

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
PPGEE

AFUNDAMENTOS DE TENSÃO NO CONTEXTO DA
EXPANSÃO DOS SISTEMAS ELÉTRICOS:
PROPOSTA DE ÍNDICES CONSIDERANDO DADOS DO
SISTEMA DE DETECÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

ALUNA: Priscilla de Paula Ferreira Campici

ORIENTADORA: Maria Helena Murta Vale

CO-ORIENTADOR: Silvério Visacro Filho

Belo Horizonte, Fevereiro de 2009

Priscilla de Paula Ferreira Campici

**“AFUNDAMENTOS DE TENSÃO NO CONTEXTO DA EXPANSÃO
DOS SISTEMAS ELÉTRICOS: PROPOSTA DE ÍNDICES
CONSIDERANDO DADOS DO SISTEMA DE DETECÇÃO DE
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS”**

Dissertação de Mestrado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

**Área de Concentração: Engenharia de Potência
Linha de Pesquisa: Sistemas de Energia Elétrica**

**Orientadora: Prof^a Maria Helena Murta Vale
Universidade Federal de Minas Gerais**

**Co-Orientador: Prof. Silvério Visacro Filho
Universidade Federal de Minas Gerais**

**Belo Horizonte
Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG
2009**

DEDICATÓRIA

Daqui para o futuro
Àqueles que eu amo
A cada dia mais

AGRADECIMENTOS

Aos que me incentivaram a investir no mestrado, que estiveram ao meu lado na primeira vitória e comemoraram comigo tantas outras. Aos que me ajudaram a chegar até o final e que agora comemoram comigo mais essa conquista.

Aos amigos e colegas que ofereceram apoio técnico, com esclarecimentos, dicas, idéias, discussões, suas linhas de raciocínio. Aos amigos e colegas que deram apoio logístico, com artigos, burocracias, fins de semana de trabalho. Em especial, cito Rosilene, Rafael, Kátia e Tumilla.

À Universidade, pública e de qualidade, que me proporcionou a oportunidade de realizar diversos cursos, com ótimos professores, e me deu ferramentas para desenvolver esse trabalho.

À Capes, à Cemig, à FUNDEP, que deram a chance de seguir os estudos com bolsa e com verbas para o projeto.

Novamente à Cemig e aos seus funcionários, Tiago Vilela Menezes e Antônio César de Macedo Ferreira, que forneceram dados necessários e suficientes para o desenvolvimento dos estudos dessa dissertação.

Aos meus orientadores, pela oportunidade de participação no projeto e em outras atividades relacionadas à escola, que me ensinaram não apenas as disciplinas, mas também a ver o aprendizado por outros ângulos.

Aos meus amigos e familiares, que tantas vezes foram trocados pelos livros, artigos, computador, mas que sempre me entenderam e apoiaram.

À minha família; meu pai, minha mãe, minha irmã, que estiveram ao meu lado em cada conquista, em cada queda, em todos os momentos, sempre por perto, com a mão ao meu alcance.

A Deus, meu guia, que me mostrou o caminho em tantos momentos e que tanto fez acontecer em minha vida, que me deu persistência para seguir em frente.

A todos que se fizeram presentes, não só meu agradecimento, mas o meu reconhecimento, vocês têm grande parte nesse trabalho!

RESUMO

O fenômeno Afundamento de Tensão tem recebido destaque nos estudos relativos aos Sistemas Elétricos de Potência em decorrência dos seus impactos negativos para consumidores e concessionárias de energia. Este tem sido considerado uma das principais causas de interrupção de energia e de mau funcionamento de equipamentos, resultando em perda da qualidade da energia.

Atualmente, a questão tem sido tratada basicamente de forma *corretiva* na fase de operação do sistema elétrico. Esta dissertação de mestrado propõe uma nova abordagem para o problema, tratando-o de forma *preventiva*, já na fase de Planejamento da Expansão dos sistemas de potência.

Tal abordagem se baseia na concepção de Índices de Afundamento de Tensão a serem incluídos no processo de decisão envolvido na elaboração dos planos, norteando o planejador na escolha da alternativa de expansão mais adequada. Os índices procuram quantificar o grau de severidade dos afundamentos e, para tal, consideram os três principais parâmetros relativos ao evento: amplitude, duração e frequência.

O grau de influência de cada um desses parâmetros no desempenho do sistema foi investigado, considerando-se a diversidade das características construtivas dos sistemas elétricos. Particularmente, tendo em conta que os curtos-circuitos decorrentes de descargas atmosféricas constituem a causa mais freqüente dos afundamentos de tensão, foi explorada a influência da distribuição geográfica não uniforme da incidência de raios nestes eventos. Nesta direção, um dos aspectos inovadores dessa dissertação é o uso de dados provenientes de Sistemas de Detecção e Localização de Descargas Atmosféricas (LLS - *Lightning Location System*) na composição dos índices.

Por meio de simulações em sistemas reais, o trabalho detalha a utilização dos índices propostos nas etapas de Planejamento da Expansão, mostrando sua aplicação na identificação de pontos frágeis na rede elétrica. Uma vez identificados os pontos críticos, já nos passos iniciais do processo, os planejadores podem atuar no sistema de forma a evitar a ocorrência dos afundamentos de tensão. Os resultados obtidos indicam benefícios de impacto para o desempenho do sistema de potência.

ABSTRACT

The impact of voltage sags to power utilities and consumers has been remarking this event as a relevant phenomenon to address in power system studies. It is considered one of the most frequent sources of power-supply interruption and malfunction on several types of equipment, resulting in power-quality degradation.

Nowadays, voltage sag has been basically addressed by means of corrective actions during system operation. This thesis proposes a preventive approach to address this event, including the corresponding analyses in the Expansion Planning activities.

The proposed methodology is based on the conception of Voltage Sag Indices to be applied in the development of expansion plans to indicate the planner the most suitable expansion alternatives. These indices are designed to indicate the severity level of voltage sag occurrence as a function of three main parameters: magnitude, duration and frequency.

The influence of each one of such parameters on the power system performance was investigated, taking into account the differences of topology and features of electrical power systems. Particularly, since lightning-related short-circuits are known as the main cause of voltage sags, the influence of the non-uniform geographic distribution of lightning incidence along the transmission system was explored. In this respect, an innovative aspect of this work consists in the use of data provided by Lightning Location System (LLS) to compose the mentioned indices.

In this work, the application of the proposed indices in the expansion process is detailed by simulations applied to real power systems. It is shown how critical points along the transmission network can be identified in the early stages of system planning to prevent the occurrence of voltage sags. The results show that the application of the presented strategy leads to the improvement of power system performance.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	AFUNDAMENTOS DE TENSÃO – DEFINIÇÕES E CONCEITOS BÁSICOS	4
2.1.	DEFINIÇÕES	4
2.2.	CAUSAS, EFEITOS E DINÂMICA DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO	6
2.3.	GRANDEZAS DE CARACTERIZAÇÃO DO FENÔMENO	10
2.3.1.	AMPLITUDE DO AFUNDAMENTO	10
2.3.2.	DURAÇÃO DO AFUNDAMENTO	12
2.3.3.	FREQÜÊNCIA DE OCORRÊNCIA DO AFUNDAMENTO	14
2.4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	15
3	CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE ÍNDICES DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO	17
3.1.	ETAPAS DE PLANEJAMENTO – CONSIDERAÇÃO DO AFUNDAMENTO DE TENSÃO	17
3.2.	SISTEMA DE DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	20
3.3.	ÍNDICES DE AFUNDAMENTO – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.3.1.	CONSIDERAÇÕES GERAIS	22
3.3.2.	METODOLOGIAS PARA CÁLCULO DE ÍNDICES	23
3.3.3.	ÍNDICES EXISTENTES	25
3.3.3.1.	SARFI	25
3.3.3.2.	GRÁFICOS DE SENSIBILIDADE	26
3.3.3.3.	TABELAS DE TENSÃO VS. DURAÇÃO	27
3.3.3.4.	GRÁFICOS DE COORDENAÇÃO	28
3.3.3.5.	ENERGIA DO AFUNDAMENTO	29
3.3.3.6.	ÍNDICE DE SEVERIDADE DO AFUNDAMENTO	30
3.4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
4	PROPOSTA DE ÍNDICE DE AFUNDAMENTO DE TENSÃO APLICADO AO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO	33
4.1.	METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS	33
4.1.1.	AMPLITUDE E DURAÇÃO DO AFUNDAMENTO	33
4.1.2.	FREQÜÊNCIA DE OCORRÊNCIA DO AFUNDAMENTO	34
4.2.	PRIMEIROS ESTUDOS SOBRE O ÍNDICE	35
4.3.	INVESTIGAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS	36
4.4.	PROPOSTA DO ÍNDICE I_{plan}	42
4.4.1.	INVESTIGAÇÕES PRELIMINARES	42
4.4.1.1.	RELAÇÃO COM A AMPLITUDE DO AFUNDAMENTO DE TENSÃO	42
4.4.1.2.	RELAÇÃO COM A DURAÇÃO DO AFUNDAMENTO DE TENSÃO	46
4.4.2.	CONCEPÇÃO DO I_{plan}	49
4.5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	49

5	APLICAÇÃO DO ÍNDICE I_{plan} NA DECISÃO DE PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO	51
5.1.	APLICAÇÃO DO ÍNDICE – CASO BASE	51
5.2.	APLICAÇÃO DO ÍNDICE – ALTERNATIVAS DE EXPANSÃO	55
5.2.1.	ALTERNATIVA 1	55
5.2.2.	ALTERNATIVA 2	58
5.3.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
6	CONCLUSÃO E CONTINUIDADE	62
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – CIRCUITO EXEMPLO	6
FIGURA 2.2 – GRÁFICO TENSÃO RESIDUAL-DURAÇÃO PARA AFUNDAMENTOS DE DIVERSAS ORIGENS – ADAPTADA DE [BOLLEN 00]	9
FIGURA 2.3 – AFUNDAMENTOS DE TENSÃO EM UMA BARRA DE REFERÊNCIA PARA FALTAS AO LONGO DO SISTEMA – ADAPTADA DE [IEEE 07]	12
FIGURA 2.4 – PADRÃO SAZONAL DE EVENTOS DE AFUNDAMENTO NOS ESTADOS UNIDOS E CANADÁ – ADAPTADA DE [DORR 95]	15
FIGURA 3.1 - REDE DE DETECÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NO BRASIL [RINDAT 09]	21
FIGURA 3.2 - DENSIDADE MÉDIA DE STROKES EM MINAS GERAIS	22
FIGURA 3.3 – CÁLCULO DE ÍNDICES – ADAPTADA DE [BOLLEN 03]	24
FIGURA 3.4 – GRÁFICO DE COORDENAÇÃO – ADAPTADO DE [IEEE 07]	29
FIGURA 3.5 – ENERGIA DO AFUNDAMENTO PARA TENSÕES RESIDUAIS DE 0,1 PU, 0,5 PU E 0,8 PU	30
FIGURA 3.6 – ÍNDICE DE SEVERIDADE PARA TENSÕES RESIDUAIS DE 0,1 PU, 0,5 PU E 0,8 PU	31
FIGURA 4.1 – EXEMPLO DE DIVISÃO DE LINHA DE TRANSMISSÃO	35
FIGURA 4.2 – SISTEMA ELÉTRICO USADO NOS ESTUDOS [VALE 06]	37
FIGURA 4.3 – EXEMPLO DE CURTO-CIRCUITO DESLIZANTE	38
FIGURA 4.4 – RELAÇÃO ENTRE O ÍNDICE DE AMPLITUDE DO AFUNDAMENTO E A FREQUÊNCIA DE DESLIGAMENTO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO [VALE 06]	40
FIGURA 4.5 – INSERÇÃO DO PARÂMETRO RELATIVO À DENSIDADE DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS [VALE 06]	41
FIGURA 4.6 - ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE FUNÇÕES	43
FIGURA 4.7 - VARIAÇÃO DE γ NA EQUAÇÃO 4.4	45
FIGURA 4.8 - VARIAÇÃO DE β NA EQUAÇÃO 4.5	46
FIGURA 4.9 – $I_A \times D$	47

FIGURA 4.10 – $X = 0,5$	48
FIGURA 4.11 – $X = 0,2$	48
FIGURA 4.12 – $X = 0,1$	48
FIGURA 5.1 – CASO BASE	52
FIGURA 5.2 – CURTO-CIRCUITO DESLIZANTE: CASO BASE	53
FIGURA 5.3 – DENSIDADE DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: CASO BASE	54
FIGURA 5.4 – I_{plan} : CASO BASE	54
FIGURA 5.5 – PRIMEIRA ALTERNATIVA DE EXPANSÃO	55
FIGURA 5.6 – CURTO-CIRCUITO DESLIZANTE: ALTERNATIVA 1	56
FIGURA 5.7 – DENSIDADE DE DESCARGAS NA LINHA DA ALTERNATIVA 1	56
FIGURA 5.8 – VARIAÇÃO DO I_{plan} PARA A ALTERNATIVA 1	58
FIGURA 5.9 – SEGUNDA ALTERNATIVA DE EXPANSÃO	58
FIGURA 5.10 – CURTO-CIRCUITO DESLIZANTE: ALTERNATIVA 2	59
FIGURA 5.11 – DENSIDADES DE DESCARGAS NA LINHA DA ALTERNATIVA 2	59
FIGURA 5.12 – VARIAÇÃO DO I_{plan} PARA A ALTERNATIVA 2	60

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – CLASSIFICAÇÃO DAS VTCD [ANEEL 05]	5
TABELA 2.2 – ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO [MENEZES 02]	13
TABELA 2.3 – DADOS MÉDIOS ADOTADOS EM PROJETO [MENEZES 02]	14
TABELA 3.1 – GRÁFICO DE SENSIBILIDADE NRS 048-2 [CIGRÉ 04]	26
TABELA 3.2 - DENSIDADE DE AFUNDAMENTOS – ADAPTADA DE [IEEE 07]	27
TABELA 3.3 – DENSIDADE CUMULATIVA – ADAPTADA DE [IEEE 07]	28

1

INTRODUÇÃO

Os Sistemas de Energia Elétrica têm experimentado significativas alterações decorrentes da reestruturação do setor elétrico. Diversos fatores contribuem para isto, tais como o uso cada vez mais intenso das redes elétricas, a escassez de recursos financeiros para grandes investimentos, a maior rigidez em termos de restrições de ordem técnica, social e ambiental, dentre outros. Além disso, um cenário de competitividade crescente se desenvolve entre as empresas de fornecimento de energia elétrica, especialmente diante da abertura do mercado e dos leilões de energia.

Em conjunto com essa condição, as exigências do mercado consumidor com relação à *qualidade da energia* fornecida também aumentam. Paralelamente, verifica-se uma maior sensibilidade das cargas instaladas nos consumidores. Para que o consumidor receba energia de forma adequada, vêm crescendo as exigências por parte dos órgãos reguladores, como a ANEEL¹.

Com o objetivo de melhorar a qualidade da energia, estudos vêm sendo conduzidos para determinar quais eventos afetam as cargas consumidoras e as formas de mitigá-los. Um dos fatores já identificados são os fenômenos chamados Afundamentos de Tensão.

Tal fenômeno se caracteriza por reduções temporárias na amplitude da tensão operativa no barramento. Dependendo da amplitude da tensão percebida pela carga do consumidor e da duração desse evento, seus efeitos podem ser muito negativos. Com a diminuição da tensão, as cargas do tipo potência constante (motores, por exemplo) passam a demandar maiores correntes, exigindo do sistema elétrico uma energia que ele poderá não conseguir entregar. As cargas do tipo corrente e impedância constante poderão ter redução no seu desempenho quando a tensão de alimentação estiver reduzida. Essas alterações nos padrões de funcionamento das cargas podem provocar sérios danos ao sistema. Na realidade, os afundamentos de tensão têm sido considerados uma das principais fontes de interrupções de processos industriais, trazendo danos significativos para os consumidores, que sofrem paradas de

¹ ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica (www.aneel.org.br).

produção, com possibilidade de danos a equipamentos, e para as empresas de energia, que deverão pagar indenizações aos consumidores que sofrerem com a má qualidade da energia.

Apesar de todo o impacto negativo dos afundamentos de tensão para o sistema elétrico, na prática eles têm sido considerados apenas de forma corretiva, nas etapas de operação. Atuando no sentido de alterar esta situação, pesquisas vêm sendo realizadas no LRC²/UFMG em parceria com a CEMIG³ [Vale 06]⁴ [P&D 08] visando tratar do fenômeno de forma preventiva, já na etapa de Planejamento da Expansão, procurando minimizar ou, até mesmo, eliminar o problema causado por ele. A dissertação de mestrado [Menezes 07] aborda de forma bastante detalhada a integração das análises dos afundamentos de tensão nos estudos de planejamento.

Este trabalho se insere nessa pesquisa, dando continuidade aos estudos para determinar e quantificar as causas de ocorrências dos afundamentos de tensão e os seus impactos nos sistemas de transmissão de energia elétrica. Uma das motivações para a elaboração deste mestrado foi a necessidade de se propor uma metodologia que viabilizasse a inclusão do estudo do evento nas decisões de planejamento.

Tal metodologia se configurou na concepção de um Índice de Afundamento de Tensão, denominado I_{plan} , capaz de simplificar a análise das alternativas de expansão, no contexto desse fenômeno. A composição deste índice passou a caracterizar o objetivo específico do mestrado.

A concepção do I_{plan} envolveu a investigação de diversas questões, para que a análise do fenômeno pudesse ser introduzida na prática de planejamento. Além do processo de expansão, foi necessário conhecer bem o fenômeno, incluindo seus mecanismos, para determinar os parâmetros capazes de quantificar um evento de afundamento, de maneira que este pudesse ser comparável a outros eventos. Dentre os parâmetros que caracterizam os afundamentos, três se destacam, conforme tratado no texto: a *amplitude*, a *duração* e a *frequência* da ocorrência do fenômeno.

² LRC – *Lightning Research Center* - Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas – Convênio UFMG e CEMIG.

³ CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais.

⁴ A autora desta dissertação participou da elaboração do trabalho.

A principal causa dos afundamentos de tensão são as faltas originadas por curtos-circuitos na rede. Estes, por sua vez, resultam, na maioria dos casos, da ocorrência de descargas atmosféricas.

Um dos aspectos inovadores deste trabalho é a consideração dos dados do Sistema de Localização e Detecção de Descargas Atmosféricas (*Lightning Location System* – LLS) na determinação da frequência dos afundamentos. No trabalho, são utilizados resultados de estudos que correlacionam a ocorrência de faltas nos sistemas de transmissão de energia à incidência de descargas atmosféricas. Os LLS fornecem diversas informações, tais como a localização e o horário da incidência, bem como a intensidade das descargas em sua região de cobertura [Mesquita 01], [Visacro 05]. Tais dados participam da composição do índice proposto.

Para cumprir seu objetivo, essa dissertação está estruturada em sete capítulos. Após o Capítulo 1 introdutório, o Capítulo 2 tem como objetivo explicar o fenômeno dos afundamentos de tensão e os parâmetros que, quando variados, determinarão o comportamento do sistema diante do evento. Nesse capítulo, os cenários que podem resultar em um afundamento de tensão são expostos e avaliados. A partir desta análise é possível definir quais possuem maior relevância para os estudos de planejamento, ou seja, aqueles que apresentam opções de ação preventiva.

O Capítulo 3 identifica as etapas do processo de decisão do planejamento da expansão, sugerindo aquelas em que os estudos de afundamento devem ser incluídos. O uso de índices é recomendado. Completando o capítulo, é apresentada a revisão bibliográfica de diversos índices propostos na literatura, mostrando as formas como os afundamentos têm sido tratados. É indicado como os vários índices procuram quantificar e comparar os eventos que ocorrem em diferentes pontos do sistema, ao longo de períodos definidos de estudo.

No Capítulo 4 é proposto o índice I_{plan} . Tal proposta se baseia na análise sobre quais parâmetros são capazes de influenciar as definições de planejamento e em que medida eles exercem essa influência. O texto detalha toda esta análise.

No Capítulo 5 o índice é aplicado a um sistema elétrico real. Primeiramente é feito um exame do sistema existente para identificar os pontos críticos do mesmo em relação ao fenômeno. Em seguida, o I_{plan} é usado para se compararem duas propostas de expansão relativas à construção de novas linhas de transmissão.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho e as suas propostas de continuidade. As Referências Bibliográficas completam o texto no Capítulo 7.

2

AFUNDAMENTOS DE TENSÃO – DEFINIÇÕES E CONCEITOS BÁSICOS

Vários estudos relacionados ao tema Afundamentos de Tensão têm sido realizados na área da Engenharia Elétrica. Ainda assim, não se verifica um consenso com relação a definições e nomenclaturas. Este capítulo discute alguns pontos abordados pela literatura e identifica as definições que são adotadas ao longo deste trabalho.

Dentre os temas abordados incluem-se as causas, os efeitos e a dinâmica dos afundamentos, as principais grandezas que caracterizam o fenômeno e a sua relação com a ocorrência de descargas atmosféricas.

2.1. DEFINIÇÕES

A literatura técnica apresenta diversas definições sobre o fenômeno. Dentre elas, destacam-se:

IEEE⁵ *Afundamento*: “Decréscimo da tensão ou da corrente *rms* (*root mean square*) para um valor entre 0,1 e 0,9 pu na frequência de operação do sistema com durações entre 0,5 ciclo e um minuto” [IEEE 95].

Afundamento de tensão: “Redução repentina da tensão enquanto a carga permanece conectada à fonte” [IEEE 98].

IEC⁶ *Afundamento de tensão*: “Redução temporária da tensão em um ponto do sistema elétrico a valores abaixo de um determinado limiar” [IEC 03]. O limiar recomendado por [IEC 02] é de 0,9 pu para o início do afundamento e 0,91 pu para o final do mesmo. Para determinar a ocorrência de interrupções, é recomendado o limiar de 0,1 pu.

⁵ IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers.*

⁶ IEC – *International Electrotechnical Commission.*

ANEEL *Afundamento momentâneo de tensão*: “Evento em que o valor eficaz da tensão do sistema se reduz, momentaneamente, para valores abaixo de 90% da tensão nominal de operação, durante intervalo inferior a 3 segundos” [ANEEL 03].

A Agência classifica as demais Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) de acordo com a tabela 2.1, na qual estão destacados os eventos que apresentam maior interesse para este trabalho.

tabela 2.1 – Classificação das VTCD [ANEEL 05]

Classificação	Denominação	Duração da variação	Amplitude da tensão (rms) em relação à referência
Variação momentânea de tensão	Interrupção momentânea de tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 pu
	Afundamento momentâneo de tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 pu e inferior a 0,9 pu
	Elevação momentânea de tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 pu
Variação temporária de tensão	Interrupção temporária de tensão	Superior a três segundos e inferior ou igual a três minutos	Inferior a 0,1 pu
	Afundamento temporário de tensão	Superior a três segundos e inferior ou igual a três minutos	Superior ou igual a 0,1 pu e inferior a 0,9 pu
	Elevação temporária de tensão	Superior a três segundos e inferior ou igual a três minutos	Superior a 1,1 pu

Diversos autores sugerem definições para o fenômeno, de acordo com o foco de seus trabalhos. No contexto desta dissertação, vale destacar aquela apresentada em [Bollen 00]: “Afundamentos de tensão são uma redução na amplitude da tensão do fornecimento seguido de uma recuperação da tensão após um curto período de tempo”. Outra referência interessante é a [Milanović 05], onde se diz que “o que realmente importa é se o equipamento do consumidor desliga ou opera de maneira incorreta ou não”.

É importante ressaltar a diferença de nomenclatura entre referências que usam por base o IEEE e as que usam a IEC. No primeiro caso, define-se o chamado *voltage sag*, que é a variação de tensão que ocorre quando se registra um afundamento. Já no segundo, define-se o *voltage dip*, que é o valor que a tensão no ponto de interesse assume durante o evento. Ambas as definições são traduzidas para

o português como “afundamento de tensão”. Nesta dissertação é adotada a definição do IEEE para denominar a amplitude do afundamento de tensão, a qual, de acordo com a IEC, corresponderia à “profundidade do afundamento” (*depth of voltage dip*) [IEC 05]. Já a tensão residual na barra de interesse será associada ao conceito de “*voltage dip*”.

Neste texto são considerados afundamentos de tensão quaisquer variações que provoquem a diminuição do valor *rms* da tensão, em um ponto de interesse, para valores abaixo de 0,85 pu.

2.2. CAUSAS, EFEITOS E DINÂMICA DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Conforme já citado, a redução da amplitude da tensão de operação em pontos do sistema faz com que este sofra prejuízos, tais como a redução na sua capacidade de entrega de energia aos consumidores. Além disso, a energia que ainda é entregue apresenta níveis mais baixos de qualidade, o que pode provocar a saída de funcionamento de equipamentos dos consumidores pela atuação de seus próprios dispositivos de proteção. Tais interrupções podem, em alguns casos, levar à parada de toda uma linha de produção e até mesmo a danos em importantes equipamentos da indústria, causando danos a todo o sistema elétrico.

O fenômeno pode ser provocado por eventos tais como o chaveamento ou a flutuação de grandes cargas (fornos a arco, por exemplo), a energização de grandes transformadores, a partida de grandes motores ou curtos-circuitos. Este último é a principal causa de afundamentos de tensão e, por esse motivo, será mais explorado nesta dissertação.

A dinâmica dos afundamentos originados pela ocorrência de faltas no sistema de potência está intimamente relacionada aos fenômenos de curto-circuito. Tal dinâmica pode ser visualizada a partir de um circuito simples, como aquele da figura 2.1.

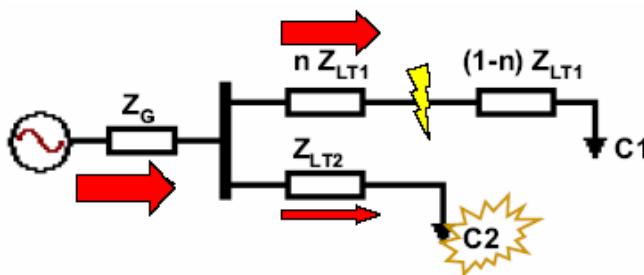


figura 2.1 – Circuito exemplo

Nesse circuito estão representadas a barra de geração (fonte e impedância Z_G) e duas linhas de transmissão (Z_{LT1} e Z_{LT2}), que alimentam duas cargas (C_1 e C_2). Na ocorrência de um curto-circuito em algum ponto da rede (por exemplo, no ponto n na linha de transmissão $LT1$), novos fluxos de corrente se estabelecem. Há um aumento da corrente que flui da fonte para o ponto de curto. Essa corrente elevada causa uma maior queda de tensão na impedância Z_G , resultando na diminuição da tensão na barra de geração. Verifica-se, portanto, na carga C_2 , ponto de observação deste sistema, a ocorrência de afundamento de tensão, ainda que a $LT2$ não tenha sido diretamente atingida pela falta.

A dinâmica do afundamento engloba, também, todo o comportamento do sistema de proteção, especialmente o tempo de atuação dos dispositivos. A duração do afundamento de tensão é um parâmetro relevante no estudo desse fenômeno. Quando as faltas não se extinguem sem qualquer interferência externa, é necessário que atue a proteção do sistema, geralmente efetuada por relés e fusíveis. Esses dispositivos normalmente têm característica de tempo inversa à magnitude das correntes que fluem no sistema e, conseqüentemente, aos níveis de tensão nominal do mesmo. Tempos típicos de atuação variam entre 100 e 500 ms [IEC 05].

Podem ocorrer casos nos quais a duração do afundamento de tensão é maior do que o tempo de atuação da proteção. Exemplos são a energização de transformadores ou a partida de motores, nos quais a corrente elevada se sustenta durante todo o tempo que durar tal evento, sem que a proteção atue. Entretanto, esses afundamentos têm amplitudes reduzidas.

O perfil de tensão resultante de um afundamento caracteriza a fonte desse evento. Um evento provocado por uma falta no sistema tem variações rápidas na curva de tensão em função do tempo, tanto no início como no final do afundamento. Quando a fonte for a energização de transformadores ou a partida de motores, a queda da tensão é instantânea, mas a recuperação da mesma é lenta. O que distingue os dois últimos eventos é a diferença no perfil da curva de tensão das três fases, que existe apenas no caso da energização dos transformadores [Nagpal 06].

Faltas que ocorrem nos sistemas elétricos podem envolver qualquer número de fases e podem ou não abranger a terra. Curtos-circuitos monofásicos à terra são o tipo mais comum de faltas, enquanto os tipos mais severos são, normalmente, dependendo dos valores das impedâncias envolvidas, os trifásicos à terra, que ocorrem menos freqüentemente, quando comparados aos outros tipos de faltas.

As características de duração e tensões residuais dos afundamentos podem ser visualizadas na figura 2.2. A numeração deste gráfico se refere à origem dos afundamentos, detalhada a seguir:

1. Faltas em sistemas de transmissão – têm pequena duração, geralmente são interrompidas pela atuação da proteção do sistema ou cessam espontaneamente antes mesmo dessa atuação. A amplitude do afundamento pode assumir valores muito altos ou não tão altos dependendo de fatores como a impedância entre o ponto de observação e o ponto de falta.
2. Faltas remotas em sistemas de distribuição – são também interrompidas pela atuação da proteção ou espontaneamente extintas. Como os níveis nominais de tensão das linhas que compõem um sistema de distribuição são mais baixos, bem como as correntes de curto-circuito, a atuação da proteção é mais lenta do que a observada nos sistemas de transmissão. A amplitude do afundamento é baixa devido à distância elétrica entre os pontos de observação e de curto, que torna menor a influência do circuito sob falta.
3. Faltas próximas em sistemas de distribuição – a duração do afundamento é ditada pela proteção do circuito de distribuição sob falta. As amplitudes de afundamento são elevadas devido à proximidade elétrica entre o ponto de falta e o ponto no qual se percebe o fenômeno.
4. Partida de grandes motores e energização de grandes transformadores – as suas características são ditadas pelo regime transitório desses eventos. Geralmente, envolvem amplitudes de correntes maiores do que aquelas observadas em operação normal, porém menores do que correntes de curto-circuito. Contudo, essas correntes estão presentes por um longo período nas linhas que alimentam o equipamento. Esse tipo de evento não é interrompido pela atuação de dispositivos de proteção.
5. Pequenas interrupções – as interrupções de fornecimento envolvem tensões residuais inferiores a 0,1 pu, conforme visto na tabela 2.1. Geralmente são causadas por curtos-circuitos muito próximos ao ponto de observação do sistema, o que justifica os níveis tão baixos de tensão.

6. Atuação de fusíveis – afundamentos causados por faltas interrompidas por fusíveis têm duração muito pequena, devido à rápida atuação desse dispositivo. Contudo, para que essa atuação ocorra, é necessária uma corrente muito alta, o que resulta amplitudes elevadas de afundamento.

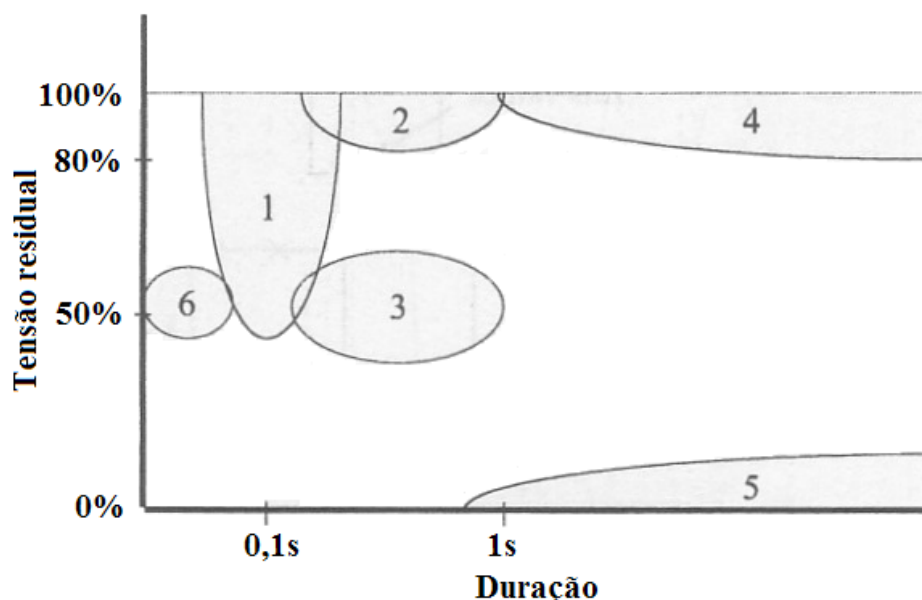


figura 2.2 – Gráfico tensão residual-duração para afundamentos de diversas origens – adaptada de [Bollen 00]

Percebe-se a partir da figura 2.2 que, geralmente, eventos como a energização de transformadores ou a partida de motores provocam afundamentos de tensão menos severos do que os curtos-circuitos. Isto decorre tanto das menores amplitudes e suas variações (derivadas), como da possibilidade de, em boa parte dos casos, serem previstas e controladas as condições em que ocorrem.

Por não serem previsíveis nem controláveis, é dispensada especial atenção aos curtos-circuitos, cujas causas mais comuns são:

- falhas em equipamentos, como chaves ou isoladores;
- falhas humanas, na manutenção ou na operação dos sistemas;
- impacto ou contato acidental com a rede elétrica (de animais ou veículos, por exemplo);
- eventos meteorológicos, tais como ventos, maresia ou descargas atmosféricas.

A eliminação da ocorrência de faltas nos sistemas elétricos é inviável. Portanto, é de interesse das concessionárias de energia e dos seus consumidores que estas sejam investigadas com o intuito de se reduzirem seus efeitos sobre as redes elétricas e as cargas.

2.3. GRANDEZAS DE CARACTERIZAÇÃO DO FENÔMENO

Os afundamentos de tensão são caracterizados pelas grandezas que refletem a sua ocorrência no sistema. São elas a amplitude e a duração desses eventos e a frequência com que ocorrem.

2.3.1. AMPLITUDE DO AFUNDAMENTO

A amplitude do afundamento de tensão é uma das características mais discutidas sobre o fenômeno. Seu valor é de extrema importância para se determinar qual o efeito imediato de um afundamento no sistema, apesar de não ser suficiente para definir as consequências que este poderá sofrer após a redução da tensão percebida pela barra monitorada.

Diversos parâmetros influenciam a variação da amplitude. No que diz respeito aos afundamentos originados por faltas ocorridas no sistema, tais parâmetros estão intimamente relacionados aos cálculos de curto-circuito. O valor e a circulação das correntes de curto e, conseqüentemente, os valores de tensão observados nos pontos da rede, se estabelecem de acordo com as características do sistema elétrico (configuração, impedância dos componentes, tipo de ligação dos transformadores, etc.) e da falta (tipo, localização e impedância).

Este item destaca dois aspectos relativos à grandeza amplitude: os parâmetros que mais influenciam o seu valor e o uso de programas de curto-circuito deslizante para a realização dos cálculos envolvidos.

Parâmetros de Influência da Amplitude

→ *Configuração do sistema*: um sistema muito malhado e alimentado por diversas fontes independentes não sofrerá influências muito grandes de uma falta distante, resultando em um afundamento de tensão de baixa amplitude, quando ocorrer. No outro extremo, um sistema com alimentação radial poderá sofrer afundamentos de tensão de amplitudes muito elevadas.

→ *Tipo da falta*: o tipo e a simetria da falta determinam o que ocorrerá em cada fase do sistema. Uma falta monofásica à terra, por exemplo,

provoca um afundamento de tensão na fase sob falta, enquanto as demais fases sofrem pequenas elevações no perfil da sua tensão. Quando se trata de uma falta trifásica, as três fases sofrem grandes reduções nos valores de tensões percebidos durante a perturbação.

- *Tensão pré-falta*: apesar de pequena a influência dessa variável, ela ainda deve ser considerada. Em operação normal, há uma flutuação no valor observado das tensões em um ponto qualquer de um sistema de potência. Geralmente essas tensões operativas variam entre 0,95 pu e 1,05 pu. Essa faixa de valores pode provocar correntes de falta e quedas de tensão bastante diferentes quando da ocorrência de um curto circuito no sistema.
- *Tipos de conexão dos transformadores*: esse fator pode influenciar na amplitude do afundamento uma vez que é possível que, ao passar pelo processo de transformação, os perfis de tensões características provocadas por um dado tipo de falta sejam alteradas, fazendo com que o secundário do transformador perceba uma falta diferente daquela que de fato ocorreu no lado do primário [Becker 93].
- *Impedância e localização da falta*: tais parâmetros definem a impedância entre o ponto de falta (sorvedouro de corrente) e a referência de potencial.

Definindo-se esses parâmetros, as correntes de falta podem ser determinadas, bem como as quedas de tensão ao longo do sistema pelo qual estas fluem, definindo-se, então, a amplitude do afundamento de tensão resultante.

Nos estudos, para determinação da amplitude, tem sido utilizada uma metodologia que permite o cálculo do chamado *curto-circuito deslizando* [Hill 97], metodologia na qual é escolhida uma barra de referência (o consumidor sob estudo, por exemplo) e são simulados curtos-circuitos nas linhas que o alimentam. Os pontos de curto-circuito são determinados em termos da percentagem do comprimento de cada linha, definida como entrada de um programa computacional. Vale ressaltar que este aplicativo não trata de forma diferenciada linhas de transmissão com comprimentos variados. Assim, para qualquer das linhas de um sistema estudado, é feito o mesmo número de simulações, resultando em trechos de comprimentos muito distintos para linhas com comprimentos diferentes.

O programa permite a escolha do tipo de falta a ser simulada (faltas trifásicas à terra, fase-fase-terra, fase-fase e monofásicas à terra), além da impedância a ser considerada para todas as faltas aplicadas.

Conforme ilustrado na figura 2.3, o cálculo do curto-circuito deslizante permite identificar regiões nas quais a ocorrência de uma falta provoca afundamentos de tensão semelhantes no ponto de observação (barra de referência). Isso possibilita que se delimitem regiões com maior ou menor influência sobre este ponto.

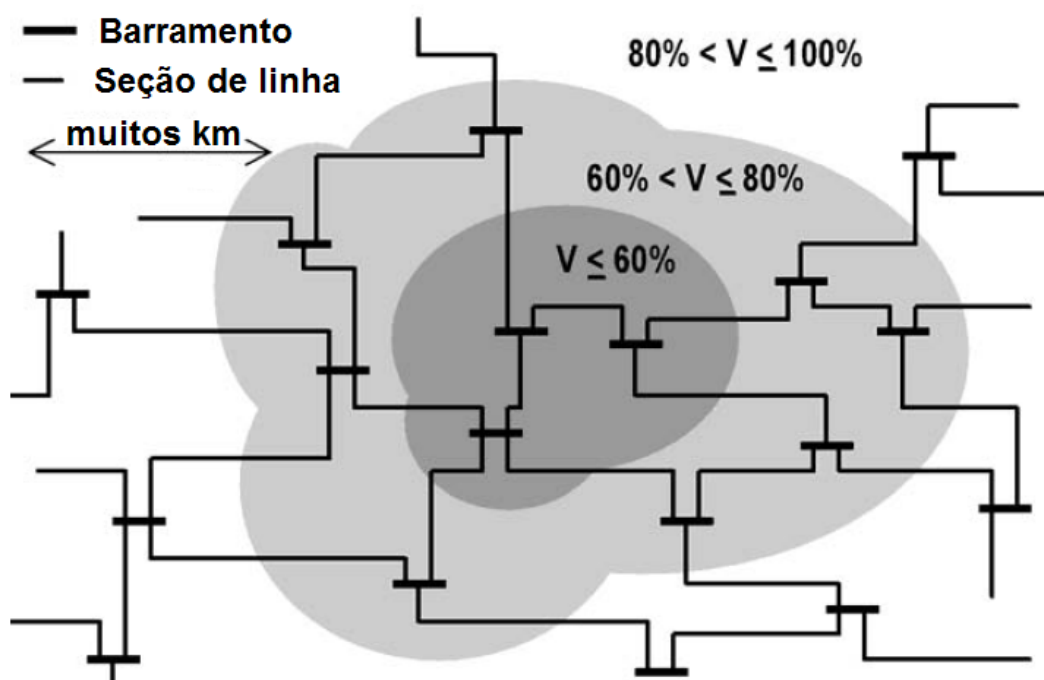


figura 2.3 – Afundamentos de tensão em uma barra de referência para faltas ao longo do sistema – adaptada de [IEEE 07]

É importante notar que a distância física entre duas subestações não necessariamente corresponde à distância elétrica, de forma que uma falta em uma subestação vizinha pode resultar em um afundamento de menor amplitude do que outra localizada a quilômetros de distância. Conforme já salientado anteriormente, o valor da amplitude depende do valor da corrente de curto-circuito que, por sua vez, depende de diversos fatores (tipo e localização da falta, impedâncias e topologia da rede, etc.).

2.3.2. DURAÇÃO DO AFUNDAMENTO

A duração do afundamento de tensão é tipicamente obtida observando-se os instantes de tempo nos quais a curva que descreve a tensão no ponto de observação ultrapassou o limiar de amplitude definido para registrar um evento. A duração é a

diferença entre o tempo em que a curva de tensão voltou a assumir valores aceitáveis e aquele em que essa grandeza passou a assumir valores inferiores ao limiar determinado. Em alguns casos aplica-se uma histerese, usando-se um limiar de tensão mais alto para o final do afundamento [IEC 02].

Quanto maior a duração de uma falta, mais severos são os efeitos do afundamento de tensão, uma vez que uma maior quantidade de energia deixa de ser entregue ao consumidor. Isto pode provocar defeitos graves em seus equipamentos e até a perda dos mesmos.

Parâmetros de Influência da Duração

Em um sistema de potência, a duração da falta é limitada superiormente pela atuação dos dispositivos de proteção instalados nas linhas e nos equipamentos. Esses dispositivos atuam com a finalidade de interromper correntes de falta que fluem nos equipamentos do sistema, podendo apresentar certos atrasos projetados para possibilitar a coordenação da atuação de diversos dispositivos.

Normalmente, para cada nível de tensão nominal da linha de transmissão existe um tempo padrão para atuação de tais dispositivos, que é menor quanto maior for o nível de tensão para o qual o sistema foi projetado. Isto porque sistemas que operam com altos níveis de tensão nominal são capazes de fornecer correntes de curto muito altas, correntes estas que têm impactos muito severos na operação do sistema. Valores típicos de atuação usados por concessionárias de energia brasileiras podem ser vistos na tabela 2.2.

tabela 2.2 – Atuação da proteção em linhas de transmissão [Menezes 02]

Tensão nominal (kV)	Tempo de atuação (s)
500	0,065
345 - 230	0,1
138 - 161	0,5
69	1,0

Os casos em que o afundamento de tensão não é provocado por ocorrência de faltas no sistema não são de interesse para esse estudo, assim não serão levados em consideração afundamentos com durações maiores do que o tempo da proteção. É importante ressaltar ainda que existem faltas (e, por consequência, afundamentos) que se extinguem espontaneamente em tempos menores do que os da proteção. Estes casos não serão computados uma vez que não representam a pior situação.

2.3.3. FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA DO AFUNDAMENTO

Os estudos realizados neste trabalho utilizam informações sobre a frequência de desligamento de linhas de transmissão para inferir a frequência com que ocorrem os afundamentos de tensão.

A frequência de desligamentos de linhas normalmente considera dados históricos provenientes das empresas de energia elétrica e, também, de referências como a [IEEE 07]. O valor da frequência de desligamentos é hoje utilizado já na fase de projeto de linhas de transmissão, no dimensionamento de itens como proteção e isolamento. Valores típicos utilizados pelas concessionárias de energia brasileiras se encontram na tabela 2.3. Linhas de transmissão com nível de tensão nominal mais elevado apresentam menores taxas de desligamentos, uma vez que o seu nível de isolamento é superior ao das linhas que apresentam tensão nominal mais baixa. Outro fator que influencia nesta taxa é o comprimento da linha, que afeta esses valores de maneira proporcional.

tabela 2.3 – Dados médios adotados em projeto [Menezes 02]

Nível de tensão (kV)	Desligamentos/100km/ ano
69	5,8
161 – 138	4,1
230 – 345	2,1
500	0,9

Como são baseados em dados históricos, esses valores não discriminam a causa dos desligamentos. Englobam, por exemplo, os desligamentos de linhas originados por falhas de equipamentos ou de operação, e também por eventos atmosféricos que tenham ocorrido.

Contudo, a ocorrência de descargas atmosféricas não possui uma distribuição geográfica uniforme e as densidades de incidências de descargas podem ser bastante diferentes em regiões diversas. Logo, verifica-se uma limitação ao uso dos dados de desligamentos mostrados na tabela 2.3 nos estudos de afundamentos de tensão.

Assim, como nem todas as linhas de transmissão de qualquer nível de tensão nominal apresentam as mesmas taxas de falha, conforme seria suposto ao se usarem os dados da tabela 2.3, essa dissertação propõe-se a resgatar a informação relativa a descargas atmosféricas com o auxílio de dados de incidência coletados pelas redes de medição.

A correlação entre a ocorrência de faltas e de afundamentos de tensão com eventos de incidência de descargas pode ser observada por meio do gráfico da figura 2.4, no qual se vê a incidência de afundamentos de tensão ao longo de um ano nos Estados Unidos da América e em algumas regiões do Canadá. Nesse gráfico é possível perceber que a maior percentagem de eventos ocorre nos meses correspondentes ao verão nesse país, estação esta que corresponde às maiores taxas de incidência de descargas [Bollen 00].

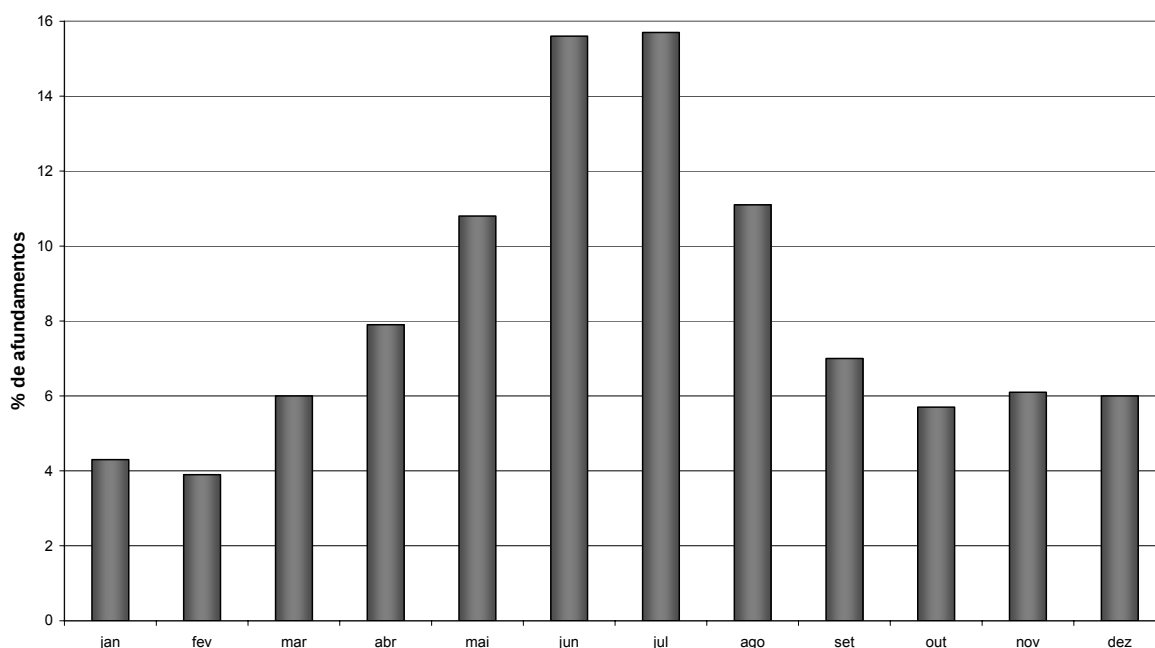


figura 2.4 – Padrão sazonal de eventos de afundamento nos Estados Unidos e Canadá – adaptada de [Dorr 95]

Neste trabalho de mestrado, para se obterem os dados históricos da ocorrência de raios, conforme introduzido no capítulo 1, recorreu-se aos LLS. Estes são compostos por estações em solo que detectam a incidência de descargas atmosféricas, armazenando em bancos de dados informações sobre cada descarga, tais como a sua localização, momento de incidência, a estimativa da intensidade de corrente, etc. [Mesquita 01].

2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O índice de afundamentos de tensão proposto nesta dissertação baseia-se nos parâmetros discutidos neste capítulo. Apesar de os conceitos acerca do fenômeno estarem bem registrados na literatura técnica, ainda se verifica a carência de aplicações práticas dos mesmos no que concerne aos estudos de planejamento da expansão elétrica.

Para que tal situação se altere, é necessário que se correlacionem os conceitos à prática da engenharia. Como exemplo desta correspondência, pode ser citada a discussão acerca da amplitude do afundamento. Como a amplitude está intimamente ligada ao cálculo de curtos-circuitos, sob a perspectiva do planejador, pode-se relacioná-la a obras de expansão que alterem as impedâncias e/ou a topologia da rede. A análise da frequência de ocorrência dos afundamentos causados por descargas em determinadas áreas da rede elétrica sugere que este seja um parâmetro de comparação entre diferentes alternativas de expansão.

Com o objetivo de fazer tal relação, o próximo capítulo procura contextualizar o estudo do fenômeno nas etapas de planejamento.

3

CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE ÍNDICES DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

As referências [Vale 06], [Menezes 07] e [P&D 08] abordam a inclusão de análises de afundamentos de tensão no processo de decisão envolvido na expansão dos sistemas elétricos. Tais estudos indicam que uma maneira adequada para tal inclusão poderia se dar por meio de indicadores que auxiliassem o planejador tanto na avaliação do desempenho do sistema quanto na seleção da melhor alternativa de expansão com relação ao fenômeno. Neste sentido, partiu-se para a identificação das características de um possível *Índice* que atendesse ao planejamento.

A presente dissertação se insere na pesquisa de inclusão dos estudos de afundamento de tensão ao Planejamento da Expansão do Sistema Elétrico. Para melhor caracterizá-la, portanto, este capítulo apresenta o contexto no qual foi definido o objetivo desse texto – a *concepção de Índice de Afundamento de Tensão aplicado à Expansão*. Nesse sentido, o texto inclui os resultados da pesquisa bibliográfica sobre índices apresentados na literatura técnica.

3.1. ETAPAS DE PLANEJAMENTO – CONSIDERAÇÃO DO AFUNDAMENTO DE TENSÃO

Com a finalidade de atender à crescente demanda por energia elétrica, as empresas responsáveis por seu fornecimento buscam sempre aprimorar o processo de planejamento da expansão do seu sistema e torná-lo cada vez mais eficiente.

Em [Menezes 07], a inclusão de análises de afundamentos de tensão na expansão é discutida de forma detalhada em três níveis do planejamento: Competências Vitais, Estudos de Planejamento e Tratamento de Consumidores Sensíveis.

Dentre esses níveis, o presente trabalho possui como objeto principal os Estudos de Planejamento, os quais englobam basicamente as seguintes etapas:

- Previsão de cargas futuras;
- Diagnóstico/prognóstico do sistema elétrico;
- Proposta de alternativas de expansão;
- Avaliações técnicas e econômicas das alternativas;
- Decisão final de planejamento.

Análises sobre os afundamentos de tensão devem ser incluídas nesse processo com a finalidade de contribuir para a melhoria da qualidade da energia entregue ao consumidor no futuro. Para melhorar o desempenho do fornecimento de energia é necessário que se atue em todas essas etapas, criando um processo capaz de minimizar os efeitos dos afundamentos no sistema elétrico.

Na primeira etapa, a *previsão de cargas futuras*, a atuação se dá no sentido de se conhecer qual será a nova demanda para o sistema. Quando ocorre a inserção de uma grande carga, o novo consumidor deve explicitar à companhia fornecedora qual será o tipo de carga inserido. Entre as informações técnicas disponibilizadas, dados como a sensibilidade das cargas instaladas à ocorrência dos afundamentos de tensão devem ser considerados. Uma nova carga inserida no sistema também provoca um novo padrão de consumo de energia elétrica, que pode trazer à tona ou agravar problemas de afundamentos de tensão no sistema existente.

Nas etapas seguintes do planejamento é possível realizar uma abordagem mais quantitativa do fenômeno. Nestas, há diversas ferramentas de análise que auxiliam o planejador a avaliar o desempenho dos sistemas elétricos. Tradicionalmente, dentre elas encontram-se os cálculos de fluxos de potência, curto-circuito, estabilidade de tensão e eletromecânica, transientes eletromagnéticos, etc. A proposta é incluir nessas análises uma nova ferramenta que busque identificar a influência dos afundamentos de tensão nessas análises. A maneira como cada uma dessas etapas pode englobar o estudo dos efeitos do fenômeno se daria como se segue:

- No *Diagnóstico do Sistema*: na identificação dos pontos críticos em termos de sensibilidade aos afundamentos de tensão no sistema elétrico atual;
- No *Prognóstico do Sistema*: na identificação dos pontos mais sensíveis aos afundamentos de tensão no sistema elétrico na condição futura prevista, considerando as novas cargas a serem conectadas e a

configuração que o sistema assumirá com as obras já aprovadas em estudos anteriores de planejamento;

- Na *Proposta de Alternativas de Expansão*: conhecendo-se as áreas mais sensíveis aos afundamentos nas perspectivas atual e futura, é possível que se concentrem esforços para que sejam propostas obras no sistema com a finalidade de se eliminar ou minimizar o impacto do fenômeno;
- Nas *Avaliações Técnicas e Econômicas das Alternativas*: novas simulações são realizadas para o sistema futuro incorporando-se os diversos reforços propostos. Considerando-se o desempenho do sistema, incorporando análises do afundamento, diante das condições de custo e de operação, podem ser definidos os novos planos de expansão.

Ao final do processo de planejamento, os especialistas devem ser capazes de apontar quais os investimentos mais adequados para o sistema, levando-se em consideração a sensibilidade das cargas instaladas e também a que tipo de problemas aquela instalação estará sujeita no horizonte de planejamento. Neste ponto, os estudos relativos aos afundamentos de tensão podem afetar decisões, tais como a escolha do barramento em que vão ser instaladas novas cargas, a localização de uma nova subestação e o traçado ou as proteções de novas linhas de transmissão, por exemplo.

A proposta é utilizar índices de afundamento nessas etapas. Estes seriam determinados com base nos parâmetros que caracterizam os afundamentos (amplitude, frequência e duração) e seriam utilizados da seguinte maneira:

- No *diagnóstico*, o índice indicaria qual parâmetro possui maior influência no afundamento, permitindo que o planejador atue no sistema para a redução da amplitude e/ou da duração e/ou da frequência de ocorrência.
- No *prognóstico*, o índice indicaria os pontos da rede que requerem obras de expansão para evitar a ocorrência do fenômeno.
- Na *proposta e na avaliação técnica de alternativas*, o índice indicaria, para cada opção, seu impacto no comportamento do sistema frente ao fenômeno, constituindo informação adicional para a escolha da obra mais adequada.

Conforme [Menezes 07] as alterações no sistema relacionadas aos parâmetros podem ser assim caracterizadas:

- Redução da Amplitude do Afundamento: alterar as impedâncias do sistema elétrico, a partir de obras ou mudanças na topologia da rede;
- Redução da Duração: definir sistema de proteção (relés e equipamentos de abertura de circuitos) com o menor tempo de atuação, para permitir a eliminação mais rápida das faltas;
- Redução da Freqüência: identificar e projetar linhas de transmissão e/ou sistemas de suprimento com melhores desempenhos, em especial frente às descargas atmosféricas.

3.2. SISTEMA DE DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

A ocorrência de um raio envolve um conjunto de efeitos perceptíveis à distância, que compreendem desde a sua luminosidade e seu efeito sonoro (trovão) até os campos eletromagnéticos irradiados por sua corrente de retorno [Visacro 05a].

A detecção desses campos pode ser utilizada para estimar algumas informações sobre o evento de incidência, tal qual a sua direção em relação ao sensor que o detectou.

Um Sistema de Detecção e Localização de Descargas Atmosféricas (em inglês, *Lightning Location System* - LLS) consiste em uma rede de sensores instalados em estações terrestres dispostas adequadamente a distâncias entre 100 e 300 km, que são utilizados para detectar os campos irradiados por eventos de descargas nuvem-solo, sincronizados com uma central de processamento com a qual se comunicam. A cada evento de incidência, as informações detectadas por tais sensores (incluindo o instante de detecção, a amplitude do sinal e, em alguns casos, a direção de chegada do sinal ao sensor) são enviadas à central para se prover estimativas do local e instante de incidência. São também realizadas estimativas, com menor precisão, da intensidade da corrente de retorno, dos tempos de subida e da duração do sinal de campo detectado.

A instalação de uma rede LLS no Brasil teve início em 1988, quando foram instalados os primeiros sensores no estado de Minas Gerais. Desde então, iniciou-se o monitoramento dos raios no país. Posteriormente, houve aumento do número de estações detectoras e diversos sistemas que funcionavam isoladamente foram interligados.

Hoje o Brasil conta com uma rede integrada de detecção de descargas atmosféricas composta por 24 sensores, a RINDAT, a Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas [RINDAT 09]. Essa rede oferece cobertura de detecção nos estados de Espírito Santo, Goiás, Minas Gerais, Paraná, Rio de Janeiro, São Paulo e parte do Mato Grosso do Sul e de Santa Catarina. A localização das estações pode ser vista na figura 3.1. É com base nos dados históricos armazenados por essa rede que se propõe a utilização das informações de descargas atmosféricas na composição dos índices de afundamento de tensão.

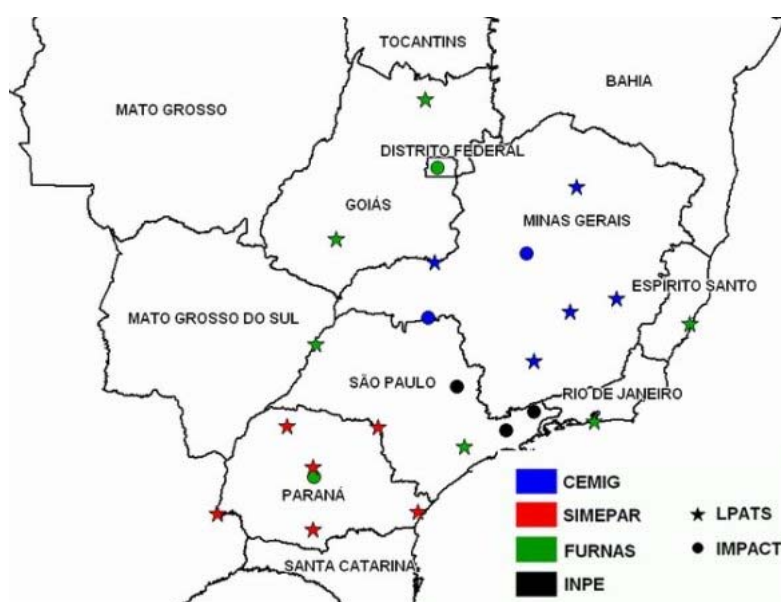


figura 3.1 - Rede de Detecção de Descargas Atmosféricas no Brasil [RINDAT 09]

Um exemplo do uso dos dados históricos de incidência de raios é mostrado na figura 3.2, obtida pela equipe do LRC [Mesquita 04] [Dias 05], que indica as regiões do estado de Minas Gerais onde se espera maior frequência de ocorrência de descargas atmosféricas.

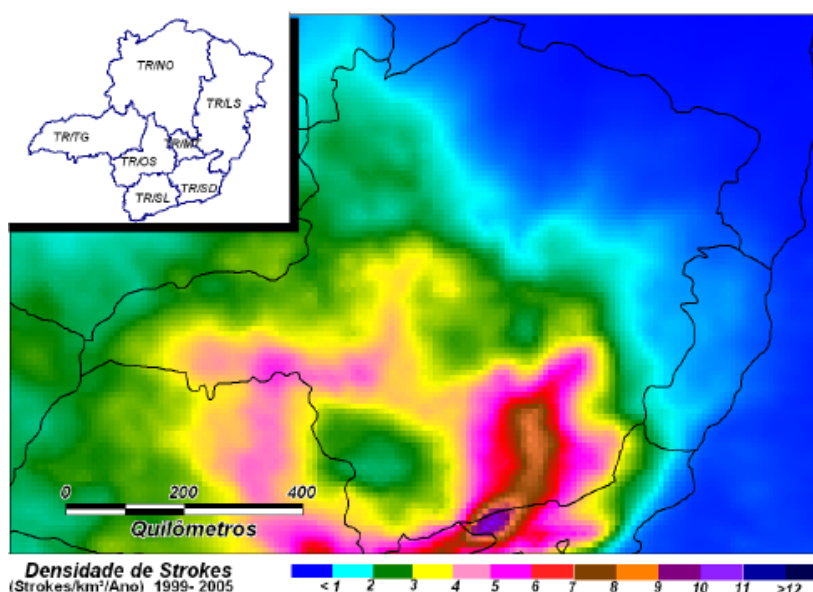


figura 3.2 - Densidade média de strokes em Minas Gerais

3.3. ÍNDICES DE AFUNDAMENTO – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O principal objetivo de se desenvolverem índices para mensurar um evento na rede elétrica, em geral, é criar padrões que permitam qualificar ou classificar os mesmos. Aplicam-se esses índices a pontos da rede elétrica a fim de comparar o desempenho de um sistema a outro ou a ele próprio ao longo do tempo. Isso é possível porque o uso de índices uniformiza o tratamento dado aos eventos que afetam o sistema.

No caso dos afundamentos de tensão, normalmente procura-se quantificar e caracterizar eventos passados para determinar se a planta de um consumidor é capaz de resistir aos afundamentos aos quais é submetido com maior frequência. Uma vez calculados esses índices, pode-se adotar uma medida para aumentar a confiabilidade do sistema elétrico sob análise.

Neste item é apresentada a revisão bibliográfica realizada para levantamento dos índices presentes na literatura que procuram caracterizar os afundamentos de tensão. Eles se baseiam nas metodologias propostas pela IEC ou pelo IEEE, conforme mostrado a seguir.

Não se incluem nessa revisão os índices propostos pela equipe do LRC, em [Vale 06] e [Menezes 07], uma vez que esses participam da mesma pesquisa relacionada a essa dissertação. Esses índices são tratados em detalhe no capítulo 4.

3.3.2. METODOLOGIAS PARA CÁLCULO DE ÍNDICES

Organizado pelo Cigré, há um grupo de trabalho [Cigré 04] dedicado ao estudo de índices que visam mensurar a qualidade da energia dos sistemas elétricos frente a diversos fatores. Além dos afundamentos de tensão, são tratados outros problemas encontrados nas redes, tais como a presença de harmônicos, *flicker*, desbalanço de fases e interrupções.

Os trabalhos desse grupo indicam metodologias de definição de valores e cálculos a serem realizados. Neste item são, inicialmente, expostas as recomendações da IEC para que se determinem as grandezas relacionadas aos afundamentos de tensão e, em seguida, são tratadas as do IEEE.

Recomendações da IEC

A IEC considera que o estudo do fenômeno afundamento de tensão deve ser feito considerando um dos pares de grandezas:

- amplitude e duração do afundamento;
- tensão residual e duração do afundamento.

Antes de se definir cada uma dessas grandezas, é necessário que se definam alguns valores de referência. O primeiro deles é utilizado para determinar o valor da tensão durante as medições. $U_{rms(1/2)}$ é o valor da tensão média quadrática medida durante um ciclo e atualizada a cada meio ciclo, conforme mostra a equação 3.1, na qual N é o número de amostras por ciclo, $u(i)$ representa a forma de onda de tensão amostrada e gravada e $k = 1, 2, 3, \dots$, o número das amostras. O primeiro valor é obtido pelas amostras $(1, N)$. Os valores seguintes são obtidos nas amostras $(\frac{1}{2}N+1, \frac{1}{2}N)$, e assim por diante. [IEEE 01].

$$U_{rms(1/2)} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1+k\frac{N}{2}}^{(k+1)\frac{N}{2}} u(i)^2} \quad (3.1)$$

Também é importante determinar o limiar de início e fim dos afundamentos. A norma [IEC 02] sugere que esses valores sejam estabelecidos, respectivamente, como 90% e 91% da tensão de referência. Essa tensão pode ser a tensão nominal da rede sob estudo ou uma tensão deslizante, que é a tensão medida a cada instante e leva em consideração a real tensão na rede antes da ocorrência de um afundamento

de tensão. Em cada estudo realizado, deve-se explicitar qual será a tensão de referência considerada.

Definidos esses padrões, caracteriza-se a *tensão residual do afundamento* como o menor valor medido de $U_{rms(1/2)}$. A *amplitude do afundamento* é a diferença entre a tensão de referência e a tensão residual. Já a *duração* do evento é definida como o módulo da diferença entre os tempos nos quais a tensão observada ultrapassou cada um dos limiares definidos para o início e o fim do evento. De posse desses valores, é possível determinar cada um dos índices recomendados pela norma IEC 61000-2-8.

Recomendações do IEEE

O IEEE também formou um grupo de trabalho para estudar variações de tensão. De acordo com [Bollen 03], o IEEE P1564 recomenda uma metodologia para o cálculo e a definição de índices para pontos da rede elétrica (estações) e para redes inteiras. Essa metodologia é mostrada na figura 3.3.

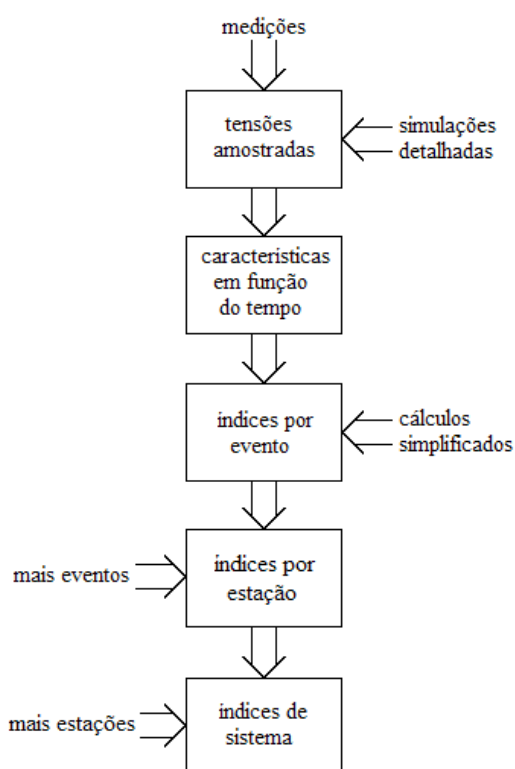


figura 3.3 – Cálculo de índices – adaptada de [Bollen 03]

Os passos indicados na figura 3.3 mostram a sequência que se recomenda seguir para o cálculo de índices relacionados à qualidade da energia. Para a obtenção das tensões presentes no sistema, podem ser usados valores provenientes de

medições coletadas da rede elétrica ou de simulações. Para que se usem nos cálculos os dados operativos, é necessário que existam equipamentos adequadamente distribuídos ao longo da rede a ser estudada, de forma que seja possível monitorar determinados pontos de observação considerados relevantes. Caso a opção seja pelo uso de dados de simulações, deve-se cuidar para que o modelo apresentado ao *software* aplicado seja verossímil e que esses cálculos não sejam fontes de erro. Uma metodologia comumente aplicada sugere determinar taxas de falha constantes para cada tipo de equipamento.

Uma vez de posse das tensões amostradas para uma dada condição operativa, calculam-se as características em função do tempo, como a tensão *rms* relativa aos dados coletados, a tensão residual e a duração dos eventos de afundamento. A partir dessas características, torna-se possível o cálculo de diversos índices, sejam eles para cada evento isolado, para um ponto de observação específico ou para um sistema mais abrangente, com diversas estações.

3.3.3. ÍNDICES EXISTENTES

Com o uso das metodologias propostas pela IEC ou pelo IEEE, é possível abordar cada um dos índices apresentados na literatura técnica como no estudo realizado pelo grupo de trabalho do Cigré. Esses índices são atualmente aqueles de mais vasta aplicação nos estudos de afundamentos de tensão.

3.3.3.1. SARFI

O índice SARFI (do inglês *System Average RMS variation Frequency Index*) conta quantos eventos de afundamentos de tensão ocorreram com duração entre meio ciclo e um minuto para um dado ponto de observação. Esses índices normalmente vêm acompanhados de uma indicação em subscrito. Esta pode ser:

- Um número, que indica qual limiar foi considerado para este cálculo. Valores propostos são de 10, 40, 70, 85 e 90 % da tensão de referência;
- Um nome, de uma curva relativa ao funcionamento de equipamentos dos consumidores, como as curvas SEMI, ITIC ou CBEMA⁷.

⁷ Curvas elaboradas por fabricantes de sistemas eletrônicos. Mostram uma curva tensão vs. tempo e indicam uma área dessa curva na qual um sistema baseado em componentes eletrônicos usualmente opera sem sofrer danos. Tais curvas normalmente contemplam interrupções, afundamentos e elevações de tensão. A referência [PG&E 99] contém informações detalhadas sobre esse tema.

Essa indicação define os limites para que se considere que a tensão observada violou o critério considerado na análise em questão. Por exemplo, um índice SARFI₇₀ igual a 10 significa que, naquele ponto e naquele período monitorados, foram observados dez afundamentos com tensão residual menor do que 70% da tensão de referência com duração entre 0,5 ciclo e um minuto.

O uso desse índice permite uma comparação bastante simplificada entre estações e ao longo do tempo. Contudo, não guarda informações sobre a duração do afundamento, que é importante para diversos equipamentos, já que esse último pode não sofrer um desligamento para eventos muito rápidos.

3.3.3.2. GRÁFICOS DE SENSIBILIDADE

A *Southern African Power Pool* propõe o uso de um gráfico que defina regiões de sensibilidade na norma NRS 048-2 (*Electricity Supply – Quality of Supply, Part 2: Minimum Standards*). Os afundamentos são classificados usando seus dados de tensão residual e duração de acordo com a tabela 3.1 para o sistema sul-africano.

tabela 3.1 – Gráfico de sensibilidade NRS 048-2 [Cigré 04]

tensão residual - V(%)	duração (t)		
	20 ≤ t < 150 (ms)	150 ≤ t < 600 (ms)	0,6 ≤ t < 3 (s)
90 > V ≥ 85	Y		Z1
85 > V ≥ 80			
80 > V ≥ 70			
70 > V ≥ 60	X1	S	Z2
60 > V ≥ 40	X2		
40 > V ≥ 0	T		

A área em cinza, denominada área “Y” representa os afundamentos de tensão mais comuns nos sistemas elétricos. São afundamentos de tensão com amplitude reduzida. A norma indica que as plantas dos consumidores devem ser protegidas desse tipo de afundamento.

Os afundamentos representados pelas áreas “X1” e “X2” são aqueles dos quais um sistema elétrico de potência se recupera após a atuação da sua proteção para isolar a falta que ocorra nas linhas de alta tensão do mesmo, de forma que essa não seja capaz de afetar por um tempo prolongado as linhas de mais baixa tensão. É recomendado pela norma que o consumidor proteja os equipamentos sensíveis de sua

planta contra afundamentos do tipo “X1”. Afundamentos do tipo “T” se referem a faltas muito próximas ao ponto de observação. Os do tipo “S” ocorrem quando a proteção atuante é fundamentada em esquemas de impedância. Eventos do tipo “Z” são mais raros de acontecer em sistemas que operam nominalmente em alta tensão e, geralmente, indicam falhas no esquema de proteção.

A norma NRS 048-2 define quantos afundamentos de cada tipo devem ser esperados por ano para redes de tensões nominais médias e altas. Via de regra, o número de afundamentos observados nas áreas “X” serão muito superiores àquele das áreas “Z”.

3.3.3.3. TABELAS DE TENSÃO VS. DURAÇÃO

Para mostrar o número de afundamentos por faixas de tensão residual e de duração, muitas vezes são usadas tabelas que relacionam tais grandezas. Existem diversos formatos de tabelas, como aqueles propostos pela IEC ou pelo IEEE, que se diferenciam, basicamente, pelas faixas de tensão residual e de tempo adotadas para separar os eventos de afundamento. A tabela 3.2 e a tabela 3.3 mostram exemplos do seu uso proposto pelo [IEEE 07], nos quais se vêem dados do projeto *Distribution Power Quality* da *Electric Power Research Institute* (EPRI - DPQ), coletados entre junho de 1993 e junho de 1994 em 222 alimentadores dos Estados Unidos. Os dados são usados nesse texto com caráter ilustrativo para a apresentação dos índices.

Na tabela 3.2 cada célula representa o número de afundamentos registrados durante o período de um ano de medições, que se enquadre na faixa de tempo e na faixa de amplitudes de tensão residual, para cada alimentador monitorado. Por exemplo, ocorreram 3,5 afundamentos por estação por ano com tensão residual entre 50 e 60% da tensão de referência e duração menor do que 200 ms.

tabela 3.2 - Densidade de Afundamentos – adaptada de [IEEE 07]

Tensão residual (%)	faixa de tempo (s)				
	0,0 a (<0,2)	0,2 a (<0,4)	0,4 a (<0,6)	0,6 a (<0,8)	≥ 0,8
(>80) a 90	53.1	4.8	1.9	0.7	2.9
(>70) a 80	14.1	1.7	0.2	0.2	0.4
(>60) a 70	6.8	0.9	0.1	0.1	0.2
(>50) a 60	3.5	0.9	0.2	0	0.2
(>40) a 50	1.4	0.4	0.2	0	0.3
(>30) a 40	1.5	0.1	0.1	0	0.3
(>20) a 30	1.2	0.3	0.2	0.2	0.4
(>10) a 20	1	0.1	0	0	0.5
0 a 10	1.9	0.7	0.7	0.2	6.4

Outra leitura dessas mesmas informações pode ser vista na tabela 3.3, que usa dados acumulados das medições. Para esse caso não mais são usadas faixas de tensão residual ou de tempo, mas sim limiares. Se um evento medido violar algum limiar, a célula referente a ele é acrescida de um evento. Novamente esses dados são mostrados para cada estação no período de um ano. Por exemplo, se ocorrer um afundamento com tensão residual igual a 35% da tensão de referência da barra com uma duração de 300 ms, todas as células com valor de tensão residual abaixo de 30% e duração acima de 0,4 serão incrementadas. Na tabela 3.3 é possível perceber que ocorreram 12,4 afundamentos de tensão com tensões residuais abaixo de 60% da referência e duração maior do que 200 ms.

tabela 3.3 – Densidade cumulativa – adaptada de [IEEE 07]

Tensão residual (%)	tempo (s)				
	0	0,2	0,4	0,6	0,8
90	111	26,5	16,6	13	11,6
80	47,6	16,2	11,1	9,4	8,7
70	31	13,7	10,3	8,8	8,3
60	22,9	12,4	9,9	8,5	8,1
50	18,1	11,1	9,5	8,3	7,9
40	15,8	10,2	9	8	7,6
30	13,8	9,7	8,6	7,7	7,3
20	11,5	8,6	7,8	7,1	6,9
10	9,9	8	7,3	6,6	6,4

Esse tipo de índice é de simples aplicação, contudo seu uso é complicado quando se pretende comparar o desempenho de estações entre regiões geográficas ou entre épocas do ano, uma vez que existem muitos resultados (células) cujos valores independem uns dos outros. Também a escolha das faixas a serem usadas não é unanimidade no meio técnico. Podem ser encontrados trabalhos com uma distribuição uniforme das faixas, como o exemplo mostrado nesse capítulo, ou com as faixas determinadas visando atender a curvas de teste de equipamentos, como é o caso daquela proposta em [IEC 02].

3.3.3.4. GRÁFICOS DE COORDENAÇÃO

Com base nos dados das medições realizadas, podem ser geradas as linhas de contorno que indicam a mesma informação considerando os dados das tabelas tratadas no item anterior. O gráfico construído, chamado na literatura de “*Voltage dip co-ordination chart*”, permite que se obtenham interessantes informações observadas por meio de uma interpolação visual das curvas traçadas.

A figura 3.4 mostra um gráfico construído com base nos mesmos dados contidos na tabela 3.3. Podem-se visualizar nos pontos marcados no gráfico algumas

das informações contidas na tabela. Exemplos são a existência de aproximadamente 10 afundamentos por alimentador por ano com duração maior do que 200 ms e tensão residual menor do que 40% e, também, aproximadamente 10 afundamentos com duração maior do que 400 ms e tensão residual inferior a 60%.

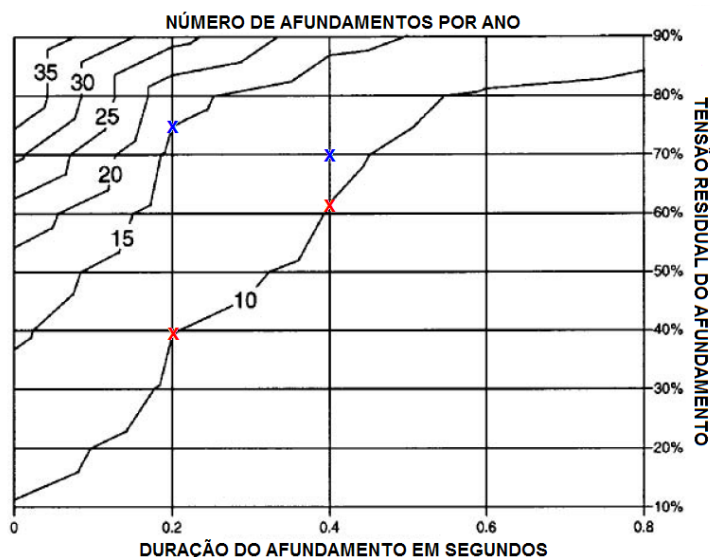


figura 3.4 – Gráfico de coordenação – adaptado de [IEEE 07]

Além dos dados de análise direta pela tabela, também podem ser inferidas outras informações de afundamentos. Por exemplo, pode-se verificar que ocorrem aproximadamente 11 afundamentos com tensão residual inferior a 70% da referência e duração maior do que 400 ms. Pela tabela 3.3 pode-se verificar o número de 10,3 afundamentos por estação por ano nessas condições. Também se pode estimar um número de 15 afundamentos por estação por ano com tensão residual menor do que 75% e duração maior do que 200 ms. Existe uma pequena diferença entre os números observados na tabela e no gráfico, mas essa diferença não é muito relevante quando se leva em consideração a abordagem estocástica dos mesmos.

Gráficos como o da figura 3.4 são de difícil construção. Contudo, uma vez obtidas as curvas representativas das medições, essa ferramenta apresenta uma maior versatilidade, principalmente para fins de análise de comportamento de cargas. As diferenças observadas entre os resultados das tabelas e dos gráficos tendem a diminuir se for traçado um maior número de linhas.

3.3.3.5. ENERGIA DO AFUNDAMENTO

De posse dos dados de tensão em função do tempo (obtidos tanto via medições como via simulações), pode-se determinar um índice numérico chamado “energia do afundamento” (E_{VS}). Esse índice leva em consideração o comportamento

da tensão no ponto de interesse ao longo de toda a duração do afundamento (0 a T) e permite que se tenha uma medida relativa de quanto de energia deixou de ser entregue ao consumidor. Ele é calculado de acordo com a equação 3.2 [Cigré 04].

$$E_{vs} = \int_0^T [1 - V(t)^2] dt \quad (3.2)$$

Por ser de fácil aplicação e tornar simples a comparação entre eventos distintos, este é um índice que tem uma boa aceitação na literatura. Contudo, ele perde informações sobre as características do afundamento que determinam se o evento levaria as cargas a sofrer ou não desligamentos.

Na comparação de eventos distintos, o uso do índice de energia dos afundamentos penaliza mais os eventos de elevada duração. Isso pode ser visto na figura 3.5, onde se observa um exemplo de cálculo desse índice para afundamentos retangulares com amplitudes mais severas (com tensão residual de 10% da tensão de referência), intermediárias (com tensão residual de 50% da tensão nominal) ou menos severas (como a de 80% da tensão de referência).

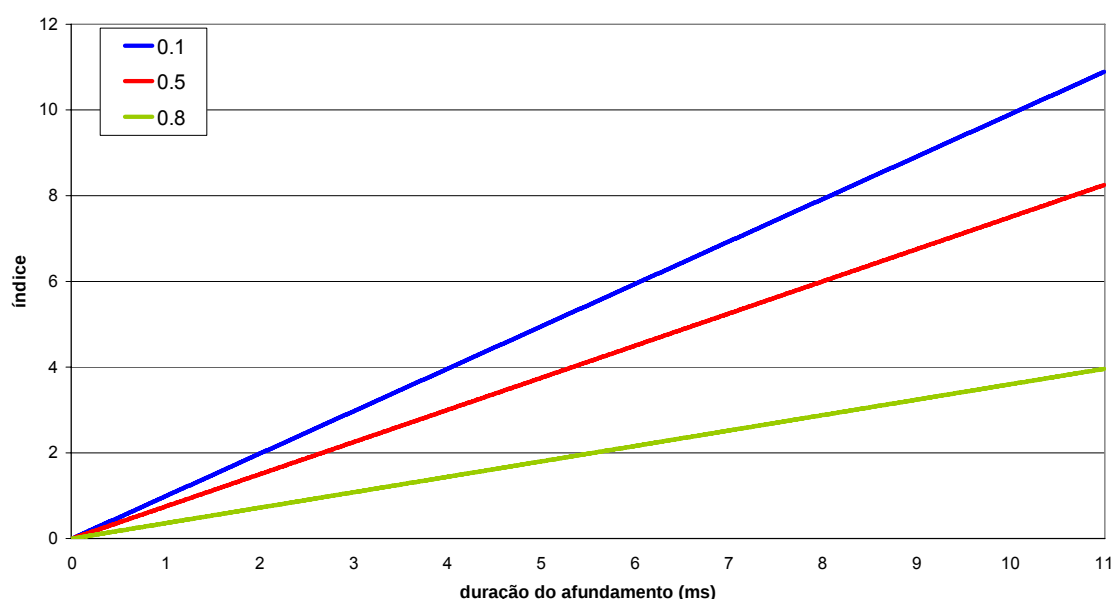


figura 3.5 – Energia do afundamento para tensões residuais de 0,1 pu, 0,5 pu e 0,8 pu

3.3.3.6. ÍNDICE DE SEVERIDADE DO AFUNDAMENTO

O índice de severidade do afundamento também apresentado em [Cigré 04], usa um cálculo que visa não penalizar tanto a duração, mas a amplitude do afundamento, sem deixar de levar o primeiro parâmetro em consideração. Para tal, esse índice é calculado de acordo com a equação 3.3, onde t é a duração do

afundamento e V é a tensão residual na barra em observação, de forma que o fator $(1-V)$ representa a amplitude do afundamento. Os resultados desses cálculos são mostrados na figura 3.6, para afundamentos retangulares de amplitudes diferentes.

$$\begin{cases} t \leq 1 \text{ ciclo} : S_e = 1 - V \\ 1 \text{ ciclo} < t \leq 200 \text{ ms} : S_e = 2(1 - V) \\ 200 \text{ ms} < t \leq 500 \text{ ms} : S_e = 3,3(1 - V) \\ 500 \text{ ms} < t \leq 10 \text{ s} : S_e = 5(1 - V) \\ t > 10 \text{ s} : S_e = 10(1 - V) \end{cases} \quad (3.3)$$

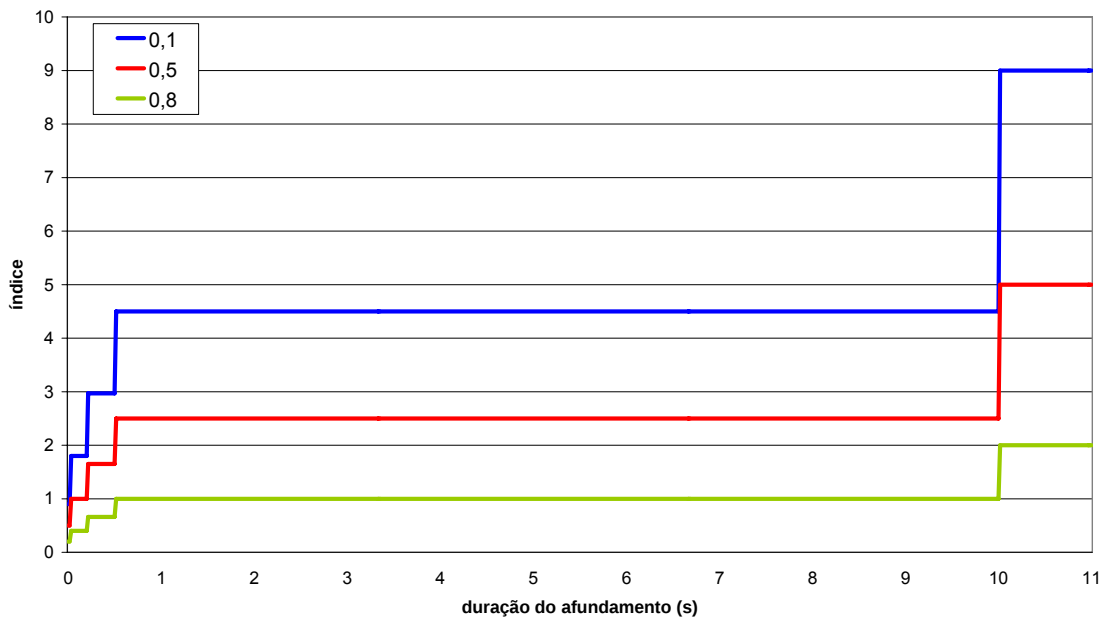


figura 3.6 – Índice de severidade para tensões residuais de 0,1 pu, 0,5 pu e 0,8 pu

3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, mostrou-se que o uso de *Índices de Afundamento de Tensão* é de especial interesse para se incluírem as análises do fenômeno nas etapas de planejamento da expansão. Adicionalmente, a descrição dos principais índices apresentados na literatura permitiu ver que nenhum deles se mostra adequado aos objetivos relacionados a cada etapa do processo de elaboração dos planos.

No contexto desta dissertação, é importante salientar dois aspectos com relação aos índices existentes: (i) nenhum deles considera a localização geográfica das linhas e dos equipamentos do sistema elétrico, implicando a não consideração da incidência de descargas atmosféricas de cada situação analisada; (ii) quando são

monitorados os comportamentos da tensão em diversos pontos da rede, a informação coletada é normalmente tratada como uma massa única de dados e, após processamentos, os eventos são distribuídos uniformemente entre todos os pontos, como no estudo realizado pelo EPRI, resultando na diluição da informação entre os pontos monitorados.

Diante do exposto neste capítulo, pode-se perceber que nenhum desses índices tem como foco a identificação dos eventos de afundamentos de tensão em etapas preliminares dos estudos, no planejamento da expansão. Isto permite ver com maior clareza a motivação e o objetivo desta dissertação que é a proposição de um índice de afundamento que se integre ao processo de planejamento, tema do capítulo que se segue.

4

PROPOSTA DE ÍNDICE DE AFUNDAMENTO DE TENSÃO APLICADO AO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO

Neste capítulo são mostradas as pesquisas anteriores, que deram origem a esse trabalho. A evolução desses desenvolvimentos leva à proposição de um índice, denominado I_{plan} , a ser aplicado no processo de decisão relativo aos planos de expansão do sistema de potência, no que concernem os aspectos de afundamento de tensão.

A abordagem adotada para o desenvolvimento do índice I_{plan} considera os três parâmetros: amplitude e duração do afundamento e frequência com que o evento ocorre. Ênfase é dada à frequência, tendo em vista o uso dos dados do LLS.

4.1. METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS

4.1.1. AMPLITUDE E DURAÇÃO DO AFUNDAMENTO

Para verificar a influência da amplitude do afundamento no índice, utilizou-se a metodologia do *curto-circuito deslizando*, tratado no capítulo 2. Como a divisão de cada linha é feita em trechos iguais, propõe-se que se faça o cálculo das tensões residuais resultantes na barra de referência para faltas que aconteçam nos pontos que representem passos de 10% do comprimento total de cada uma das linhas próximas a esta barra. O programa encerra a simulação quando os afundamentos percebidos na barra de referência resultarem em tensões medidas acima de um determinado limiar, por exemplo, 0,85 pu.

A duração do afundamento é considerada igual à duração da falta que o causou. Essa última pode corresponder a um de três eventos: extinção espontânea da falta, operação da proteção de primeira zona e operação da proteção de segunda zona. Entre as condições de maior duração, que são as de atuação da proteção, a mais comum é a operação da proteção de primeira zona. Por esse motivo, são adotados os

valores mostrados na tabela 2.2 dessa dissertação para este parâmetro, de acordo com o nível de tensão nominal da linha sob falta.

4.1.2. FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA DO AFUNDAMENTO

É neste último parâmetro, a frequência, que o I_{plan} insere a informação relativa à localização dos equipamentos, a qual permite verificar qual a densidade da incidência de descargas atmosféricas sobre as linhas de transmissão e as estações. Essa densidade deverá ser considerada em conjunto com os demais parâmetros levantados: a amplitude do afundamento e a duração da falta.

Para esse trabalho, os dados de incidência de raios do LLS são obtidos por meio da rede de sensores da RINDAT. A fim de adequar os dados para todo o período estudado (1999 a 2005), são utilizados 16 sensores das redes CEMIG e FURNAS Centrais Elétricas para reprocessamento das informações, que conferem uma massa de dados adequada para a região de estudo (estado de Minas Gerais) [Dias 02] [Visacro 05b] [Dias 06]. Esses dados podem ser utilizados para ponderar as frequências de desligamentos de equipamentos da tabela 2.3, evidenciando-se a diferença entre se instalar um equipamento em uma região com maior ou menor incidência de descargas.

Para se obter a expectativa do número de descargas que têm grande probabilidade de provocar falta em uma linha ou em uma estação, são criadas regiões de 2 km de largura em torno das linhas. A largura da faixa foi definida para que se levem em consideração dois fatores: os erros de medição inerentes ao sistema LLS e o fato de que incidências próximas às linhas de menores níveis nominais de tensão também são capazes de provocar curtos-circuitos nas mesmas devido aos efeitos indiretos provocados pela sua exposição aos intensos campos eletromagnéticos presentes no evento de descarga atmosférica [Dias 02] [Visacro 05b] [Dias 06].

As descargas que tiverem sido detectadas dentro desse limite apresentam alta probabilidade de ter incidido sobre algum elemento do sistema e provocado uma falta. Portanto, consideram-se esses valores para determinar um perfil de incidência de descargas atmosféricas,. Essa incidência tende a repetir os padrões históricos e pode, portanto, ser um parâmetro para ponderar os eventos esperados no futuro.

A exemplo do que se fez no cálculo do curto-circuito deslizante, tais faixas são também divididas a cada 10% do comprimento da linha. Por aproximação, considera-se que qualquer raio que incida entre dois pontos tenha provocado um curto-circuito no ponto de referência mais próximo da barra monitorada. Isto faz com que se considere o pior caso de amplitude do curto-circuito provocado. Na figura 4.1 vê-se um

exemplo dos pontos nos quais se aplicam os curtos-circuitos, bem como a divisão da faixa para o agrupamento dos eventos de raios. A figura 4.1 (a) mostra um esquema de como se faz tal divisão e onde estão os curtos-circuitos calculados com o auxílio do programa de curto-circuito deslizante. A figura 4.1 (b) mostra um exemplo da mesma divisão, contudo para uma linha real.

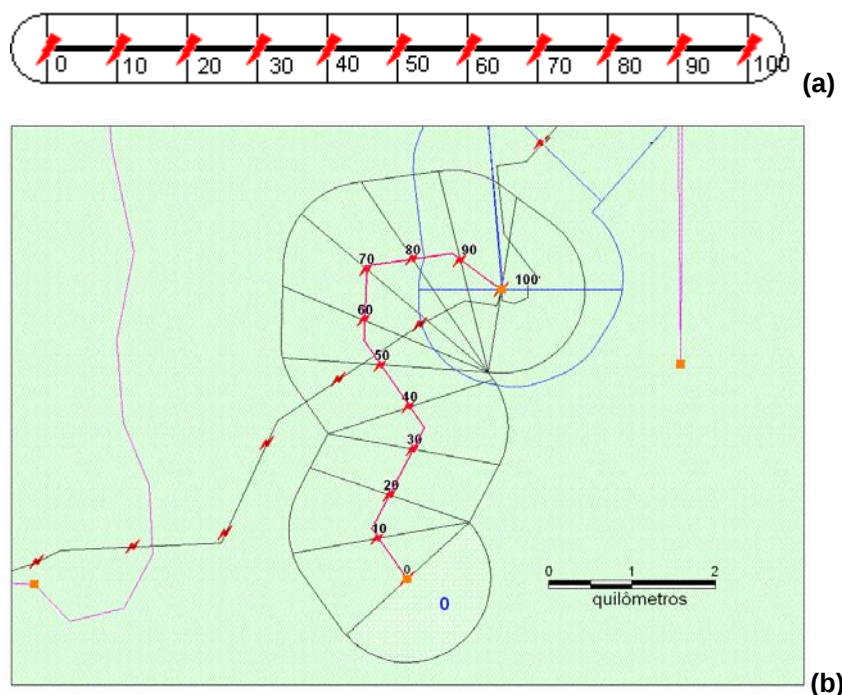


figura 4.1 – Exemplo de divisão de linha de transmissão

4.2. PRIMEIROS ESTUDOS SOBRE O ÍNDICE

O início das pesquisas no LRC sobre a relação entre a densidade de descargas atmosféricas incidentes e os afundamentos de tensão percebidos por um consumidor se deu durante o desenvolvimento da dissertação de mestrado [Menezes 07] defendida na UFMG, também mostrados em [Menezes 03]. Esses trabalhos propuseram três novos índices para descrever os afundamentos de tensão.

O primeiro desses índices, denominado “Fator de Severidade” ou **Fats**, relaciona as grandezas amplitude residual v (em pu) na barra de referência, tempo t pelo qual o evento causador do afundamento de tensão persiste e a frequência f (em eventos por ano) com que essa barra de referência percebe um evento que provoca esses afundamentos. Essa relação é mostrada na equação 4.1.

$$Fats = \frac{f \cdot t}{v} \quad (4.1)$$

O **Fats** tem como proposta mostrar a influência que um curto-circuito ao longo do sistema sob estudo exerce sobre os afundamentos de tensão em uma barra de referência.

O segundo índice proposto em [Menezes 07] pretende indicar a susceptibilidade de uma barra a eventos de afundamentos de tensão. Esse índice é denominado “Índice de Severidade” ou **Isev** e é dado pela somatória dos índices **Fats** encontrados para a barra de referência em questão.

O terceiro índice proposto tem a intenção de indicar se a barra de referência é mais sensível a afundamentos de tensão originados em linhas de um nível de tensão ou de outro. Esse índice, chamado “Índice de Sensibilidade” ou **Isen**, é calculado de acordo com a equação 4.2:

$$I_{sen} = \frac{\sum Fats \text{ de cada nível de tensão}}{I_{sev}} \quad (4.2)$$

Dessa forma, a barra será tão menos sensível a afundamentos provocados por eventos ocorridos nos elementos de um dado nível nominal de tensão quanto menor for o valor de **Isen**.

À luz das análises que decorrem desses índices, propõe-se que nesse trabalho sejam averiguadas em mais detalhes as relações entre os parâmetros capazes de influenciar um fenômeno de afundamento de tensão.

4.3. INVESTIGAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS

Os primeiros resultados das pesquisas sobre as relações das quais decorrem a composição de índices de afundamento, considerando os três parâmetros de influência, são mostrados em [Vale 06]. O banco de dados de descargas atmosféricas utilizado nesse trabalho compreende fenômenos ocorridos entre os anos de 1999 e 2005 no estado de Minas Gerais. Esses dados são usados para calcular a expectativa anual de incidência de descargas atmosféricas em uma área.

As investigações utilizaram um sistema real, adotando seus parâmetros, para as simulações de curto-circuito, e a localização geográfica dos seus componentes (linhas, subestações e usinas) de forma que se tornasse possível determinar a densidade de descargas atmosféricas (strokes/km²/ano) a partir dos bancos de dados existentes. O sistema analisado está ilustrado na figura 4.2, com a indicação dos níveis de tensão nominal de cada uma das linhas. A barra usada como referência para os estudos de afundamentos de tensão está marcada com o símbolo *Ref*.

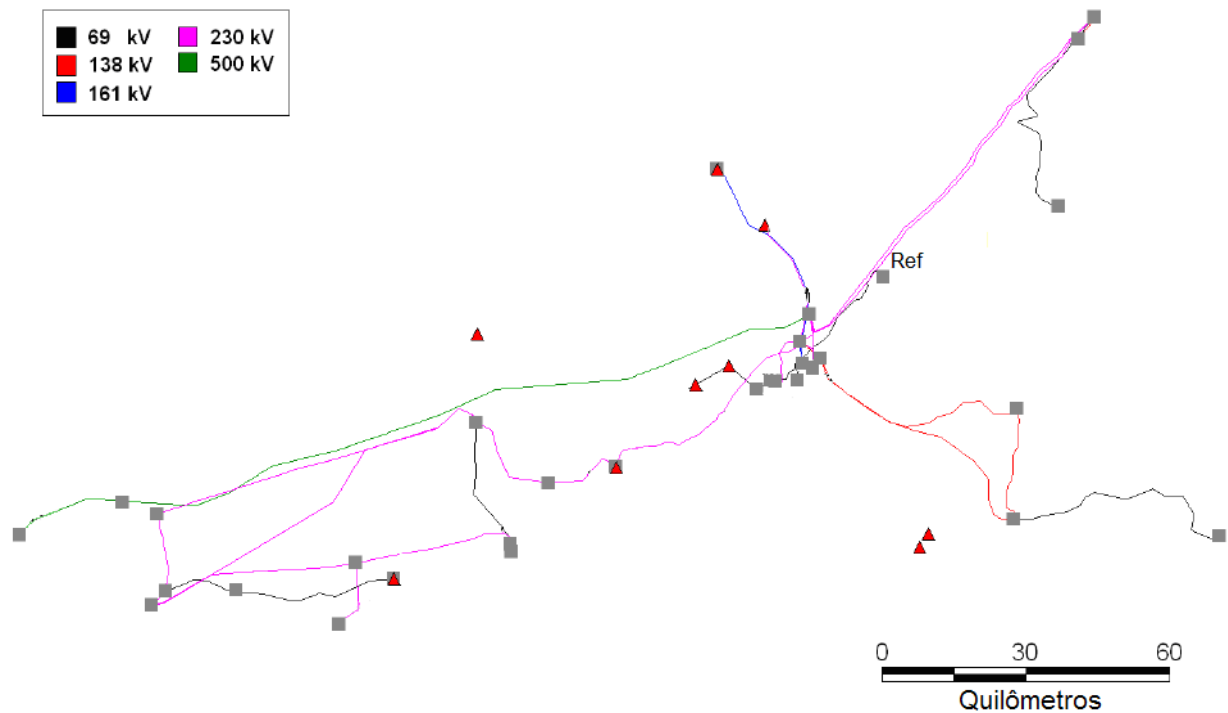


figura 4.2 – Sistema elétrico usado nos estudos [Vale 06]

Definido o sistema com todas as suas características, são determinados os valores de afundamento de tensão e densidade de descargas atmosféricas que incidem próximas às linhas e estações do mesmo. Com esses dados, tem início o cálculo do índice. Tal cálculo começa com a definição de quatro parâmetros. São eles:

- I_A – índice relativo à amplitude do afundamento. A relação entre o valor da tensão residual na barra monitorada e a severidade do evento de afundamento de tensão é inversa. Por essa razão, considera-se a equação 4.3, onde v_r é a tensão residual, em pu, calculada pelo método de curto-circuito deslizante. Esse parâmetro pode ser visualizado na figura 4.3 para um sistema simulado.

$$I_A = \frac{1}{v_r} \quad (4.3)$$

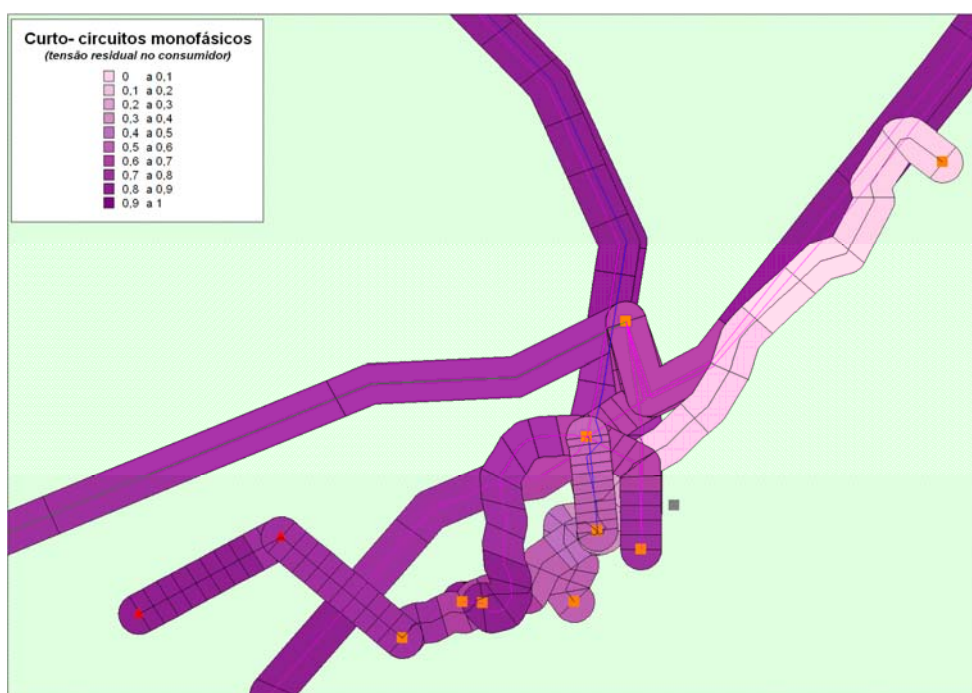


figura 4.3 – Exemplo de curto-circuito deslizante

- I_S – densidade de *strokes* observada para o trecho considerado da linha de transmissão [Dias 02] [Visacro 05b]. Cada corrente de retorno percebida pelo sistema de detecção de descargas atmosféricas é considerada para este cálculo.
- I_O – frequência de desligamentos dada pela tabela 2.3, dependente da classe de tensão da linha de transmissão.
- D – duração do afundamento de tensão, dada pela tabela 2.2, dependente do nível de tensão nominal da linha de transmissão.

As análises realizadas em [Vale 06] mostram o resultado de algumas combinações desses parâmetros, de forma a se verificar qual a influência de fatores, tais como a localização do ponto de falta com relação à barra de referência e a localização geográfica dos elementos do sistema.

Os cálculos realizados e os índices estudados não levaram em consideração as faltas ocorridas na linha que alimenta radialmente a barra de referência. Isso se deve ao comportamento hiperbólico da porção I_A do índice calculado. Por causa dessa relação, esse termo do índice tenderá a infinito para valores de tensão residual próximos de zero, o que ocorrerá em qualquer linha que alimentar radialmente a barra de referência. Isso traz incoerência à comparação com os valores obtidos nas demais

linhas. Portanto, nas figuras que ilustram os cálculos realizados, essa linha também não é mostrada.

Com o objetivo de mostrar a influência dos parâmetros nas análises de afundamentos de tensão, o trabalho parte de um cálculo simples, a ser usado como base de comparação com índices propostos. Nesse primeiro cálculo, apenas os valores de amplitude do afundamento e de frequência de desligamentos (tabela 2.3) foram utilizados. A multiplicação desses fatores resulta no gráfico que se vê na figura 4.4. No detalhe desta figura é possível perceber que, geralmente, os afundamentos mais severos ocorrem para as faltas que tenham acontecido mais próximas da barra de referência. Também as linhas com menor tensão nominal provocam piores efeitos relativos aos afundamentos de tensão.

Em seguida, para se visualizar o efeito de se considerar a incidência local de descargas atmosféricas, foi realizado o mesmo cálculo, desta vez inserindo-se os valores obtidos para a densidade de descargas atmosféricas para as faixas em torno de cada trecho de linha. Esses resultados estão ilustrados na figura 4.5. Estão destacados nessa figura alguns dos pontos em que ficou mais evidente a alteração dos valores calculados do índice. Nestes, fica mais clara a influência que exercem sobre o comportamento da barra de referência devido à alta incidência de raios.

Estes resultados iniciais evidenciaram a importância de serem considerados dados do LLS nos estudos de afundamentos tensão e deram indícios para a continuidade da pesquisa, no sentido de se apurarem os resultados, tornando-os mais efetivos do ponto de vista do fenômeno estudado. Esta dissertação de mestrado constitui continuidade e avanço nesta linha de pesquisa, consubstanciado por meio do índice I_{plan} , detalhado no próximo item.

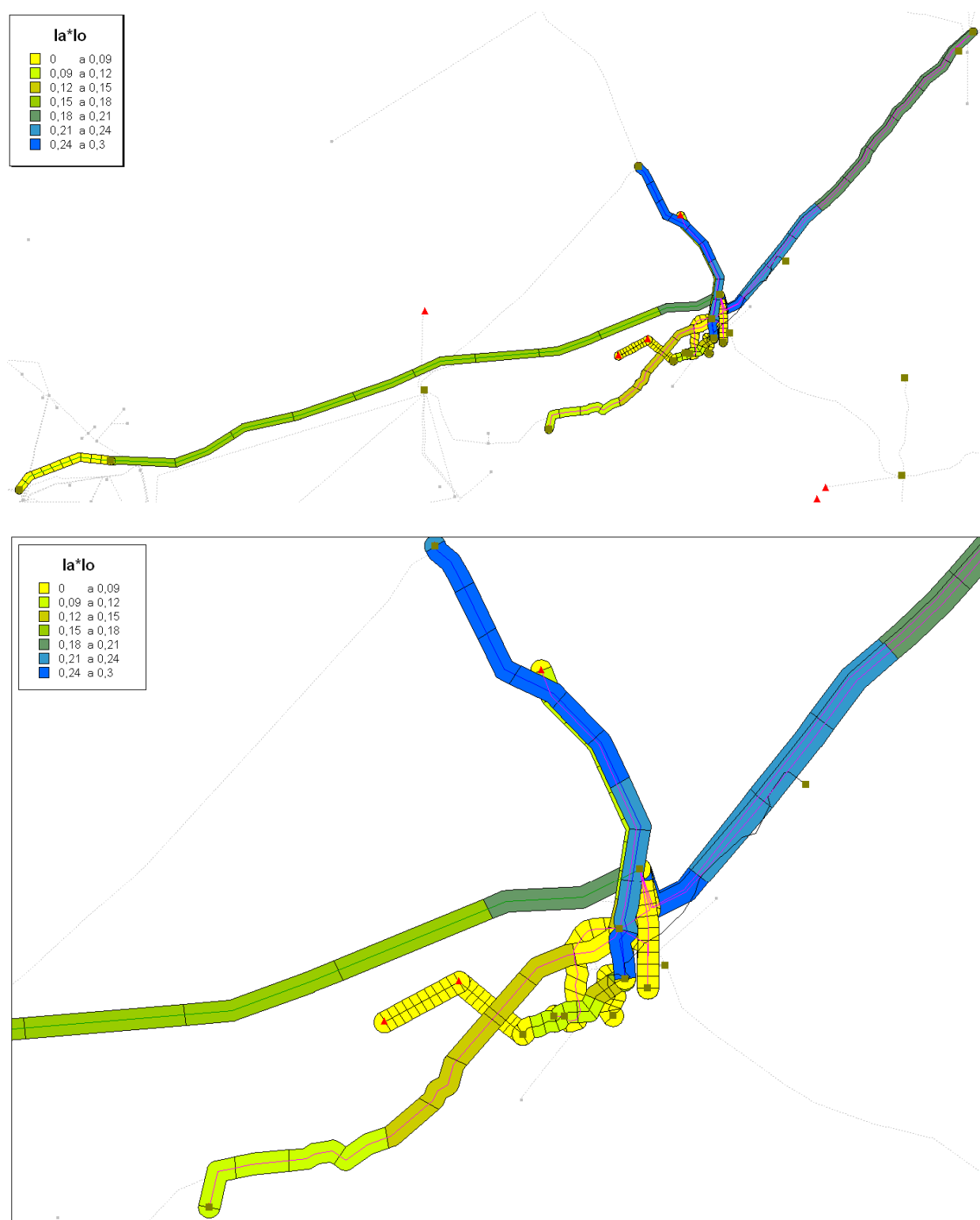


figura 4.4 – Relação entre o índice de amplitude do afundamento e a frequência de desligamento das linhas de transmissão [Vale 06]

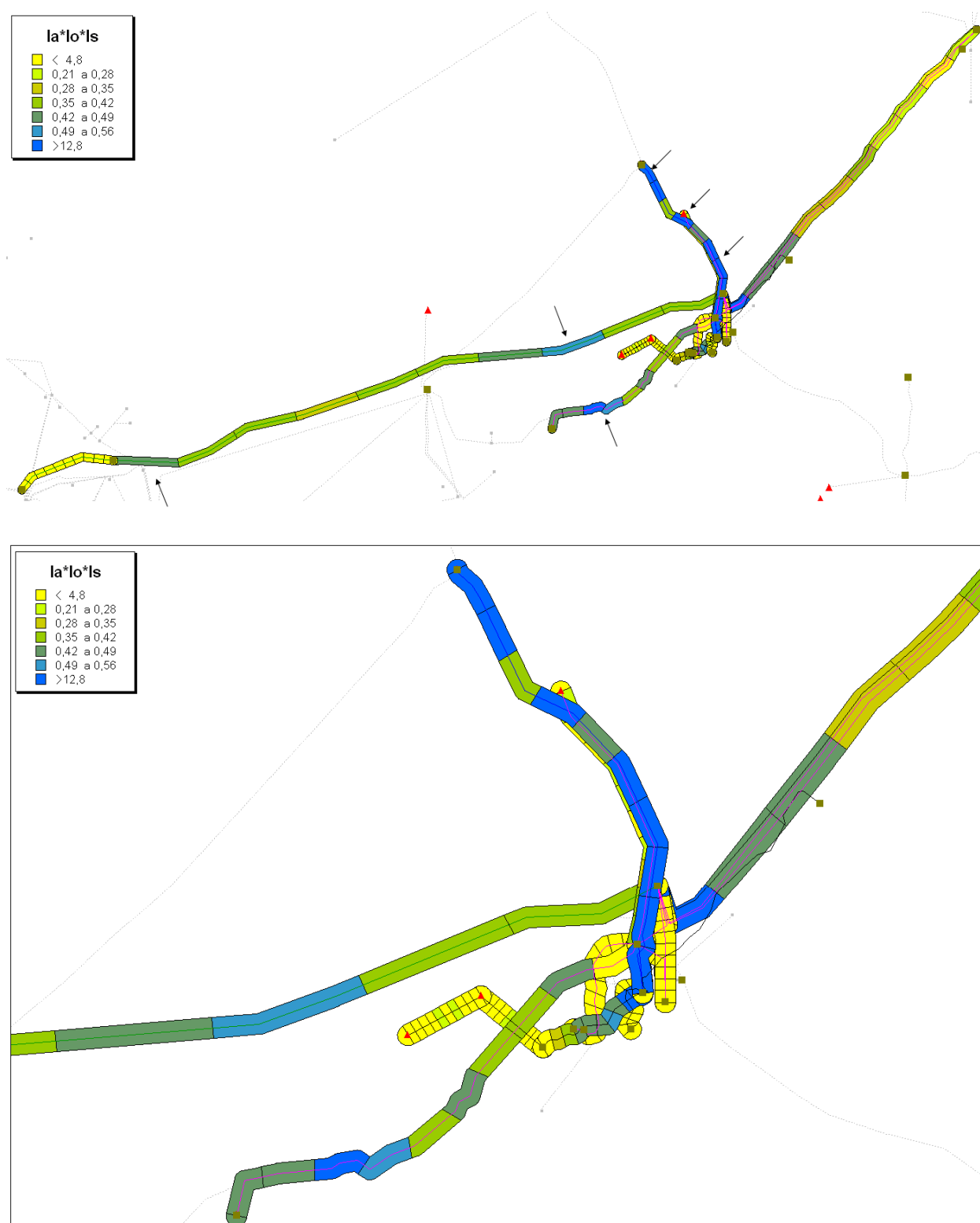


figura 4.5 – Inserção do parâmetro relativo à densidade de descargas atmosféricas [Vale 06]

4.4. PROPOSTA DO ÍNDICE I_{plan}

A possibilidade de se gerar uma ferramenta de simples aplicação nos estudos de expansão foi um fator relevante no desenvolvimento da presente proposta. Por esse motivo, a partir dos estudos iniciados em [Vale 06] e [Menezes 07], as investigações foram evoluindo e novas propostas de índices começaram a ser examinadas, com o objetivo de traçar as melhores relações entre os fenômenos estudados (afundamentos de tensão e incidência de descargas atmosféricas). Esta evolução é registrada neste item, por ser importante para a compreensão do I_{plan} .

4.4.1. INVESTIGAÇÕES PRELIMINARES

Para o desenvolvimento do novo índice, foi definido que o seu valor será maior quanto mais severo for o evento de afundamento de tensão provocado na barra de referência. Dessa maneira, pode-se chegar a três conclusões, uma referente a cada parâmetro principal de influência:

- A influência no índice da tensão residual observada no afundamento de tensão se dá de maneira *inversamente proporcional*, assim como já foi definido em estudos anteriores;
- Quanto maior o tempo de permanência da falta no sistema, pior será o evento sentido pela barra de referência. Assim esta influência é *diretamente proporcional* ao tempo de atuação das proteções;
- Se ocorrer um maior número de faltas que afetem a tensão observada na barra de referência, pior será o seu desempenho final frente ao fenômeno dos afundamentos de tensão. Dessa maneira, a frequência de desligamentos e a densidade de descargas atmosféricas influenciam o índice de maneira *diretamente proporcional*.

Com base nesses estudos, foram feitas simulações para se verificar a proporção da influência de cada um desses parâmetros.

4.4.1.1. RELAÇÃO COM A AMPLITUDE DO AFUNDAMENTO DE TENSÃO

A tensão residual na barra de referência é o aspecto principal do fenômeno estudado e o mesmo fator I_A considerado nos estudos mostrados em [Vale 06] foi usado como base para a definição do índice.

Como já foi citado no anteriormente neste texto, o uso desse fator apresenta uma limitação de aplicação do índice às linhas que alimentem a barra de referência radialmente. Essas linhas produzirão sempre afundamentos de tensão próximos de zero nessa barra.

É esperado que o índice em linhas de alimentação radial seja pior do que nas demais linhas do mesmo sistema, uma vez que não existe nenhum outro caminho de alimentação para as cargas conectadas a essas linhas. Por essa razão, são esperadas nessas linhas tensões percebidas mais próximas de zero. Contudo, é interessante que se possam mensurar os efeitos das intervenções também nessas linhas.

Além disso, essa relação mostra valores muito baixos para o índice calculado, quando se obtêm tensões como 0,5 pu, por exemplo. Isso imprime a falsa sensação de que esses valores de tensão não provocam reações ruins no sistema. De fato, ao chegarem as medições a essas tensões, caso uma proteção ainda não tenha atuado, a maioria dos equipamentos já não funciona corretamente ou já sofreu danos permanentes.

Por essas razões, propõe-se a alteração do fator I_A previamente trabalhado. A figura 4.6 mostra a comparação de algumas novas propostas para esse índice, as quais ainda apresentam relação com a tensão na condição de falta inversamente proporcional.

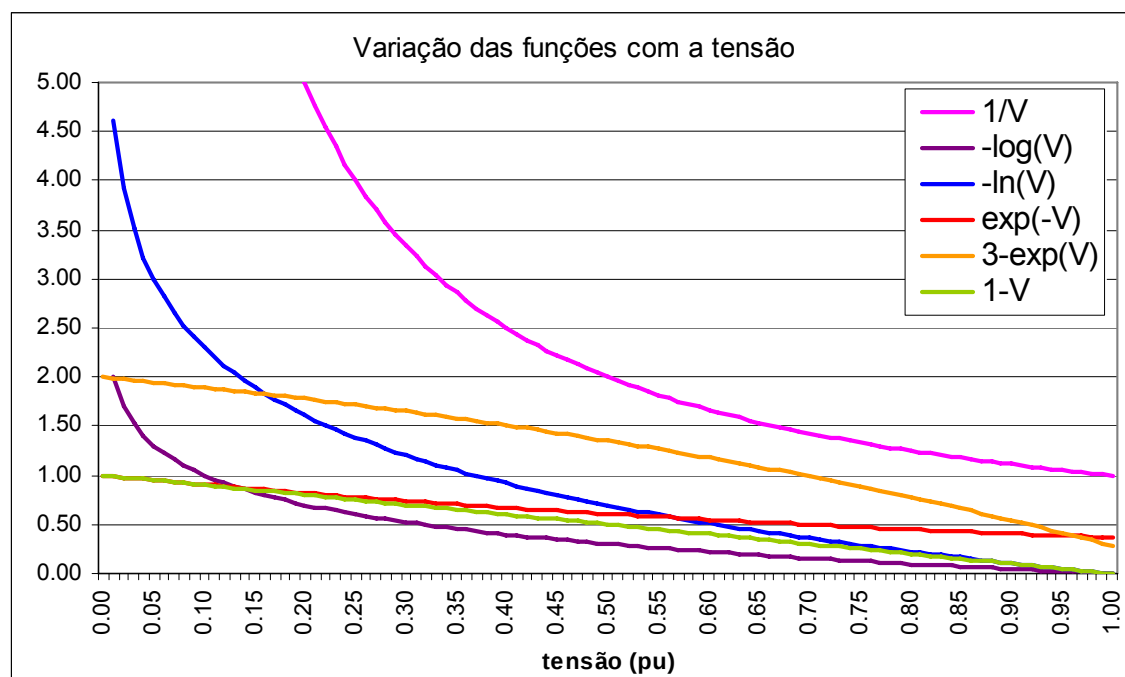


figura 4.6 - Estudo do comportamento de funções

- $\frac{1}{V}$: relação hiperbólica que cresce indefinidamente quando a tensão medida tende a zero. Decai muito rapidamente para valores baixos de tensão e mais lentamente para valores mais altos de tensão. Esse comportamento provoca a falsa impressão de que acima de um valor de tensão ainda baixo (como 0,5 ou 0,6 pu) não seria percebida diferença significativa pela carga;
- $-\log(V)$ e $-\ln(V)$: relações logarítmicas que não possuem resultado para valores de tensão nulas. Ainda apresentam decaimento muito rápido para tensões mais baixas e derivadas menores para tensões mais altas, problema também apresentado pela função hiperbólica. Nas funções logarítmicas, entretanto, esse comportamento é muito menos acentuado e tende a reduzir quanto maior for a base do logaritmo. O valor da função vai a zero para tensões medidas de 1 pu, podendo fazer com que o cálculo indique que não é necessária (ou possível) qualquer melhoria nesses casos;
- $\exp(-V)$: função exponencial, que existe em toda a faixa estudada. Apresenta decrescimento bem mais lento com relação às funções anteriormente descritas, mas ainda penaliza mais os valores mais baixos de tensão pela sua derivada decrescente;
- $3 - \exp(V)$: função exponencial, que existe para qualquer valor de tensão assumido pelo sistema. A sua derivada de módulo crescente tende a penalizar menos os valores de tensão residual mais baixos e acentua as diferenças do índice para as tensões medidas mais elevadas. A constante 3 usada nesse cálculo foi escolhida com a finalidade de deslocar a curva para o primeiro quadrante do plano de forma que esse índice não possua valores negativos;
- $1 - V$: reta que apresenta valores reais para qualquer valor de tensão apresentado. A derivada constante dessa função não privilegia as tensões altas nem as baixas no cálculo do índice.

Com base nessas observações e nos estudos realizados na dissertação, quanto menor for a tensão sentida no barramento de referência, pior será o comportamento da carga que sofrerá o afundamento. Uma carga do tipo potência constante, por exemplo, terá maior probabilidade de queimar quanto menor for a tensão operativa, pois isso aumenta a corrente drenada pela mesma.

Esse raciocínio leva à escolha da função exponencial $\exp(-V)$ para representar o termo do índice dependente da tensão residual, uma vez que insere uma penalidade maior para valores de tensão mais baixos, mas sem provocar diferenças muito exageradas entre os dois extremos.

Para se conhecer um pouco melhor a sensibilidade dessa função, foram realizadas mais duas análises. À equação $\exp(-V)$ foram adicionadas constantes que alteram o comportamento da mesma. A primeira simulação refere-se à equação 4.4. Seus resultados são mostrados na figura 4.7.

$$\gamma \times \exp(-V) \quad (4.4)$$

A inserção dessa constante na equação é capaz de alterar a velocidade de decaimento da função, acentuando ou reduzindo a diferença entre os extremos de tensões, o que torna possível o ajuste da penalidade que se quer imprimir aos dados.

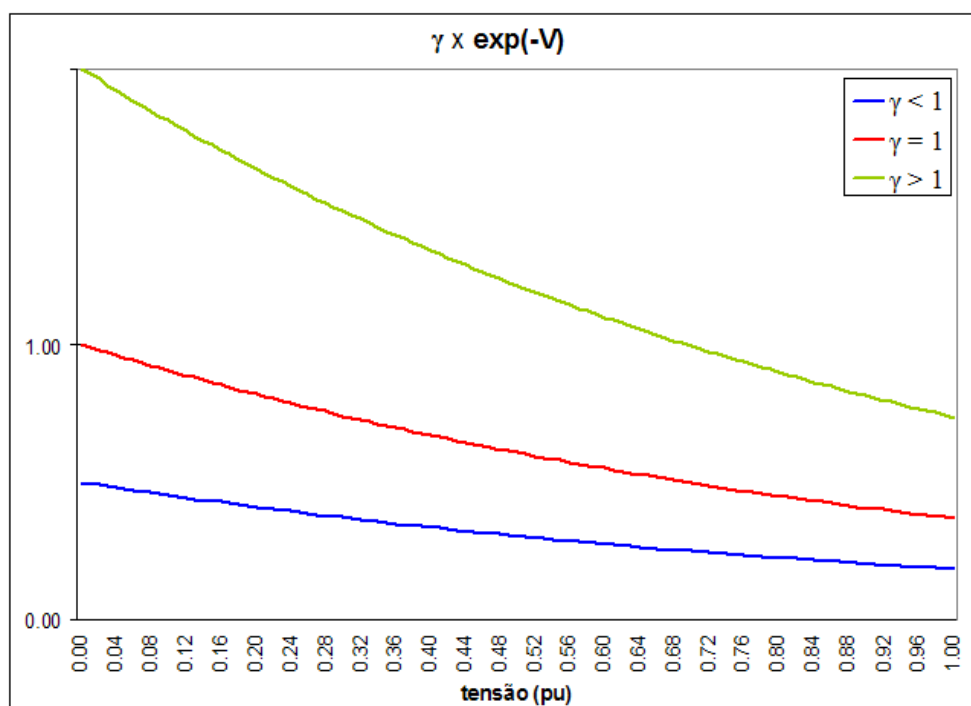


figura 4.7 - Variação de γ na equação 4.4

A segunda análise simula a variação de β na equação 4.5. Essa variação altera a penalidade apenas para as tensões observadas mais altas, com grande impacto na variação da derivada da função, conforme mostrado na figura 4.8. Essa alteração também é capaz de ajustar a sensibilidade do índice de acordo com o desejado.

$$\exp(-\beta \times V) \quad (4.5)$$

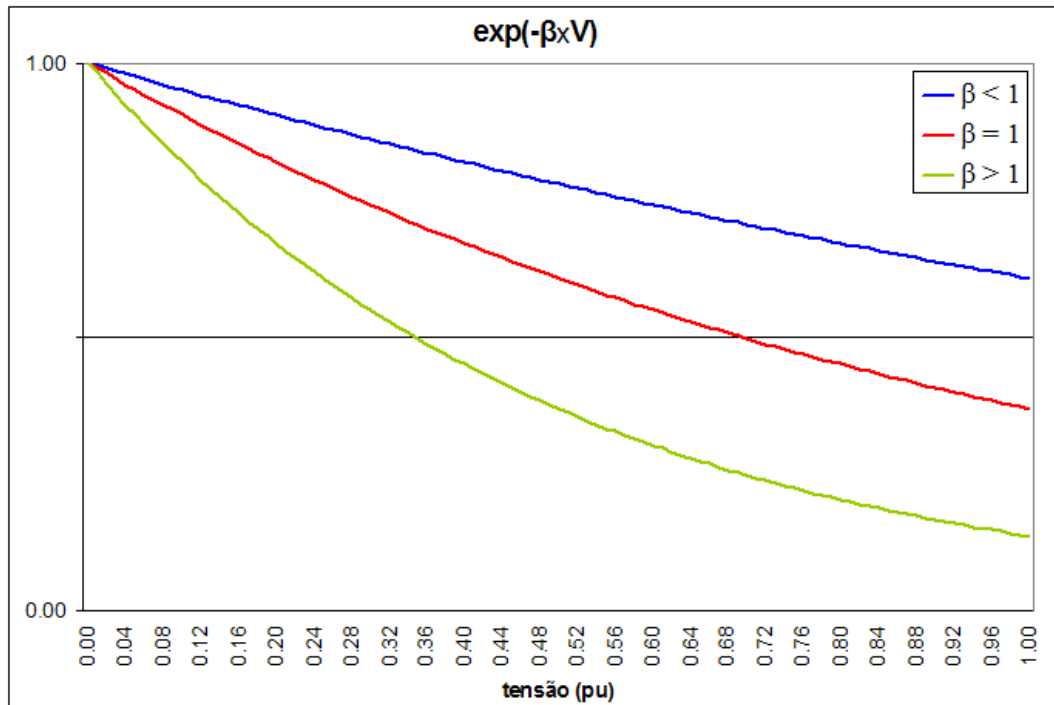


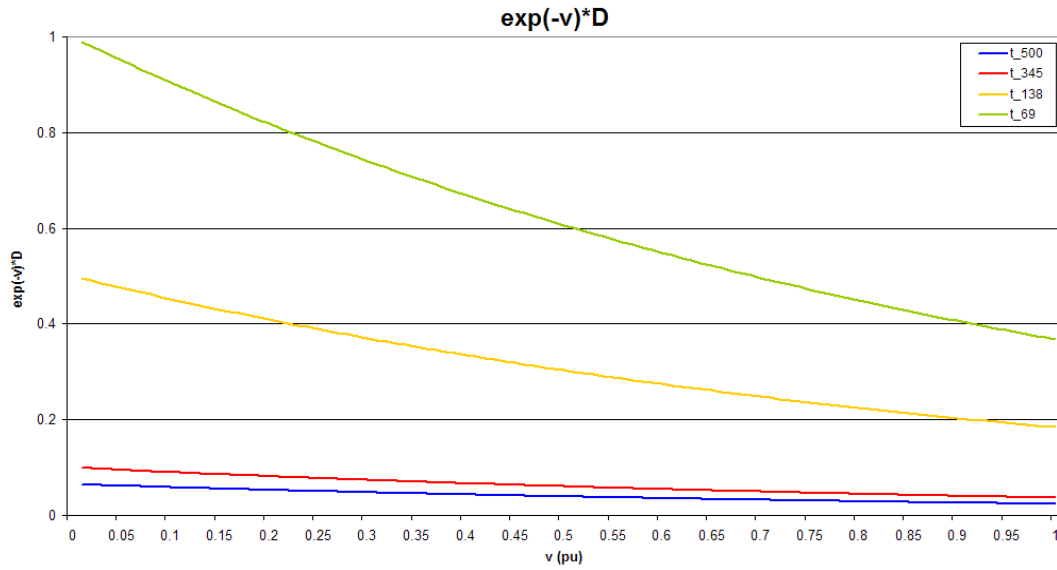
figura 4.8 - Variação de β na equação 4.5

Para os estudos iniciais dessa dissertação consideram ambos os fatores γ e β unitários.

4.4.1.2. RELAÇÃO COM A DURAÇÃO DO AFUNDAMENTO DE TENSÃO

Para analisar os efeitos da inserção do tempo de duração do afundamento sobre o índice e as comparações que serão feitas entre as alternativas propostas, implementou-se a equação 4.6, que executa uma multiplicação simples do fator I_A proposto no item 4.4.1.1 com os tempos de atuação da proteção de primeira zona (tabela 2.2), aqui denominado “D”. Os resultados obtidos com esses cálculos se encontram na figura 4.9 para as quatro classes de tensão presentes no sistema estudado.

$$I_{p0} = \exp(-v_r) \times D \quad (4.6)$$

figura 4.9 – $I_A \times D$

Nesta figura fica claro que o índice será tendencioso para soluções de valores de tensão observada mais altos, indicando até que tais soluções seriam eficazes mesmo para tensões medidas muito baixas. Esta conclusão, contudo, não corresponde à realidade.

Uma tentativa de se diminuir o ângulo da assíntota dessas curvas é inserir um fator de ponderação para os tempos de atuação da proteção. Dessa forma, os cálculos propostos obedecem à equação 4.7, na qual o valor de x será variado para se avaliar a influência do mesmo na resposta do índice. Alguns resultados desses cálculos são vistos da figura 4.10 à figura 4.12.

$$I_{p1} = \exp(-v_r) \times D^x \quad (4.7)$$

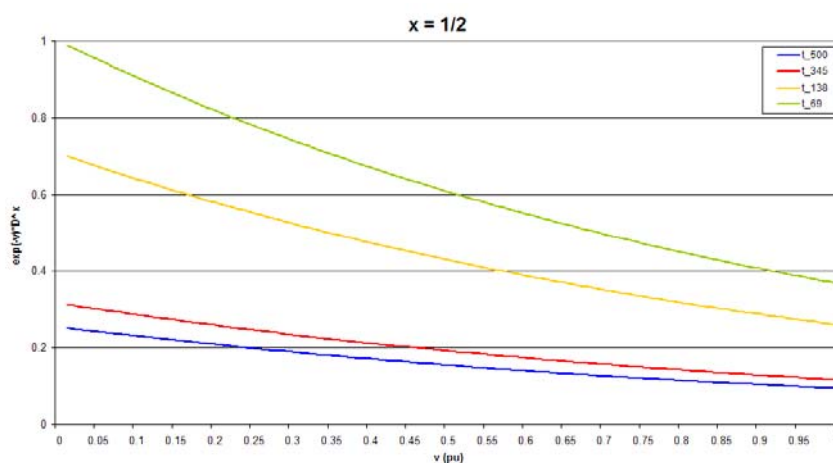


figura 4.10 – $x = 0,5$

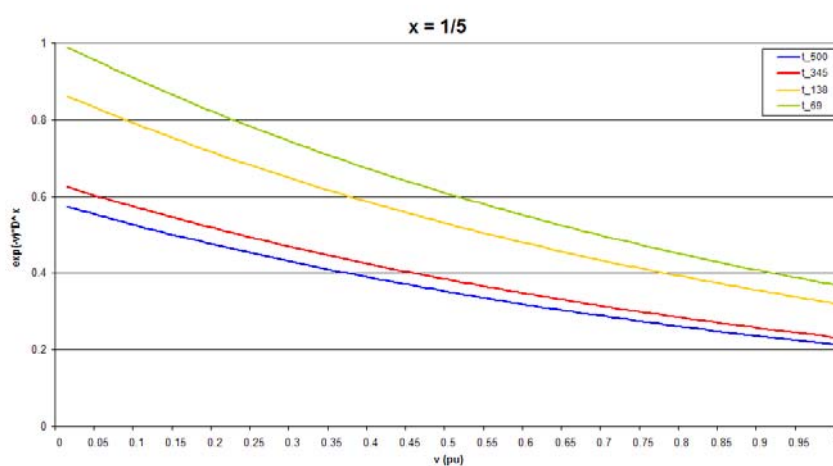


figura 4.11 – $x = 0,2$

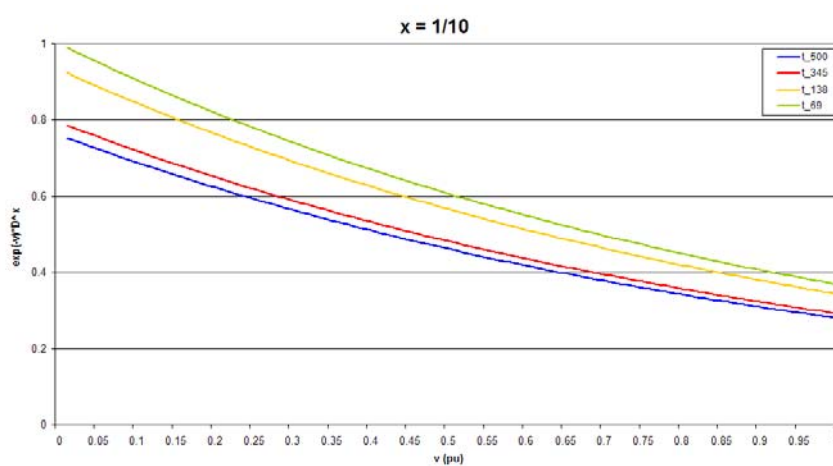


figura 4.12 – $x = 0,1$

Esses gráficos mostram que, para que as curvas se aproximem o suficiente ao ponto de serem comparáveis, seria necessário que praticamente se levasse a

influência do parâmetro “tempo” a zero. Ainda assim, como esta operação não torna possível que as curvas se cruzem, o índice será sempre tendencioso para as soluções de maiores níveis nominais de tensão.

Após essa análise, optou-se por propor a não utilização do índice I_{plan} para determinar a classe de tensão das alternativas de expansão. Essa variável será mais bem definida pelo planejador, que observará, além dos efeitos de um afundamento de tensão, os recursos disponíveis para a expansão. Por essa razão, ambos os fatores D e I_o (frequência de desligamentos por nível de tensão) não serão considerados no cálculo do índice proposto.

4.4.2. CONCEPÇÃO DO I_{plan}

Uma vez determinado que os valores tabelados de tempo da proteção e frequência de desligamentos não serão adotados para o cálculo do índice, pode-se concluir que o I_{plan} será definido relacionando-se a tensão residual na barra de referência e a densidade de raios incidentes na região em que a linha está instalada, conforme mostra a equação 4.8, onde I_S é a densidade de descargas atmosféricas na faixa delimitada em torno da linha, conforme mostrado na figura 4.1.

$$I_{plan} = \exp(-v_r) \times I_S \quad (4.8)$$

Essa equação pode ser aplicada ao caso base do sistema, visando verificar os pontos mais sensíveis do mesmo. Os pontos nos quais este índice alcançar os maiores valores serão aqueles com maior probabilidade de sofrer faltas ou cujas faltas provoquem afundamentos de tensão mais severos na barra de referência.

Como a decisão de qual será o nível de tensão nominal usado nas alternativas caberá ao planejador, o índice proposto terá por objetivo apontar a melhor solução em termos de fonte de alimentação usada e traçado para as novas linhas. Por essa razão, é proposto que, para o sistema elétrico sob estudo, bem como para cada linha proposta nas alternativas de expansão, seja aplicado o I_{plan} com o objetivo de se obter o sistema mais robusto possível perante os afundamentos de tensão.

4.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O índice proposto neste capítulo resulta de uma série de avaliações realizadas acerca do impacto da variação dos parâmetros (amplitude, frequência e duração) nas informações a serem passadas para os planejadores.

Sua formatação final está adequada para auxiliar a identificação dos pontos críticos do sistema com relação aos afundamentos e a comparação de alternativas de expansão, conforme a meta estabelecida.

Vale observar que, para o cálculo do I_{plan} , são utilizados programas que já fazem parte do conjunto de ferramentas de análise do planejamento, fato que facilita sua determinação e utilização na prática das empresas de energia elétrica.

Essas características podem ser verificadas por meio das simulações apresentadas no próximo capítulo, relativas à aplicação do índice.

5

APLICAÇÃO DO ÍNDICE I_{plan} NA DECISÃO DE PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados da aplicação prática do índice proposto. Foi selecionado um sistema elétrico simplificado, com suas informações de localização geográfica de estações e linhas existentes, bem como os dados elétricos. A metodologia usada para os cálculos das amplitudes dos afundamentos foi o curto-circuito deslizante, onde foram definidos os limites do sistema e quais as linhas e estações que, ao sofrer uma falta, provocam afundamentos de tensão na estação monitorada (referência).

Uma vez definidas as estações e linhas de transmissão envolvidas, o sistema elétrico foi todo georreferenciado, de forma a permitir que se avalie a expectativa do número de descargas atmosféricas capazes de causar faltas nas linhas e estações de interesse, conforme metodologia descrita na seção 4.1.

De posse das informações referentes ao comportamento elétrico do sistema e também dos dados de densidades de descargas atmosférica, é possível calcular o índice proposto pela equação 4.8.

5.1. APLICAÇÃO DO ÍNDICE – CASO BASE

Como qualquer estudo de planejamento, o início se dá com a análise do caso base. O sistema que representa este caso base pode ser visto na figura 5.1. A barra usada como referência está indicada na figura pelo nome 'AA'.

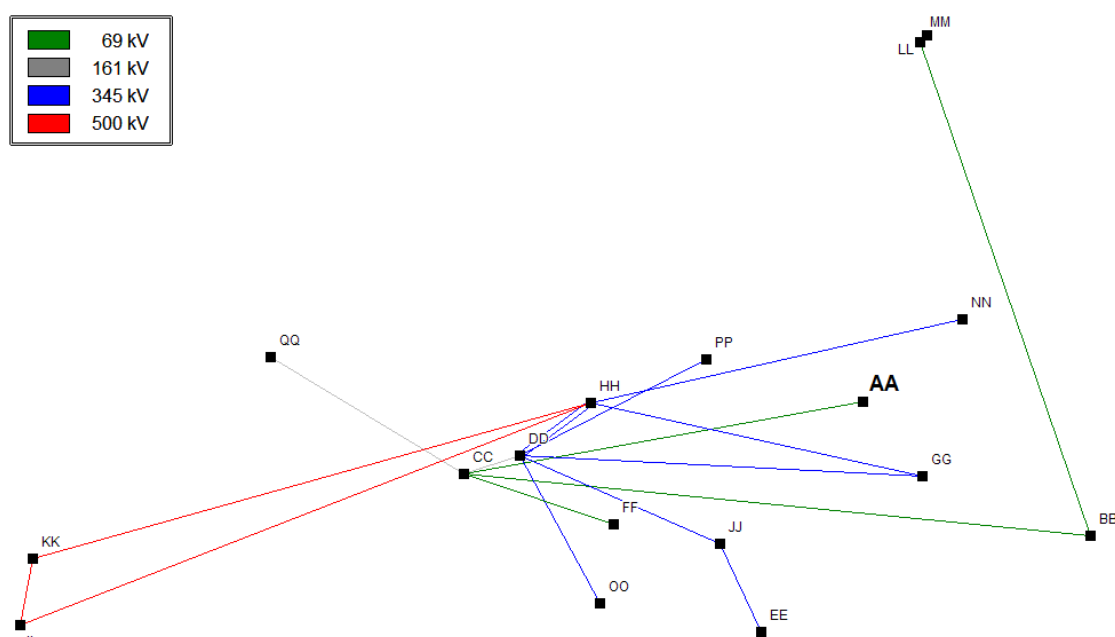


figura 5.1 – Caso base

Esse sistema foi submetido aos procedimentos indicados no capítulo 4, com a finalidade de se visualizar uma simulação completa do índice e dos métodos de obtenção dos parâmetros.

O primeiro passo sugerido no item 4.1 é a avaliação dos pontos de linhas nos quais uma falta provoca um afundamento na barra de referência. Para isso, foram feitas simulações usando um programa de curto-circuito deslizante, usando os dados do modelo elétrico do sistema.

A figura 5.2 mostra o resultado de tais cálculos. Com essa simulação é possível que se visualizem os pontos nos quais a ocorrência de uma falta gera afundamentos mais severos na barra de referência.

Naturalmente, quanto mais eletricamente próximo o ponto estiver da barra de referência, pior será o afundamento que será ocasionado naquela barra. Essa distância, contudo, não é a distância geográfica, mas sim elétrica [Menezes 07]. Quanto menor for a impedância vista entre o ponto de falta e a barra sob análise, maiores serão os efeitos do afundamento nesta última provocado por uma falta.

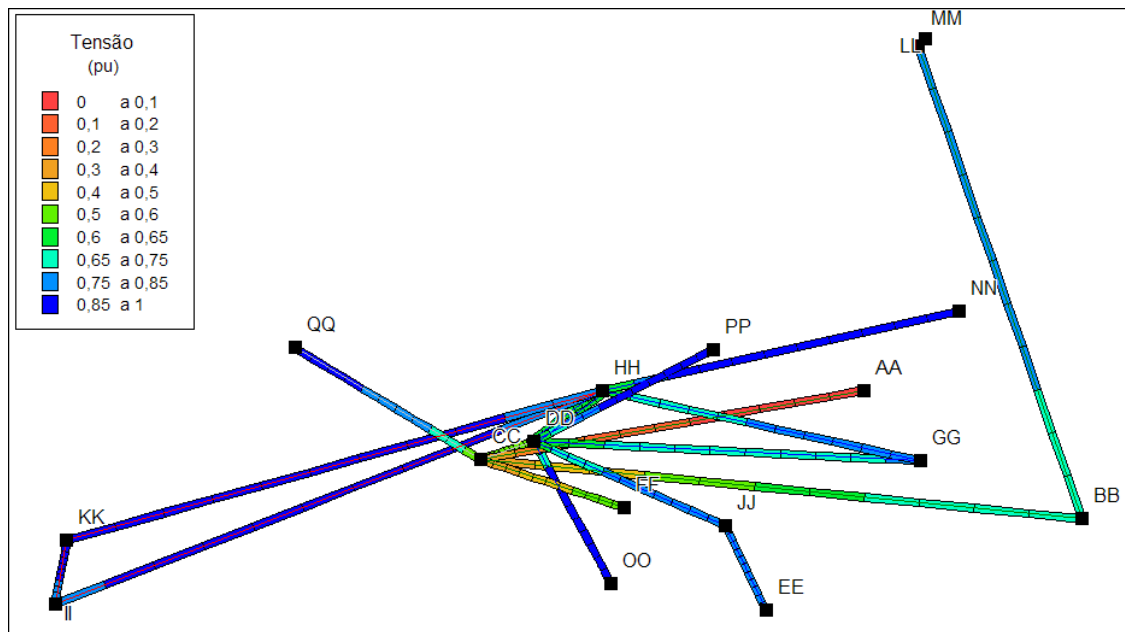


figura 5.2 – Curto-circuito deslizante: caso base

O parâmetro seguinte a ser determinado é aquele relativo à frequência de ocorrência de faltas nas linhas do sistema. Os resultados do curto-circuito deslizante definiram as estações limítrofes em termos de influência nos afundamentos de tensão na barra de referência. Com isso foram consideradas apenas as linhas em que a ocorrência de uma falta poderia trazer tensões operativas indesejadas na barra monitorada.

A figura 5.3 mostra a expectativa de incidências de faltas tendo como base apenas nos dados de descargas, sendo representada pelo fator I_s da equação 4.8. Esse comportamento, tomado de maneira isolada, já seria um indicativo para que se pensasse em melhorar a proteção contra descargas em regiões críticas da rede, com a finalidade de melhorar o desempenho do sistema em relação à barra tomada como referência.

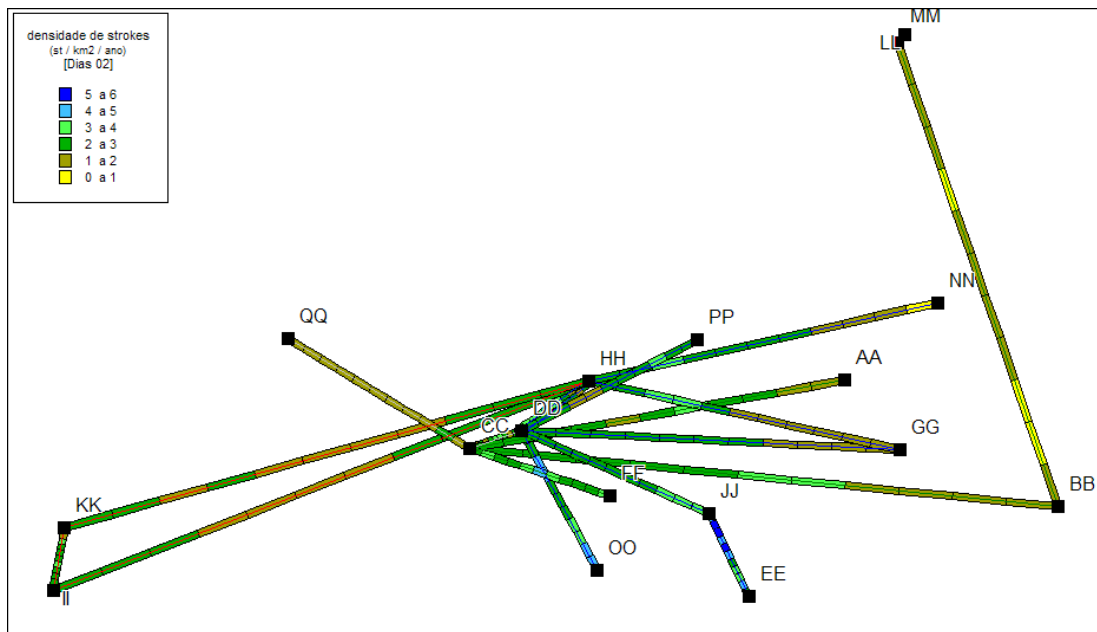
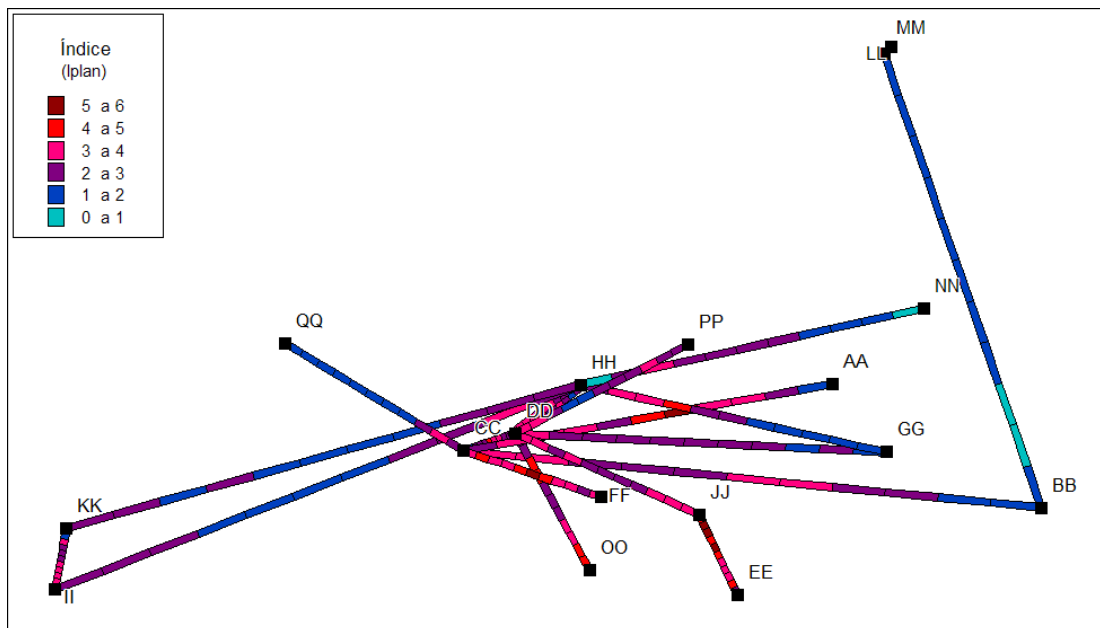


figura 5.3 – Densidade de descargas atmosféricas: caso base

Para que as duas informações possam ser analisadas em conjunto, aplicam-se os resultados numéricos dessas duas simulações isoladas à equação 4.8. A figura 5.4 mostra os valores obtidos para o caso base ilustrado na figura 5.1. Tal análise oferece base de comparação para que se possa verificar se uma alternativa de expansão proposta terá resultados positivos ou não sobre os efeitos sentidos pela barra de referência com respeito aos afundamentos de tensão.

figura 5.4 – I_{plan} : caso base

Quanto maior for o valor de I_{plan} calculado para um trecho de linha, maior a indicação de que aquela região provoca piores efeitos relacionados a afundamentos de tensão na barra de referência. Na figura 5.4 é possível visualizar pontos nos quais um reforço na linha ou em suas proteções contra raios teria maior efetividade.

5.2. APLICAÇÃO DO ÍNDICE – ALTERNATIVAS DE EXPANSÃO

Diferentes tipos de investimentos no sistema elétrico podem ser propostos nos estudos de planejamento da expansão. Como exemplos, podem ser citadas a reforma de instalações já existentes, tais como linhas e subestações, e a inclusão de novas instalações. A opção selecionada nessa dissertação para a aplicação do I_{plan} , é a construção de nova linha na rede elétrica. Essa escolha permite mostrar de forma clara o uso do índice na comparação entre diferentes alternativas, principalmente pela variação das densidades de descargas que pode ocorrer ao longo das linhas.

Para tornar a comparação dependente apenas dos parâmetros de interesse (tensões de afundamento na barra de referência e densidade de descargas atmosféricas sobre as linhas), as alternativas propostas têm a mesma classe de tensão e comprimento e características elétricas semelhantes.

5.2.1. ALTERNATIVA 1

A primeira alternativa de expansão é mostrada na figura 5.5. Esta alternativa propõe que seja construída uma nova linha de transmissão entre as estações **DD** e **RR**, criando mais um caminho para a alimentação da estação **DD** e, por consequência, da estação de referência.

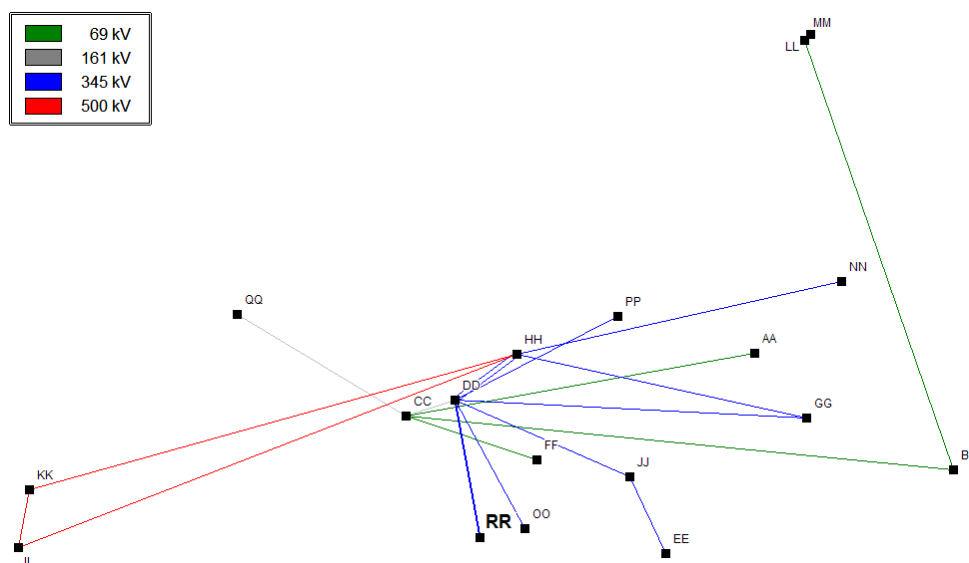


figura 5.5 – Primeira alternativa de expansão

Novamente foram realizados os cálculos de curto-circuito e das expectativas do número de descargas atmosféricas para o sistema de acordo com o proposto na seção 4.1, agora contemplando a nova linha incluída no sistema. Os resultados das simulações para esta alternativa podem ser vistos na figura 5.6, na qual se vê a nova distribuição das tensões percebidas na barra de referência provocadas pelos curtos-circuitos ao longo das linhas.

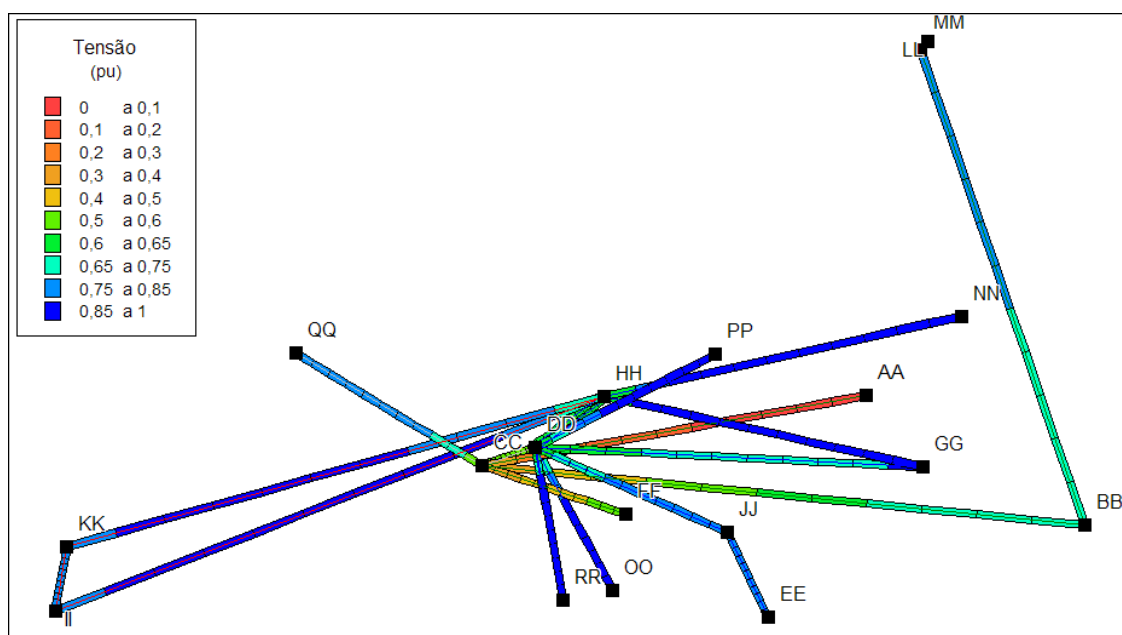


figura 5.6 – Curto-circuito deslizante: alternativa 1

A nova linha inserida apresenta uma distribuição de descargas atmosféricas de acordo com a figura 5.7. As demais linhas mantêm a mesma análise de densidade já mostrada na figura 5.3.

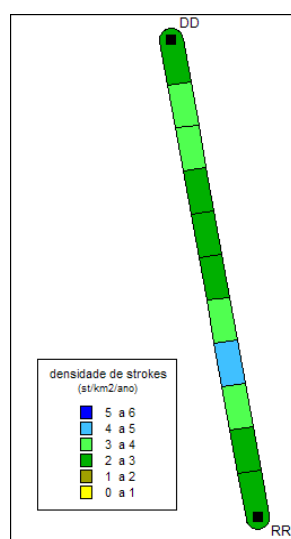


figura 5.7 – Densidade de descargas na linha da alternativa 1

O próximo passo consiste em encontrar os resultados em termos do índice I_{plan} quando se insere no sistema a linha proposta nessa alternativa. O índice calculado apresenta resultados muito semelhantes aos encontrados para o caso base. Isso se deve ao fato de a inserção de apenas uma nova linha alterar relativamente pouco a distribuição das tensões operativas no sistema.

Para comparar os resultados do cálculo do índice entre cada uma das duas alternativas e o caso base, é proposto que se trabalhe com a variação do mesmo após as mudanças inseridas. Isso torna possível que se detectem as pequenas variações dos afundamentos na barra de referência. O cálculo foi realizado conforme mostrado na equação 5.1, onde $I_{plan-cb}$ é o índice calculado para o caso base e $I_{plan-alt}$ é o índice calculado para a alternativa em questão. Seus resultados podem ser visualizados na figura 5.8.

$$\Delta I_{plan} = I_{plan-alt} - I_{plan-cb} \quad (5.1)$$

Esse cálculo mostra alguns resultados possíveis para o valor de ΔI_{plan} :

- se $I_{plan-cb} > I_{plan-alt}$, o sistema com a alternativa de expansão implantada apresenta melhores resultados de afundamentos na barra de referência para faltas que ocorrerem naquele trecho da linha do que o caso base com o qual ele está em comparação. Neste caso $\Delta I_{plan} < 0$;
- se $I_{plan-cb} = I_{plan-alt}$, o comportamento da barra de referência não se altera devido a uma falta naquele trecho de linha e ΔI_{plan} é nulo;
- se $I_{plan-cb} < I_{plan-alt}$, a obra proposta no sistema tornou o perfil de tensão na barra de referência mais sensível a faltas no trecho indicado e o ΔI_{plan} será maior do que zero.

Portanto, na figura 5.8, os valores calculados que estão abaixo de zero (escala em azul e verde) indicam uma melhoria nos afundamentos de tensão sentidos pela barra de referência (AA) devida à inclusão da nova linha. Os pontos com valores positivos (escala em vermelho e amarelo) mostram pioras no desempenho do sistema sob o aspecto estudado. Os pontos em branco indicam que não houve alteração no cálculo do índice quando se compara a alternativa proposta com o caso base.

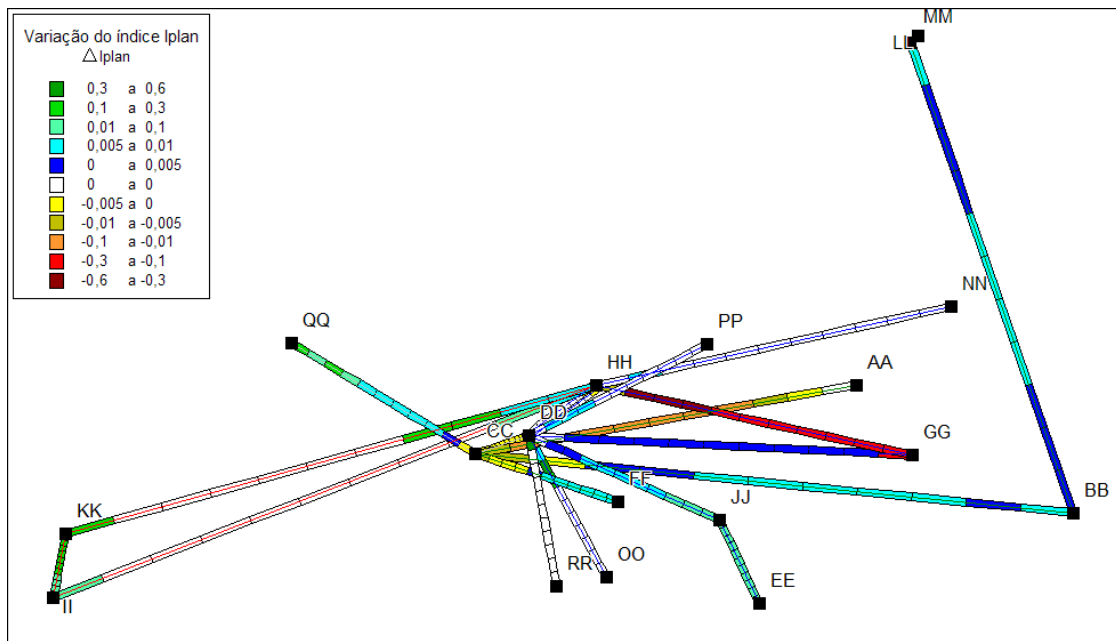


figura 5.8 – Variação do I_{plan} para a alternativa 1

5.2.2. ALTERNATIVA 2

A segunda alternativa proposta é a de incluir uma linha de transmissão entre as estações **SS** e **DD**, como se vê na figura 5.9.

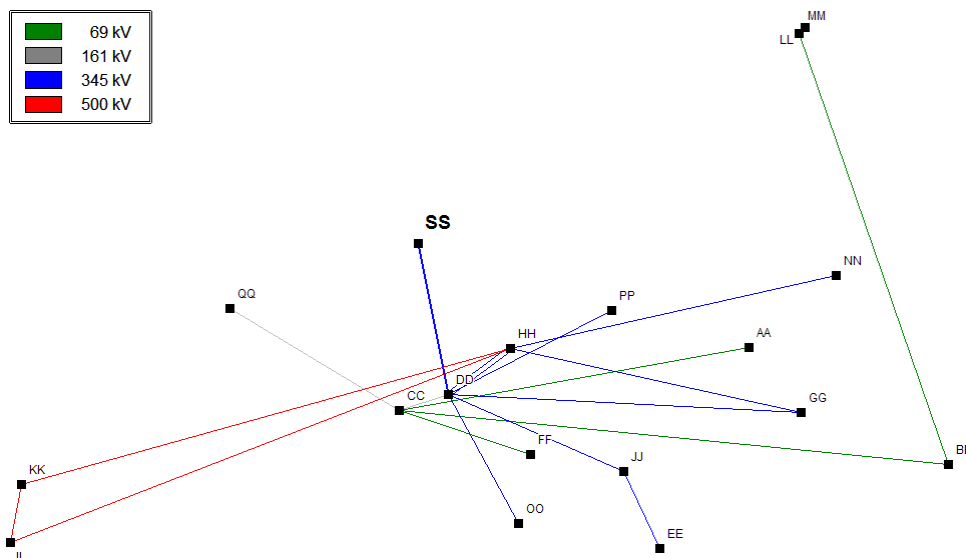


figura 5.9 – Segunda alternativa de expansão

De maneira semelhante à alternativa 1, foram calculados tanto o curto-circuito deslizante e a densidade de descargas como o índice proposto por este

trabalho. Os resultados desses cálculos se encontram entre a figura 5.10 e a figura 5.12.

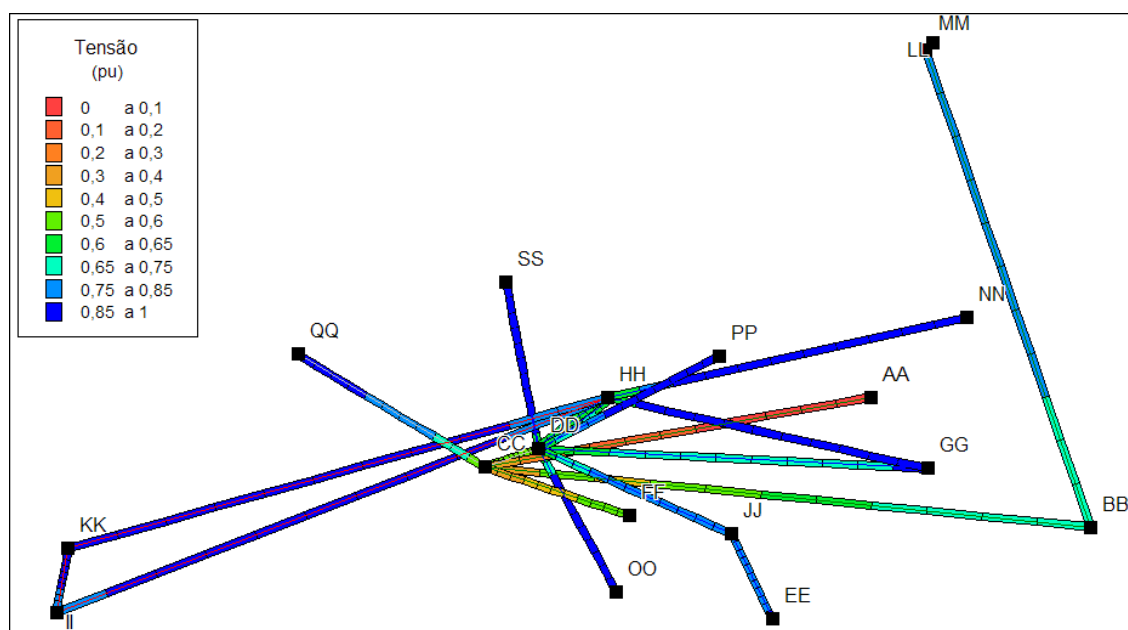


figura 5.10 – Curto-circuito deslizante: alternativa 2

Comparando-se os resultados do cálculo do curto-circuito deslizante para as alternativas 1 (figura 5.6) e 2 (figura 5.10), percebe-se um desempenho ligeiramente melhor da segunda alternativa, com tensões residuais mais altas na barra de referência para algumas faltas, por exemplo aquelas próximas às estações KK e QQ.

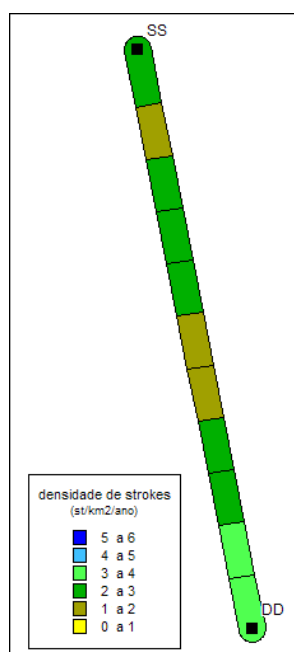


figura 5.11 – Densidades de descargas na linha da alternativa 2

Além desse melhor desempenho elétrico, percebe-se a partir da comparação da figura 5.7 com a figura 5.11 que a linha de transmissão da segunda proposta de expansão é menos susceptível à incidência de raios (menores densidades) do que a da primeira proposta. Esses são indícios que apontam para a alternativa 2 como a melhor opção entre as duas propostas. Para verificar esses indícios e identificar em quais pontos o sistema reage melhor após a expansão e quais pontos são fragilizados nessas situações, o I_{plan} foi calculado para a alternativa 2 e pode ser visualizado na figura 5.12. As escalas dos valores na figura 5.12 são as mesmas usadas na figura 5.8.

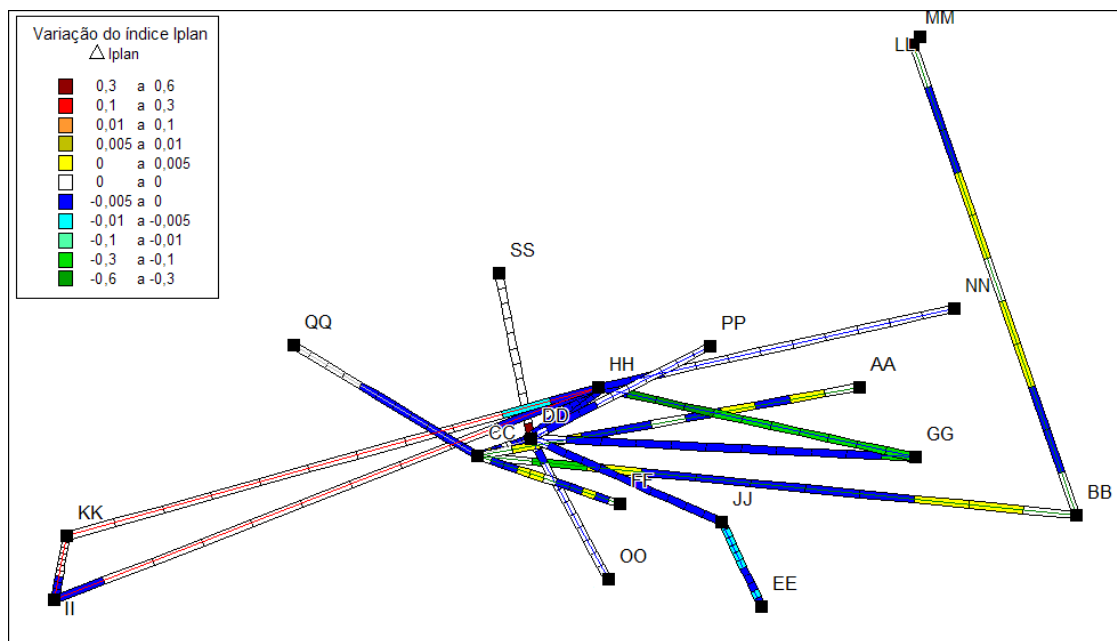


figura 5.12 – Variação do I_{plan} para a alternativa 2

A comparação dos dois casos analisados mostra que a alternativa 2 seria melhor do ponto de vista dos afundamentos de tensão. Apesar de se perceberem alguns pontos do sistema com desempenho pior, há diversos pontos que mostram melhora.

Entre os pontos em que foi percebido um aumento do índice, pode-se ver que esse aumento está mais relacionado à densidade de descargas incidentes sobre a linha do que à tensão residual na barra AA. Essa análise pode levar a novas propostas de expansão que visem melhorar o desempenho desses trechos frente às faltas provocadas por descargas atmosféricas.

5.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As alternativas propostas neste capítulo têm características elétricas e de instalação muito semelhantes, fazendo com que os resultados de curto-circuito

deslizante para ambas não sejam muito distintos. Em um ponto, entretanto, elas divergem. O traçado proposto para cada linha é bem diferente, partindo da mesma estação, mas seguindo em direções opostas.

Esse fato faz com que cada uma das alternativas tenha características próprias de incidência de descargas atmosféricas, permitindo uma melhor análise da proposta da dissertação.

É importante lembrar, contudo, que as alternativas não se limitam às mostradas nesse capítulo. Várias outras podem ser sugeridas, estudadas e simuladas. Basta que, para isto, sejam feitas as alterações adequadas dos dados elétricos e geográficos do sistema para que a proposta reflita as novas características que o mesmo deverá assumir.

6

CONCLUSÃO E CONTINUIDADE

Após se buscarem na literatura as referências que mostram como hoje é abordado o assunto de afundamentos de tensão no contexto dos sistemas elétricos, pode-se perceber que esse assunto é tratado, principalmente, com o objetivo de se medirem os danos causados aos sistemas existentes, tanto de concessionárias como de consumidores.

Esse trabalho propõe a inclusão desse estudo no Planejamento da Expansão dos Sistemas Elétricos de Potência por intermédio de um novo índice para auxiliar o planejador nos estudos. Desta maneira, é possível minimizar a ocorrência desse fenômeno nos sistemas elétricos, atuando de forma preventiva ao se proporem formas de melhorar a configuração do sistema responsável pelo fornecimento de energia elétrica. Tendo em vista a influência da incidência de raios e os afundamentos, propôs-se que esses dois eventos fossem associados em um único indicador, o I_{plan} .

O índice I_{plan} é capaz de mostrar ao planejador, já na etapa de diagnóstico do sistema elétrico, os pontos que já se apresentam críticos com respeito à ocorrência de afundamentos de tensão. De maneira análoga, na fase de prognóstico, esse índice mostra ao planejador os pontos da rede nos quais o problema poderá se agravar no horizonte de planejamento. Para isso, são consideradas tanto a topologia e as características do sistema elétrico que influenciam os parâmetros de interesse (amplitude, duração e frequência), como a distribuição geográfica da rede e do histórico de incidência de descargas atmosféricas, que influencia fortemente a frequência de ocorrência dos eventos. Nas etapas de proposta de alternativas de expansão e da avaliação técnica dessas alternativas, a aplicação do I_{plan} constitui mais um elemento técnico a ser considerado na escolha da intervenção a ser feita no sistema.

Vale ressaltar que a idéia é incorporar o I_{plan} no elenco das demais ferramentas de análise à disposição das equipes de planejamento. Para tal, sugere-se que esse índice seja inserido em uma ferramenta computacional capaz de fornecer de maneira rápida as informações ao planejador.

Caminhando nesta direção, como proposta de continuidade do trabalho, o I_{plan} deverá ser implementado em uma nova ferramenta computacional, denominada

PlanSag, que se encontra em desenvolvimento por meio de projeto de pesquisa numa parceria entre a UFMG e a CEMIG [P&D 08]. Tal ferramenta, por meio de uma interface amigável, permitirá que as equipes utilizem de forma direta as informações relacionadas aos afundamentos de tensão.

Essa ferramenta tem um grande potencial de aplicação nas empresas de energia elétrica. Com a sua inclusão nos estudos de planejamento, é esperada a melhoria na definição das obras de expansão do sistema, atuando para um melhor desempenho do mesmo. Assim, espera-se obter melhor qualidade de energia entregue aos consumidores, o que deve resultar na redução de penalidades às empresas, provenientes da ANEEL, devidas à baixa qualidade da energia fornecida. Os impactos positivos decorrentes da otimização dos investimentos em obras de expansão e manutenção se refletem na modicidade tarifária, trazendo benefícios diretos para a sociedade.

7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [ANEEL 05] Agência Nacional de Energia Elétrica, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST – Módulo 8: Qualidade de Energia Elétrica, Agosto 2005;
- [ANEEL 03] Agência Nacional de Energia Elétrica, Resolução ANEEL n. 676, de 19 de dezembro de 2003 (Diário Oficial, de 22 dez. 2003, seção 1, p. 86);
- [Becker 93] BECKER, C., BRAUN, W.JR., CARRICK, K., DILIBERTI, T., GRIGG, C., GROESCH, J., HAZEN, B., IMEL, T., KOVAL, D., MUELLER, D., ST. JOHN, T., CONRAD, L.E.: Proposed Chapter 9 for Predicting Voltage Sags (dips) in Revision to IEEE Std 493, the Gold Book, IEEE Transactions on Industry Applications, 17pp. Volume 30, Número 3, Maio 1994;
- [Bollen 03] BOLLEN, M.H.J., SABIN, D.D., THALLAM, R.S.: Voltage-sag Indices - Recent Developments in IEEE PI564 Task Force, 2003 Quality and Security of Electric Power Delivery Systems, CIGRE/IEEE PES International Symposium, 8pp. Outubro 2003;
- [Bollen 00] BOLLEN, M.H.J.: Understanding Power Quality Problems, Voltage Sags and Interruptions, book, IEEE Press Series on Power Engineering, 672 p., 2000;
- [Cigré 04] Power Quality Indices and Objectives, Joint Working Group Cigré 4.07 / Cired, 96pp. Março 2004;
- [Dias 06] DIAS, R.N.: Nova Metodologia para Identificação de Pontos Críticos de Desempenho em Linhas de Transmissão Baseada na Aplicação de Sistemas de Localização de Descargas Atmosféricas, Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Orientador: Silvério Visacro, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica (LRC/PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 01 de Dezembro 2006;

-
- [Dias 05] DIAS, R.N., MESQUITA, C.R., VISACRO, S., CAZETTA, F.A.: Análise de Incidência de Descargas Atmosféricas Nuvem-Solo Negativas no Estado de Minas Gerais; XVIII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba – Paraná, Outubro 2005;
- [Dias 02] DIAS, R.N.: Aplicações do SLT em Proteção Elétrica: Constituição de Base de Dados para Análise de Incidência de Descargas Atmosféricas em Linhas de Transmissão, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Orientador: Silvério Visacro, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica (LRC/PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Julho 2002;
- [Dorr 95] DORR, D.S.: Point of Utilization Power Quality Study Results, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, Julho / Agosto 1995;
- [Hill 97] HILL, J.C., HU, I.-P., FENN, J.H.: Eliminating Fault-induced Voltage Sags at an Industrial Plant: a Comparative Evaluation of Solutions, CIRED 97, Conference Publication no. 438, Junho 1997;
- [IEC 05] Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-34: Testing and Measurement Techniques – Voltage Dips, Short Interruptions and Voltage Variations Immunity Tests and Equipment with Input Current more than 16 A per phase – IEC 61000-4-34, 2005;
- [IEC 03] Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and Measurement Techniques - Power Quality Measurement Methods – IEC 61000-4-30, 2003;
- [IEC 02] Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-8: Environment - Voltage Dips and Short Interruptions on Public Electric Power Supply Systems with Statistical Measurement Results – IEC 61000-2-8, 2002;
- [IEEE 07] IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems – IEEE Std 493-2007 – Power Systems Reliability Subcommittee of the Power Systems Engineering Committee of the IEEE Industry Applications Society, 2007;
- [IEEE 98] IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems – IEEE Std 493-1997 (Gold Book) – Power Systems Reliability Subcommittee of the Power Systems Engineering Committee of the IEEE Industry Applications Society, Agosto 1998;
-

-
- [IEEE 95] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality - IEEE Std. 1159-1995 – IEEE Standards Coordinating Committee 22 on Power Quality, Novembro 1995;
- [Menezes 07] MENEZES, T.V.: Estratégia para Análise de Afundamento de Tensão no Planejamento do Sistema Elétrico; Orientadora: Maria Helena Murta Vale; Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (LRC/PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Outubro de 2007;
- [Menezes 03] MENEZES, T.V.: Critérios e Procedimentos Para Identificação E Avaliação de Barras Suscetíveis a Afundamentos de Tensão, Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica – SBQEE, 2003;
- [Menezes 02] MENEZES, T.V.: Critérios e Procedimentos de Planejamento para Identificação de Subsistemas Susceptíveis aos Fenômenos que Afetam a Qualidade da Energia, Especificamente Afundamentos de Tensão – Relatório Interno da Cemig, Dezembro de 2002;
- [Mesquita 04] MESQUITA, C.R., DIAS, R.N., VISACRO, S.: Incidence Analysis of Positive Lightning Flashes in Minas Gerais State, Brazil. International Conference on Lightning Protection (ICLP'2004), Avignon, France, September 2004;
- [Mesquita 01] MESQUITA, C.R.: Investigação de Sistemas de Detecção e Localização de Descargas Atmosféricas; Orientador: Silvério Visacro Filho; Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (LRC/PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Junho 2001;
- [Milanović 05] MILANOVIC, J.V., AUNG M.T., GUPTA, C.P.: The Influence of Fault Distribution on Stochastic Prediction of Voltage Sags, IEEE Transactions on Power Delivery, 8pp. Volume 20, número 1, Janeiro 2005;
- [Nagpal 06] Nagpal, M., Martinich T., Moshref A., Morison K. e Kundur P.: Assessing and Limiting Impact of Transformer Inrush Current on Power Quality, IEEE Transactions on Power Delivery, 7pp. Volume 21, número 2, Abril 2006;
- [PG&E 99] Pacific Gas and Electric Company: Voltage Tolerance Boundary, Janeiro 1999;
-

- [P&D 08] Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento ANEEL/CEMIG/UFMG: Desenvolvimento de uma Ferramenta Computacional para Análise de Afundamento de Tensão Aplicada ao Planejamento da Expansão, 2008/2009/2010;
- [RINDAT 09] Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas, <http://www.rindat.com.br>;
- [Vale 06] VALE, M.H.M., CAMPICI, P., MENEZES, T.V., VISACRO, S., DIAS, R.N.: Power System Expansion Planning: Applying LLS Data to Evaluate Lightning-related Voltage Sags, 19th International Lightning Detection Conference, Abril 2006;
- [Visacro 05a] VISACRO, S.: Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem em Engenharia, livro, Artliber Editora Ltda., São Paulo, SP, 2005;
- [Visacro 05b] VISACRO, S., DIAS, R.N., MESQUITA, C.R.: Novel Approach for Determining Spots of Critical Lightning Performance along Transmission Lines. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol 20, no 2, April 2005. pp 1459 – 1464.