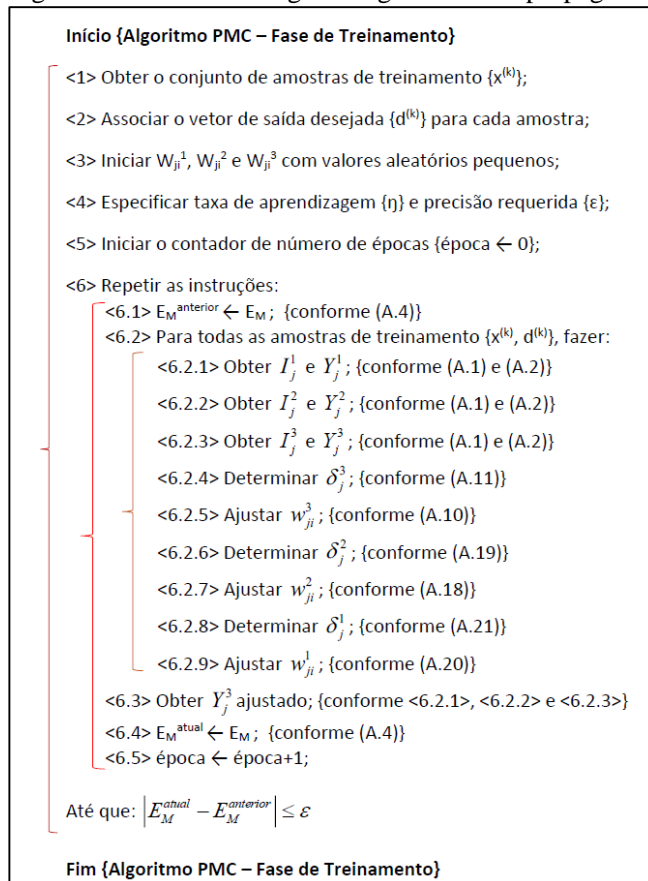
Ajuste dos pesos sinápticos da primeira camada escondida, A demonstração completa pode ser acompanhada em (SILVA, 2010):

$$W_{ji}^1 \leftarrow W_{ji}^1 + \eta \cdot \delta_j^1 \cdot x_i \quad (\text{A.20})$$

$$\delta_j^1 = \left(\sum_{k=1}^{n_2} \delta_k^2 \cdot w_{kj}^2 \right) \cdot g'(I_j^1) \quad (\text{A.21})$$

Definimos o vetor $x^{(k)}$ que representa a k-ésima amostra de treinamento, assim como o vetor $d^{(k)}$ que armazena os respectivos valores desejados. A sequência de procedimentos computacionais é explicitada na Figura A.4:

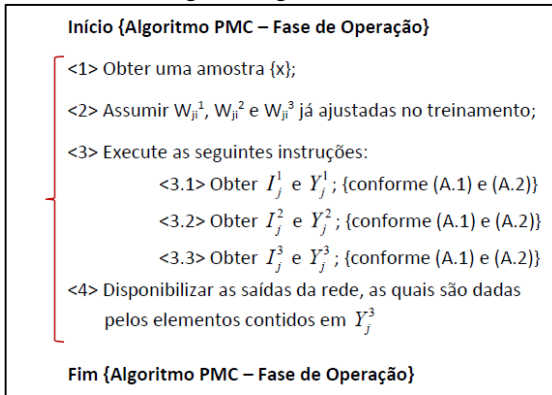
Figura A.4 – Pseudocódigo do algoritmo backpropagation



O algoritmo converge quando o erro quadrático médio obtido pela expressão (A.4) for inferior de um valor pré-estabelecido, a diferença no erro quadrático médio entre duas épocas sucessivas for suficientemente pequena ou o número de épocas de treinamento for superior de certo valor.

Onde ε é a precisão requerida para o processo de convergência. Após o treinamento do PMC, a variável época conterá o número de épocas que foram necessárias para o ajuste das matrizes de pesos sinápticos e assim a capacidade de mapear o sistema em estudo. Essas matrizes de pesos sinápticos já ajustados precisam ser armazenadas. Após o termino do treinamento do PMC, pode então se passar a fase de operação da rede, onde as matrizes de pesos armazenadas são então utilizadas para estimar as saídas do sistema frente às novas amostras que serão apresentadas em suas entradas, como segue no pseudocódigo:

Figura A.5 – Pseudocódigo do algoritmo PMC na fase de Operação



É importante lembrar que os ajustes das matrizes de pesos são unicamente realizados na fase de treinamento a partir dos sucessivos passos forward e backward. Já na fase de operação, nenhum tipo de ajuste é efetuado nos parâmetros internos da rede, sendo que, somente a fase forward é processada com o objetivo de gerar as saídas da rede.

Diversas variações do método backpropagation têm sido propostas com o objetivo de tornar o processo de convergência mais eficiente entre tais temos a inserção do termo de momentum. A qual visa ponderar o quão as matrizes sinápticas foram alteradas entre duas iterações anteriores e sucessivas. A expressão matemática considerando os neurônios pertencentes à L-ésima camada, é:

$$W_{ji}^L(t+1) = W_{ji}^L(t) + \alpha \cdot [W_{ji}^L(t) - W_{ji}^L(t-1)] + \eta \cdot \delta_j^L \cdot Y_i^{L-1} \quad (3.29)$$

Onde α é definida como taxa de momentum e seu valor está entre zero e um. Conforme a expressão (3.29), quando a solução atual estiver longe da solução final, a variação na direção oposta ao gradiente da função erro quadrático entre duas iterativas sucessivas será também grande e os ajustes serão conduzidos pelo termo momentum; e quando a solução atual estiver bem próxima da solução final as variações nas matrizes de pesos serão então bem ínfimas e a partir deste instante todos os ajustes são conduzidos pelo termo de aprendizagem. Assim por intermédio da inserção do termo momentum, o processo de convergência da rede se torna bem mais eficiente, pois leva o critério de quão afastada está a solução atual da solução final ótima (SILVA et al. 2010).