



**XXIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GPC/23

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO V

**GPC - GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO, CONTROLE
E AUTOMAÇÃO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA**

**REDE DE OSCILOGRAFIAS SAPNET®: ANÁLISE DE CASOS REAIS DE PERTURBAÇÕES EM LTS
REALIMENTANDO OS PROCEDIMENTOS E ALGORITMOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS**

Weber Melo de Sousa*
CEMIG GT

Anderson Adriano Dias
CEMIG GT

Carlos Alberto B. Costa
CEMIG GT

José Felício dos Santos
CEMIG GT

Víctor P. Carmo Neto
CEMIG GT

RESUMO

Este artigo apresenta análise de conjunto oscilografias de faltas reais em linhas de transmissão – LTs da Rede Básica Cemig GT, onde os locais e causas das faltas foram identificados pelas equipes de campo ou pelo Sistema de Localização de Tempestades – SLT. Cerca de 700 casos foram analisados e estratificados causas, tipos de faltas, religamentos satisfatórios, dentre outros. Adicionalmente, correlações foram estabelecidas entre dados tais como causas, resistência de faltas, ângulo da tensão da fase faltosa no instante do curto-circuito. Por conseguinte, essa comparação pôde sugerir em alguns casos a associação desses valores com as causas mais comuns.

PALAVRAS-CHAVE

Análise de perturbações, oscilografia digital, localização automática, localização de faltas em LTs.

1.0 - INTRODUÇÃO

A Cemig GT possui, no seu sistema de Rede Básica, LTs de 230, 345 e 500 kV totalizando 4930 km de linhas de transmissão. Todas essas linhas são monitoradas por Registradores Digitais de Perturbação – RDPs supervisionando as grandezas de corrente e tensão nos respectivos terminais, os quais estão integrados à Sapnet® - Sistema de Análise de Perturbações em Rede [1].

Esse Sistema utiliza dois métodos principais de localização de faltas. O Método de Wiznievsky [1], o qual utiliza os dados de um dos terminais, e o método baseado na proposta dos autores Johns e Jamali - 1990, que utiliza os dados dos dois terminais, o qual foi desenvolvido através de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento – P&D da Aneel [2]. Esse último algoritmo, de forma inovadora, determina a resistência de falta para cada uma das amostras entre o início e o fim da perturbação detectado pelo sistema a partir dos valores de tensão e corrente nos dois terminais e das grandezas de sequência no ponto de falta. A estimação da resistência de falta é obtida pela mediana dos valores calculados das resistências vistas pelos terminais da linha. Ao sistema da rede Sapnet® foi acrescida a Caracterização Automática e Identificação em Registros Oscilográficos de Perturbações [3] que faz uma prévia classificação automática dos registros de RDPs a partir de um sistema especialista - fruto de projeto P&D da Aneel.

Seja em tempo real ou durante a análise do desligamento de linhas de transmissão, o procedimento operacional vigente determina que além da análise de desempenho do sistema de proteção, a faixa de provável localização do defeito seja consistida pelos especialistas de proteção. Então essa informação é passada ao Centro de Operação do Sistema – COS e às equipes de campo, com o objetivo de avaliação, de realização de inspeções, possíveis reparos

(*) Cemig GT Av. Barbacena 1200 – 14º. Andar Ala A1 – CEP 30190-131 BH, MG – Brasil
Tel: (+55 31) 3506-4620 – Fax: (+55 31) 3506-4639 – Email: weber@cemig.com.br

e análise dos dados com relação às características construtivas das linhas (tipos de torres, de isoladores, recorrência de defeitos em determinados trechos, etc). Após a execução das inspeções, as retornam o resultado à engenharia de operação, através do preenchimento de formulário específico, visando a aferição do algoritmo e também adequações nos procedimentos, visando a melhoria contínua dos processos.

No âmbito regulatório, regras de cobrança da Parcela Variável - PV no sistema de Transmissão foram atualizadas, pelo poder concedente, através da Resolução Normativa nº 729/2016 - ANEEL [3]. Dentre outros pontos, destaca-se Isenção de Parcela Variável por Indisponibilidade - PVI para desligamentos causados por queimada fora da alçada da gestão do agente, isto é, fora da faixa de servidão, podendo inclusive resultar em procedimentos específicos para LTs susceptíveis a desligamentos por queimadas. Ademais, se atingido o limite do Padrão de Duração de Desligamentos de uma linha sem o retorno à operação, poderá ocorrer a suspensão de PB - Pagamento Base.

A resolução também regula sobre a isenção de PVI quando da queda ou dano de estrutura considerando 20 horas para a detecção dos locais de defeito, isolamento e mobilização, 40 horas para reparo de cada estrutura de circuito simples, 50 horas para reparo de cada estrutura de circuito duplo.

Neste contexto, a precisão e qualidade da localização e resistência de faltas em LTs da concessionária tornam-se imprescindível para a agilidade das equipes de campo e assim, para o restabelecimento da função de transmissão. Dessa forma, minimizando as consequências para o Sistema Interligado Nacional - SIN e as perdas financeiras para o negócio Transmissão. Assim a análise de um extenso grupo de oscilografias de faltas, citadas anteriormente, pretende alimentar o processo automático de classificação de registros visando sugerir aos especialistas de proteção e operação a possível causa associada às variáveis acima citadas.

2.0 - UNIVERSO DE FALTAS

As oscilografias analisadas referem-se às linhas de transmissão da Cemig GT, envolvendo os níveis de tensão de 230, 345 e 500 kV, conforme ilustrado na Figura 1 e totalizam 706 casos de curtos-circuitos compreendendo o período de janeiro de 2012 até março de 2017.

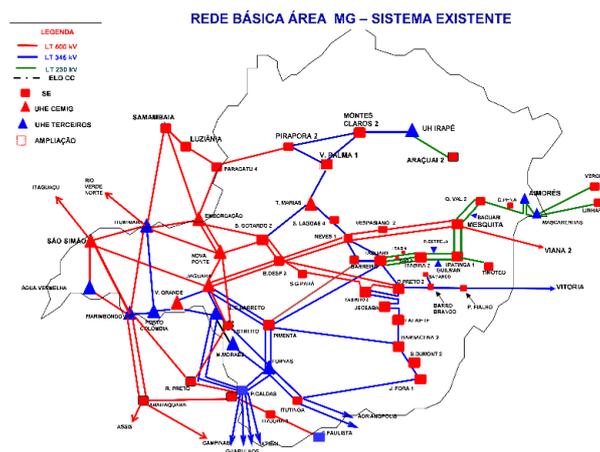


FIGURA 1 – Sistema de Transmissão da Cemig GT

3.0 - ANÁLISES DE FALTAS

3.1. Análise das principais causas

As principais causas de desligamentos apuradas para um total de 539 casos, ocorridos entre 2013 e 2017, foram Descargas Atmosféricas, Queimadas, Árvores, Não Determinado e Outros. Ao longo dos anos houve integração com outros sistemas e processos tais como SLT, sincronização via satélite – GPS, aumento da interação com as equipes de campo e realimentação do algoritmo, visando reduzir o número de causas classificadas como não determinadas. Este fato justifica o período apurado para essa análise.

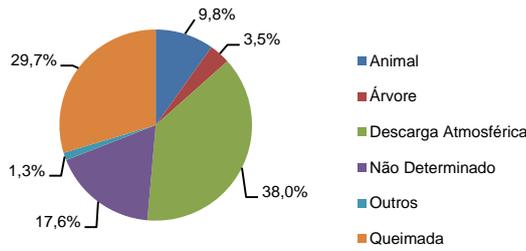


FIGURA 2 – Estratificação dos desligamentos de LTs por causa.

Observa-se da Figura 2 que a principal causa de desligamentos continua sendo descargas atmosféricas, alcançando 38% do total. Isto é justificado considerando a extensão territorial do estado de MG, onde as LTs se localizam, e o fato dele possuir alta densidade média de descargas - 7 a 10 descargas / km² / ano - conforme mostrado em [5] e na Figura 3.

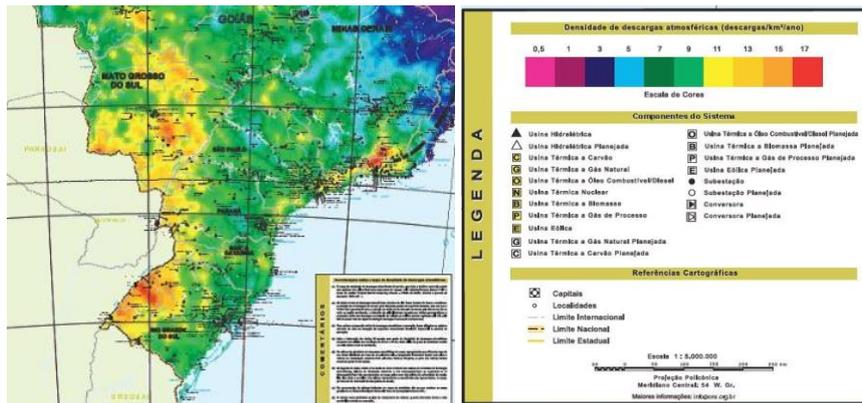


FIGURA 3 – Mapa de Densidade de Descargas Atmosféricas 1998 – 2013 – INPE [6]

Da Figura 2 verifica-se que as queimadas representam 29,7% do total de causas de falhas o que pode ser explicado pelos anos com estações com baixíssima pluviometria, implicando tempo seco e baixa umidade do ar. Estes fatores estes que combinados com plantio de culturas que ainda utilizam esse recurso de queimada, áreas de preservação e parques nacionais sujeitos à ação de vândalos culminam com desligamentos forçados por curtos-circuitos provocados pela ionização do ar aquecido devido às queimadas. Reforçamos a promoção de intensas campanhas pela empresa junto à sociedade e aos agricultores em especial conforme Figura 4.



FIGURA 4 – Queimada sob LTs em Parque Nacional - MG e Material de Campanha contra Queimadas da Cemig

Também da Figura 2 pode-se notar um percentual 9,8% para falhas causadas por animal, explicado pelo excremento de aves conhecidas como curicacas. Estes animais possuem hábitos diurnos e constroem seus ninhos em árvores elevadas e grandes rochedos para chocar seus ovos durante o período de reprodução, que geralmente vai de julho a novembro. Mas devido ao desequilíbrio natural provocado pela ocupação humana, vêm construindo seus ninhos nas estruturas das torres das LTs, no alto das cadeias de isoladores. Seu excremento provoca a disrupção do isolamento das cadeias e consequente curto-circuito fase-terra. Dispositivos, conforme Figura 5, foram desenvolvidos

a fim de evitar a construção dos ninhos pelas aves, os quais se mostraram efetivos. Apesar disso, a migração das aves vem provocando novos desligamentos motivados pela utilização de novas estruturas.



FIGURA 5 – Curicaca e respectivo ninho, marcas de curtos-circuitos nos isoladores e dispositivos anti-curicacas

Há um percentual de 3,5% causado por árvores explicado por vegetação fora da faixa de servidão da concessionária. Basicamente plantação de eucalipto por terceiros, que atingem tamanhos tais que, aliados às condições de vento, atingem a distância mínima dos cabos da LT, o suficiente para o rompimento da rigidez dielétrica e o consequente estabelecimento do curto-circuito.

As causas que não apresentaram indícios via condições atmosféricas, SLT ou retorno do campo foram classificadas como não determinadas e alcançaram 17,6% dos casos, menor que a média nacional de acordo com [7]. Já aquelas classificadas como outros englobam causas como queda de torre, rompimento de cabos, ventos fortes e vandalismo atingindo apenas 1,3% dos casos, portanto não terão enfoque neste trabalho.

3.2. Análise dos tipos de faltas: fases envolvidas

Em se tratando de LTs de Rede Básica e conforme a Figura 7 há a predominância da ocorrência de faltas envolvendo apenas uma fase e a terra – FT com alcance de 88,5% do total de faltas. Aquelas envolvendo duas fases - FF ou duas fases e a terra - FFT totalizam aproximadamente 10% e as trifásicas – 3F atingiram 1,8%.

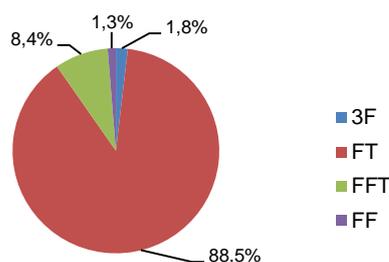


FIGURA 6 – Classificação de faltas por tipo

Conforme esperado, através da Tabela 1 verificamos que a quase totalidade das faltas (97,2%) das LTs de 500 kV envolvem apenas uma fase e a terra, ao passo que as faltas FFT pouco representam (2,8%) e as faltas 3F e FF não ocorreram. Para as LTs de 345 kV, os índices alcançados pelas faltas FT correspondem a 90,2% do total de faltas em LTs desse nível de tensão, e outros tipos permaneceram nos mesmos patamares daqueles observados no total. Verificou-se aumento significativo nas LTs de 230 kV das faltas FFT em comparação com o total de faltas, de 8,4% para 30,3%, e das faltas 3F de 1,8% para 6,1%. Estes fatos podem ser explicados pela topologia das estruturas utilizadas em cada nível de tensão e a respectiva distância entre os cabos de fase, que no 500 kV corresponde a 12,3 m, enquanto nas LTs 230 kV este valor é de 7,2 m.

TABELA 1 – Tipos de faltas por fases envolvidas por nível de tensão das LTs

Nível de Tensão da LT	Tipos de faltas por fases envolvidas [% do total]			
	Fase-Terra FT	Fase-Fase-Terra FFT	Fase-Fase FF	Trifásico 3F
Total	88,5	8,4	1,3	1,8
500 kV	97,2	2,8	--	--
345 kV	90,2	6,2	1,9	1,7
230 kV	61,6	30,3	2,0	6,1

4.0 - ANÁLISE DO DESEMPENHO DO RELIGAMENTO AUTOMÁTICO

A seguir propomos uma análise de desempenho do religamento automático sob enfoque da origem do defeito, se o curto-circuito foi transitório ou não. Portanto, consideramos como religamento satisfatório – RAS quando pelo menos

um dos terminais da LT foi fechado com sucesso, já que neste caso podemos afirmar que a falta foi extinta. Foram compilados dados de 2013 a 2017 e segundo a Figura 7 e o critério citado anteriormente o desempenho do religamento automático foi satisfatório – RAS para 80,8% do total sendo que para 19,2% dos casos a falta permaneceu implicando em religamento automático não satisfatório – RANS.

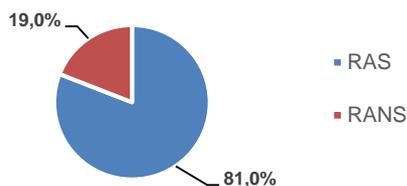


FIGURA 7 – Desempenho do Religamento Automático

5.0 - ANÁLISE CONJUNTA DE PARÂMETROS

A partir da experiência da análise de oscilografia das faltas, do banco de dados repleto de causas identificadas, conforme procedimentos vigentes na empresa e da experiência dos profissionais de proteção foram sugeridas correlações entre parâmetros inerentes aos curtos-circuitos as quais serão mostradas a seguir.

5.1. Análise da Causa Animal: Curicaca

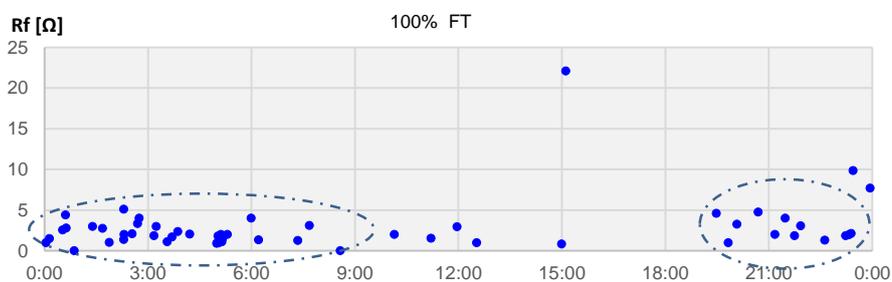


FIGURA 8 – Causa Curicaca: Horário do dia x Resistência de faltas

Foram analisados os curtos-circuitos causados por excrementos de curicacas versus o tipo de falta versus o horário da ocorrência da falta versus a resistência de falta medida pela Sapnet®. De acordo com a Figura 8 verifica-se a seguinte correlação: todas as faltas são do tipo FT, ocorrem no período da noite ou de madrugada e apresentam, em sua maioria, Rf menores que 10 Ω . Podemos buscar explicação no fato que este é o horário em que as aves, que têm hábitos diurnos, estão em seus ninhos e produzindo seu excremento. Os ninhos são normalmente construídos sob a cadeia de isoladores da fase localizada no meio da torre, explicando a incidência em sua totalidade de curtos-circuitos monofásicos. Além disso, nestes horários há umidade mais elevada do ar. Registramos também a ocorrência destas faltas concentradas nas regiões do estado de Minas Gerais: Triângulo Mineiro, Centro-Oeste e Sudeste, basicamente regiões agrícolas, de campos e cerrado, onde concentram-se as LTs de 345 kV e 500 kV e há registros da presença dessas aves.

Os casos de curtos-circuitos causados por excrementos de curicaca foram analisados e apontados os ângulos da tensão da fase faltosa no momento de inserção do curto-circuito, isto é, no instante do aparecimento da corrente de desequilíbrio de neutro. Os resultados são apresentados na Figura 9 abaixo. Adicionalmente, da Figura 9 infere-se que para este tipo de causa podemos associar: Tipo de curto FT; Baixa impedância $\leq 10 \Omega$; Ocorrendo no período da madrugada ou pela manhã e Ângulo da tensão da fase faltosa entre 45° e 135°.

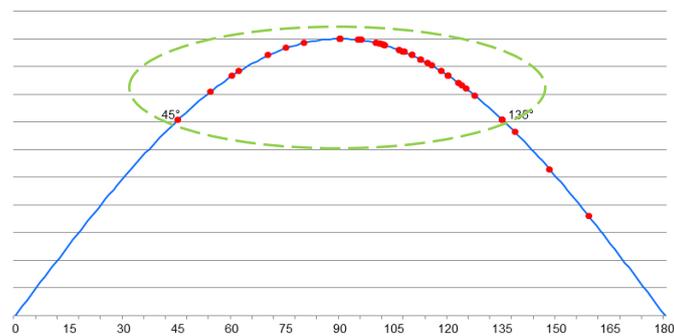


FIGURA 9 – Causa Aves: Ângulos da tensão da fase faltosa [°]

5.2. Análise da Causa Árvore

As faltas causadas por árvores são na sua maioria também do tipo FT - 83,3%, sendo outros 16,7% do tipo FFT. De acordo com a Figura 10 essas faltas, na sua maioria, apresentam Rf menores que 100 Ω .

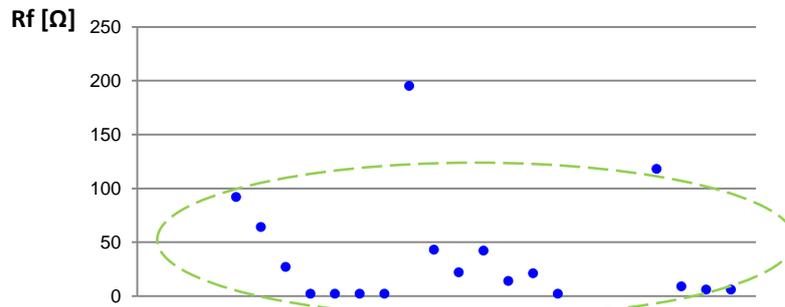


FIGURA 10 – Causa Árvore: Resistência de falta – Rf [Ω]

A análise dessas mesmas faltas com enfoque nos ângulos da tensão da fase faltosa mostrou, de acordo com a Figura 11, que esses ângulos ficam inseridos na faixa entre 60° e 130°. Lembra-se que devido ao tamanho pouco significativo da amostra, 24 casos para a causa árvore, esta correlação poderá ser modificada ao longo do tempo com o incremento de ocorrências.

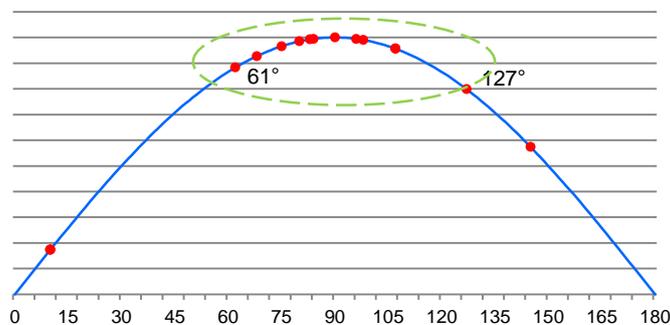


FIGURA 11 – Causa Árvore: Ângulos da Tensão da Fase Faltosa [$^{\circ}$]

5.3. Análise da Causa Queimadas

Além de concentrarem nos períodos secos do ano, de abril até outubro, as faltas causadas por queimadas ocorrem em sua maioria entre 09 e 19h, período mais quente e seco do dia, com predominância de faltas do tipo FT 91,5%, outros 8,0% são do tipo FFT e com registro de um único caso de FF. Também conforme a Figura 12 observam-se as Rf menores que 150 Ω .

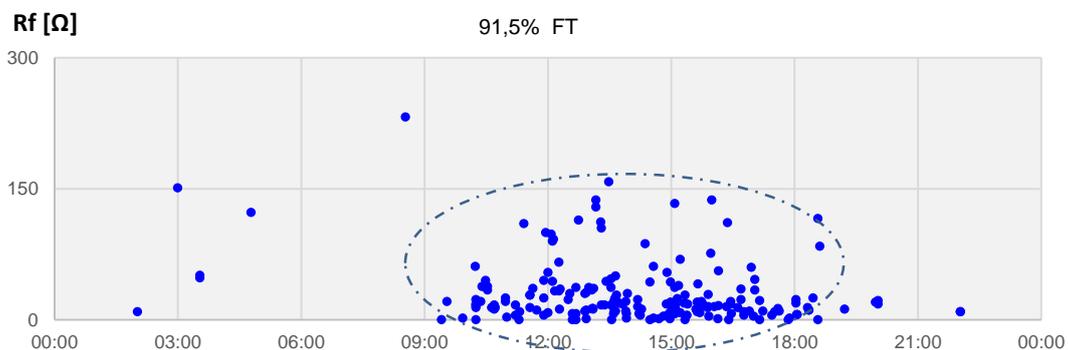


FIGURA 12 – Causa Queimadas: Resistência de falta – Rf x Horário de Ocorrência

Para o caso de queimadas, a análise com enfoque nos ângulos da tensão da fase faltosa exibiu, conforme mostra a Figura 13, uma faixa maior desses valores que ficaram entre 50° e 130°. Portanto, a combinação entre horário entre 09 e 19h, do tipo predominante FT, Rf \leq 150 Ω e ângulo variando de 50° e 150° permite o estabelecimento de uma correlação com essa grandeza e a causa com certo grau de assertividade.

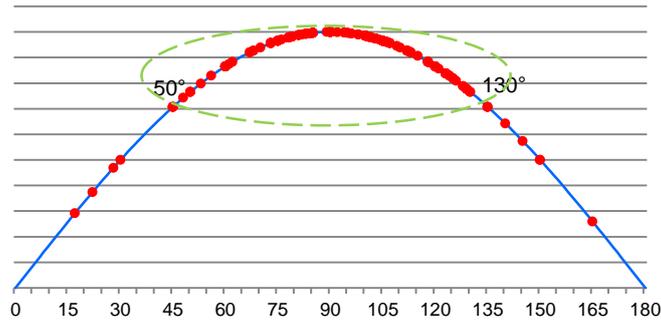


FIGURA 13 – Causa Queimadas: Ângulos da Tensão da Fase Faltosa

5.4. Análise da Causa Descarga Atmosférica

No período de 2012 a mar/2107 dentre um total de 272 casos de desligamentos cuja causa foi descarga atmosférica, houve a predominância das faltas envolvendo a terra sendo que 83,1% foram tipo FT e 11,4% são tipo FFT. Registra-se a ocorrência 5,5% de curtos-circuitos 3F e FF em LTs de tensões de 230 e 345 kV apenas.

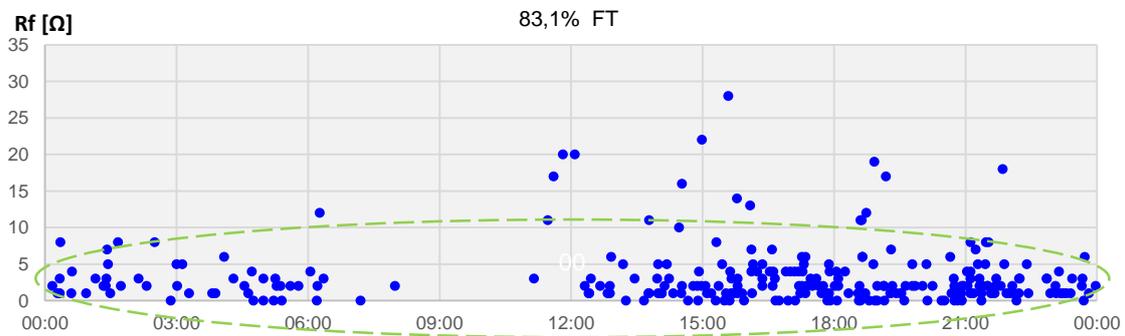


FIGURA 14 – Causa Descarga Atmosférica: Resistência de falta – Rf

Verifica-se na Figura 14 Rf menores que 15 Ω para estes casos e ocorrências espalhadas ao longo do dia.

Conforme Figura 15, observa-se grande dispersão dos valores de ângulo da tensão da fase faltosa no instante do estabelecimento do curto-circuito não sendo possível o estabelecimento da causa com este ângulo.

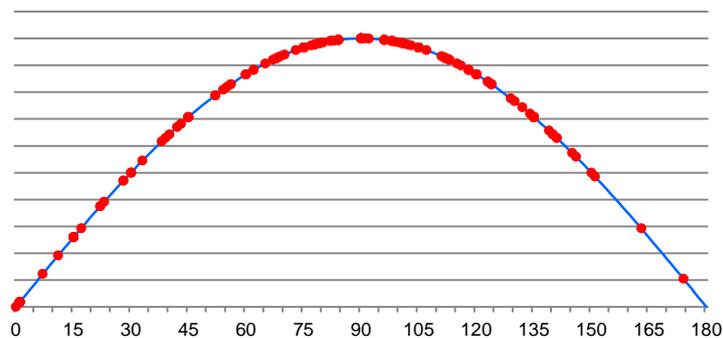


FIGURA 15 – Causa Descarga Atmosférica: Ângulos da Tensão da Fase Faltosa

5.5. Síntese das análises

Abaixo segue Tabela 2 contemplando o resultado das análises de forma sucinta.

TABELA 2 – Correlações estabelecidas nas Análises

Causa	Resistência de Falta		Horário	Tipo de Falta	Ângulo de Incidência		Ferramenta externa para auxílio na classificação
	Min	Max			Min	Max	
Animal (Curicaca)	1	10	Entre 21h e 09h	FT	45	135	-
Queimada	10	150	Entre 09h e 18h	FT-FFT	50	130	-
Árvore	10	100	Indefinido	FT-FFT	50	130	-
Descarga Atmosférica	0	15	Indefinido	FT-FFT	Indefinido		SLT

6.0 - CONCLUSÃO

As análises aqui apresentadas podem reduzir significativamente o tempo de detecção dos locais de falha, isolamento e mobilização das equipes. Agregam valor ao produto Localização da Falta através do estabelecimento de padrões prováveis inerentes à algumas causas de falha. Esses padrões baseiam-se em correlações entre parâmetros tais como horários de ocorrência, fases envolvidas no defeito, resistência de falta calculada de forma precisa, o ângulo da tensão da fase faltosa no momento de inserção do curto-circuito e sua associação desses à causa do defeito.

Finalmente, essas funcionalidades, quando implementadas no sistema de classificação automática dos registros da Sapnet®, permitem redução do tempo de indisponibilidade dos elementos do SIN e melhoria do desempenho da concessionária de transmissão. Pretende-se o estabelecimento em processo contínuo dessas análises retrocedendo em anos anteriores, quando possível, e casos futuros visando enriquecer massa de dados e, por conseguinte a melhoria contínua do algoritmo e do processo na Cemig GT.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Gomes N. S., Andrade S. R. C., Costa C. A. B., Coutinho C. E. B., "SAPNET – Sistema de Análise de Perturbações da Cemig", XV SNPTEE, 1999.
- [2] Sousa W. M., Costa C. A. B., Pereira Jr, I. H., Filho C. S. P. – Sistema de Localização Automática de Falhas em Linhas de Transmissão Utilizando Dados de Dois Terminais – Experiência da Cemig, XVIII SNPTEE, Curitiba, 2005.
- [3] Sousa W. M., Filho C. S. P., Miranda, M. B. e Costa C. A. B., Caracterização Automática e Identificação em Registros Oscilográficos de Perturbações – X STPC - Recife – Brasil – 2010
- [4] ANEEL Resolução Normativa N° 729 - Disposições relativas à qualidade do serviço público de transmissão de energia elétrica... 28 de junho de 2016
- [5] Pinto O. Jr., Thunderstorm climatology of Brazil: ENSO and Tropical Atlantic connections, International Journal of Climatology, 35, 871-878, 2015
- [6] ONS - Operador Nacional do Sistema Mapa Densidade de Descargas Atmosféricas 1998–2013. http://www.ons.org.br/download/mapas_sin/pdf/Mapa%20Densidade%20Descargas%20Atmosfericas_1998-2013_.pdf em 20/03/17 - 15:05h.
- [7] ONS – Operador Nacional do Sistema - Relatório de Análise Estatística de Desligamentos Forçados Referente ao Ano de 2015 - Linhas de Transmissão - ONS RE 3/0077/2016 – Julho/2016

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

	<p>Weber Melo de Sousa* é natural de Divinópolis, MG. Nascido em Julho de 1968, concluiu o curso de graduação em Engenharia Elétrica pela PUC-MG em 1994, a pós-graduação em Sistemas Elétricos de Potência na Unifei em 1999 e a defesa da dissertação de mestrado pela UFMG em Dezembro de 2002, tendo recebido o título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica. Trabalha na Cemig GT há 31 anos tendo atuado nas áreas de operação e atualmente na área engenharia de proteção da Geração e Transmissão da Cemig GT. Possui vários artigos redigidos e apresentados em congressos, seminários e periódicos, nacionais e internacionais em temas relacionados com Proteção, Geração, Transmissão de Energia e Sistemas Elétricos de Potência. E-mail: weber@cemig.com.br</p>
	<p>Anderson Adriano Dias é natural de Belo Horizonte, MG. Nascido em Abril de 1976, concluiu o curso de graduação em Engenharia Elétrica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG em 2004. Trabalhou na empresa Cooper Bussman do Brasil Ltda. atuando como Engenheiro de Vendas até Junho de 2006. Trabalha na empresa Cemig Geração e Transmissão – CEMIG GT há 11 anos tendo atuado na área de planejamento da transmissão do sistema interligado nacional - SIN e atualmente trabalha na área de engenharia de proteção. E-mail: anderson.dias@cemig.com.br.</p>
	<p>Carlos Alberto Boaventura Costa é natural Belo Horizonte, MG. Nascido em Janeiro de 1965. Experiência profissional: Engenharia Elétrica, com ênfase em Circuitos Elétricos, Magnéticos e Eletrônicos, atuando principalmente nos seguintes temas: perturbações, localização de faltas, análise e Sincrofasores. E-mail: cacosta@cemig.com.br</p>
	<p>José Felício dos Santos é natural Lagoa da Prata, MG. Nascido em Janeiro de 1969. Concluiu o curso de graduação em Engenharia Elétrica pela PUC-MG em 1993, a pós-graduação em Sistemas Elétricos de Potência na UFMG em 2005. Trabalha na Cemig GT há 30 anos tendo atuado nas áreas de operação de estações, no Centro de Operação do Sistema (COS) e na área engenharia de proteção da Geração e Transmissão da Cemig GT. E-mail: jfsantos@cemig.com.br</p>
	<p>Victor Pereira do Carmo Neto é natural de Belo Horizonte, MG. Nascido em Março de 1988, concluiu o curso de graduação em Engenharia Elétrica pela PUC-MG em 2010 e MBA em Gestão de Negócios na FGV em 2016. Trabalha desde janeiro de 2014 na área de análise de perturbações no sistema elétrico e engenharia de proteção da geração e transmissão na Cemig GT. E-mail: victor.neto@cemig.com.br</p>