

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 696

**ESTUDOS DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO NA
EXPANSÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - ANÁLISE
DO PARÂMETRO DURAÇÃO**

Alyson Geraldo Guimarães Cardoso

DATA DA DEFESA: 05/08/2011

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**ESTUDOS DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO NA EXPANSÃO
DE SISTEMAS ELÉTRICOS - ANÁLISE DO PARÂMETRO
DURAÇÃO**

Alyson Geraldo Guimarães Cardoso

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Profa. Maria Helena Murta Vale

Belo Horizonte - MG

Agosto de 2011

**"Estudos de Afundamentos de Tensão Na Expansão de
Sistemas Elétricos - Análise do Parâmetro Duração"**

Alyson Geraldo Guimarães Cardoso

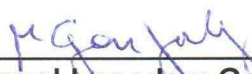
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 05 de agosto de 2011.

Por:



Profa. Dra. Maria Helena Murta Vale
DEE (UFMG)



Prof. Dr. Manuel Losada y Gonzalez
DEE (UFMG)



Profa. Dra. Rosilene Nietzsche Dias
LRC (UFMG)

**“Estudos de Afundamentos de Tensão na Expansão de
Sistemas Elétricos – Análise do Parâmetro Duração”**

Alyson Geraldo Guimarães Cardoso

Dissertação de Mestrado apresentada ao Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais em 05 de agosto de 2011.

Convidado Especial:



Eng. Tiago Vilela Menezes
(CEMIG)

Dedicatória

Aos meus queridos pais

Geraldo Magela de Paula Cardoso e

Leda Estela Guimarães Cardoso.

Agradecimentos

Rendo graças a Deus pelos amigos e oportunidades que tornam minha vida a cada dia mais feliz.

Um bom trabalho não é fruto de um único homem, sempre há uma equipe, e nesse caso, uma grande equipe. Em especial agradeço a orientação da minha amiga e Professora Maria Helena, também agradeço ao Professor Silvério e demais professores pela acolhida e apoio durante o desenvolvimento dessa pesquisa.

Aos colegas, que agora chamo de amigos, devo também agradecer pelo apoio técnico e científico, mas também sou grato pelas horas de conversa que tanto enriquecem e torna agradável o ambiente de trabalho. Ao Gustavo Ribeiro, agradeço por dividir a sala e pela sua amizade ao longo de todo esse trabalho.

Aos funcionários do LRC, sempre prestativos e gentis, expresso minha gratidão pelos seus serviços e mais ainda por sua amizade.

Agradeço a UFMG e ao CPDEE, por me acolherem mais uma vez como seu aluno, e à CAPES pela concessão de bolsa de estudo.

À Pesquisadora Rosilene Nietzsche e à CEMIG, em especial ao Engenheiro Tiago Vilela, pela oportunidade de trabalhar em um de seus projetos de pesquisa.

É com emoção, que me lembro dos meus pais, Geraldo Magela e Leda Estela, minha tia Alaíde de Paula, segunda mãe, das minhas queridas irmãs Viviane Amaral, Iury Alcídia e Joanna Paula, e agradeço por serem ao mesmo tempo exemplo e fiel apoio. Agradeço também, a minha madrinha Suzy Bernadete e aos meus padrinhos Heber e Heder pelo apoio. À minha família meu eterno agradecimento.

À Vanessa Abdul, minha namorada, pela cumplicidade e ao Paulo Márcio, meu nobre amigo, pelo apoio de sempre.

“Se eu vi mais longe, foi por estar de pé sobre ombros de gigantes.”

Isaac Newton

Resumo

A ocorrência do fenômeno Afundamento de Tensão nos Sistemas de Energia Elétrica influencia diretamente na qualidade da energia entregue pelos mesmos e gera prejuízos tanto para consumidores, quanto para as concessionárias de energia.

Esta dissertação enfoca os procedimentos aplicados à análise deste fenômeno nas etapas de Planejamento da Expansão dos sistemas de potência, aprofundando-se de forma mais específica no parâmetro Duração do afundamento de tensão. Constitui continuidade de pesquisas que vêm sendo realizadas na universidade.

O trabalho apresenta em caráter inovador, um fator de ponderação, denominado **fator τ** , que permite relacionar o tempo de atuação da proteção das linhas de transmissão à duração dos afundamentos de tensão. Considerando este fator, é apresentado o índice de desempenho I_{ALPLAN} , que constitui um avanço às pesquisas anteriores.

Abstract

The occurrence of voltage sags directly influences the quality of the energy supplied by the electrical systems and generates losses for both consumers and power utilities.

This work focuses the phenomenon from the expansion activity perspective in order to avoid or minimize its occurrence. It constitutes a continuity of researches that have been developed by the university. The voltage sag duration time is the parameter that is mainly investigated.

*This research proposes a innovative weighting factor, named **factor τ** , that relates the actuation time of the protection system to the voltage sag duration time. Taking into account this factor, the performance index I_{ALPLAN} is presented and constitutes an improvement of the previous researches.*

Sumário

1	Introdução	1
2	Afundamento de Tensão - Caracterização do Fenômeno e Elo com o Planejamento. 4	
2.1	Considerações iniciais.....	4
2.2	Caracterização do fenômeno e definições	4
2.3	Causas e impactos dos afundamentos de tensão	6
2.4	Parâmetros associados aos afundamentos de tensão	7
2.4.1	Parâmetro Intensidade	7
2.4.2	Parâmetro Duração	8
2.4.3	Parâmetro Frequência.....	9
2.5	Elo com o planejamento da expansão elétrica	9
2.5.1	Etapas dos estudos de planejamento da expansão elétrica.....	9
2.5.2	Inclusão da análise dos afundamentos de tensão no planejamento	11
2.6	Considerações finais	13
3	Contextualização do Trabalho	14
3.1	Considerações iniciais.....	14
3.2	I_{PLAN} – Índice de Desempenho de Pontos de Linha	14
3.2.1	Parâmetro intensidade do afundamento	16
3.2.2	Parâmetro frequência do afundamento.....	18
3.2.3	Parâmetro duração do afundamento.....	24
3.3	Considerações finais	25
4	Duração do Afundamento de Tensão – Proposta do Fator τ.....	26
4.1	Considerações iniciais.....	26
4.2	Critério de qualidade para avaliação das Funções Ganho	27
4.3	Análise de sensibilidade das Funções Ganho	28
4.3.1	Funções Ganho propostas	28
4.3.2	Análise das Funções Ganho	28
4.3.3	Análise de sensibilidade da função ganho harmônica	31
4.3.4	Conclusões obtidas com a análise de sensibilidade das funções	33
4.4	Testes das Funções Ganho	33
4.4.1	Função ganho unitário.....	35
4.4.2	Função ganho exponencial	38
4.4.3	Função ganho aritmético	42
4.4.4	Função ganho geométrico.....	45
4.4.5	Função ganho harmônico.....	48
4.5	Definição do fator τ	51
4.6	Considerações finais	51
5	I_{ALPlan} – Índice de Desempenho de Afundamento de Tensão Considerando o Fator τ 52	
5.1	Considerações iniciais.....	52
5.2	Índice de desempenho - I_{ALPLAN}	52
5.3	I_{ALPLAN} – Inclusão nos estudos de planejamento da expansão	53
5.4	Identificação de pontos críticos usando I_{ALPLAN}	58
5.5	Considerações finais	61
6	Conclusões e Propostas de Continuidade do Trabalho	62
7	Referências Bibliográficas	63

Lista de Figuras

FIGURA 2.1 – AFUNDAMENTO DE TENSÃO GERADO POR CURTO-CIRCUITO	5
FIGURA 2.2 – PASSOS DO PROCESSO DE DECISÃO DOS ESTUDOS DE PLANEJAMENTO	10
FIGURA 3.1 – VISUALIZAÇÃO DOS PONTOS DE CÁLCULO DO ÍNDICE I_{PLAN}	15
FIGURA 3.2 – ESTUDO DO COMPORTAMENTO DAS FUNÇÕES	16
FIGURA 3.3 – COMPARAÇÃO DE FUNÇÕES	17
FIGURA 3.4 – ESTIMATIVA DO DESEMPENHO PARA $N_g = 1$	19
FIGURA 3.5 – TELA DO SLT	20
FIGURA 3.6 – EXEMPLO DE MAPA DE DENSIDADE DE DESCARGAS INDIVIDUAIS (STROKES)	20
FIGURA 3.7 – FORMATO DOS ARQUIVOS B3D	21
FIGURA 3.8 – COMPOSIÇÃO DO B3D	23
FIGURA 4.1 – GRÁFICO DAS FUNÇÕES GANHO PROPOSTAS	29
FIGURA 4.2 – AMPLIAÇÃO DA FIGURA 4.1	30
FIGURA 4.3 – FATOR X TEMPO DE PROTEÇÃO	31
FIGURA 4.4 – CURVAS DE SENSIBILIDADE	32
FIGURA 4.5 – SEP FICTÍCIO	34
FIGURA 4.6 – AMPLITUDE DO ÍNDICE X TENSÃO RESIDUAL NO PONTO - BARRA 3 - 138 kV	35
FIGURA 4.7 – AMPLITUDE DO ÍNDICE X TENSÃO RESIDUAL NO PONTO - BARRA 8 - 345 kV	36
FIGURA 4.8 – AMPLITUDE DO ÍNDICE X TENSÃO RESIDUAL NO PONTO - BARRA 16 - 500 kV	36
FIGURA 4.9 – AMPLITUDE DO ÍNDICE X TENSÃO RESIDUAL NO PONTO - BARRA 18 - 69 kV	37
FIGURA 4.10 – AMPLITUDE DO ÍNDICE X TENSÃO RESIDUAL NO PONTO - BARRA 30 - 69 kV	37
FIGURA 4.11 – AMPLITUDE DO ÍNDICE X TENSÃO RESIDUAL NO PONTO - BARRA 3 - 138 kV	39
FIGURA 4.12 – AMPLITUDE DO ÍNDICE X TENSÃO RESIDUAL NO PONTO - BARRA 8 - 345 kV	39
FIGURA 4.13 – AMPLITUDE DO ÍNDICE X TENSÃO RESIDUAL NO PONTO - BARRA 16 - 500 kV	40
FIGURA 4.14 – AMPLITUDE DO ÍNDICE X TENSÃO RESIDUAL NO PONTO - BARRA 18 - 69 kV	41
FIGURA 4.15 – AMPLITUDE DO ÍNDICE X TENSÃO RESIDUAL NO PONTO - BARRA 30 - 69 kV	41
FIGURA 4.16 – AMPLITUDE DO ÍNDICE X TENSÃO RESIDUAL NO PONTO - BARRA 3 - 138 kV	42
FIGURA 4.17 – AMPLITUDE DO ÍNDICE X TENSÃO RESIDUAL NO PONTO - BARRA 8 - 345 kV	43
FIGURA 4.18 – AMPLITUDE DO ÍNDICE X TENSÃO RESIDUAL NO PONTO - BARRA 16 - 500 kV	43
FIGURA 4.19 – AMPLITUDE DO ÍNDICE X TENSÃO RESIDUAL NO PONTO - BARRA 18 - 69 kV	44
FIGURA 4.20 – AMPLITUDE DO ÍNDICE X TENSÃO RESIDUAL NO PONTO - BARRA 30 - 69 kV	44
FIGURA 4.21 – AMPLITUDE DO ÍNDICE X TENSÃO RESIDUAL NO PONTO - BARRA 3 - 138 kV	45

FIGURA 4.22 – AMPLITUDE DO ÍNDICE X TENSÃO RESIDUAL NO PONTO - BARRA 8 - 345 kV	46
FIGURA 4.23 – AMPLITUDE DO ÍNDICE X TENSÃO RESIDUAL NO PONTO - BARRA 16 - 500 kV	46
FIGURA 4.24 – AMPLITUDE DO ÍNDICE X TENSÃO RESIDUAL NO PONTO - BARRA 18 - 69 kV	47
FIGURA 4.25 – AMPLITUDE DO ÍNDICE X TENSÃO RESIDUAL NO PONTO - BARRA 30 - 69 kV	47
FIGURA 4.26 – AMPLITUDE DO ÍNDICE X TENSÃO RESIDUAL NO PONTO - BARRA 3 - 138 kV	48
FIGURA 4.27 – AMPLITUDE DO ÍNDICE X TENSÃO RESIDUAL NO PONTO - BARRA 8 - 345 kV	49
FIGURA 4.28 – AMPLITUDE DO ÍNDICE X TENSÃO RESIDUAL NO PONTO - BARRA 16 - 500 kV	49
FIGURA 4.29 – AMPLITUDE DO ÍNDICE X TENSÃO RESIDUAL NO PONTO - BARRA 18 - 69 kV	50
FIGURA 4.30 – AMPLITUDE DO ÍNDICE X TENSÃO RESIDUAL NO PONTO - BARRA 30 - 69 kV	50
FIGURA 5.1 – DIAGRAMA DE ANÁLISE PARA DIAGNÓSTICO E PROGNÓSTICO DO SISTEMA	54

Lista de Tabelas

TABELA 2.1 – CLASSIFICAÇÃO DAS VARIAÇÕES DE TENSÕES DE CURTA DURAÇÃO (PRODIST) _____	6
TABELA 2.2 – TEMPOS TÍPICOS DE ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO _____	8
TABELA 3.1 – NDR MÉDIO POR CLASSE DE TENSÃO _____	19
TABELA 3.2 – TEMPO DE ATUAÇÃO POR CLASSE DE TENSÃO _____	24
TABELA 4.1 – VALORES DAS FUNÇÕES E SUAS RESPECTIVAS RAZÕES _____	30
TABELA 4.2 – VALORES DAS FUNÇÕES DE SENSIBILIDADE E SUAS RESPECTIVAS RAZÕES _____	32
TABELA 5.1 – INFLUÊNCIA DA INCLUSÃO DO PARÂMETRO TEMPO NAS ANÁLISE DE PLANEJAMENTO _	59

1

Introdução

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) possui fundamental importância na sociedade atual, onde a dependência em relação à energia elétrica por parte dos diversos setores (saúde, segurança, alimentício, dentre inúmeros outros) faz com que seja necessária uma alta confiabilidade.

A demanda de energia aumenta a cada dia e crescem as exigências acerca da *Qualidade de Energia Elétrica* entregue pelas empresas concessionárias. Dentre os distúrbios considerados no contexto da qualidade de energia, os Afundamentos de Tensão têm recebido especial atenção por parte do setor elétrico, devido aos impactos negativos que trazem para o SEP.

O fenômeno do Afundamento de Tensão se caracteriza por uma *redução do valor eficaz da tensão, por um período de tempo, decorrente de perturbações ocorridas no sistema elétrico*.

Graves podem ser as *consequências* dos afundamentos de tensão. Este fenômeno tem sido responsável por perdas de grandes blocos de cargas, sendo considerado uma das principais fontes de interrupções de processos industriais, trazendo danos significativos para empresas de energia e consumidores.

Várias são as *origens* deste fenômeno e, dentre elas, citam-se a partida de motores de grande porte, as faltas na rede elétrica e a energização de transformadores [Bollen, 2000]. Os afundamentos de tensão, assim, podem se originar de distúrbios ocorridos tanto nas plantas dos consumidores quanto na rede elétrica das empresas de energia. Diversos têm sido os esforços para minimizar ou eliminar a ocorrência do fenômeno nestas duas frentes: empresas e consumidores.

Nesta dissertação, o enfoque é no contexto das empresas de energia elétrica e, portanto, atenção é dada aos afundamentos de tensão provocados por curtos-circuitos nas Linhas de Transmissão (LT) e Linhas de Distribuição (LD) aéreas. Devido à sua extensão e exposição, estas se tornam muito vulneráveis às faltas.

Os afundamentos de tensão têm sido tratados, tradicionalmente, de forma corretiva, quando o problema já está ocorrendo. Com o objetivo de alterar esta visão, uma pesquisa conjunta entre o LRC¹/UFMG e CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais, iniciada em 2003 e considerada inovadora, mostrou que “os danos decorrentes dos afundamentos

¹ LRC – *Lightning Research Center* – Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas (convênio UFMG / CEMIG).

*de tensão poderiam ser evitados ou substancialmente minimizados, se análises sobre o fenômeno fossem incluídas já na elaboração dos planos de obras de expansão do SEP*².

Desta forma, o objetivo passou a ser o de antever eventuais problemas, analisando o desempenho do sistema futuro quanto aos afundamentos de tensão. De uma perspectiva corretiva passou-se para uma visão preventiva com relação ao fenômeno.

A evolução dessas pesquisas indicou que a maneira mais adequada para se incluir a análise dos afundamentos de tensão no processo de expansão seria por meio do uso de índices de desempenho do SEP, com relação ao fenômeno. Tais índices, calculados com base nos parâmetros de interesse – intensidade, duração e frequência de ocorrência do fenômeno, procurariam indicar ao planejador os pontos vulneráveis do sistema na situação atual e futura, considerando o horizonte de planejamento. Os trabalhos levaram à concepção e implementação de uma ferramenta computacional denominada PlanSag, como parte de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento conjunto entre empresa-universidade² [P&D D-224, 2010].

Apesar de essas pesquisas terem atingido um patamar elevado de desenvolvimento, trata-se de um tema inovador, envolvendo sempre avanços e aprimoramentos. Esta dissertação se insere no contexto de sua continuidade. Em capítulos posteriores deste texto, é realizada uma breve revisão histórica sobre a evolução dessas pesquisas, indicando aquelas desenvolvidas neste trabalho.

Diante do exposto, pode-se identificar o **objetivo básico** deste trabalho como sendo: *contribuir para a inclusão das análises de afundamentos de tensão no processo de decisão das etapas de Planejamento da Expansão dos sistemas das empresas de energia, por meio de Índices de Desempenho.*

A concepção dos índices de afundamentos de tensão partiu de estudos detalhados sobre cada parâmetro de interesse, com o objetivo de identificar os fatores que melhor os representassem nas formulações. Dentre os três parâmetros, a duração dos afundamentos de tensão foi aquele que apresentou uma maior necessidade de investigações adicionais, na busca por um fator tempo de duração mais adequado.

Sendo assim, como **objetivo específico** do trabalho tem-se a *investigação detalhada do parâmetro duração dos afundamentos de tensão, visando à proposição de um fator tempo que melhor o ponderasse, na composição de um novo índice de desempenho.*

Com esta meta, é proposto nesta dissertação um *fator denominado fator tempo τ* , baseado em uma função ganho harmônico. A consideração deste fator levou à composição do índice I_{ALPLAN} .

² Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento ANEEL - P&D D-224–CEMIG–LRC/UFMG - “Desenvolvimento de uma Ferramenta Computacional para Análise de Afundamento de Tensão Aplicada ao Planejamento da Expansão”, 2010.

A fim de alcançar seus objetivos, esta dissertação está estruturada em sete capítulos. O presente capítulo dedica-se à introdução do tema e a seguir é feita uma breve descrição dos demais.

O Capítulo 2 é responsável pela caracterização e definição do fenômeno afundamento de tensão. São apresentados os parâmetros intensidade, duração e frequência de afundamentos. Além disso, relaciona a etapa de estudos de planejamento da expansão de sistemas elétricos de potência com os estudos e análises do fenômeno afundamentos de tensão.

O Capítulo 3 faz a contextualização dos objetivos dessa pesquisa e embasa os desenvolvimentos e análises apresentados nesta dissertação. É apresentada a correlação deste trabalho com o projeto de pesquisa e desenvolvimento [P&D D-224, 2010]. O nível de desenvolvimento das pesquisas, desse projeto, com respeito a índices de desempenho de pontos de linha, é revelado, o que tornam claras as contribuições desta dissertação. Somado a isso, é feita uma revisão da análise do parâmetro intensidade de afundamento proposta em [Campici, 2009] e é apresentado o desenvolvimento de um *software* para produção de um banco de dados ligado ao projeto.

O Capítulo 4 é inteiramente dedicado ao estudo do parâmetro duração de afundamento de tensão. Através da investigação de funções que permitam a inclusão adequada do parâmetro duração de afundamento de tensão no cálculo de índices de desempenho é escolhida a melhor proposta, e a partir desta, é definido o fator τ .

O Capítulo 5 usa o fator τ na definição do índice de desempenho I_{ALPLAN} . São apresentados os procedimentos para análise de planejamento do sistema incluindo o uso do índice proposto. Ainda é apresentada uma análise típica de planejamento, usando o I_{ALPLAN} , destacando as consequências da inclusão do parâmetro duração de afundamentos de tensão.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho e as propostas de continuidade do mesmo, enquanto o Capítulo 7 contém as referências bibliográficas citadas ao longo do texto.

2

Afundamento de Tensão - Caracterização do Fenômeno e Elo com o Planejamento

O capítulo caracteriza o fenômeno de afundamento de tensão, identificando as definições adotadas neste trabalho, e apresenta o elo que sua análise possui com a etapa de estudos de planejamento da expansão dos sistemas elétricos de potência.

2.1 Considerações iniciais

O fenômeno afundamento de tensão é assunto de muitas pesquisas no mundo, principalmente no contexto de qualidade da energia. Tradicionalmente, estes têm sido tratados por meio de ações corretivas que devem ser executadas quando da ocorrência do fenômeno, a fim de evitar danos. O presente trabalho possui outro foco, sendo o fenômeno estudado em caráter preventivo, já nas etapas de planejamento.

Este capítulo traz a descrição e as definições relacionadas ao fenômeno afundamento de tensão apresentadas na literatura, incluindo as normas pertinentes. Suas causas e impactos são descritas. Três parâmetros de interesse são tratados em detalhes: intensidade, duração e frequência de ocorrência do fenômeno.

É, também, escopo deste capítulo discorrer sobre o planejamento do sistema elétrico de potência e qual seria o elo entre a etapa da expansão e os estudos sobre afundamentos de tensão, bem como sua importância e necessidades atuais.

A evolução das pesquisas relacionadas à inclusão da análise dos afundamentos de tensão no planejamento da expansão realizadas pela equipe do LRC/UFMG, nas quais esta dissertação se insere, é apresentada, para subsidiar os capítulos posteriores.

2.2 Caracterização do fenômeno e definições

Basicamente, afundamentos de tensão são reduções do nível de tensão na rede que ocorrem durante um curto intervalo de tempo, em geral, fruto de curtos-circuitos, energização de transformadores e partida de motores de grande porte.

A Figura 2.1, adaptada de [Bollen, 2000] apresenta o comportamento da tensão em uma das fases de um circuito ao longo do tempo. Essa tensão foi amostrada durante um afundamento de tensão causado por curto-circuito. Seu valor cai para próximo de 20% da tensão pré-falta, durante um tempo de cerca de dois ciclos, e retorna ao seu valor original depois desse período.

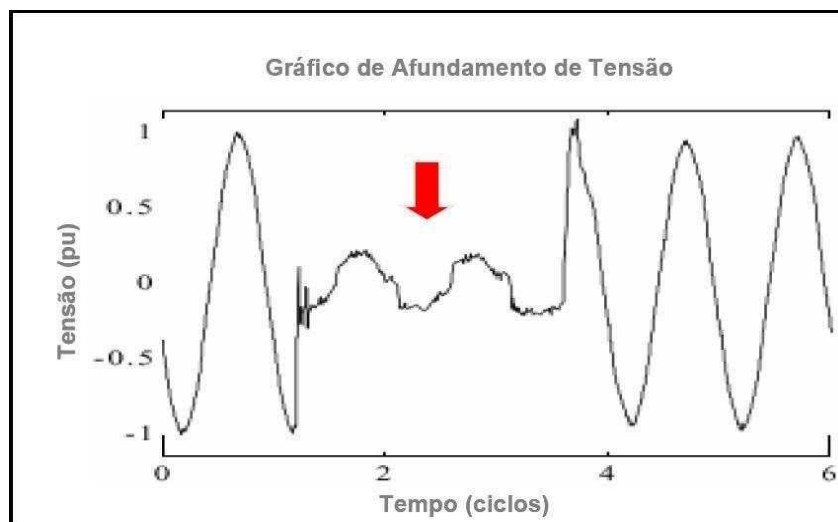


Figura 2.1 – Afundamento de tensão gerado por curto-circuito

A curva da Figura 2.1 pode ser vista como *característica* de um afundamento de tensão provocado por curto-circuito. Nota-se, a partir da mesma, que dois parâmetros podem ser destacados: intensidade e duração do fenômeno no tempo.

A intensidade³ é definida, pelo IEEE, como a menor tensão remanescente ou residual (em valor eficaz) observada durante o afundamento, desde que esta seja superior a 0,10 p.u. Caso a tensão remanescente seja inferior a esse valor, o evento passa a ser tratado como uma interrupção. Dependendo do tempo de duração, um afundamento de tensão, pode ser classificado como: *Instantâneo*: entre 0,5 ciclos e 30 ciclos; *Momentâneo*: entre 30 ciclos e 3 segundos; *Temporário*: entre 3 segundos e 1 minuto.

As pequenas oscilações durante o segundo ciclo e o pico no fim do quarto ciclo indicam que os parâmetros intensidade e duração do fenômeno no tempo não são suficientes para descrever todo o comportamento da tensão durante o evento. Entretanto, tais oscilações podem ser desconsideradas no contexto desta dissertação, pois apresentam um grau de detalhamento do fenômeno incompatível com os estudos realizados na etapa de planejamento da expansão.

Considerando definições apresentadas no contexto do setor elétrico nacional, segundo os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST [ANEEL, 2011], as variações de tensão de curta duração são classificadas de acordo com a Tabela 2.1, extraída do Módulo 8 desse conjunto de normas.

³ O termo *intensidade* é utilizado nesta dissertação referindo-se ao valor remanescente ou residual da tensão. Em muitas publicações, o termo *amplitude* do afundamento de tensão tem sido adotado. Contudo, deve-se observar que tal termo nem sempre se refere ao valor residual da tensão e, sim, à diferença de tensão entre o valor inicial e o residual.

Nessa tabela, o fenômeno afundamento de tensão é classificado com base em dois tipos diferentes de variação de tensão, ambos definidos para valor eficaz de tensão entre 0,1 e 0,9 p.u.: *Variação Momentânea* (superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos) e *Variação Temporária* (superior a três segundos e inferior a três minutos).

Tabela 2.1 – Classificação das variações de tensões de curta duração (PRODIST)

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u.
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u.
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u.
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p.u.
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u.
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 p.u.

Observa-se que o IEEE, através da norma Standard 1159 – 1995 [IEEE, 1995], recomendada internacionalmente pelo IEEE Standard 493-1997 [IEEE, 1997], é coerente com o PRODIST ao definir que o fenômeno afundamento de tensão ocorre para valores de tensão eficaz entre 0,1 e 0,9 p.u. Entretanto define que a duração deste deve estar compreendida entre meio ciclo e um minuto.

O ONS [ONS, 2010] classifica o fenômeno afundamento de tensão como Variações de Tensão de Curta Duração – VTCD e o define de maneira equivalente à definição, referente à variação momentânea de tensão, do PRODIST.

2.3 Causas e impactos dos afundamentos de tensão

Várias são as **causas** dos afundamentos de tensão e, dentre elas, podem ser citadas as faltas no sistema de transmissão e distribuição, a partida de motores de grande porte e a

energização de transformadores de grande potência, conforme discutido detalhadamente em [Bollen, 2000].

A origem mais freqüente dos afundamentos de tensão é a ocorrência de curtos-circuitos ao longo das redes elétricas, sendo estes causados principalmente por descargas atmosféricas. No contexto desta dissertação, enfoque é dado aos afundamentos de tensão provenientes de curtos-circuitos, tendo em vista a perspectiva da pesquisa, que está relacionada ao planejamento da expansão de sistemas de potência.

O estudo do fenômeno no que diz respeito a seus **impactos** resulta na observância de que, em geral, sua ocorrência não causa danos permanentes a equipamentos. Entretanto, pode provocar o desligamento de dispositivos ou até mesmo a parada de processos. No caso onde esses processos são de grande porte e o tempo é preponderante à produção, interrupções podem causar danos ao produto final e/ou prejuízos financeiros vultosos.

Conforme já citado, tradicionalmente, o problema tem sido tratado na área de operação, em caráter corretivo. Todavia, essa alternativa necessita de análise técnica rigorosa e específica, requerendo a preparação de projetos especiais, uma vez que cada cliente se liga a um ponto distinto da rede. Observa-se que o investimento necessário para a aquisição e implantação de dispositivos de proteção elencados nesses projetos, muitas vezes é tão elevado que os tornam inviáveis ou muito pouco rentáveis. Questões legais sobre quem arca com essas despesas ainda são discutidas entre as concessionárias e os clientes, o que cria um clima de animosidade entre as partes. Isto reforça a relevância desta dissertação que aborda a ocorrência do afundamento de tensão de forma preventiva.

2.4 Parâmetros associados aos afundamentos de tensão

Conforme citado anteriormente, três fatores são extremamente relevantes nos estudos relacionados aos afundamentos de tensão: intensidade, duração e freqüência de ocorrência. Tais parâmetros procuraram “quantizar” o fenômeno, trazendo informações que podem ser extremamente úteis nas análises de planejamento da expansão do SEP.

Neste item os parâmetros são abordados de forma introdutória, de maneira a permitir a compreensão do seu detalhamento em capítulos posteriores do texto.

2.4.1 Parâmetro Intensidade

A intensidade do afundamento de tensão é um dos parâmetros mais relevantes, uma vez que traz a informação direta do impacto do afundamento de tensão no valor da tensão dos barramentos do sistema.

É importante registrar que a literatura se reporta a este impacto de duas formas distintas: *Valor da Tensão Residual* (amplitude residual) ou *Valor da Redução da Tensão* (diferença entre as amplitudes inicial e final). Nesta dissertação, a intensidade do afundamento está relacionada ao valor residual da tensão.

Considerando os afundamentos de tensão causados por curtos-circuitos, o valor residual da tensão está intimamente ligado a diversas características elétricas e físicas do SEP, como ligações de transformadores, tipo, localização e impedância de falta, topologia da rede, impedância dos componentes do sistema, dentre outras. Uma ferramenta usualmente adotada para determinar a intensidade dos afundamentos de tensão é o programa que faz o chamado cálculo de *curto-circuito deslizante*. Para uma determinada barra de referência esse programa fornece os valores da tensão residual provenientes de curtos-circuitos aplicados ao longo do SEP. Nos desenvolvimentos desta dissertação, foi utilizado o programa [AspenTM, 2009].

2.4.2 Parâmetro Duração

A duração de um afundamento de tensão é o intervalo de tempo compreendido entre o ponto onde o valor da tensão fica inferior ao limiar que define o fenômeno (0,9 p.u. na Tabela 2.1) e o ponto onde esta retorna a valores considerados aceitáveis. O parâmetro duração do evento é fundamental e, inclusive, integra a própria definição do fenômeno (Tabela 2.1), onde é estipulada uma duração mínima e máxima do evento para a qual este é considerado efetivamente como um afundamento de tensão e não como outro fenômeno elétrico.

Quando o valor desse parâmetro é elevado, maiores são os efeitos para os consumidores conectados na rede. Isso ocorre uma vez que, ao tempo de duração do afundamento, se associa a quantidade de energia a que o consumidor foi privado. Sendo esta elevada, maiores serão os danos associados.

O tempo de atuação da proteção do sistema tem sido associado ao tempo de duração dos afundamentos de tensão, constituindo assim fator determinante para o cálculo desse parâmetro. A proteção apresenta tempos distintos de atuação para diferentes níveis de tensão e, por conseguinte, a estes são associados diferentes valores para o parâmetro de duração.

Tempos típicos utilizados pelas concessionárias brasileiras estão indicados na Tabela 2.2 extraída de [Menezes, 2007]. Nessa tabela observa-se que o tempo de atuação da proteção é tão menor quanto maior é o nível de tensão da linha. Os valores podem alterar em função do sistema de proteção utilizado e da coordenação da proteção.

Tabela 2.2 – Tempos típicos de atuação da proteção em linhas de transmissão

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

2.4.3 Parâmetro Frequência

O parâmetro frequência de afundamentos de tensão informa com que taxa esse fenômeno ocorre em um dado ponto do sistema. Essa informação agrega a noção de grau de incidência do fenômeno naquele ponto.

No contexto da *operação* do SEP, a frequência de afundamentos pode ser obtida por medição direta através da amostragem de sinais na rede durante o afundamento ou pode ser estimada por algum parâmetro que esteja relacionado ao fenômeno.

No contexto da *expansão*, o parâmetro frequência tem sido tradicionalmente relacionado ao número de desligamentos das linhas. Conforme tratado no capítulo 3, nos desenvolvimentos realizados no LRC/UFMG, informações sobre densidades de descargas individuais são incorporadas na composição do parâmetro.

2.5 Elo com o planejamento da expansão elétrica

As pesquisas desenvolvidas na UFMG, relacionadas aos afundamentos de tensão, têm se direcionado à inclusão das análises deste fenômeno nas etapas do processo de planejamento.

A Expansão do Sistema Elétrico, conforme discutido em detalhes na dissertação [Menezes, 2007], engloba diversas atividades e, dentre elas, destacam-se os Estudos de Planejamento da Expansão Elétrica, para onde a proposta desta dissertação está direcionada.

Sendo assim, neste item, o tema planejamento da expansão elétrica refere-se, de forma específica, aos estudos de planejamento, tornando-se importante identificar suas etapas e indicar aquelas onde a inclusão das análises de afundamentos de tensão é recomendada.

2.5.1 Etapas dos estudos de planejamento da expansão elétrica

Basicamente, os estudos de planejamento têm como objetivo gerar os planos de expansão a serem implementados no sistema elétrico, visando o atendimento da demanda atual e futura. Inclui a proposta de possíveis alternativas de expansão, sua comparação e a seleção da mais adequada, considerando aspectos técnicos e econômicos. O horizonte de planejamento típico é de 10 anos. Normalmente esse processo de decisão envolve os passos mostrados na Figura 2.2 [Menezes, 2007].

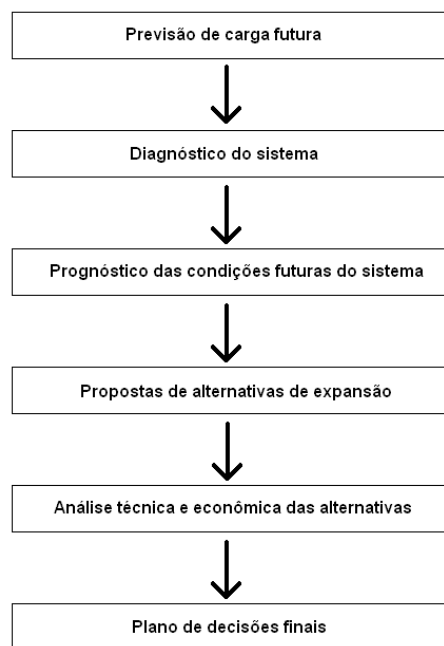


Figura 2.2 – Passos do processo de decisão dos estudos de planejamento

- **Previsão de carga futura** – Nesta etapa é indicada a previsão da demanda de carga futura. Tal estimativa leva em conta o conhecimento da evolução do mercado, das obras de grandes consumidores que serão concluídas, do crescimento do país, além de outros fatores políticos e econômicos que possam interferir no desenvolvimento do setor.
- **Diagnóstico do sistema** – Nesta etapa é feito um levantamento da condição do sistema atual, para identificar possíveis pontos críticos. São realizados estudos de fluxo de potência, curto-circuito, transitórios e de estabilidade (eletromecânica e de tensão). Entre as variáveis observadas destacam-se os níveis de carregamento das linhas de transmissão/distribuição e de transformadores, perdas ôhmicas do sistema, comportamento de energia reativa, como pode ser visto em [Menezes, 2007].
- **Prognóstico da situação futura do sistema** – Esta etapa é semelhante à etapa de diagnóstico do SEP, entretanto o sistema em estudo agora é o sistema futuro, considerando o horizonte de planejamento. Os planejadores devem prever as características do sistema no futuro, principalmente no que diz respeito a suas fragilidades. Simulações são feitas e, como no diagnóstico, estudos de fluxo de potência, curto-circuito, transitórios e estabilidade (eletromecânica e de tensão) são realizados.
- **Propostas de alternativas de expansão** – Uma vez estudados os sistemas atual e futuro, os planejadores devem propor alternativas de expansão que atendam às necessidades detectadas por esses estudos. As alternativas em

geral envolvem obras para garantir o atendimento da demanda futura, tais como, reforço da rede elétrica, construção de novas linhas, subestações ou até mesmo de usinas, implantação de compensações série ou *shunt*, interligação de sistemas, bem como alterações da configuração dos mesmos.

- **Análise técnica e econômica das alternativas** – Não basta propor alternativas, é preciso que a equipe de planejamento decida sobre a mais viável técnica e economicamente para a empresa e sociedade. Para tal, são necessários estudos comparativos ponderando as vantagens e desvantagens de cada uma delas, considerando aspectos técnicos e econômicos.
- **Plano de decisões finais** – Após a etapa de análise técnica e econômica, a alternativa é escolhida, sendo preparado o plano para a sua implementação.

2.5.2 Inclusão da análise dos afundamentos de tensão no planejamento

A inclusão da análise dos afundamentos de tensão nos estudos de planejamento foi proposta inicialmente em [Menezes, 2003] de forma bastante inovadora. O fenômeno passaria a ser tratado de maneira preventiva e não apenas corretiva. Nesta referência, o autor Tiago Menezes já tratava dos parâmetros (intensidade, frequência e duração) de forma aplicada aos estudos de planejamento e propunha índices de desempenho relacionados aos afundamentos de tensão.

As discussões iniciais evoluíram, incluindo um maior detalhamento das etapas de planejamento, sob a ótica do fenômeno, e a revisão da legislação pertinente. Reforçou-se a idéia de que a maneira mais adequada para a inclusão das análises de afundamentos de tensão nos processos de decisão das empresas seria por meio da utilização de **índices de desempenho** que indicassem pontos críticos do SEP. Esta evolução das pesquisas deu origem à dissertação [Menezes, 2007], intitulada “*Estratégia para Análise de Afundamento de Tensão no Planejamento do Sistema Elétrico*”.

Diante do fato da maior causa de afundamentos de tensão ser proveniente de curtos-circuitos e estes, por sua vez, serem devidos à incidência de descargas atmosféricas [Visacro, 2005], as pesquisas evoluíram para incluir, nos índices até então gerados, a influência da diferença da densidade de raios ao longo das linhas (existentes ou planejadas). Os dados de densidade são obtidos do Sistema de Detecção e Localização de Descargas, *Lightning Location System* (LLS).

Estes desenvolvimentos uniram experiências multidisciplinares das equipes do LRC/UFG e CEMIG (planejamento e descargas atmosféricas), tendo seus primeiros resultados apresentados em [Vale, 2006] e na dissertação [Campici, 2009], intitulada “*Afundamentos de Tensão no Contexto da Expansão dos Sistemas Elétricos: Proposta de Índices Considerando Dados do Sistema de Detecção de Raios*”. O efeito das descargas

atmosféricas passou, assim, a ser considerado na análise do parâmetro frequência dos afundamentos.

Diante dos resultados extremamente significativos apresentados pelos desenvolvimentos realizados, a pesquisa teve continuidade, configurando um Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento, denominado “*Desenvolvimento de uma Ferramenta Computacional para Análise de Afundamento de Tensão Aplicada ao Planejamento da Expansão*”, numa parceria entre o LRC/UFMG e a empresa CEMIG.

Neste projeto, foi gerada a ferramenta computacional **PlanSag** que, por meio de uma interface homem-máquina amigável, auxilia as equipes de planejamento na elaboração dos estudos de expansão. Esta ferramenta encontra-se detalhada em [Vale, 2010], [Vale, 2011]⁴ e [P&D D-224, 2010]⁴. Basicamente, o *software* calcula índices de desempenho baseados nos três parâmetros de interesse (intensidade, frequência e duração do fenômeno) que são utilizados para identificar pontos críticos ao longo do SEP, com relação aos afundamentos de tensão.

Conforme detalhado no capítulo 3, parte dos desenvolvimentos realizados nesta dissertação integra o conjunto de funcionalidades implementadas no PlanSag.

O conhecimento dos pontos críticos do sistema pode ser utilizado para analisar situações atuais, futuras, na proposição de alternativas e na comparação entre as mesmas. Desta forma, considerando os passos identificados na Figura 2.2, a inclusão da análise dos afundamentos de tensão é indicada nas seguintes etapas:

- **Diagnóstico do sistema** – Nessa etapa a análise de afundamentos de tensão dirá ao planejador quais são os pontos críticos do sistema atual em relação a esse fenômeno. Medidas corretivas, quando possíveis, podem ser realizadas.
- **Prognóstico da situação futura do sistema** – A análise de afundamentos de tensão identifica os pontos críticos no horizonte de planejamento futuro do sistema. A equipe de planejamento poderá, ao visualizar esses pontos, tomar medidas preventivas que os atenuem ou mesmo os evitem.
- **Propostas de alternativas de expansão** – A proposição de alternativas passa a considerar a existência dos pontos críticos identificados no prognóstico.
- **Análise comparativa de alternativas de expansão** – As alternativas de expansão, se testadas com relação a afundamentos de tensão, também podem ser melhor diferenciadas e ponderadas a fim de que os planejadores possam optar pela melhor dentre elas.

⁴ O autor da presente dissertação integra o conjunto de pesquisadores destes trabalhos.

2.6 Considerações finais

Do exposto neste capítulo, pode-se perceber a importância de se tratarem os afundamentos de tensão desde as etapas de expansão do SEP, visando minimizá-los ou, até mesmo, evitá-los. São fortes seus impactos negativos para as empresas e para os consumidores.

Em termos de índices relacionados ao fenômeno, conforme detalhado em [Cigré, 2009], estes têm sido quase sempre propostos para quantificar ou caracterizar eventos já ocorridos. Os índices SARFI (*System Average RMS Variation Frequency Index*), *Voltage-Sag Energy* (baseia-se em funções do tipo energia) e *Voltage-Sag Severity* (relaciona amplitude versus duração) são normalmente utilizados. Tais índices são representados por meio de tabelas e gráficos. Uma publicação bem completa sobre a determinação deste tipo de índice é o relatório [Cigré, 2004] do Cigré.

Apesar de serem índices tradicionais, não se aplicam diretamente a análises de expansão, pois se baseiam em dados históricos em instalações já existentes. Esta situação reforça mais uma vez o fato de que a análise do fenômeno sob o prisma do planejamento, além de não ser trivial, é bastante inovadora, exigindo continuidades e aprimoramentos.

Conforme já citado, a presente dissertação foi elaborada no âmbito de implementação da ferramenta **PlanSag**. Representa continuidade das pesquisas, trazendo avanços significativos na determinação dos índices. O próximo capítulo identifica os desenvolvimentos realizados neste contexto.

3

Contextualização do Trabalho

Este capítulo contextualiza os desenvolvimentos realizados no mestrado no âmbito das pesquisas relativas à concepção de índices de desempenho de afundamentos de tensão aplicados aos estudos de planejamento da expansão.

3.1 Considerações iniciais

A integração dos trabalhos desta dissertação com as pesquisas que vêm sendo realizadas no tema se dá em dois níveis: (i) atuação na composição do índice I_{PLAN} – *Índice de Desempenho de Pontos de Linha*, do PlanSag e (ii) proposta de novo índice de desempenho denominado I_{ALPLAN} .

Neste capítulo, é tratado o nível (i), atuação na composição do I_{PLAN} . Para tal, são apresentadas suas principais características, mostrando como este atua na análise de afundamentos de tensão no âmbito do planejamento.

O I_{PLAN} se baseia nos parâmetros intensidade do afundamento, duração e frequência de ocorrência do mesmo e é usado para identificar pontos críticos no SEP, ou seja, pontos mais sensíveis ao fenômeno.

A formulação completa e detalhada do índice encontra-se registrada nas referências [P&D D-224, 2010]. Neste capítulo, é apresentada, de forma sucinta, apenas a formulação básica que subsidia as discussões desta dissertação.

3.2 I_{PLAN} – Índice de Desempenho de Pontos de Linha

O índice I_{PLAN} é calculado para diversos pontos ao longo das LT ou LD do sistema elétrico, denominados *pontos de interesse*. Com relação a uma barra de referência, ele é obtido de acordo com a equação (3.1), retirada de [P&D D-224, 2010].

$$I_{PLAN} = \exp(-v_r) \cdot I_s \cdot F \cdot t \quad (3.1)$$

Nesta expressão, tem-se:

- v_r : tensão residual em p.u. na barra de referência
- I_s : densidade de descargas atmosféricas individuais consideradas no ponto de interesse
- F : taxa de desligamentos da linha (por nível de tensão) que contém o ponto de interesse

- t : fator tempo de duração determinado pelos tempos típicos de atuação da proteção

A Figura 3.1, retirada de [P&D D-224, 2010] ilustra a idéia central do I_{PLAN} . Ao longo de cada LT ou LD são identificados onze pontos de interesse (subestações, final e inicial, e nove pontos entre elas). Em cada um deles é simulado um curto-circuito, sendo calculada a tensão residual na barra de referência.

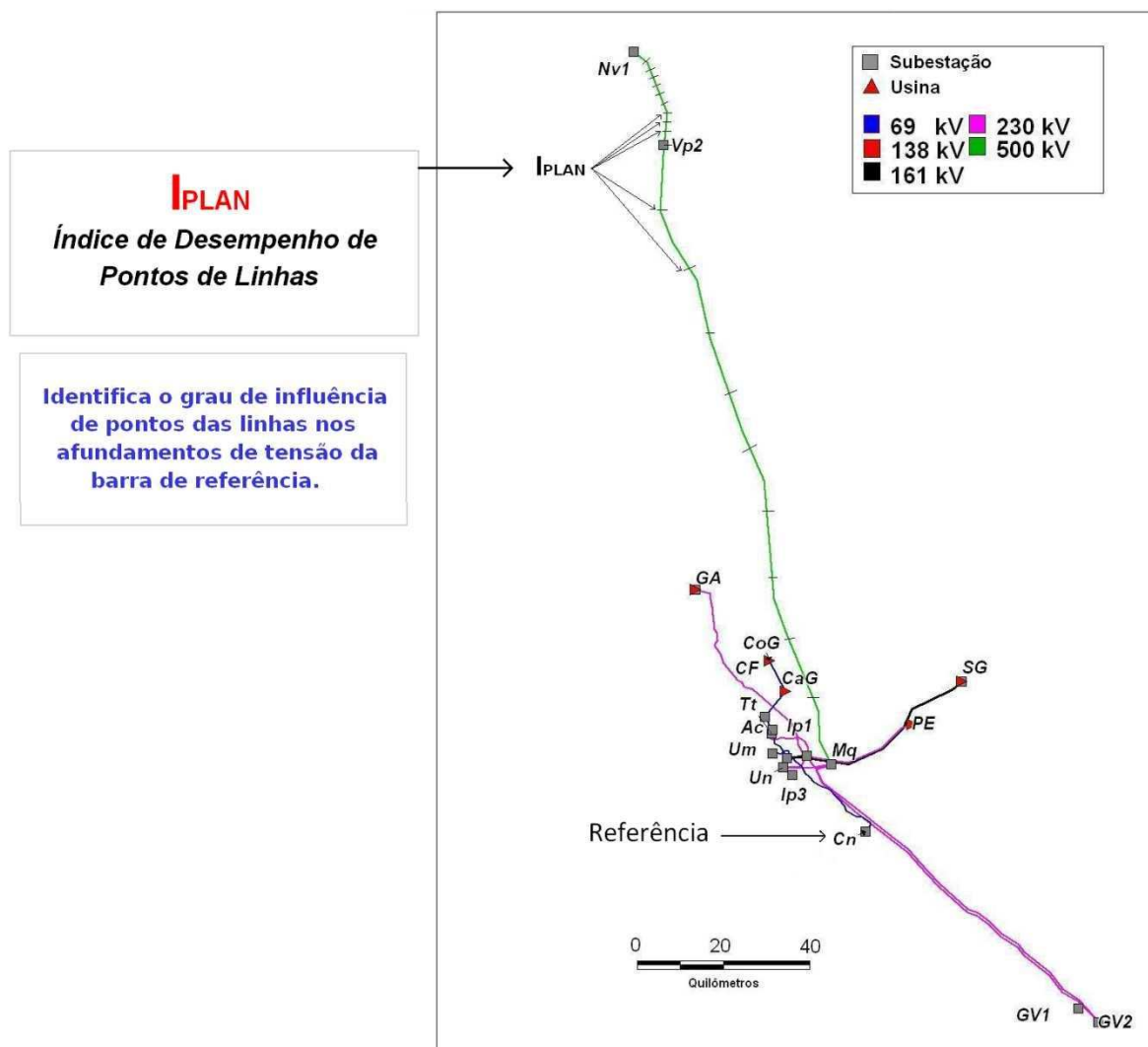


Figura 3.1 – Visualização dos pontos de cálculo do índice I_{PLAN}

O índice calculado de acordo com a equação 3.1 procura identificar o grau de influência de pontos ao longo do sistema, nos afundamentos de tensão na barra de referência.

Valores mais elevados de I_{PLAN} indicam pontos do sistema que se apresentam mais críticos com relação aos afundamentos de tensão. A informação trazida pelos índices é utilizada de forma comparativa e não de forma absoluta.

3.2.1 Parâmetro intensidade do afundamento

- **Cálculo do fator usado no I_{PLAN}**

O valor de v_r é considerado o menor valor eficaz (RMS) da tensão remanescente dentre as três fases, seja para eventos monofásicos ou eventos trifásicos. No PlanSag, é utilizado o *software* Aspen para o cálculo de curtos-circuitos em pontos ao longo da linha, a cada 10% da distância total da LT ou LD.

A decisão pela utilização da função $\exp(-v_r)$ decorreu da proposta apresentada por [Campici, 2009]. Nessa referência, foram analisadas diferentes funções, com o objetivo de melhor ponderar o parâmetro intensidade na identificação dos pontos críticos.

Um dos objetivos desta dissertação é rever a aplicação da função exponencial na composição do I_{PLAN} . Os resultados da análise são apresentados abaixo.

- **Análise de sensibilidade da função de intensidade**

As funções propostas em [Campici, 2009] estão indicadas na Figura 3.2.

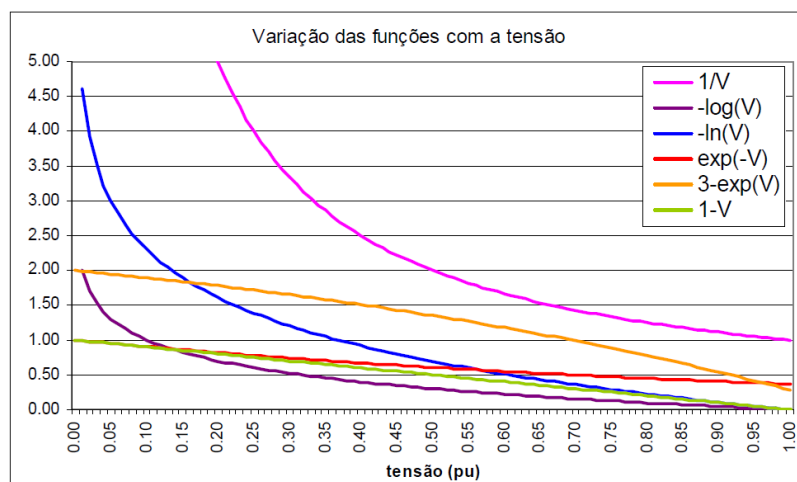


Figura 3.2 – Estudo do comportamento das funções

A comparação entre as funções foi toda refeita neste trabalho, porém agora utilizando o PlanSag. O programa foi alterado para permitir as simulações das várias propostas. Esta implementação possibilitou, inclusive, a investigação das funções em diferentes sistemas elétricos. O resultado dessa análise pode ser visto graficamente através da Figura 3.3.

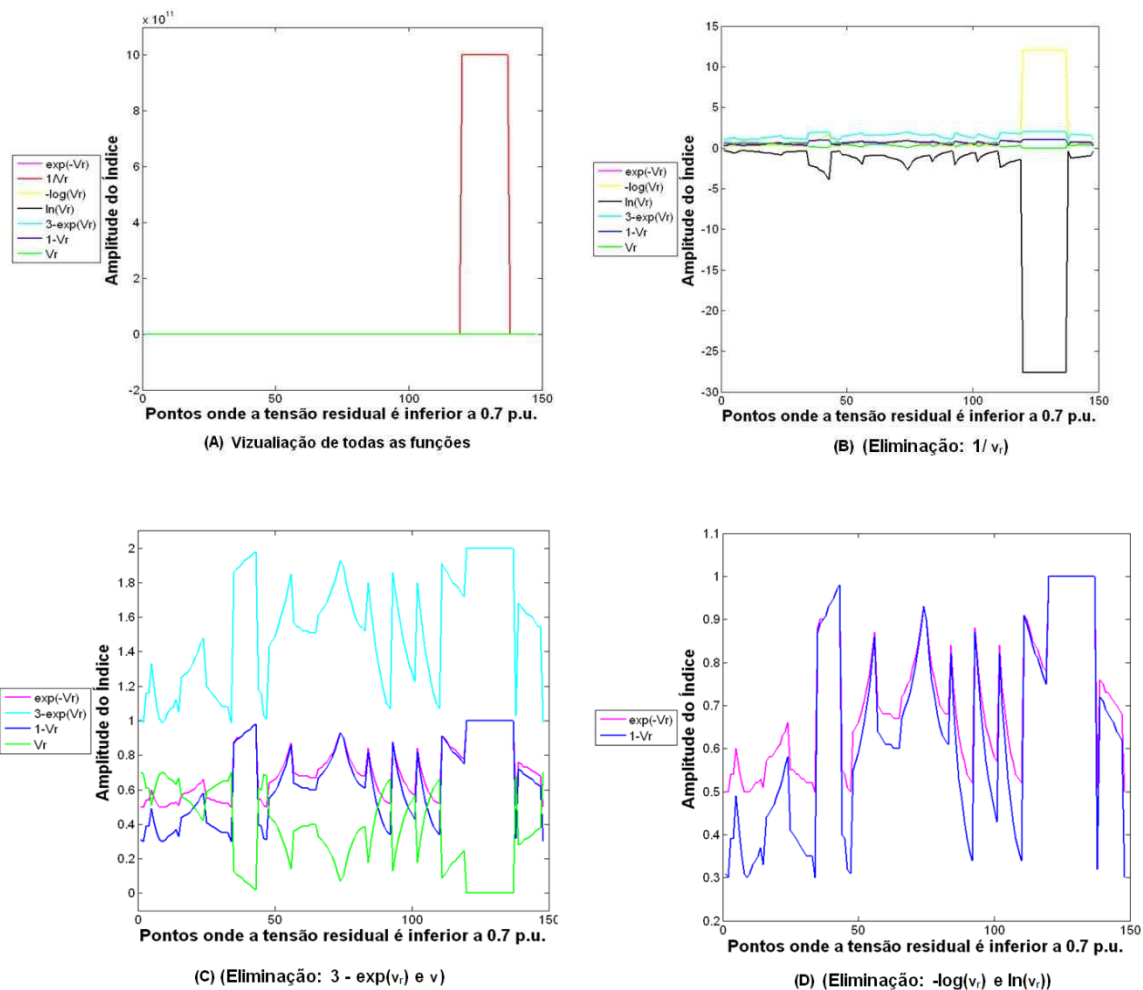


Figura 3.3 – Comparação de funções

Esses gráficos mostram a amplitude da tensão residual do afundamento de tensão ponderada em cada caso por uma função distinta. A amplitude é mostrada para cada ponto simulado.

No eixo das ordenadas encontram-se os valores dos índices calculados e, no eixo das abscissas, é indicado o número de pontos. Essa ponderação é feita para cada ponto da rede onde o programa de cálculo de curto-circuito identificou valores de tensão residual inferiores a 0,7 p.u. Os gráficos evoluem eliminando algumas funções a fim de explicitar o comportamento de cada função usada.

No primeiro gráfico, Figura 3.3 (A), observa-se que a função $1/v_r$ assume valores extremamente elevados. Isto ocorre quando o valor de v_r tende a zero. Tal fato evidencia que esta não seria uma boa função para ponderar o valor de v_r . A Figura 3.3 (B) não contém a função $1/v_r$, entretanto as duas funções logarítmicas propostas apresentam comportamento similar ao da função inversa eliminada. Ambas possuem um pico quando a tensão v_r tende a zero.

Foram eliminadas na Figura 3.3 (C) as funções cujo comportamento apresenta anomalias graves quando a tensão v_r tende a zero. Através da observação dessa figura nota-se o comportamento de três outras funções $\exp(-v_r)$, $3 - \exp(-v_r)$ e $1 - v_r$. Observa-se que as três funções têm grande semelhança no seu comportamento. Entretanto, para que o índice tenha um valor entre zero e um, pode ser eliminada a segunda dessas funções. O mesmo gráfico, sem a presença desta, pode ser visto na Figura 3.3 (D).

Segundo [Campici, 2009], a função $\exp(-v_r)$ é mais adequada para ser usada no índice, pois é a que melhor pondera os valores mais baixos de tensão residual. O índice deve ser mais severo (elevado) quando a tensão residual for menor. Esse comportamento da função $\exp(-v_r)$ em relação a função linear $(1-v_r)$ fica claro ao se observar a Figura 3.2 e a Figura 3.3 (D). Na primeira, a observação dessa diferença se dá diretamente no valor das funções, enquanto na segunda essa diferença pode ser vista para um caso fictício de aplicação do índice.

A análise aqui elaborada leva à conclusão de que a pesquisa desenvolvida anteriormente [Campici, 2009] obteve bons resultados com a escolha da função $\exp(-v_r)$. Esta traduz bem a severidade do afundamento de tensão, baseado na intensidade de v_r , e, além disso, penaliza mais os casos onde o valor de v_r é menor.

3.2.2 Parâmetro frequência do afundamento

- **Cálculo dos fatores usados no I_{PLAN}**

Conforme já introduzido anteriormente, a principal causa de afundamentos de tensão são curtos-circuitos nas linhas. Em geral um curto-circuito franco em uma linha provoca seu desligamento. Sendo assim, pode-se dizer que a frequência de afundamentos está relacionada com o número de desligamentos das LT/LD. Adicionalmente, sabe-se que a principal origem dos curtos-circuitos são as descargas atmosféricas e, portanto, é natural relacionar a frequência de afundamento de tensão à densidade de descargas atmosféricas ao longo das linhas do sistema.

No I_{PLAN} (equação 3.1) tais correlações são caracterizadas por meio dos fatores: F e I_S .

Cálculo do fator F

O fator F associa a frequência de afundamentos de tensão ao chamado NDR (Número de desligamentos por 100 km de linha por ano para cada classe de tensão). Sendo assim, está relacionado com aspectos construtivos das linhas e pode considerar especificidades, tais como: material utilizado nas torres, número de cabos pára-raios, dentre outras.

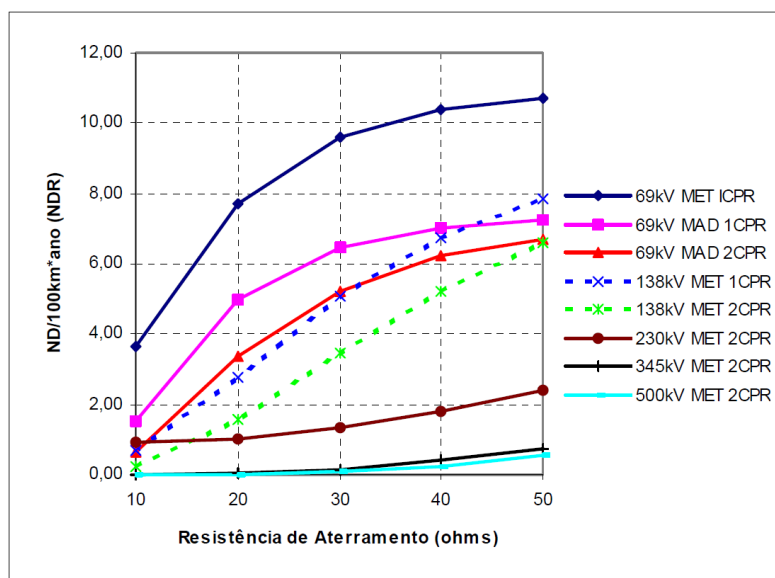
Em geral, os dados de desligamentos de linhas são históricos, decorrentes da detecção do evento em linhas reais, e os valores são obtidos pelas concessionárias de energia.

A Tabela 3.1, retirada de [CEMIG, 1995], contém os valores médios históricos de desligamentos de linhas (NDR).

Tabela 3.1 – NDR médio por classe de tensão

Tensão (kV)	NDR (1989 a 1993) (taxa de desligamentos/100 km/ano)
34,5	31,4
69	10,9
138	8,1
230	3,2
345	1,6
500	0,7

A Figura 3.4 extraída de [CEMIG, 1995] mostra curvas que contêm os valores de NDR em função da resistência de aterramento das linhas para diferentes níveis de tensão e para estruturas metálicas e de madeira. Essa figura exemplifica a relação desse fator com características físicas da linha.

Figura 3.4 – Estimativa do desempenho para $Ng^5 = 1$

Com relação ao fator F , este já se encontra bem definido, apresentando resultados consistentes. Sendo assim, nesta dissertação, não são feitas investigações adicionais relacionadas ao mesmo.

Cálculo do fator I_s

O fator de densidade de descargas individuais I_s (strokes/km²/ano) advém da necessidade de se considerar a influência de descargas atmosféricas na ocorrência de afundamentos de tensão. Tal fator foi proposto pela equipe do LRC/UFGM [Vale, 2006] e é calculado com base nos dados do Sistema de Detecção e Localização de Descargas,

⁵ Índice de densidade de descargas plenas (flashes) para a terra. [Dias, 2006]

Lightning Location System (LLS) – na CEMIG denominado SLT (Sistema de Localização de Tempestades). A Figura 3.5 ilustra uma tela deste sistema.

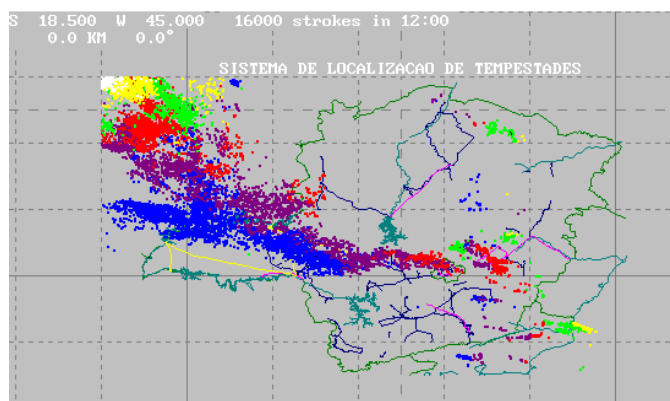


Figura 3.5 – Tela do SLT

Os bancos de dados criados a partir do LLS para descargas atmosféricas são a base para definição do fator I_s . A Figura 3.6 mostra, à esquerda [Dias, 2006], um mapa de densidade de descargas individuais (*strokes*) e, à direita, o estado de Minas Gerais sob um *gride* de identificação de regiões [P&D D-224, 2010]. A ferramenta PlanSag utiliza esse recurso de identificação de regiões para determinar a densidade de descargas atmosféricas com uma precisão de até dois quilômetros quadrados. O banco de dados utilizado pela ferramenta PlanSag é denominado B3D.

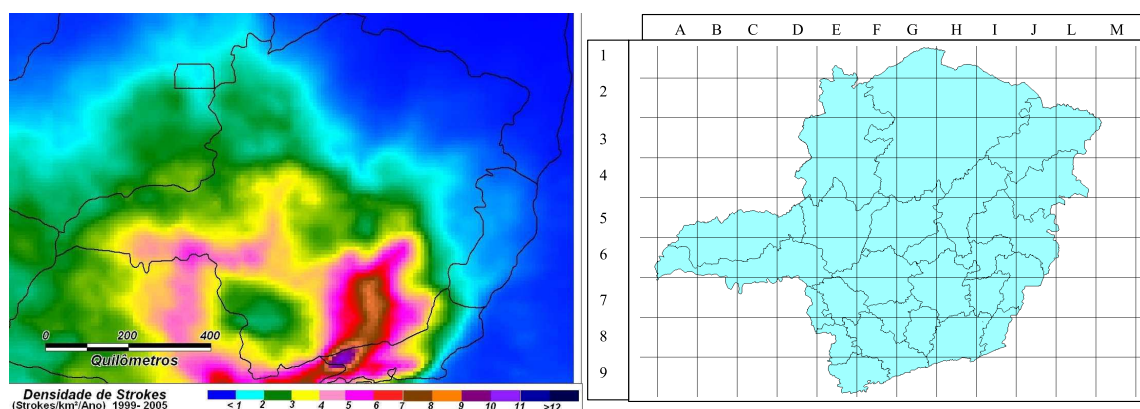


Figura 3.6 – Exemplo de mapa de densidade de descargas individuais (*strokes*)

O B3D relaciona as linhas do sistema elétrico com as densidades de descargas atmosféricas individuais (*strokes*/km²/ano). A utilização deste banco envolve duas situações bem caracterizadas:

- B3D_Sistema Existente: Contém dados de densidades para as linhas já existentes do sistema elétrico.
- B3D_Sistema Planejado: Contém dados de densidades de descargas das linhas futuras em construção ou com recursos aprovados e estudos de rotas preliminares concluídos.

Os dados de descargas contidos no B3D consideram um período de dez anos e referem-se à região compreendida pelos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro, Espírito Santo e parte de São Paulo, no Brasil. É feito o cálculo da densidade de descargas associada a cada ponto situado em cada parcela de 10% da linha.

Os desenvolvimentos desta dissertação relacionados ao fator I_s se referem à composição do banco de dados B3D.

Tal composição constituiu uma das primeiras investigações do mestrado, sendo muito importante para os passos seguintes, pois permitiu ganho de conhecimentos e experiência nos temas relativos ao fenômeno dos afundamentos de tensão: configuração de redes elétricas, redes de detecção de descargas atmosféricas, uso do programa Aspen, etc.

Além dos conhecimentos de forma isolada, foi necessário todo um trabalho de correlação entre os mesmos.

Foram desenvolvidos programas específicos para a composição do banco, em especial destaca-se o programa descrito a seguir.

- **Desenvolvimento do software de criação do B3D**

A Figura 3.7 apresenta o formato dos arquivos, que compõem o B3D. As informações estão relacionadas aos pontos de interesse e às linhas nas quais estes se inserem.

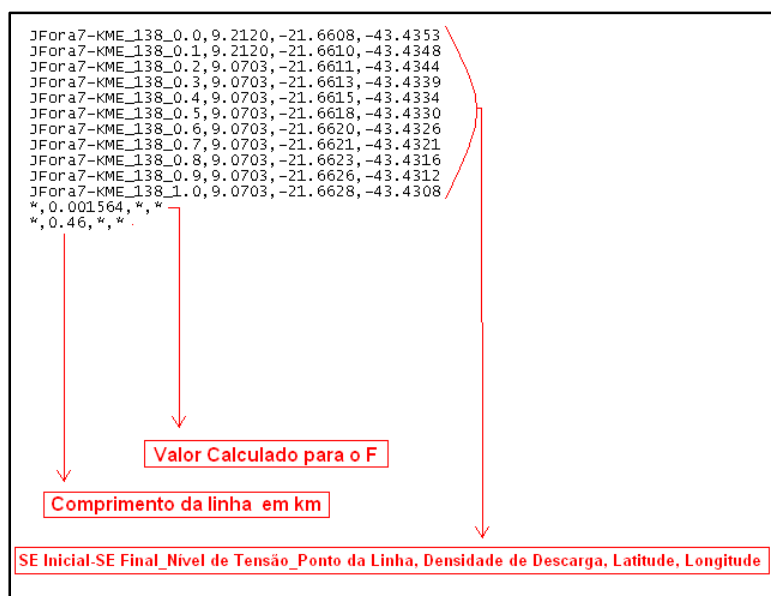


Figura 3.7 – Formato dos arquivos B3D

O programa desenvolvido no mestrado partiu da especificação do PlanSag, onde foram definidas as características do B3D. Essas definições deram origem à identificação das Necessidades de Projeto e, conseqüentemente, da Motivação para a produção do programa. Com base nestas, foi feito o Desenvolvimento do software, conforme indicado a seguir.

Necessidade de Projeto / Motivação

1. A especificação de projeto da ferramenta PlanSag pede um banco de dados capaz de fornecer a densidade de descargas atmosféricas individuais (*strokes*/km²/ano) para qualquer par latitude-longitude de interesse, na região sudeste do Brasil. Para tanto, essa região encontra-se dividida por um *gride*, cada célula do *gride* representa 2 quilômetros quadrados. A cada célula está vinculado um valor de densidade de descargas atmosféricas.
2. As linhas devem ser divididas em 10 partes iguais. As coordenadas geográficas dos 9 pontos de divisão e das duas subestações limítrofes à linha, devem ser consideradas como pontos de interesse e, portanto devem ter sua respectiva densidade de descargas atmosféricas determinada.
3. Existe a necessidade de identificação das coordenadas dos pontos de interesse a partir das coordenadas das torres de qualquer linha na região geográfica estipulada seja fisicamente ou em tempo de planejamento. Não há limite superior para o número de torres com coordenadas geográficas conhecidas, podem ser fornecidas somente as coordenadas das subestações limítrofes ou podem ser acrescidas a estas as coordenadas de centenas de torres pertencentes a uma mesma linha.
4. O valor do fator F deve ser calculado, uma vez que este faz parte do B3D.
5. Os arquivos B3D devem ter o formato mostrado na Figura 3.7.

Desenvolvimento do *software*

Diante das necessidades de projeto da ferramenta PlanSag e do número de dados envolvidos, optou-se pela produção de um *software* que fosse capaz de manipular dados de diversas fontes a fim de gerar os arquivos B3D. Essa união pode ser vista na Figura 3.8. Os dados são fruto do LLS, das coordenadas das torres e dos dados de desligamento de linhas, no caso da frequência de desligamentos.

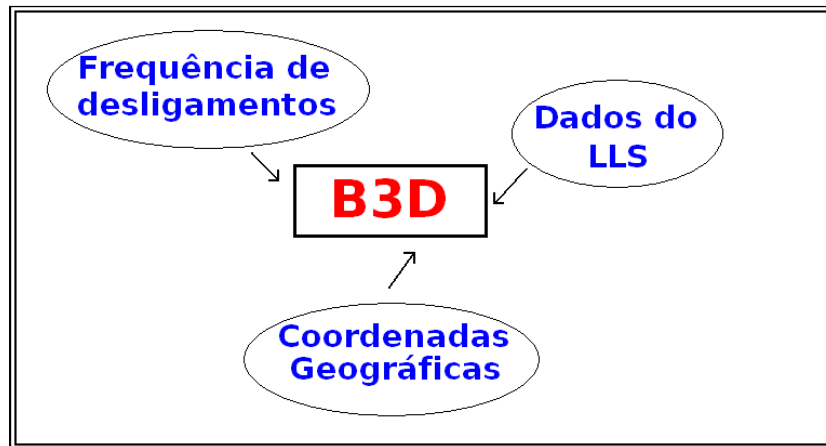


Figura 3.8 – Composição do B3D

Esse *software* foi desenvolvido em [Matlab®, 2004] e conta com várias funções que desempenham papéis específicos para obtenção do B3D. A solução de cada uma das necessidades de projeto introduzidas anteriormente é explicada de forma sucinta nos itens que se seguem.

1. Inicialmente os dados de densidade de descargas atmosféricas se relacionavam somente com as coordenadas geográficas específicas de cada ponto, latitude e longitude. O desenvolvimento do *software* iniciou com uma abstração relacionada ao *gride* que foi colocado sobre a região sudeste. O programa cria uma nova tabela somente com os dados de densidade de descargas atmosféricas onde a correlação destes com as coordenadas geográficas é feita em relação à posição na tabela; essa tabela contém exatamente o mesmo número de linhas e colunas que o *gride*. Da mesma forma são geradas tabelas para as coordenadas latitude e longitude, o que facilitou o algoritmo de busca de densidades de descargas.
2. Uma vez desenvolvida a parte anterior, onde o *software* retorna para cada par de coordenadas geográficas um valor de densidade de descargas atmosféricas relativo a uma das células do *grid*, o código foi preparado para que possa ser executado quantas vezes forem necessárias, já que a ferramenta PlanSag o utiliza para vários pontos de interesse. Cada linha possui 11 pontos de interesse a serem determinados.
3. O problema de se determinarem quais são os pontos críticos de LDs e LTs está relacionado, não somente com a divisão destas em partes iguais, mas na determinação das coordenadas geográficas dos pontos onde elas são divididas. Os pontos conhecidos são apenas as coordenadas das torres da linha, e estes aparecem como pontos “soltos” sobre a região geográfica. É preciso calcular a distância entre cada um desses pontos e somá-la a fim de determinar o comprimento total da linha. Em seguida, voltar a percorrer a linha até que se encontre o ponto onde foi percorrido 10% do comprimento anteriormente calculado. Este é o segundo ponto de interesse, já que o primeiro é o ponto inicial relativo à subestação de origem da linha. O mesmo

procedimento é feito para os demais pontos até que se obtenham os 11 pontos de interesse.

A fim de calcular a distância entre dois pontos, foi utilizado o Teorema de Pitágoras, que é repetido tantas vezes quanto necessário até que todos os pontos fornecidos tenham sido considerados. É importante notar que a precisão dos pontos de interesse é maior quanto maior for o número de coordenadas de torres conhecidas.

4. O valor do fator F é determinado para a ferramenta PlanSag através da Equação 3.2 que utiliza valores de NDR (Número de desligamentos por 100 km de linha por ano para cada classe de tensão).

$$F = \frac{(\text{Valor de NDR relativo à linha}) * \text{Comprimento total da linha} / 10}{100} \quad (3.2)$$

O comprimento da linha é dividido por 10 para que F seja determinado por trecho e o resultado do produto é dividido por 100 uma vez que os dados de NDR são referentes a 100 km de linha.

5. A saída do programa foi preparada de tal forma a gerar um arquivo .txt para cada uma das linhas a ele submetidas de acordo com o formato da Figura 3.7. A ferramenta PlanSag é dotada da capacidade de ler e interpretar esses arquivos podendo usar o código desenvolvido para recriar ou incluir arquivos no B3D.

3.2.3 Parâmetro duração do afundamento

O parâmetro tempo de duração, no I_{PLAN} é considerado a partir dos tempos típicos de proteção de acordo com as filosofias de proteção utilizadas para cada nível de tensão do ponto do curto-circuito. É utilizado um *fator tempo* t , conforme indicado na Tabela 3.2. Tal fator é resultado da normalização dos tempos com relação ao maior deles.

Tabela 3.2 – Tempo de atuação por classe de tensão

Nível de tensão	Tempo de atuação [ms]	<i>Fator tempo t</i>
$V \geq 230 \text{ kV}$	150	<i>0,3</i>
$13,8 < V < 230 \text{ kV}$	300	<i>0,6</i>
$V \leq 13,8 \text{ kV}$	500	<i>1</i>

Um dos objetivos desta dissertação é investigar o parâmetro duração de forma mais detalhada e propor nova composição para o fator tempo. A duração é abordada com maior detalhe no capítulo 4 onde é definido o fator tempo τ .

3.3 Considerações finais

A análise apresentada neste capítulo mostra o nível de desenvolvimento da pesquisa que vem sendo realizada com respeito a índices de desempenho de pontos de linha na identificação de pontos críticos do sistema no que concernem os afundamentos de tensão.

O I_{PLAN} foi projetado para utilização nos Estudos de Planejamento da Expansão Elétrica, integrando as etapas do processo de decisão abordado no capítulo 2. Os resultados de sua aplicação prática em sistemas reais estão registrados em [Rel. 4-3, 2010].

Neste capítulo, procurou-se identificar as investigações realizadas nesta dissertação que contribuíram para a evolução da ferramenta PlanSag. Com relação à análise de sensibilidade sobre o parâmetro intensidade, constatou-se que a proposta feita em [Campici, 2009] é válida em sua aplicação.

Com relação ao parâmetro frequência de duração, a maior contribuição se deu com respeito à construção do banco B3D. O desenvolvimento do *software* foi importante em três aspectos principais: (i) o aprendizado de temas que fundamentam esta pesquisa; (ii) a união de várias vertentes de dados e o estudo dos mesmos; (iii) desenvolvimento de trabalho em equipe em projeto de pesquisa.

Em última análise, aparece o parâmetro duração de afundamento. Tendo em vista que o fator tempo considerado nas pesquisas anteriores é resultado da normalização dos tempos de proteção, concluiu-se que seria oportuno investigá-lo de uma forma mais aprofundada. Sendo assim, o capítulo 4 é totalmente dedicado ao estudo deste parâmetro.

4

Duração do Afundamento de Tensão – Proposta do *Fator* τ

*Neste capítulo é feita uma análise minuciosa da influência do parâmetro duração nos estudos de afundamento de tensão. São investigadas propostas de funções que permitam sua inclusão de maneira mais satisfatória em índices de desempenho. A melhor proposta define o **fator** τ .*

4.1 Considerações iniciais

A duração do evento afundamento de tensão está diretamente relacionada à severidade do mesmo. Dessa forma, a inclusão desse parâmetro na expressão dos índices de desempenho é importante. Conforme visto no capítulo 3, no PlanSag foi adotado o fator tempo t . Comparando o grau de estudos dedicado a cada parâmetro, verificou-se a necessidade de se investigarem novas composições nas quais o efeito dos tempos no índice agregasse a este uma ponderação balanceada sem se sobrepor aos demais parâmetros, definindo assim pontos críticos do sistema de uma maneira mais adequada.

À semelhança do que foi realizado em [Campici, 2009], com relação ao parâmetro intensidade dos afundamentos de tensão, a investigação realizada nesta dissertação partiu da definição de funções candidatas que pudessem ponderar os tempos de atuação da proteção visando criar um fator de duração. Várias funções ganho foram investigadas e, neste capítulo, são apresentadas as análises relacionadas a cinco delas: (i) Ganho Unitário; (ii) Ganho Exponencial; (iii) Ganho Aritmético; (iv) Ganho Geométrico; (v) Ganho Harmônico.

Todas as funções são baseadas nos tempos de atuação da proteção, os quais são característicos para cada classe de tensão. Esses tempos estão registrados na Tabela 2.2.

Para o estudo comparativo entre as funções propostas, foram definidos “Critérios de Qualidade”, com base na expectativa de sua aplicação em redes elétricas reais.

Os estudos envolveram dezenas de simulações e, após a análise de seus resultados, foi proposto um fator para representar o parâmetro tempo de duração do afundamento nos índices de desempenho. Este fator é denominado **fator** τ .

4.2 Critério de qualidade para avaliação das Funções Ganho

Para que um índice tenha aplicabilidade é necessário que exista uma forma de avaliá-lo quanto a sua qualidade. A definição de um critério a ser adotado pode ser feita a partir de diferentes premissas e, dentre elas, há as que baseiam em requisitos de interesse esperados.

No caso do estudo das funções ganho, os critérios são definidos com base em situações onde o comportamento do índice de desempenho deve apresentar uma resposta esperada ou, pelo menos, o mais próximo possível da mesma.

Nesta direção, considerando os parâmetros intensidade e duração, o Critério de Qualidade para avaliação das Funções Ganho é definido considerando as três premissas abaixo:

- Quando a barra de referência estiver sob curto-circuito franco, o índice calculado nesse ponto deve ser elevado.

Essa afirmativa fundamenta-se no fato de que o curto-circuito leva a tensão na barra para zero. A consideração do parâmetro tempo não poderá sobrepor a influência do parâmetro intensidade.

- É esperado que, de maneira geral, as linhas de menor nível de tensão apresentem maiores valores de índice.

Esta premissa se justifica pelo fato do tempo de atuação da proteção diminuir com a elevação da classe de tensão.

A exceção ocorrerá quando as linhas de classe de tensão mais baixa estiverem distantes eletricamente da barra escolhida como referência. Isso ocorre devido aos baixos valores de v_r que serão observados para essas barras.

- O tipo de barra também deve ser considerado. Não é esperado que os índices calculados para barras do tipo PV⁶ tenham valores elevados, uma vez que nestas a tensão é controlada.

O atendimento ao critério de qualidade apontou para o uso das funções do tipo ganho. Estas são responsáveis por atribuir ganhos diferenciados a uma variável, que podem ser definidos por faixas ou tipos de variáveis.

O conjunto dos tempos de proteção pode ser visto como um conjunto de variáveis do mesmo tipo, sugerindo a definição da **Função Ganho** por meio de faixas de tempo.

Nos itens que seguem, as funções propostas são definidas, analisadas detalhadamente e testadas quanto a sua aplicação em índices de desempenho.

⁶ Barras do Tipo PV: Definição utilizada pelos programas de Fluxo de Potência para designar barras onde a tensão é controlada. São do tipo PV as barras de geração (geradores com Reguladores Automáticos de Tensão) e as que possuem Compensadores Síncronos e Estáticos.

4.3 Análise de sensibilidade das Funções Ganho

4.3.1 Funções Ganho propostas

Este item apresenta os resultados da investigação sobre o comportamento de diferentes funções ganho no que diz respeito à ponderação dos tempos de atuação das proteções dos diferentes níveis de tensão das linhas. Seu objetivo é escolher a função que melhor atende às necessidades do fator τ . Esse fator é o responsável pela inclusão satisfatória do parâmetro duração de afundamento no cálculo do índice de severidade.

A escolha das candidatas a função ganho partiu do estudo de funções decrescentes com o tempo de proteção, ou seja, que apresentassem maiores valores para tempos menores. As expressões utilizadas por [Campici, 2009] também serviram de referência básica, para a seleção de funções.

Nas Equações 4.1 a 4.5 são apresentadas as funções ganho analisadas.

$$Y = 1 * X \quad \text{Função Ganho Unitário} \quad (4.1)$$

$$Y = \exp(X) \quad \text{Função Ganho Exponencial} \quad (4.2)$$

$$Y = A * \exp[A * \ln(X)] \quad \text{Função Ganho Aritmético} \quad (4.3)$$

$$Y = G * \exp[G * \ln(X)] \quad \text{Função Ganho Geométrico} \quad (4.4)$$

$$Y = H * \exp[H * \ln(X)] \quad \text{Função Ganho Harmônico} \quad (4.5)$$

Nestas expressões, tem-se:

- **Y**: função a ser analisada
- **X**: variável [0 a 1] usada para simular a variação do tempo de proteção
- **A**: média aritmética dos tempos de proteção mostrados na Tabela 2.2, ($A = 0,41625$)
- **G**: média geométrica dos tempos de proteção mostrados na Tabela 2.2, ($G = 0,23876$)
- **H**: média harmônica dos tempos de proteção mostrados na Tabela 2.2, ($H = 0,14092$)

4.3.2 Análise das Funções Ganho

Para que o comportamento das funções propostas possa ser melhor visualizado optou-se pela análise gráfica das mesmas. A Figura 4.1 contém as respectivas curvas de ganho dessas funções.

O valor das funções calculado em um ponto X é dividido pelo valor do próprio X a fim de que, no eixo das ordenadas, se observasse não o valor da função, mas o **ganho** que esta proporciona ao respectivo valor de X.

Sendo assim, o valor do ganho tende ao infinito quando o tempo de proteção tende para zero. Todavia, como o menor tempo de proteção utilizado foi o de 0,065 s, para a classe de tensão 500 kV, a região das curvas de ganho que apresenta picos elevados pode ser desconsiderada, já que os pontos analisados se situam fora da faixa de tempo de proteção.

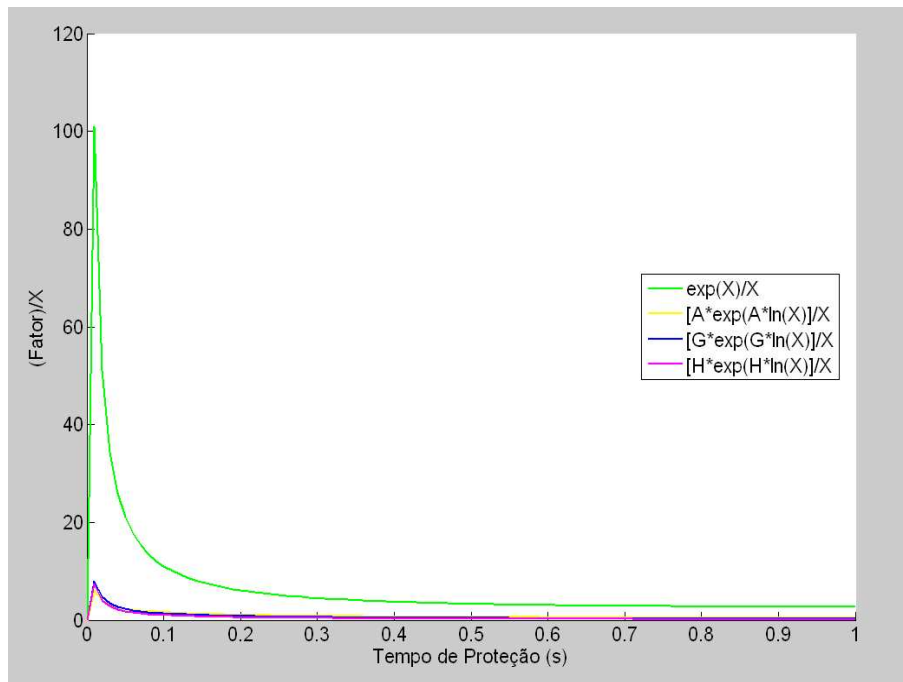


Figura 4.1 – Gráfico das funções ganho propostas

A Figura 4.2 é uma parte da Figura 4.1 ampliada. Observa-se que as curvas de ganho privilegiam consideravelmente os tempos de proteção menores, como desejado.

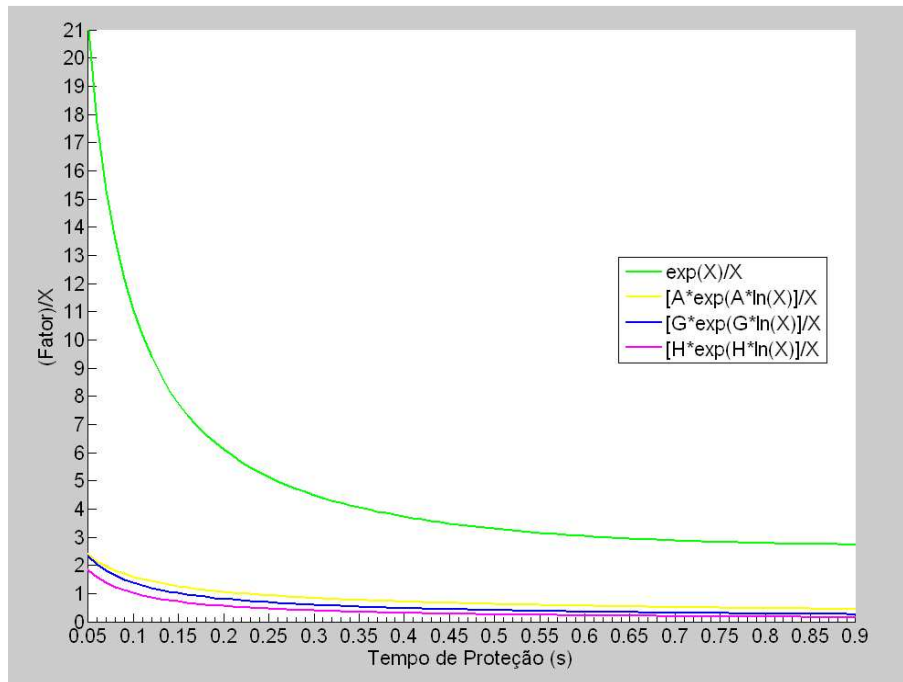


Figura 4.2 – Ampliação da figura 4.1

É fundamental notar que a dimensão do ganho não é relevante para a ponderação dos tempos de proteção. A importância está no ganho relativo introduzido aos tempos. O ganho relativo é o resultado da razão entre os ganhos fornecidos pela função para dois tempos de proteção distintos. Espera-se que a função com maior ganho relativo privilegie de maneira acentuada tempos menores de proteção e, por essa razão, o uso desta é adequado para avaliação da qualidade do fator.

A fim de comprovar que a análise do valor desse ganho é mais relevante que a análise do ganho de cada ponto de maneira isolada, é feita uma divisão entre dois pontos de cada uma das funções. A divisão é realizada para tempos de proteção 0,1 e 0,5 s. A escolha desses valores deve-se ao fato destes serem os tempos de proteção das linhas de 345 kV e 138 kV respectivamente. Como forma de visualizar os pontos escolhidos para as quatro funções e as suas respectivas razões (divisões), foi produzida a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Valores das funções e suas respectivas razões

Funções	X	Y	Razão (Y(0,1) / Y(0,5))
$Y = \exp(X)$	0,1	11,05	3,35153
	0,5	3,297	
$Y = A * \exp[A * \ln(X)]$	0,1	1,596	2,55810
	0,5	0,6239	
$Y = G * \exp[G * \ln(X)]$	0,1	1,378	3,40499
	0,5	0,4047	
$Y = H * \exp[H * \ln(X)]$	0,1	1,019	3,98669
	0,5	0,2556	

Observa-se que a função ganho harmônico introduz o maior ganho relativo aos tempos de proteção e que o menor ganho relativo introduzido é referente à função ganho aritmético.

Apesar de a função exponencial possuir um ganho relativo superior ao da função ganho aritmético, esta decai de forma mais suave para tempos de proteção maiores, como pode ser visto na Figura 4.2. Dessa forma ela aplica ganhos muito elevados para tempos de proteção maiores.

Na Figura 4.3 é feita uma comparação entre as funções ganho propostas.

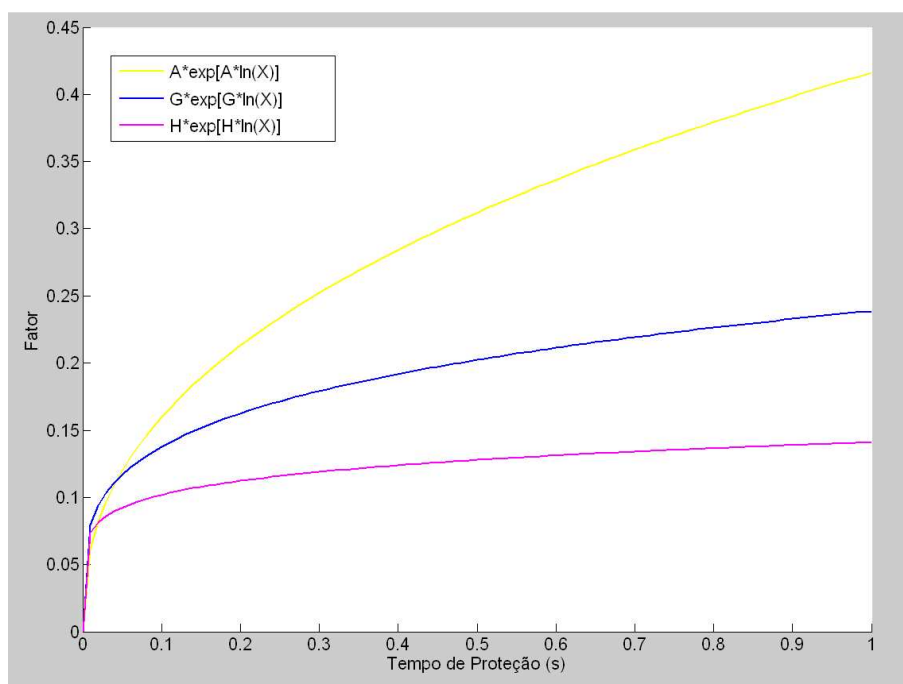


Figura 4.3 – Fator x Tempo de Proteção

A taxa de variação da função ganho aritmético é maior que a inclinação da função ganho harmônico. Entretanto, para valores pequenos de tempo de proteção, ambas têm comportamento semelhante, apresentando um crescimento íngreme. Essas características fazem com que o ganho relativo, que essas funções proporcionam aos diferentes tempos de proteção, seja diferente.

Devido ao ganho relativo da função ganho harmônico ter sido superior aos das demais e apresentar uma característica mais suave para tempos de proteção maiores, esta foi selecionada para um estudo mais detalhado, conforme mostrado no próximo subitem.

4.3.3 Análise de sensibilidade da função ganho harmônica

A análise de sensibilidade da função ganho harmônico consiste no estudo de novas funções geradas por pequenas variações estabelecidas no valor de H. Tais variações são feitas a partir da soma ou subtração de um pequeno valor de passo.

Na Figura 4.4 é utilizado um passo igual a 0,1 e são visíveis três curvas: (i) curva original para a média harmônica (H) dos tempos de proteção; (ii) curva para a qual se utiliza o valor original de H acrescido do valor de passo; (iii) curva para a qual se utiliza o valor original de H subtraído do valor de passo. Nessa figura foi adotada a mesma ampliação aplicada na Figura 4.2.

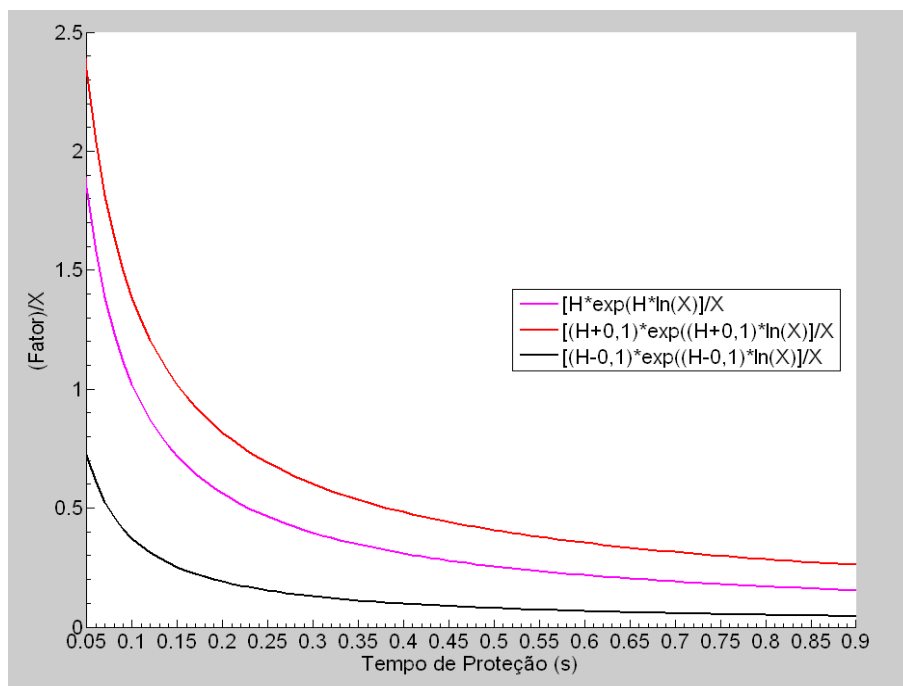


Figura 4.4 – Curvas de sensibilidade

A fim de comparar o ganho relativo que cada uma dessas curvas propicia aos tempos de proteção, é preparada a Tabela 4.2. Nesta encontram-se os valores das funções de sensibilidade para os tempos de proteção de 0,1 e 0,5 s e a razão entre esses valores para cada uma das funções.

Tabela 4.2 – Valores das funções de sensibilidade e suas respectivas razões

Funções	X	Y	Razão (Y(0,1) / Y(0,5))
$Y = H * \exp[H * \ln(X)]$	0,1	1,019	3,98669
	0,5	0,2556	
$Y = (H + 0,1) * \exp[(H + 0,1) * \ln(X)]$	0,1	1,383	3,39220
	0,5	0,4077	
$Y = (H - 0,1) * \exp[(H - 0,1) * \ln(X)]$	0,1	0,3724	4,68133
	0,5	0,07955	

Observa-se que o menor ganho relativo foi obtido para a função que recebe acréscimo em H. Esta apresenta resultados piores que os da função ganho harmônico original. Já para a função onde H foi reduzido, observa-se que esta apresenta maior ganho relativo que a função ganho harmônico original.

4.3.4 Conclusões obtidas com a análise de sensibilidade das funções

A análise detalhada neste item indica que a função ganho harmônico possui maior ganho relativo e apresenta características de variação mais suave para tempos de proteção mais elevados.

Tais características, quando da aplicação desta função sobre os tempos de atuação da proteção das linhas, permitem que pontos de linhas de tensão superiores com baixos valores de tensão residual possam ser identificados como pontos críticos e que os pontos das linhas de tensão mais baixas não sejam sempre considerados os mais críticos do ponto de vista do tempo de atuação.

Contudo, para validar esta primeira constatação, é importante proceder a uma etapa de testes de aplicação em um sistema elétrico, para se verificar o comportamento de todas as funções sob análise. Tais testes estão registrados no próximo item.

4.4 Testes das Funções Ganho

Os testes avaliam o comportamento das funções ganho com respeito ao atendimento das premissas que compõem o critério de qualidade. São utilizados, principalmente, dois tipos de informações: (i) o circuito-elétrico, onde são identificados a barra de referência e os pontos de cálculo dos curtos-circuitos; (ii) valores dos índices de desempenho calculados considerando as diferentes funções ganho.

O **índice de desempenho I** , para cada ponto de interesse, é selecionado para realizar as análises comparativas é expresso pela Equação 4.5.

O termo v_r representa a tensão residual do afundamento de tensão registrado na barra de referência, resultante do curto-circuito aplicado nos diversos pontos ao longo das linhas. O termo $f(D)$ representa as diversas funções ganho. Os valores de D correspondem aos tempos de duração da proteção para cada classe de tensão dos pontos de interesse (Tabela 2.2).

$$I = \exp(-v_r) * f(D) \quad (4.5)$$

As simulações consideraram 5 barras de referência, sendo o valor v_r calculado pelo *software* Aspen na versão curto-circuito deslizante.

Os testes foram realizados no SEP fictício ilustrado na Figura 4.5. O código de cores utilizado tem a função de discriminar qual é o nível de tensão das linhas: verde é usado para linhas de 500 kV; rosa para linhas de 345 kV; vermelho para linhas de 138 kV; preto para linhas de 69 kV. Este sistema elétrico é constituído, basicamente, de seis linhas de 69 kV, seis linhas de 138 kV, três linhas de 345 kV, quatro linhas de 500 kV, doze transformadores abaixadores ou elevadores de tensão e sete barras do tipo geração.

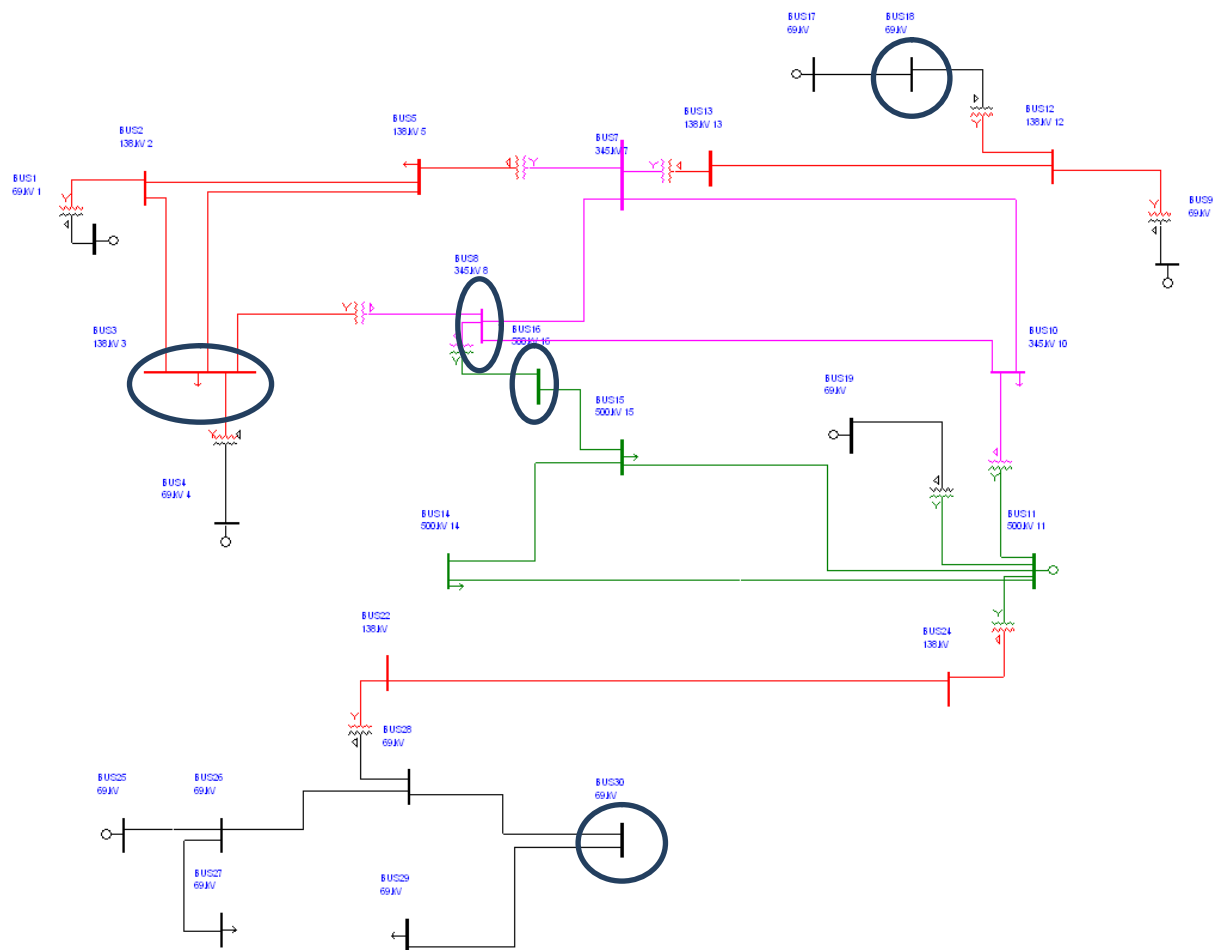


Figura 4.5 – SEP fictício

Esse sistema é simulado usando a ferramenta PlanSag. Para as simulações, na busca de tornar o estudo mais abrangente, são escolhidas as barras 3, 8, 16, 18 e 30 como barras de referência. Essa escolha é feita para diversificar o tipo de barras, a classe de tensão e a localização das mesmas. É importante ressaltar que os critérios de qualidade citados no item 4.2 também são considerados para a escolha das barras de referência.

As normas pertinentes [IEEE, 1995] definem o fenômeno afundamento de tensão para valores de tensão residual entre 0,1 e 0,9 p.u. Contudo, foi considerada nas simulações a variação de 0 a 1 p.u., para uma visão matemática mais completa dos resultados das funções.

Os próximos itens detalham os resultados dos testes realizados para cada função. Para cada barra de referência, foram simulados curtos-circuitos em 188 pontos de interesse, determinando os valores de tensão residual. Para cada nível de tensão das linhas, são levantados os valores de índices calculados para os diversos pontos.

4.4.1 Função ganho unitário

Os gráficos da Figura 4.6 até a Figura 4.10 apresentam os resultados das simulações para as barras de referência, considerando o cálculo do índice relativo à função ganho unitário.

A expressão do índice da Equação 4.5 aplicada à função ganho unitário é reescrita por meio da Equação 4.6, onde o termo $f(D)$ vale o próprio D .

$$I = \exp(-v_r) * D \quad (4.6)$$

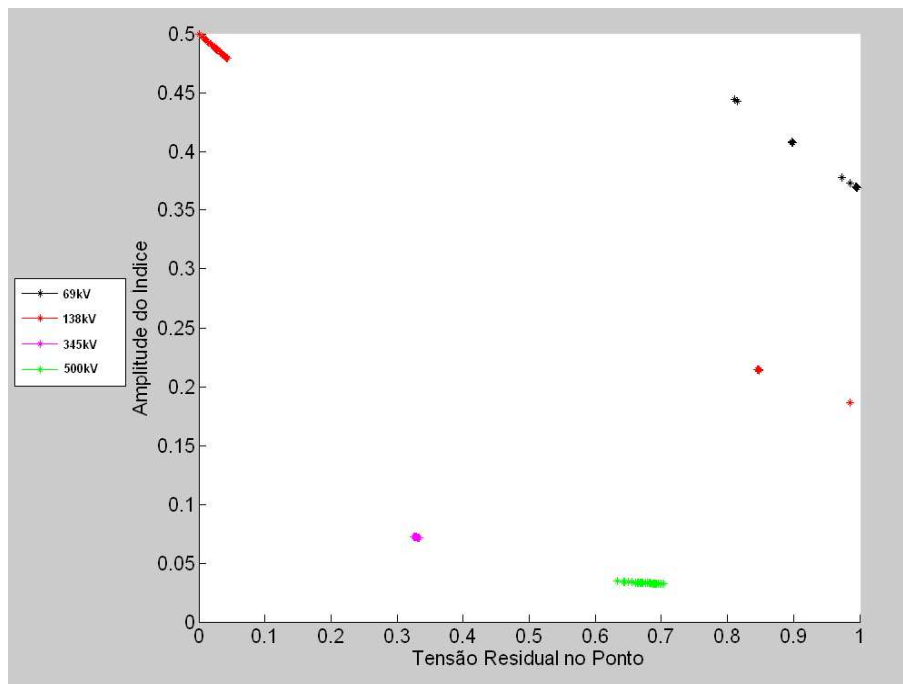


Figura 4.6 – Amplitude do índice x Tensão residual no ponto - Barra 3 - 138 kV

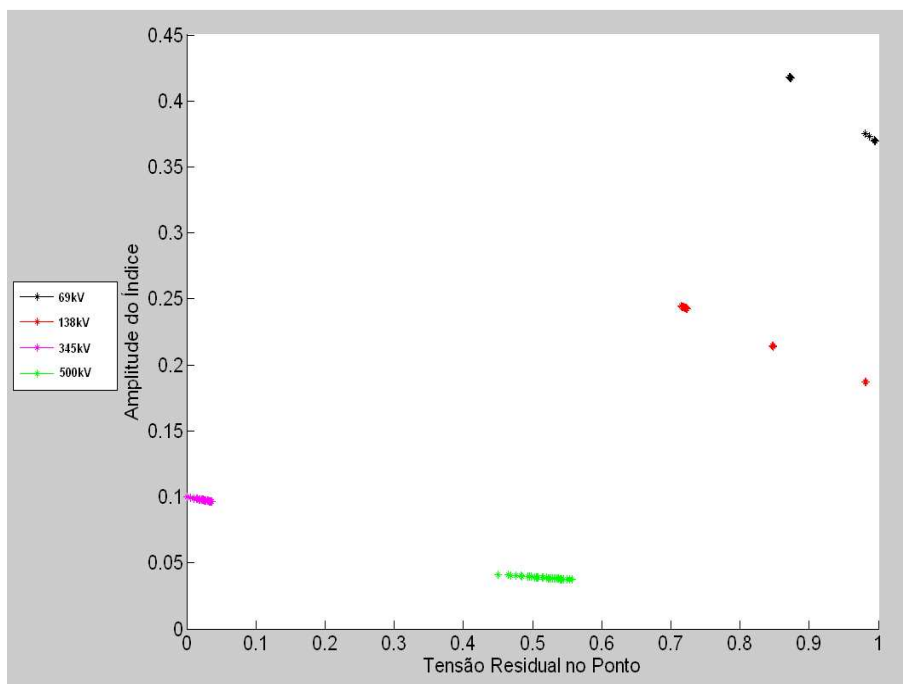


Figura 4.7 – Amplitude do índice x Tensão residual no ponto - Barra 8 - 345 kV

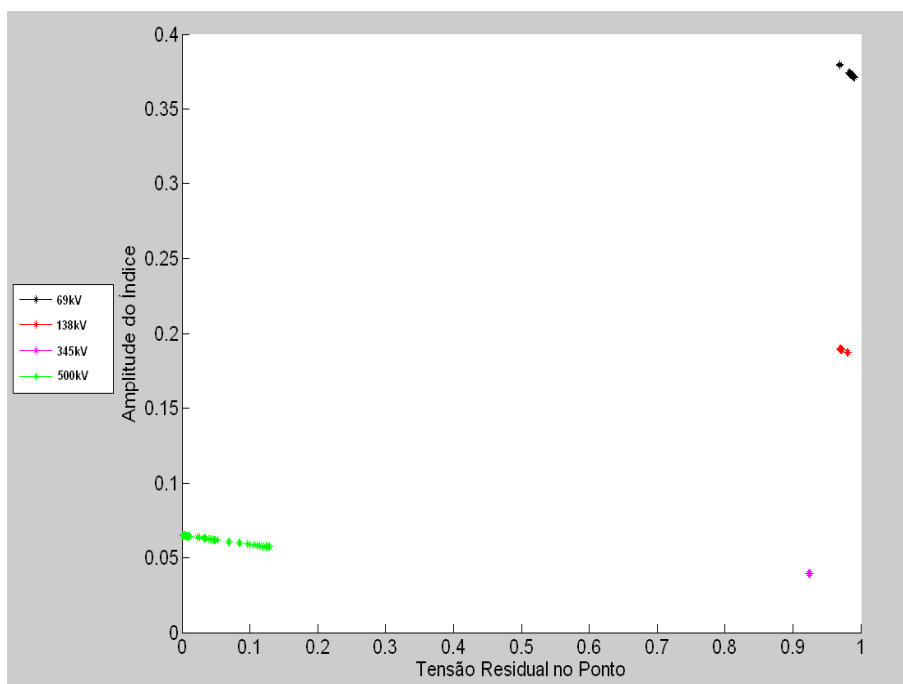


Figura 4.8 – Amplitude do índice x Tensão residual no ponto - Barra 16 -500 kV

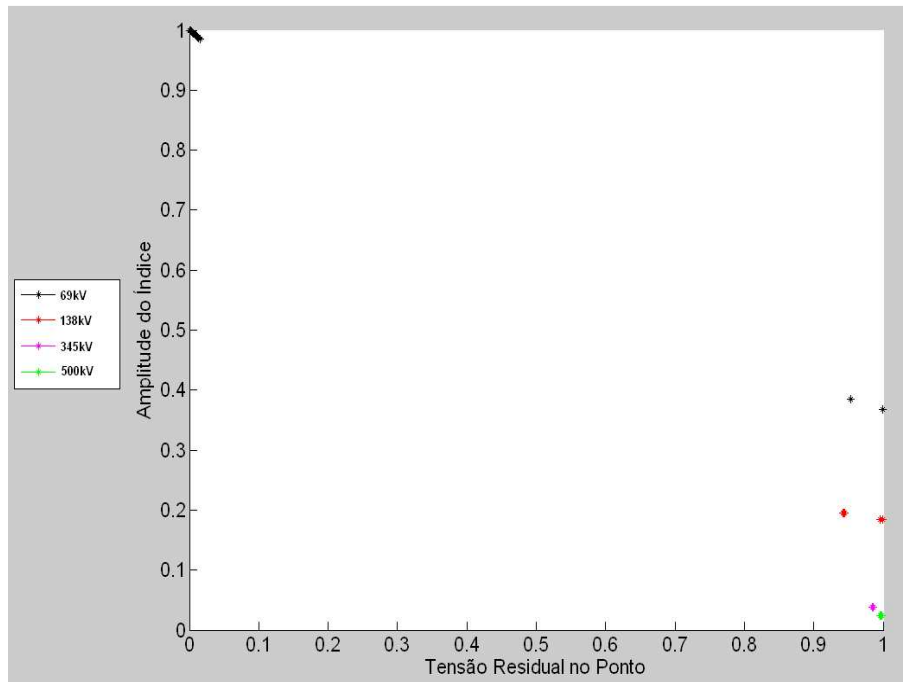


Figura 4.9 – Amplitude do índice x Tensão residual no ponto - Barra 18 - 69 kV

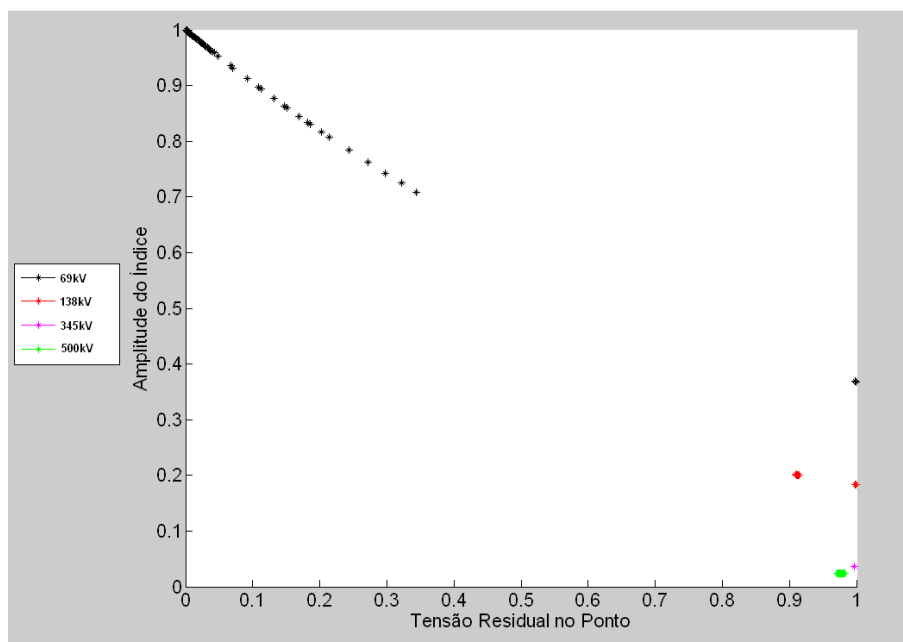


Figura 4.10 – Amplitude do índice x Tensão residual no ponto - Barra 30 - 69 kV

Observa-se que vários pontos localizados em 69 kV apresentaram um alto valor de índice, apesar de não possuírem baixos valores de tensão residual. Isso ocorre devido ao produto direto do tempo de proteção, que é muito maior para linhas de 69 kV.

Analisando-se a Figura 4.8, nota-se que a classe de tensão 500 kV possui os menores valores de tensão residual. A barra 16 faz parte dessa classe de tensão e é a barra de referência. Segundo os parâmetros de qualidade definidos na seção 4.2 é esperado que este índice seja elevado. Isto não ocorre. Apesar da tensão residual para essa barra ser

nula, a parcela multiplicativa do tempo faz com que os índices calculados para essa classe de tensão, 500 kV, estejam acima somente dos calculados para a classe de tensão de 345 kV, sendo inferiores aos de 69 kV e de 138 kV.

Quando a barra de referência escolhida é da classe de 69 kV, dois fatores contribuem para que os índices calculados para os pontos a ela próximos (na mesma classe de tensão) sejam maiores. O primeiro deles (proximidade) está relacionado ao valor da tensão residual na barra de referência. O segundo resulta do tempo de proteção para essa classe de tensão ser elevado. Essa conclusão fica clara na Figura 4.9 e na Figura 4.10.

Assim, como previsto em [Campici, 2009], conclui-se que o uso do produto direto do parâmetro duração de afundamento de tensão não é razoável uma vez que essa forma de cálculo privilegia algumas classes de tensão em detrimento de outras.

4.4.2 Função ganho exponencial

Os gráficos da Figura 4.11 até a Figura 4.15 apresentam os resultados das simulações para as 5 barras de referência, considerando o cálculo do índice relativo à função ganho exponencial.

A expressão do índice da Equação 4.5 aplicada à função ganho exponencial é reescrita por meio da Equação 4.7, onde o termo $f(D)$ vale $\exp(D)$.

$$I = \exp(-v_r) * \exp(D) \quad (4.7)$$

A barra 3 é uma barra de classe de tensão 138 kV e está localizada na parte esquerda do circuito. Ela possui muitas ramificações, faz conexão com duas barras de 138 kV, uma de 69 kV e uma de 345 kV. É esperado que, sendo usada esta barra como referência, os índices calculados para os pontos de mesma classe de tensão sejam os maiores devido à proximidade relativa destes à referência. A confirmação dessa expectativa aparece na Figura 4.11.

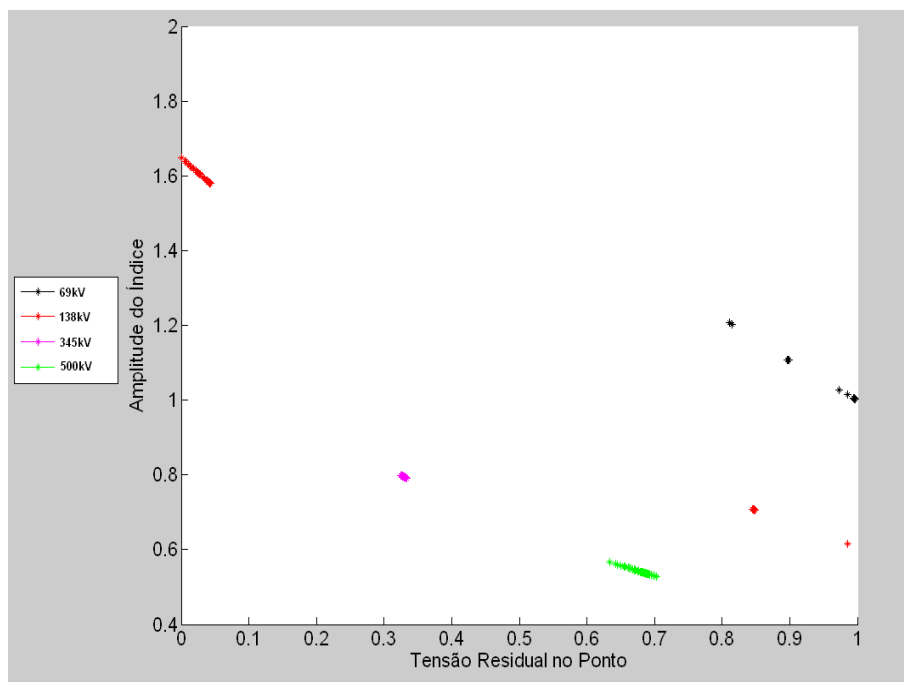


Figura 4.11 – Amplitude do índice x Tensão residual no ponto - Barra 3 - 138 kV

A barra 8 possui classe de tensão 345 kV e encontra-se na região central do sistema. Espera-se que, para um curto nessa barra, seu índice e os das barras de mesma classe de tensão e diretamente ligadas a esta possuam altos valores. Ao comparar a Figura 4.12 com a Figura 4.7, ambas referentes à barra 8, pode-se dizer que a segunda proposta de índice atende melhor aos critérios de qualidade propostos.

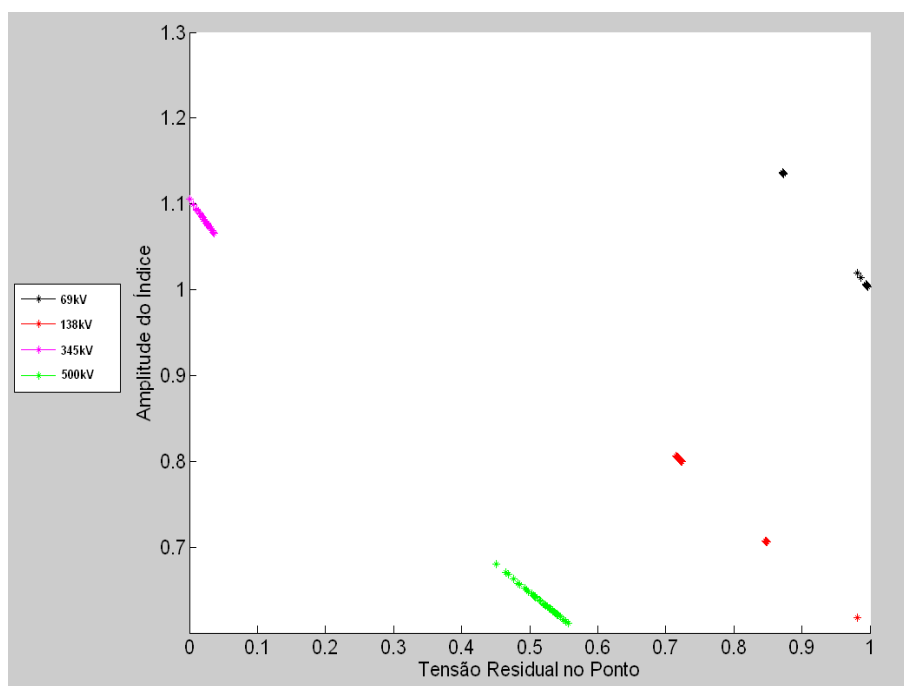


Figura 4.12 – Amplitude do índice x Tensão residual no ponto - Barra 8 - 345 kV

É importante ressaltar, ainda na Figura 4.12, que alguns pontos, classe de tensão 69 kV e tensão residual entre 0,8 e 0,9 p.u., possuem os maiores valores de índice. Esse comportamento anômalo é incoerente com os critérios de qualidade estabelecidos o que mostra que essa proposta de índice não é satisfatória.

Nas Figura 4.13, Figura 4.14 e Figura 4.15 o índice se comporta de maneira adequada, porém na primeira delas os índices calculados para a classe de tensão de 69 kV ainda se apresentam muito elevados em comparação com a classe de tensão 500 kV que possui menores valores de tensão residual.

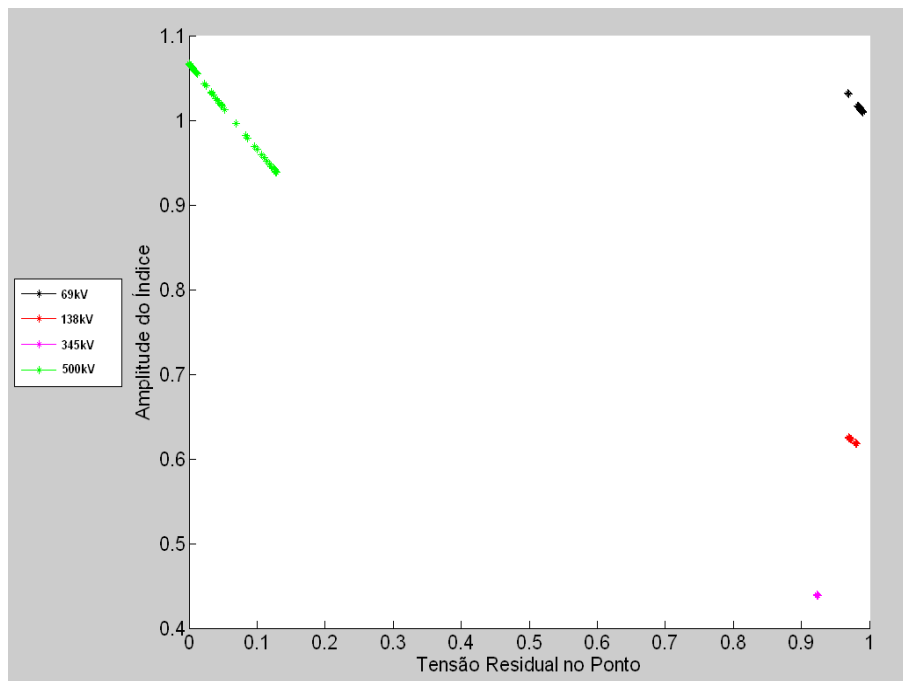


Figura 4.13 – Amplitude do índice x Tensão residual no ponto - Barra 16 - 500 kV

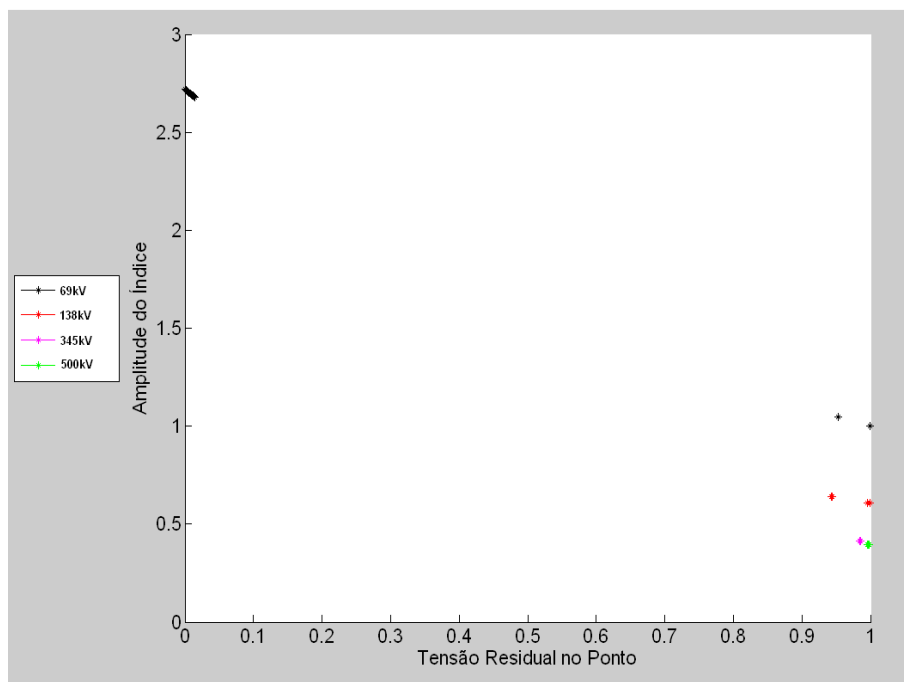


Figura 4.14 – Amplitude do índice x Tensão residual no ponto - Barra 18 - 69 kV

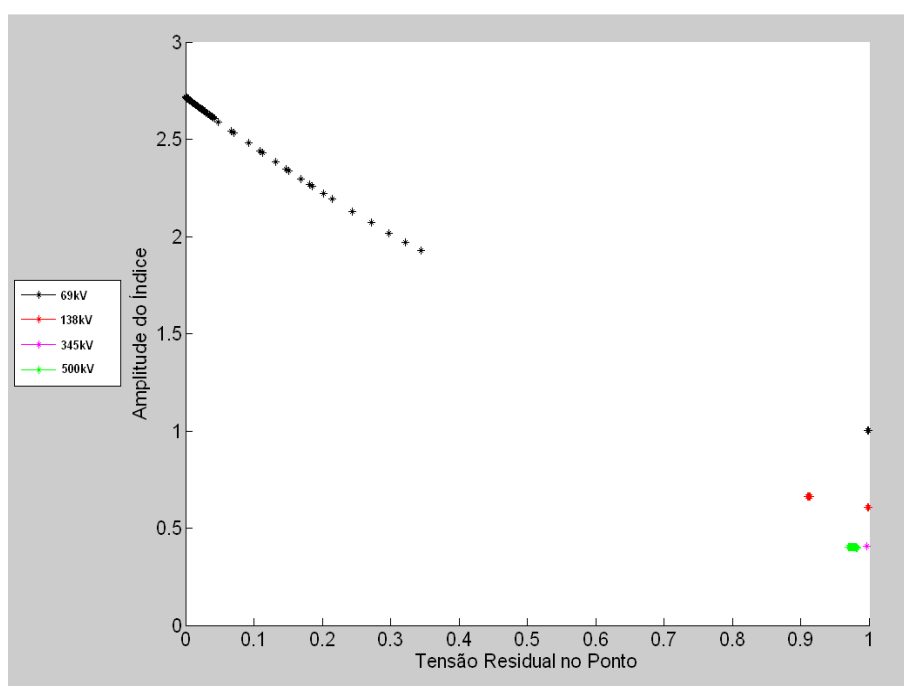


Figura 4.15 – Amplitude do índice x Tensão residual no ponto - Barra 30 - 69 kV

Apesar dessa proposta não ser satisfatória, o uso da função exponencial é interessante do ponto de vista que distribui o ganho tornando-o maior para valores de tempo de proteção menores. Essa observação motiva o uso dessa função nas próximas propostas.

4.4.3 Função ganho aritmético

Outra forma de associar ganhos aos tempos de proteção, através do uso de uma função, é encontrar o valor médio destes e ponderar a função utilizando-se tal valor. Essa aplicação pode ser feita de várias formas, e aqui ela é produzida usando o benefício da exponencial que torna o ganho maior para tempos menores.

A expressão do índice da Equação 4.5 aplicada à função ganho aritmético é reescrita por meio da Equação 4.8, onde o termo $f(D)$ vale $A * \exp[A * \ln(D)]$, e A vale 0,41625 (valor mostrado na Equação 4.2).

$$I = \exp(-v_r) * A * \exp[A * \ln(D)] \quad (4.8)$$

A Figura 4.16 apresenta bons resultados para o índice. Observa-se que os pontos de classe de tensão 138 kV, mesma tensão da barra de referência (barra 3), apresentam elevados valores de índice.

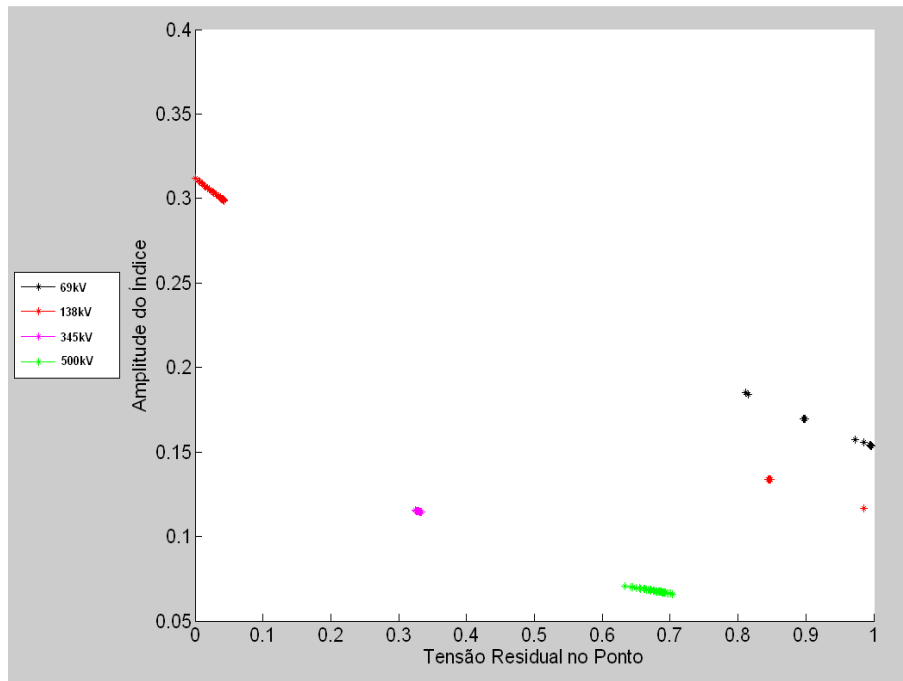


Figura 4.16 – Amplitude do índice x Tensão residual no ponto - Barra 3 - 138 kV

Quando as barras de referência escolhidas são a barra 8 e a barra 16, Figura 4.17 e Figura 4.18, a resposta não é coerente visto que pontos de 69 kV com níveis altos de tensão residual apresentam índices elevados. É importante notar que a função exponencial decai de forma suave e, em razão disso, mesmo para níveis elevados de v_r ainda aparecem ganhos substanciais.

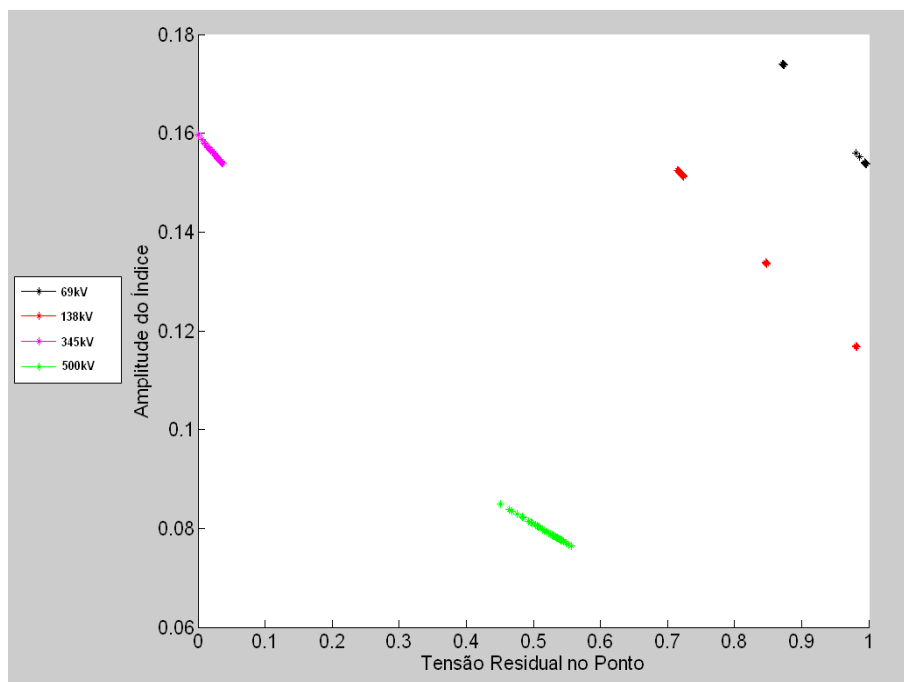


Figura 4.17 – Amplitude do índice x Tensão residual no ponto - Barra 8 - 345 kV

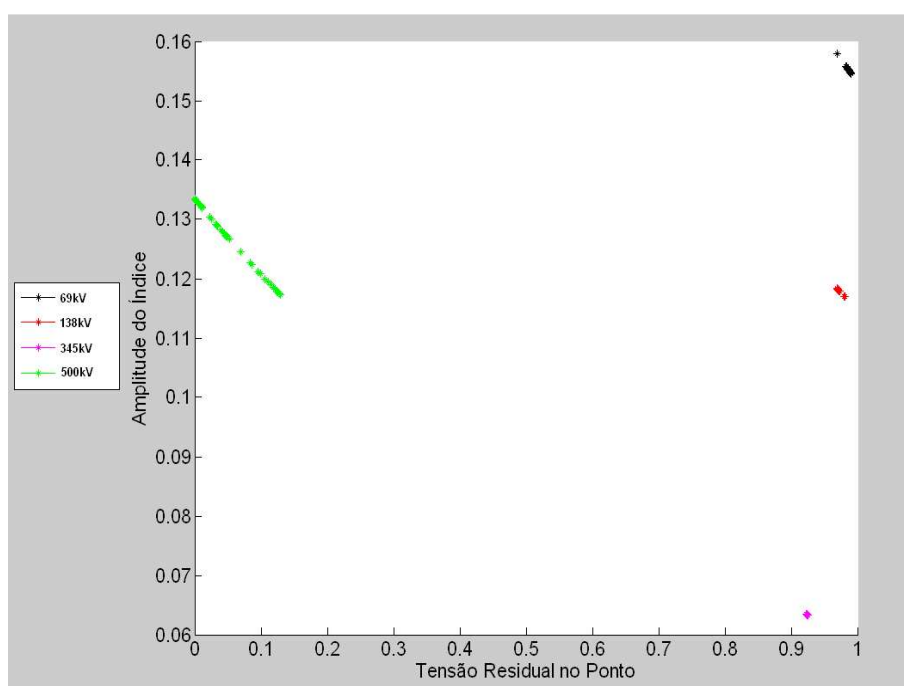


Figura 4.18 – Amplitude do índice x Tensão residual no ponto - Barra 16 - 500 kV

Quando a simulação é feita para barras de 69 kV, Figura 4.19 e Figura 4.20, o índice volta a se comportar de maneira consistente, apresentando as respectivas barras de referência como os pontos mais críticos do sistema.

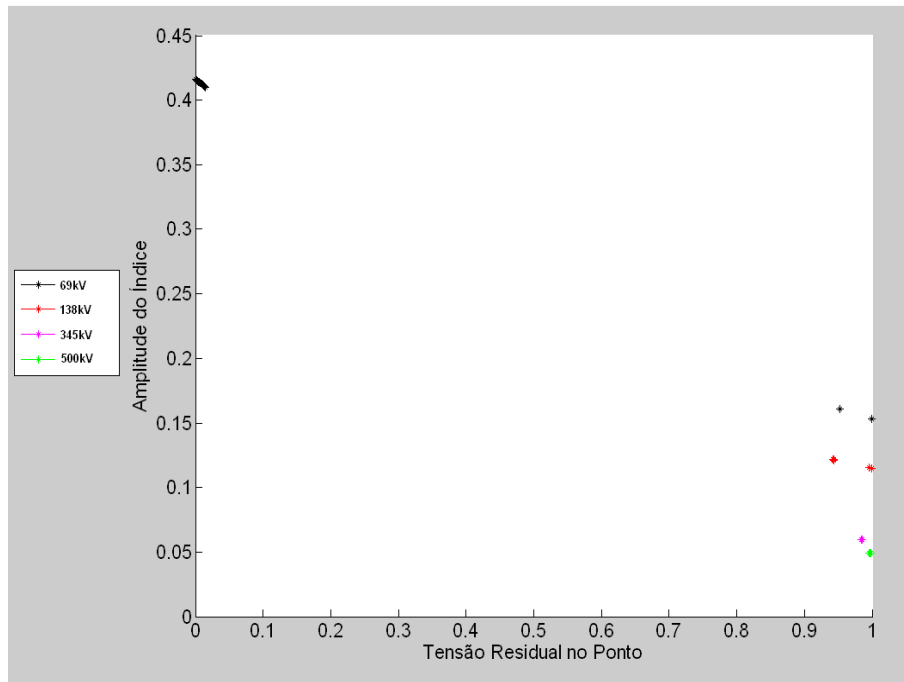


Figura 4.19 – Amplitude do índice x Tensão residual no ponto - Barra 18 - 69 kV

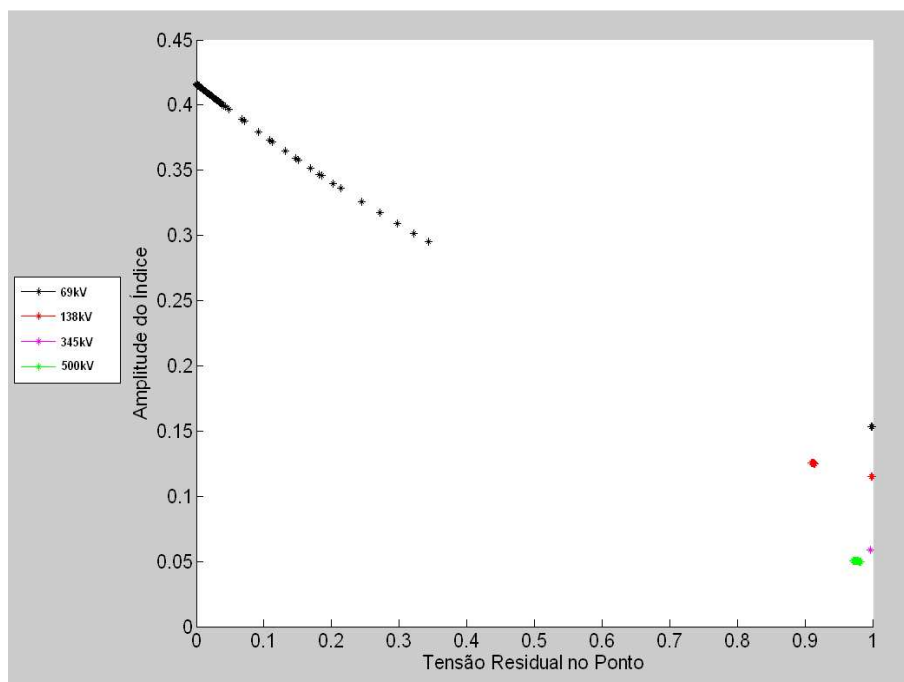


Figura 4.20 – Amplitude do índice x Tensão residual no ponto - Barra 30 - 69 kV

Essa proposta não é satisfatória. Entretanto, tendo em vista o comportamento anterior da função exponencial, seção 4.4.2, aparentemente as inadequações do índice parecem ser fruto de má calibração dessa função. Mais especificamente, pode-se concluir que a média utilizada, fator A, não foi adequada. A próxima proposta substitui o fator A pelo fator G, média geométrica, e as simulações são refeitas.

4.4.4 Função ganho geométrico

Usa-se a mesma idéia de inclusão de um parâmetro médio dos tempos de proteção como forma de ponderação de ganhos. Neste caso é proposta o uso da média geométrica dos tempos.

A expressão do índice da Equação 4.5 aplicada à função ganho geométrico é reescrita por meio da Equação 4.9, onde o termo $f(D)$ vale $G * \exp[G * \ln(D)]$, e G vale 0,23876 (valor mostrado na Equação 4.3).

$$I = \exp(-v_r) * G * \exp[G * \ln(D)] \quad (4.9)$$

O comportamento do índice proposto é semelhante ao da função ganho aritmético quando a simulação é feita considerando como barra de referência a barra 3, Figura 4.21. Porém, quando se consideram como referência as barras 8 e 16, Figura 4.22 e Figura 4.23, o problema de inconsistência devido à elevação excessiva dos índices calculados para as barras de 69 kV é resolvida. Observa-se ainda na Figura 4.21 que alguns pontos de 69 kV ainda são mais críticos que os de 345 kV, resultado que pode ser questionado devido ao nível elevado de tensão residual observado nos pontos de 69 kV.

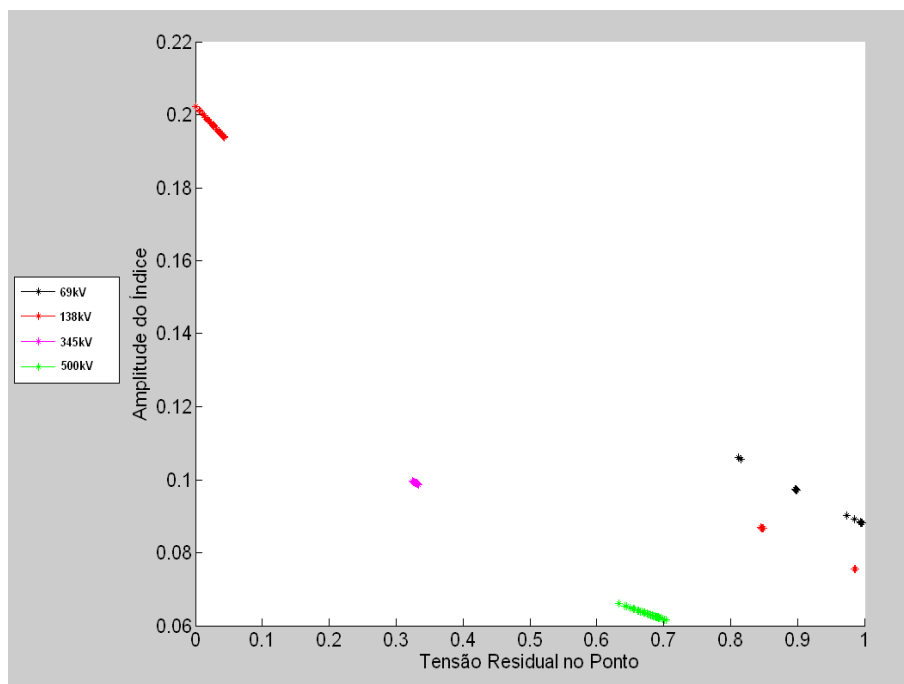


Figura 4.21 – Amplitude do índice x Tensão residual no ponto - Barra 3 - 138 kV

Na Figura 4.22 e Figura 4.23 o resultado é coerente quando o índice apresenta valores elevados para pontos próximos à barra de referência. Entretanto, tensões residuais muito grandes ainda aparecem para pontos com índice elevado, resultado recorrente para as linhas de 69 kV.

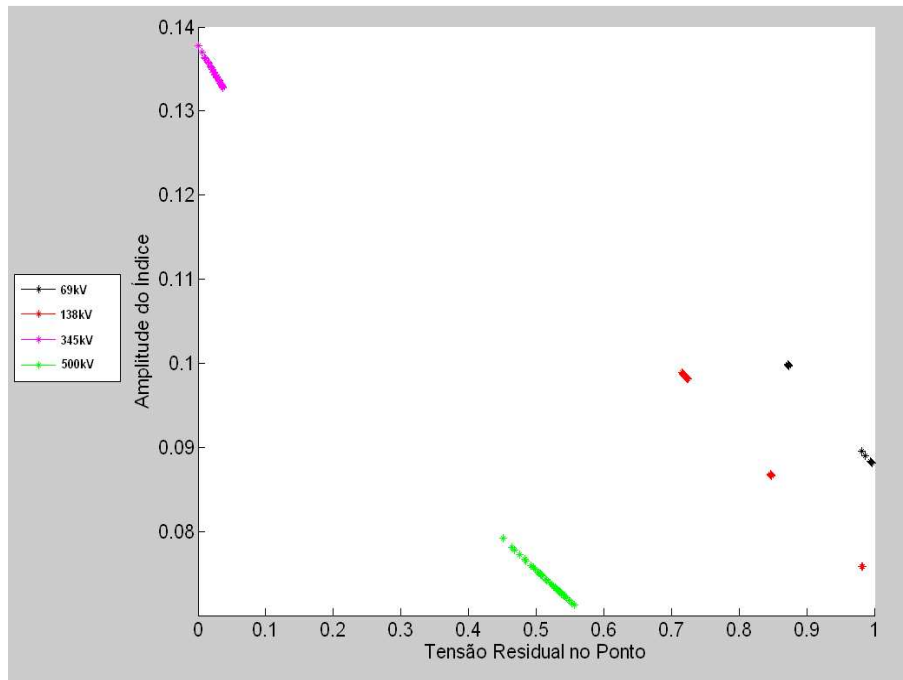


Figura 4.22 – Amplitude do índice x Tensão residual no ponto - Barra 8 - 345 kV

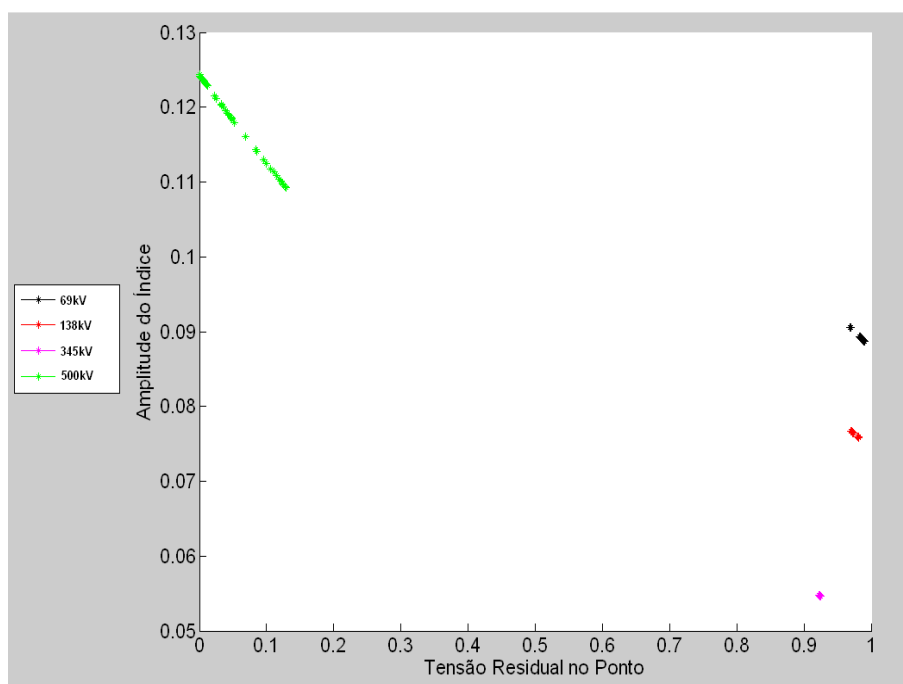


Figura 4.23 – Amplitude do índice x Tensão residual no ponto - Barra 16 - 500 kV

Na Figura 4.24 e na Figura 4.25 existe coerência para valores pequenos de tensão residual. Entretanto, para valores elevados a coerência se perde devido à presença de índices muito elevados. Como as barras de referência escolhidas são de 69 kV, os pontos que apresentaram maior índice são dessa classe de tensão, como esperado.

A análise das propostas já realizadas e o fato da redução do valor da constante de ponderação da função exponencial de A para G trazer melhores resultados, quanto ao

aspecto do índice, levam a crer que a redução ainda maior desse parâmetro produza uma função de ganho eficiente e que atenda a todos os critérios de qualidade definidos na seção 4.2.

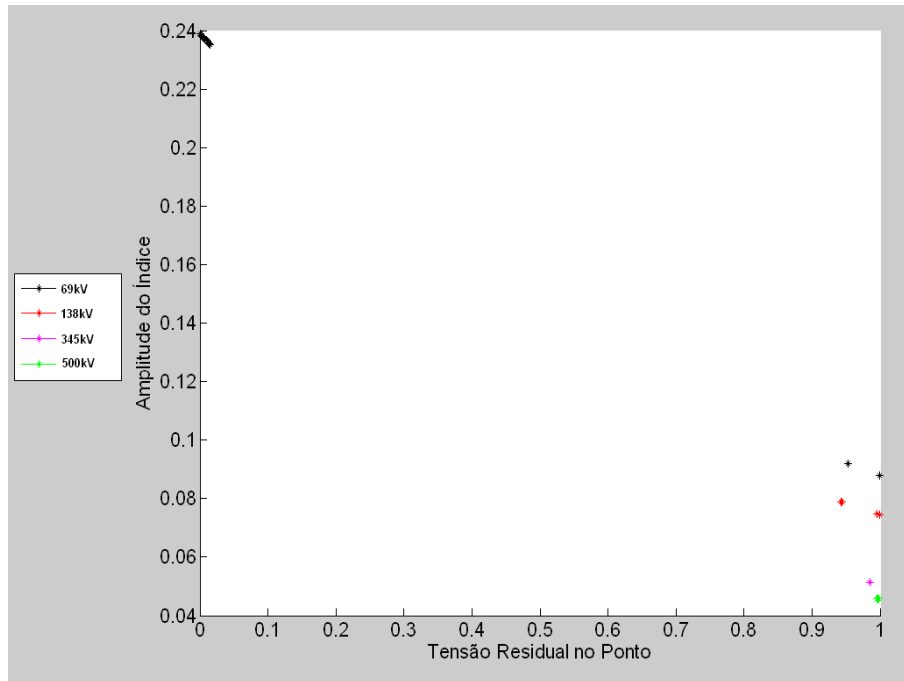


Figura 4.24 – Amplitude do índice x Tensão residual no ponto - Barra 18 - 69 kV

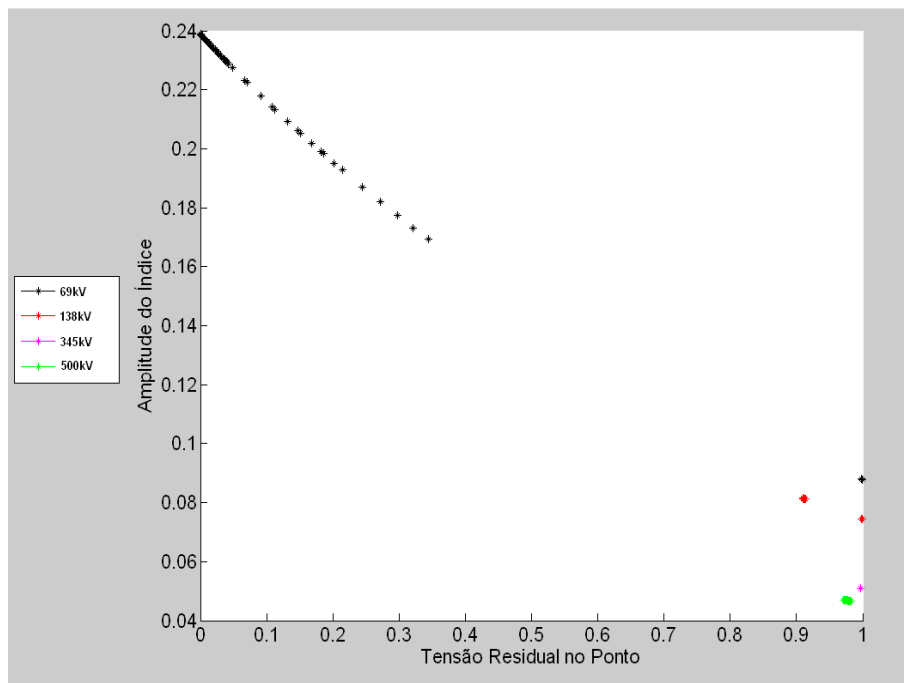


Figura 4.25 – Amplitude do índice x Tensão residual no ponto - Barra 30 - 69 kV

A proposta 5 apresenta H, média harmônica, como um possível parâmetro para ponderar a função exponencial.

4.4.5 Função ganho harmônico

A expressão do índice da Equação 4.5 aplicada à função ganho harmônico é reescrita por meio da Equação 4.10, onde o termo $f(D)$ vale $H * \exp[H * \ln(D)]$, e H vale 0,14092 (valor mostrado na Equação 4.4) .

$$I = \exp(-v_r) * H * \exp[H * \ln(D)] \quad (4.10)$$

Os gráficos originados da simulação dessa proposta podem ser vistos da Figura 4.26 à Figura 4.30.

Todos os pontos de mesma classe de tensão que as barras de referência aparecem nesses resultados como sendo os mais críticos. Essa observação está de acordo com o primeiro critério de qualidade proposto na seção 4.2.

De acordo com a segunda premissa do critério de qualidade, é esperado que, de maneira geral, as linhas de menor nível de tensão apresentem maiores valores de índice. A exceção ocorrerá quando as linhas de classe de tensão mais baixa estiverem distantes eletricamente da barra escolhida como referência.

Essa premissa pode ser comprovada a partir dos gráficos apresentados. Na Figura 4.26 observa-se que o índice calculado aumenta à medida que a tensão residual reduz para a classe de tensão de 69 kV. Outra observação importante aparece em relação aos pontos de 345 kV, que agora obtêm índices superiores aos obtidos pelos pontos de 69 kV. Este resultado é desejado, uma vez que a classe de tensão de 345 kV, neste caso, apresenta valores de tensões residuais expressivamente inferiores aos da classe de tensão de 69 kV.

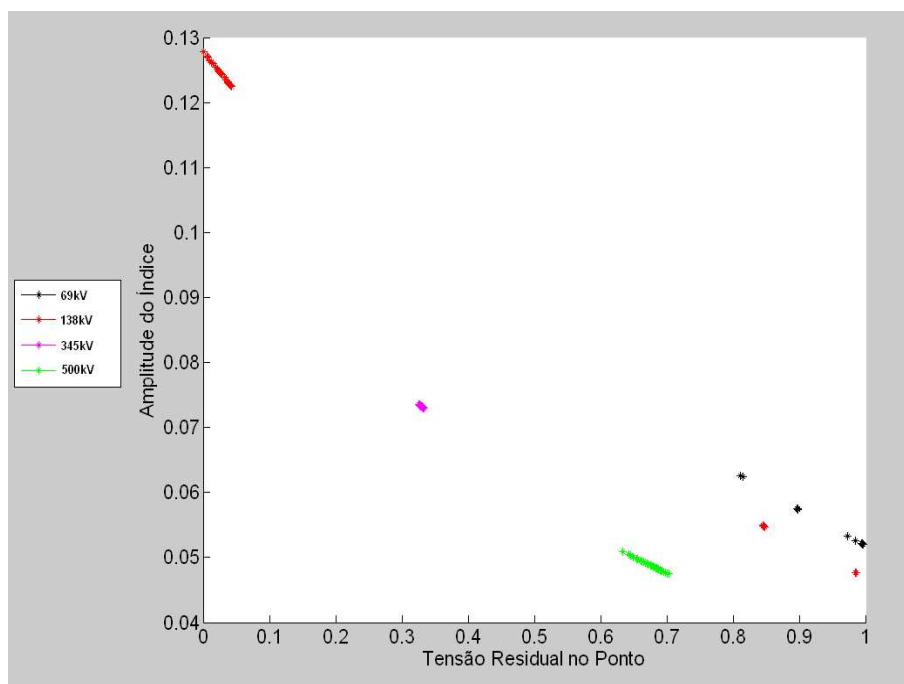


Figura 4.26 – Amplitude do índice x Tensão residual no ponto - Barra 3 - 138 kV

O resultado apresentado nos gráficos da Figura 4.27 à Figura 4.30, também estão de acordo com as premissas. Os pontos de mesma classe de tensão da barra de referência possuem os maiores valores de índice e os pontos com altos valores de tensão residual têm baixos valores de índice.

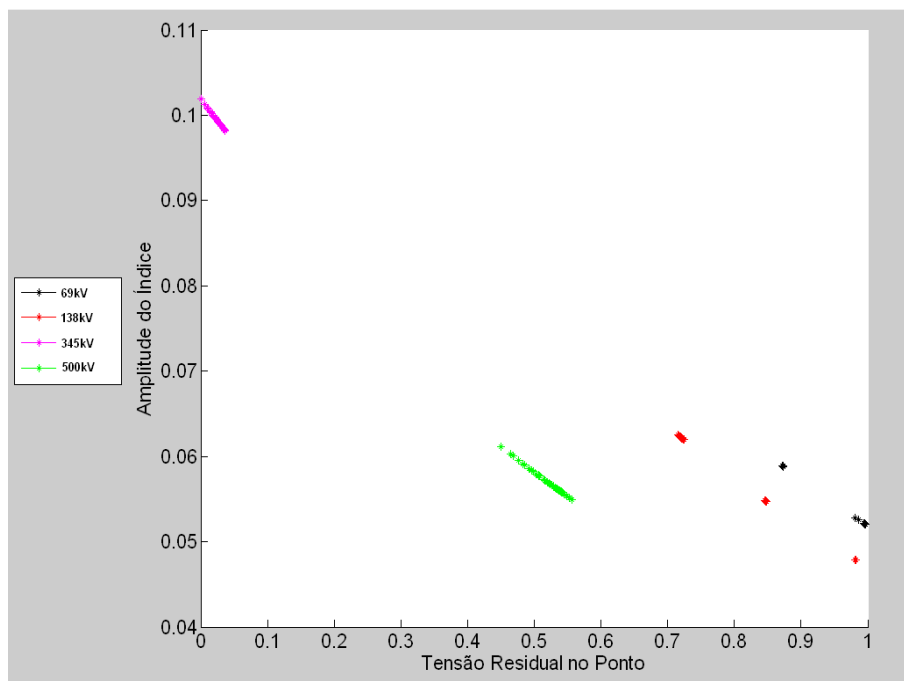


Figura 4.27 – Amplitude do índice x Tensão residual no ponto - Barra 8 - 345 kV

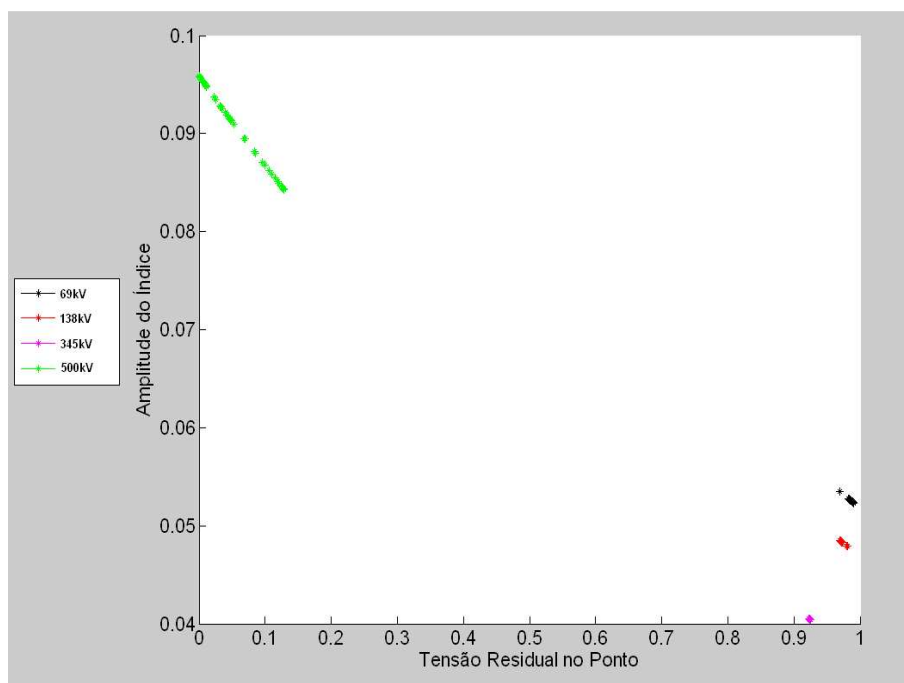


Figura 4.28 – Amplitude do índice x Tensão residual no ponto - Barra 16 - 500 kV

Devido à escala utilizada e à proximidade das tensões residuais obtidas, algumas vezes vários pontos se sobrepõem nos gráficos, dificultando a contagem dos mesmos. Em

especial na simulação registrada na Figura 4.29, é apresentado um detalhe em maior escala para mostrar a sobreposição de diversos pontos de 69 kV. Pela figura, onde a barra de referência é a barra 18, 69 kV, pode-se perceber que, como esperado, os maiores valores de índice ocorrem para essa classe de tensão. Todavia, vários pontos também para essa classe de tensão, possuem pequenos valores de índice, em função da distância elétrica (altos valores de impedância) destes à barra de referência.

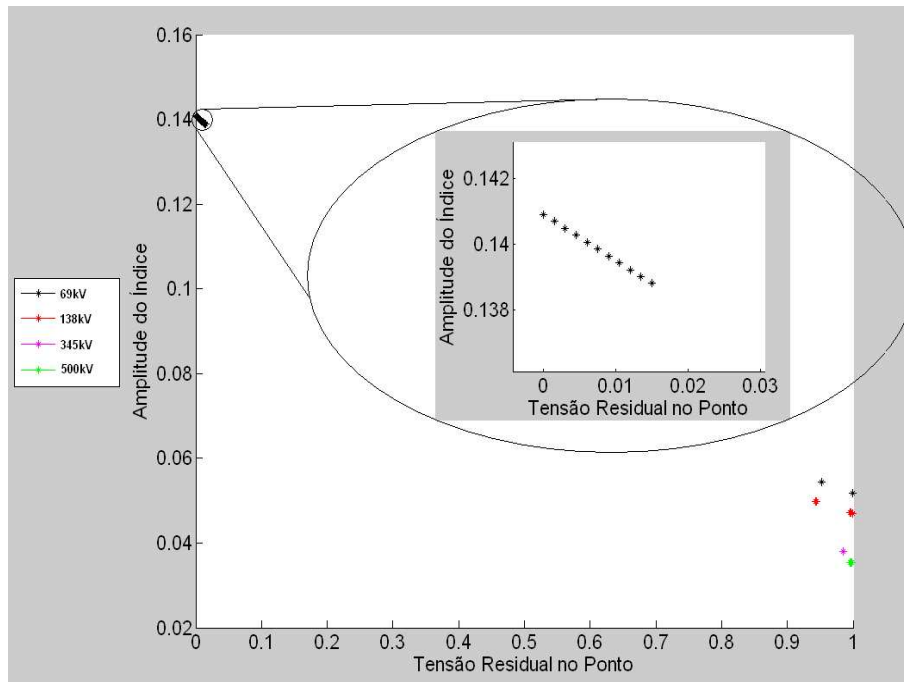


Figura 4.29 – Amplitude do índice x Tensão residual no ponto - Barra 18 - 69 kV

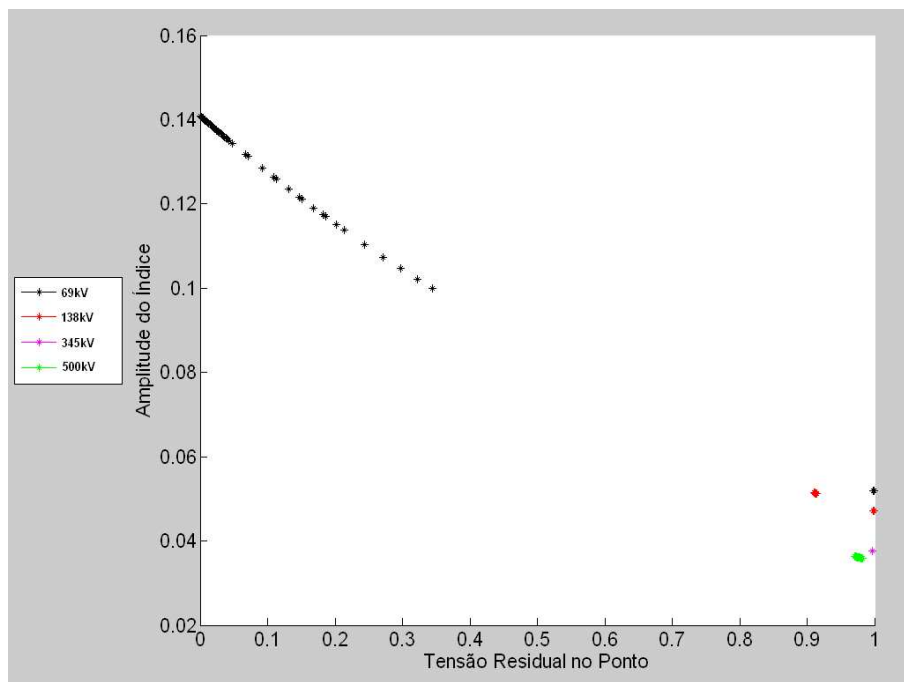


Figura 4.30 – Amplitude do índice x Tensão residual no ponto - Barra 30 - 69 kV

4.5 Definição do fator τ

Cinco funções foram analisadas segundo o critério de qualidade definido. Com exceção à primeira, que usa um ganho unitário, as quatro outras propostas fazem uso de uma função ganho para ponderar os tempos de proteção das linhas.

Algumas propostas foram eficazes no que diz respeito a atender mais de um dos critérios de qualidade propostos, porém a não contemplação de todos eles faz com que o índice não seja confiável e que essas propostas sejam descartadas. A última função, ganho harmônico, atendeu a todos os critérios de qualidade propostos.

Os resultados positivos da função ganho harmônico sugeriram que fosse criado um fator tempo com base em sua expressão. Sendo assim, foi definido o *fator* τ conforme a Equação 4.11.

$$\tau = H * \exp[H * \ln(D)] \quad (4.11)$$

Para que a composição deste fator fique bem clara, seus termos são definidos novamente abaixo:

- **H**: média harmônica dos tempos de proteção mostrados na Tabela 2.2, ($H = 0,14092$)
- **D**: tempo de proteção referente a cada classe de tensão

4.6 Considerações finais

Após analisar as várias propostas de funções ganho, bem como sua aplicabilidade à questão de inclusão do parâmetro duração de afundamento de tensão em um índice de severidade para afundamentos de tensão, é proposto neste capítulo o *fator* τ

O aplicativo PlanSag, conforme já tratado anteriormente, utiliza o fator tempo denominado t na composição do índice de desempenho I_{PLAN} . No próximo capítulo, o *fator* τ é utilizado, originando um índice modificado denominado I_{ALPLAN} .

Vale observar que, da forma como tal fator foi definido, ele pode ser ajustado à medida que for aplicado a um maior número de sistemas elétricos, com características diversas e, principalmente, com cargas que apresentam diferente sensibilidade diante dos afundamentos de tensão. Os resultados são bastante consistentes, mas podem ser sempre aprimorados, por meio do ajuste do valor de H .

5

I_{AlPlan} – Índice de Desempenho de Afundamento de Tensão Considerando o *Fator* τ

O fator tempo τ é utilizado, neste capítulo, para definir um novo índice de desempenho de afundamentos de tensão, denominado I_{AlPlan} . A aplicação deste índice nos estudos de planejamento é discutida, apresentando-se uma proposta de procedimentos.

5.1 Considerações iniciais

Neste capítulo é descrito o índice I_{ALPLAN} – Índice de Desempenho de Afundamento de Tensão Considerando o Fator τ . Este índice possui a mesma filosofia básica e estrutura do I_{PLAN} descrito no capítulo 3. A diferença básica entre eles se refere ao fator que representa a influência do parâmetro duração dos afundamentos de tensão.

A composição do índice I_{ALPLAN} considera os mesmos fatores anteriores relacionados à intensidade e à frequência dos afundamentos de tensão e, para o fator que pondera a duração do fenômeno, utiliza o fator tempo τ , definido no capítulo anterior.

Uma vez definido o I_{ALPLAN} , surge a necessidade de agregá-lo aos procedimentos de análises de planejamento, a fim de permitir seu uso nesse contexto. O texto inclui, assim, uma discussão sobre sua inclusão nos Estudos de Planejamento da Expansão, por meio de uma análise de parâmetros, mostrando como identificar, para os pontos críticos encontrados, os fatores que poderiam causá-los.

Completando as investigações o SEP fictício do capítulo anterior é avaliado com respeito aos valores do I_{ALPLAN} , visando mostrar o impacto da inclusão do fator tempo τ nas análises de planejamento.

5.2 Índice de desempenho - I_{ALPLAN}

Os fatores F e I_s relacionados à frequência de ocorrência dos afundamentos, como foi dito anteriormente, estão bem consolidados e, portanto, são utilizados pelo I_{ALPLAN} de forma direta, sendo, em conjunto, tratados pelo fator Freq, conforme Equação 5.1.

$$Freq = I_s * F \quad (5.1)$$

Nesta expressão, tem-se:

- I_S : fator de densidade de descargas individuais (*strokes*⁷/km²/ano)
- F : taxa de desligamentos da linha (por nível de tensão)

À semelhança do que foi discutido para o I_{PLAN} , esta equação mostra que o fator I_S pondera os valores de desligamentos de linha segundo a densidade de descargas individuais naquele trecho. Essa ponderação é importante, já que ao parâmetro frequência de afundamento de tensão está associada a taxa de desligamentos de linhas, e a principal causa de desligamento de linhas é por curto-circuito, que por sua vez, possui descargas atmosféricas como a principal causa de curtos-circuitos em linhas de transmissão.

O índice I_{ALPLAN} é definido pela Equação 5.2 como resultado dos estudos anteriores da pesquisa, das análises aqui realizadas e da proposta do *fator* τ que permite a consideração do parâmetro tempo de maneira adequada.

$$I_{ALPLAN} = \exp(-v_r) * \text{Freq} * \tau \quad (5.1)$$

Nesta expressão, tem-se:

- v_r : tensão residual em p.u. na barra de referência
- **Freq**: fator $\text{Freq} = I_S * F$
- τ : *fator* $\tau = H * \exp[H * \ln(D)]$, onde $H = 0,14092$

Desta forma, elevados valores de I_{ALPLAN} indicam pontos críticos do sistema com relação aos fundamentos de tensão.

Para que este índice possa ser utilizado no planejamento devem existir procedimentos que indiquem seu uso e as análises que poderão ser feitas a fim de se determinarem, não só os pontos críticos do sistema, mas também as causas dessa sensibilidade a afundamentos, apontando soluções para as mesmas. Também é esperado que diferentes alternativas de expansão possam ser comparadas quanto à sensibilidade a afundamentos de tensão. O item seguinte trata desses procedimentos.

5.3 I_{ALPLAN} – Inclusão nos estudos de planejamento da expansão

Neste tópico faz-se uma exposição de como a análise de afundamentos de tensão pode ser inserida nas etapas dos estudos de planejamento, considerando as informações fornecidas pelo I_{ALPLAN} . São sugeridos procedimentos que poderiam ser seguidos de maneira criteriosa para que a elaboração do plano seja concluída da melhor forma.

Na Figura 5.1 encontra-se um diagrama contendo proposta de procedimentos a serem executados. O uso adequado desses procedimentos permite, em termos de prognóstico, antever problemas de afundamento de tensão bem como sua causa e, para o sistema atual, torna possível determinar os pontos que requerem ação corretiva.

⁷ *Strokes* – Descargas atmosféricas individuais [Visacro, 2005]

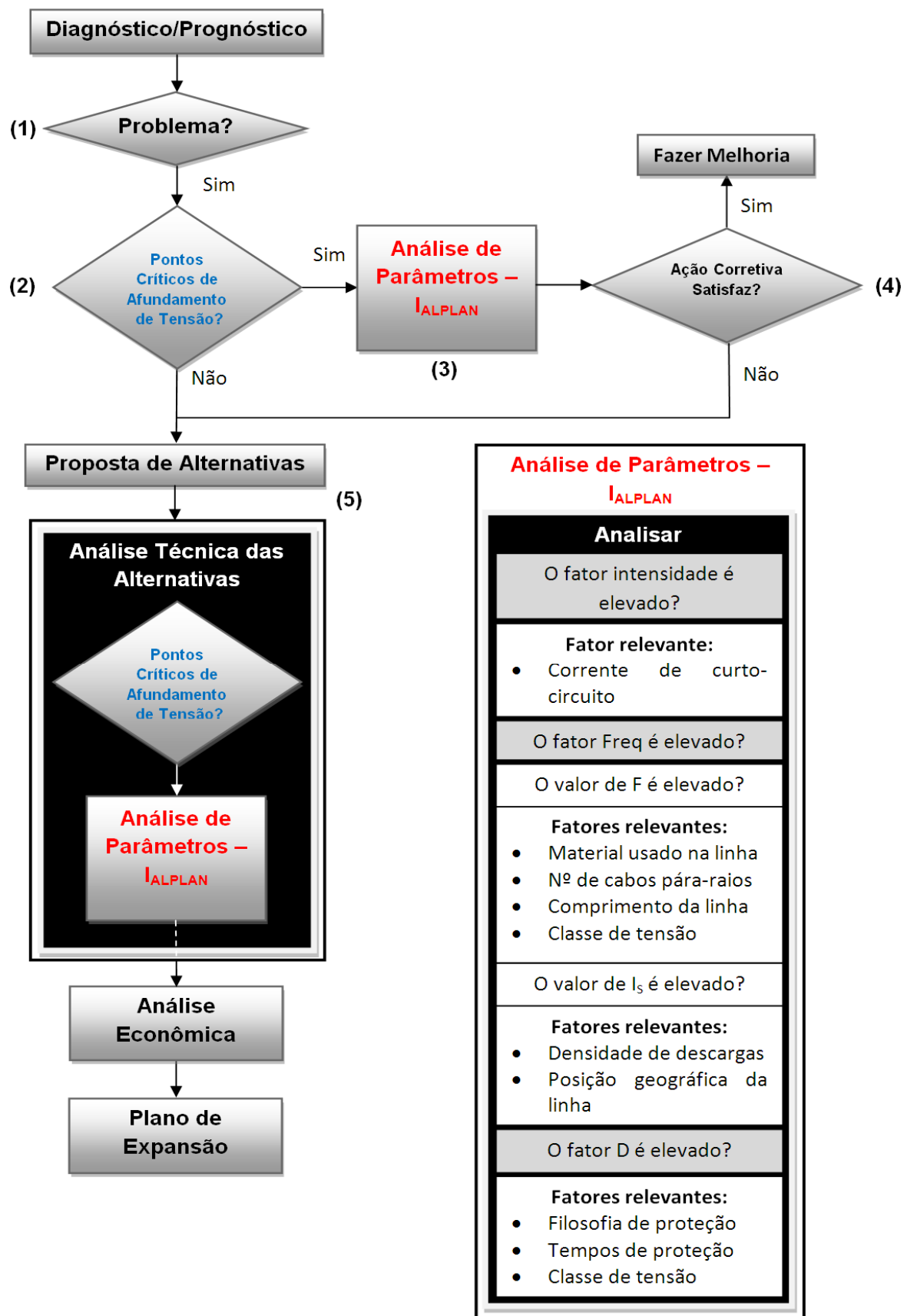


Figura 5.1 – Diagrama de análise para diagnóstico e prognóstico do sistema

- (1) **Problema?** – A primeira questão a ser respondida, tanto para o prognóstico quanto para o diagnóstico do sistema, é se há algum problema com o mesmo. Diz-se que o SEP tem algum problema se um ou mais dos critérios exigidos para o funcionamento do mesmo não são satisfeitos. O caso para o qual o sistema não possui iniquidades desses critérios dispensa os procedimentos aqui apresentados. Os demais casos deverão seguir os procedimentos.
- (2) **Pontos Críticos de Afundamentos de Tensão?** – Essa questão envolve o uso de uma ferramenta de análise de afundamentos de tensão; esta pesquisa recomenda o uso do I_{ALPLAN} como índice de sensibilidade para tal ponderação. Caso sejam encontrados pontos críticos de afundamento de tensão, o procedimento (3) deverá ser executado, caso contrário, o procedimento (5) deverá ser executado.
- (3) **Análise de Parâmetros I_{ALPLAN}** – A Análise de Parâmetros, destacada no diagrama, contém a análise individual de cada um dos fatores que compõem o índice I_{ALPLAN} . A relevância de um fator é determinada através da influência que este tem sobre o parâmetro.

Este tópico inclui uma análise dos fatores relevantes para cada um dos parâmetros.

- **v_r – Tensão residual do afundamento de tensão**

- **Corrente de curto-circuito** – Vários fatores interferem na corrente de curto-circuito e esta é a principal causa de afundamentos de tensão.

As impedâncias dos componentes do SEP, tais como linhas e transformadores, impedâncias de aterramento, bem como o tipo de ligação dos transformadores, influenciam no valor da corrente de curto-circuito. A intensidade da corrente de curto-circuito depende da configuração da rede.

Além disso, é importante destacar que cada tipo de falta possui uma impedância de falta diferente. Falhas trifásicas, em geral, apresentam maior valor de corrente de curto-circuito, porém as faltas monofásicas são mais frequentes. O ponto onde a falta ocorre também deve ser analisado, pois sua posição determina quais serão as impedâncias a serem percorridas pela corrente de curto-circuito.

De modo geral, quando o índice for crítico devido a pequenos valores de v_r , pode-se dizer que a questão deve ser resolvida em tempo de planejamento, através de alternativas de expansão satisfatórias. Essa afirmação se fundamenta na natureza dos fatores que interferem nesse parâmetro, já que guardam relação com a estrutura da rede e não são considerados, normalmente, como pequenas alterações do sistema.

- **Frequência de afundamento de tensão**

- ✓ **F** – taxa de desligamentos da linha – Alto número de desligamentos de linhas deve ser tratado como um problema de expansão. A afirmativa anterior se baseia na dificuldade inerente de alteração dos fatores que podem minimizar essa taxa. Esses fatores são detalhados a seguir.

- **Material usado na linha** – O material usado na confecção das linhas interfere no isolamento das mesmas. Dependendo da condutância do material usado, por exemplo, madeira (baixa condutância), o nível de isolamento da linha se eleva e a mesma fica menos suscetível a afundamentos de tensão quando de um curto-circuito da linha para a estrutura.

No processo usado para obtenção do valor desse parâmetro são consideradas equações diferentes para cada tipo de material. As curvas utilizadas podem ser vistas na Figura 3.4 dessa dissertação.

- **Comprimento da linha** – quanto maior o comprimento das linhas aéreas, maior é a área de vulnerabilidade com relação à ocorrência de curtos-circuitos, aumentando a possibilidade de desligamentos.
- **Classe de tensão** – Classes de tensão diferentes possuem isolamentos diferentes. A frequência de desligamento de linhas com isolamento superior tende a ser menor, uma vez que se torna mais difícil ocorrerem curtos-circuitos.
- **Nº de cabos pára-raios** – Supõe-se que, quanto maior o número de cabos pára-raios em uma linha, maior a proteção que esta tem contra os efeitos de descargas atmosféricas. Sendo assim, esse fator minimiza os curtos-circuitos nas linhas e, por conseguinte, a ocorrência de afundamentos de tensão. Este fator pode ser analisado em conjunto com o fator I_s tratado a seguir.

- ✓ **I_s – Densidade de descargas atmosféricas** – Devido à natureza das descargas atmosféricas, sua ocorrência não pode ser minimizada. Todavia procura-se reduzir os efeitos que estas têm sobre as linhas. Esse tipo de modificação pode ser feito, em alguns casos, em prazos mais curtos e constitui uma boa alternativa para melhoria do desempenho de linhas de transmissão.

- **Densidade de descargas** – O desempenho de linhas de transmissão frente a altas densidades de descargas pode ser melhorado. São exemplos de melhorias o uso de cabos pára-raios e a melhoria do aterramento das torres.
- **Posição geográfica das linhas** – A definição da localização de uma linha deve ser cuidadosamente planejada, levando em consideração a sua posição geográfica com respeito à densidade de descargas atmosféricas própria da região. Tal cuidado visa minimizar a ocorrência de curtos-circuitos devido a descargas e, conseqüentemente, os afundamentos de tensão.

- **D – Duração de afundamento de tensão**

- **Filosofia de proteção** – A filosofia de proteção está relacionada com as escolhas de planejamento. Caso esta seja responsável por altos valores de D, após avaliação, é possível alterá-la nesse contexto.
- **Tempos de proteção** – Tempos de proteção elevados podem ser a causa de altos valores do fator D. Quando ocorre um curto-circuito em uma linha e a proteção demora a atuar, o sistema, exposto à corrente de curto-circuito, sofre com os efeitos inerentes desta. Entre esses efeitos encontram-se os afundamentos de tensão. São realizados estudos complexos para que pequenos ajustes possam ser feitos na atuação dos equipamentos de proteção a fim de solucionar problemas desse tipo em um horizonte de curto de tempo.
- **Classe de tensão** – A classe de tensão é definidora de faixas para os tempos de proteção, sendo que a disparidade dessas faixas pode ser crucial no que diz respeito à duração de afundamentos de tensão. Problemas desse tipo devem ser tratados no contexto de expansão do SEP.

(4) Ação Corretiva Satisfaz? – Após a análise dos parâmetros do índice é possível dizer qual ou quais fatores o tornam crítico. Diante desse resultado deve-se decidir se ações corretivas serão capazes de solucionar o problema e, caso sejam, estas devem ser propostas.

(5) Proposta e Análise Técnica de Alternativas – Para cada alternativa proposta os procedimentos **(2)** e **(3)** deverão ser repetidos. Isso é feito a fim de garantir alternativas que possuam melhor desempenho em relação a afundamentos de tensão.

5.4 Identificação de pontos críticos usando I_{ALPLAN}

No capítulo 4 são apresentados resultados de simulações realizadas para determinar qual seria a melhor função ganho para ponderar os tempos de proteção e, desta forma, possibilitar a inclusão dos mesmos como um fator duração de afundamento de tensão na proposta de cálculo de um índice de desempenho.

Tais simulações também podem ser analisadas sob a perspectiva de planejamento, onde o planejador analisa, através do índice I_{ALPLAN} , quais são os pontos críticos do sistema.

Para exemplificar essa análise, o circuito fictício da Figura 4.5 é simulado, utilizando a barra 8 como referência. O fator Freq foi considerado igual a um, para permitir a análise da ponderação do fator tempo τ com relação à intensidade, sem a influência do parâmetro frequência dos afundamentos de tensão.

A Tabela 5.1 (A) mostra o resultado da ordenação decrescente dos índices de desempenho quando se considera apenas o uso do parâmetro intensidade, $\text{Índice 1} = \exp(-v_r)$, e a Tabela 5.1 (B) contém a ordenação decrescente dos resultados do índice de sensibilidade quando se inclui, além do parâmetro intensidade, o parâmetro duração por meio do uso do fator τ , $\text{Índice 2} = \exp(-v_r) * \tau$.

Como o Índice 1 só considera o fator intensidade, ele está relacionado apenas à distância elétrica, em termos de curto-circuito, entre o ponto de curto e a barra de referência. Como era de se esperar, os pontos mais próximos à barra de referência apresentam índices bem elevados, pois as tensões residuais apresentam-se extremamente baixas. Lembrando que a barra de referência utilizada foi a barra 8, tensão 345 kV, os pontos desta classe de tensão são indicados na parte superior da tabela como sendo os mais críticos.

Com a inclusão do fator tempo τ , no Índice 2, além da distância elétrica, a diferença entre os níveis de tensão passa a influenciar na identificação dos pontos críticos. Pontos que apresentam a mesma intensidade de afundamento (tensões residuais com valores próximos) serão considerados mais críticos (índices mais elevados) quando pertencerem a linhas com classe de tensão menor.

Na Tabela 5.1 são destacados em cinza os pontos de classe de tensão 138 kV que passaram a ser considerados mais críticos com o uso do Índice 2 e, em vermelho, quando essa mudança ocorreu para pontos de classe de tensão 69 kV. Verifica-se que a inclusão do parâmetro duração altera de maneira relativa o quão crítico são os pontos.

A análise feita considerando a barra 8 como referência pode ser repetida para qualquer outra barra da rede, sendo possível identificar os pontos críticos do sistema em relação aos afundamentos de tensão.

Tabela 5.1 – Influência da inclusão do parâmetro tempo nas análise de planejamento

(A) Índice 1 = $\exp(-v_r)$			(B) Índice 2 = $\exp(-v_r) * \tau$			
Identificador do ponto	Vr	Índice 1	Identificador do ponto	Vr	Fator τ	Índice 2
BUS8_345	0	1	BUS8_345	0	0,101871484	0,101872168
BUS10-BUS8_345_90	0,00542875	0,994585959	BUS10-BUS8_345_90	0,00542875	0,101871484	0,101320628
BUS7-BUS8_345_90	0,00580196	0,994214839	BUS7-BUS8_345_90	0,00580196	0,101871484	0,101282821
BUS10-BUS8_345_80	0,0102505	0,989801857	BUS10-BUS8_345_80	0,0102505	0,101871484	0,100833261
BUS7-BUS8_345_80	0,0109849	0,989075214	BUS7-BUS8_345_80	0,0109849	0,101871484	0,100759236
BUS10-BUS8_345_70	0,0144775	0,985626795	BUS10-BUS8_345_70	0,0144775	0,101871484	0,100407939
BUS7-BUS8_345_70	0,0155628	0,984557675	BUS7-BUS8_345_70	0,0155628	0,101871484	0,100299025
BUS10-BUS8_345_60	0,0181201	0,982043082	BUS10-BUS8_345_60	0,0181201	0,101871484	0,100042858
BUS7-BUS8_345_60	0,0195472	0,980642608	BUS7-BUS8_345_60	0,0195472	0,101871484	0,099900189
BUS10-BUS8_345_50	0,0211867	0,979036161	BUS10-BUS8_345_50	0,0211867	0,101871484	0,099736536
BUS7-BUS8_345_50	0,0229476	0,977313694	BUS7-BUS8_345_50	0,0229476	0,101871484	0,099561065
BUS10-BUS8_345_40	0,0236839	0,976594362	BUS10-BUS8_345_40	0,0236839	0,101871484	0,099487785
BUS7-BUS8_345_40	0,0256166	0,974708721	BUS7-BUS8_345_40	0,0256166	0,101871484	0,099295691
BUS10-BUS8_345_30	0,0257717	0,974557556	BUS10-BUS8_345_30	0,0257717	0,101871484	0,099280291
BUS7-BUS8_345_30	0,0269881	0,973372825	BUS7-BUS8_345_30	0,0269881	0,101871484	0,0991596
BUS10-BUS8_345_20	0,0278003	0,972582572	BUS10-BUS8_345_20	0,0278003	0,101871484	0,099079095
BUS7-BUS8_345_20	0,0280248	0,972364252	BUS7-BUS8_345_20	0,0280248	0,101871484	0,099056855
BUS10_345	0,028054	0,972335859	BUS10_345	0,028054	0,101871484	0,099053962
BUS7-BUS8_345_10	0,0297108	0,970726227	BUS7-BUS8_345_10	0,0297108	0,101871484	0,098889985
BUS10-BUS7_345_10	0,0308312	0,969639234	BUS10-BUS7_345_10	0,0308312	0,101871484	0,098779251
BUS7_345	0,031386	0,969101428	BUS7_345	0,031386	0,101871484	0,098724464
BUS10-BUS7_345_20	0,0331891	0,967355615	BUS10-BUS7_345_20	0,0331891	0,101871484	0,098546614
BUS10-BUS7_345_90	0,0335721	0,966985189	BUS10-BUS7_345_90	0,0335721	0,101871484	0,098508878
BUS10-BUS7_345_30	0,0349148	0,965687689	BUS10-BUS7_345_30	0,0349148	0,101871484	0,098376699
BUS10-BUS7_345_80	0,0351914	0,965420617	BUS10-BUS7_345_80	0,0351914	0,101871484	0,098349491
BUS10-BUS7_345_40	0,0360823	0,964560907	BUS10-BUS7_345_40	0,0360823	0,101871484	0,098261911
BUS10-BUS7_345_70	0,0362492	0,964399935	BUS10-BUS7_345_70	0,0362492	0,101871484	0,098245512
BUS10-BUS7_345_50	0,0366934	0,963971644	BUS10-BUS7_345_50	0,0366934	0,101871484	0,098201881
BUS10-BUS7_345_60	0,0367492	0,963917856	BUS10-BUS7_345_60	0,0367492	0,101871484	0,098196402
BUS11_500	0,450643	0,637218289	BUS5_138	0,715322	0,127806072	0,062502154
BUS11-BUS15_500_10	0,46445	0,628480675	BUS3-BUS5_138_90	0,716291	0,127806072	0,062441619
BUS14-BUS11_500_90	0,468347	0,626036251	BUS5-BUS2_138_10	0,716942	0,127806072	0,062400982
BUS11-BUS15_500_20	0,475852	0,621355436	BUS3-BUS5_138_80	0,717089	0,127806072	0,06239181
BUS14-BUS11_500_80	0,483396	0,616685568	BUS3_138	0,717584	0,127806072	0,062360934
BUS11-BUS15_500_30	0,485171	0,615591922	BUS3-BUS5_138_70	0,717719	0,127806072	0,062352516
BUS11-BUS15_500_40	0,492662	0,610997751	BUS3-BUS5_138_10	0,718084	0,127806072	0,062329761
BUS14-BUS11_500_70	0,496162	0,608862997	BUS3-BUS5_138_60	0,718184	0,127806072	0,062323528
BUS11-BUS15_500_50	0,498526	0,607425345	BUS5-BUS2_138_20	0,718385	0,127806072	0,062311003
BUS11-BUS15_500_60	0,50292	0,604762173	BUS3-BUS5_138_20	0,718425	0,127806072	0,06230851
BUS11-BUS15_500_70	0,505971	0,602919856	BUS3-BUS5_138_50	0,718486	0,127806072	0,06230471
BUS14-BUS11_500_60	0,50694	0,60233591	BUS3-BUS5_138_30	0,718605	0,127806072	0,062297296
BUS11-BUS15_500_80	0,507773	0,601834373	BUS3-BUS5_138_40	0,718626	0,127806072	0,062295987
BUS15_500	0,507908	0,601753131	BUS3-BUS2_138_10	0,718941	0,127806072	0,062276367
BUS11-BUS15_500_90	0,508401	0,601456539	BUS5-BUS2_138_30	0,719656	0,127806072	0,062231856
BUS15-BUS16_500_10	0,514314	0,597910621	BUS3-BUS2_138_20	0,720134	0,127806072	0,062202116
BUS14-BUS11_500_50	0,515966	0,596923688	BUS5-BUS2_138_40	0,72076	0,127806072	0,06216319
BUS15-BUS14_500_10	0,515987	0,596911152	BUS3-BUS2_138_30	0,721165	0,127806072	0,062138019
BUS15-BUS16_500_20	0,520302	0,59434103	BUS5-BUS2_138_50	0,7217	0,127806072	0,062104784
BUS15-BUS14_500_20	0,522871	0,592816127	BUS3-BUS2_138_40	0,722038	0,127806072	0,062083796
BUS14-BUS11_500_40	0,523429	0,592485428	BUS5-BUS2_138_60	0,722479	0,127806072	0,062056423
BUS15-BUS16_500_30	0,525909	0,591017885	BUS3-BUS2_138_50	0,722754	0,127806072	0,06203936
BUS15-BUS14_500_30	0,528629	0,589412501	BUS5-BUS2_138_70	0,723102	0,127806072	0,062017774
BUS14-BUS11_500_30	0,52948	0,588911124	BUS3-BUS2_138_60	0,723316	0,127806072	0,062004503
BUS15-BUS16_500_40	0,531168	0,58791788	BUS5-BUS2_138_80	0,723568	0,127806072	0,06198888
BUS15-BUS14_500_40	0,533315	0,586656975	BUS3-BUS2_138_70	0,723725	0,127806072	0,061979149
BUS14-BUS11_500_20	0,53424	0,586114568	BUS5-BUS2_138_90	0,723882	0,127806072	0,061969419
BUS15-BUS16_500_50	0,536109	0,585020143	BUS3-BUS2_138_80	0,723982	0,127806072	0,061963222
BUS15-BUS14_500_50	0,536969	0,584517242	BUS2_138	0,724042	0,127806072	0,061959504
BUS14-BUS11_500_10	0,537806	0,584028206	BUS3-BUS2_138_90	0,724088	0,127806072	0,061956654

(A) Índice 1 = $\exp(-v_r)$ cont.		
Identificador do ponto	Vr	Índice 1
BUS15-BUS14_500_60	0,539617	0,582971488
BUS14_500	0,540251	0,582602001
BUS15-BUS16_500_60	0,540757	0,582307279
BUS15-BUS14_500_70	0,541275	0,582005722
BUS15-BUS14_500_90	0,541609	0,581811364
BUS15-BUS14_500_80	0,541942	0,581617653
BUS15-BUS16_500_70	0,545138	0,579761771
BUS15-BUS16_500_80	0,54927	0,577371138
BUS15-BUS16_500_90	0,553174	0,575121475
BUS16_500	0,556866	0,573002041
BUS5_138	0,715322	0,489034617
BUS3-BUS5_138_90	0,716291	0,488560972
BUS5-BUS2_138_10	0,716942	0,488243023
BUS3-BUS5_138_80	0,717089	0,488171256
BUS3_138	0,717584	0,487929671
BUS3-BUS5_138_70	0,717719	0,487863805
BUS3-BUS5_138_10	0,718084	0,487685767
BUS3-BUS5_138_60	0,718184	0,487637001
BUS5-BUS2_138_20	0,718385	0,487538996
BUS3-BUS5_138_20	0,718425	0,487519495
BUS3-BUS5_138_50	0,718486	0,487489757
BUS3-BUS5_138_30	0,718605	0,487431749
BUS3-BUS5_138_40	0,718626	0,487421513
BUS3-BUS2_138_10	0,718941	0,487268
BUS5-BUS2_138_30	0,719656	0,486919728
BUS3-BUS2_138_20	0,720134	0,486687036
BUS5-BUS2_138_40	0,72076	0,486382465
BUS3-BUS2_138_30	0,721165	0,48618552
BUS5-BUS2_138_50	0,7217	0,48592548
BUS3-BUS2_138_40	0,722038	0,485761265
BUS5-BUS2_138_60	0,722479	0,485547092
BUS3-BUS2_138_50	0,722754	0,485413584
BUS5-BUS2_138_70	0,723102	0,48524469
BUS3-BUS2_138_60	0,723316	0,485140859
BUS5-BUS2_138_80	0,723568	0,485018619
BUS3-BUS2_138_70	0,723725	0,484942477
BUS5-BUS2_138_90	0,723882	0,484866347
BUS3-BUS2_138_80	0,723982	0,484817862
BUS2_138	0,724042	0,484788774
BUS3-BUS2_138_90	0,724088	0,484766474
BUS13_138	0,846074	0,429096261
BUS12-BUS13_138_90	0,846306	0,428996722
BUS12-BUS13_138_80	0,84654	0,428896349
BUS12-BUS13_138_70	0,846775	0,42879557
BUS12-BUS13_138_60	0,84701	0,428694815
BUS12-BUS13_138_50	0,847246	0,428593655
BUS12-BUS13_138_40	0,847483	0,42849209
BUS12-BUS13_138_30	0,847721	0,428390121
BUS12-BUS13_138_20	0,847959	0,428288177
BUS12-BUS13_138_10	0,848199	0,4281854
BUS12_138	0,848438	0,428083076
BUS18_69	0,8717	0,418239937
BUS18-BUS17_69_10	0,871898	0,418157133
BUS18-BUS17_69_20	0,872096	0,418074346
BUS18-BUS17_69_30	0,872293	0,417991994
BUS18-BUS17_69_40	0,87249	0,417909658
BUS18-BUS17_69_50	0,872686	0,417827755
BUS18-BUS17_69_60	0,872881	0,417746287
BUS18-BUS17_69_70	0,873076	0,417664834
BUS18-BUS17_69_80	0,87327	0,417583815
BUS18-BUS17_69_90	0,873464	0,417502812
BUS17_69	0,873657	0,417422241

(B) Índice 2 = $\exp(-v_r) * \tau$ cont.			
Identificador do ponto	Vr	Fator τ	Índice 2
BUS11_500	0,450643	0,095871249	0,061091286
BUS11-BUS15_500_10	0,46445	0,095871249	0,060253595
BUS14-BUS11_500_90	0,468347	0,095871249	0,060019244
BUS11-BUS15_500_20	0,475852	0,095871249	0,059570485
BUS14-BUS11_500_80	0,483396	0,095871249	0,059122777
BUS11-BUS15_500_30	0,485171	0,095871249	0,059017927
BUS18_69	0,8717	0,14092	0,058938957
BUS18-BUS17_69_10	0,871898	0,14092	0,058927289
BUS18-BUS17_69_20	0,872096	0,14092	0,058915622
BUS18-BUS17_69_30	0,872293	0,14092	0,058904017
BUS18-BUS17_69_40	0,87249	0,14092	0,058892414
BUS18-BUS17_69_50	0,872686	0,14092	0,058880872
BUS18-BUS17_69_60	0,872881	0,14092	0,058869392
BUS18-BUS17_69_70	0,873076	0,14092	0,058857913
BUS18-BUS17_69_80	0,87327	0,14092	0,058846496
BUS18-BUS17_69_90	0,873464	0,14092	0,058835081
BUS17_69	0,873657	0,14092	0,058823727
BUS11-BUS15_500_40	0,492662	0,095871249	0,058577475
BUS14-BUS11_500_70	0,496162	0,095871249	0,058372812
BUS11-BUS15_500_50	0,498526	0,095871249	0,058234982
BUS11-BUS15_500_60	0,50292	0,095871249	0,057979659
BUS11-BUS15_500_70	0,505971	0,095871249	0,057803033
BUS14-BUS11_500_60	0,50694	0,095871249	0,057747049
BUS11-BUS15_500_80	0,507773	0,095871249	0,057698965
BUS15_500	0,507908	0,095871249	0,057691177
BUS11-BUS15_500_90	0,508401	0,095871249	0,057662742
BUS15-BUS16_500_10	0,514314	0,095871249	0,057322788
BUS14-BUS11_500_50	0,515966	0,095871249	0,057228169
BUS15-BUS14_500_10	0,515987	0,095871249	0,057226967
BUS15-BUS16_500_20	0,520302	0,095871249	0,056980565
BUS15-BUS14_500_20	0,522871	0,095871249	0,05683437
BUS14-BUS11_500_40	0,523429	0,095871249	0,056802665
BUS15-BUS16_500_30	0,525909	0,095871249	0,056661969
BUS15-BUS14_500_30	0,528629	0,095871249	0,056508058
BUS14-BUS11_500_30	0,52948	0,095871249	0,05645999
BUS15-BUS16_500_40	0,531168	0,095871249	0,056364766
BUS15-BUS14_500_40	0,533315	0,095871249	0,05624388
BUS14-BUS11_500_20	0,53424	0,095871249	0,056191879
BUS15-BUS16_500_50	0,536109	0,095871249	0,056086954
BUS15-BUS14_500_50	0,536969	0,095871249	0,05603874
BUS14-BUS11_500_10	0,537806	0,095871249	0,055991855
BUS15-BUS14_500_60	0,539617	0,095871249	0,055890546
BUS14_500	0,540251	0,095871249	0,055855123
BUS15-BUS16_500_60	0,540757	0,095871249	0,055826867
BUS15-BUS14_500_70	0,541275	0,095871249	0,055797956
BUS15-BUS14_500_90	0,541609	0,095871249	0,055779323
BUS15-BUS14_500_80	0,541942	0,095871249	0,055760751
BUS15-BUS16_500_70	0,545138	0,095871249	0,055582824
BUS15-BUS16_500_80	0,54927	0,095871249	0,05535363
BUS15-BUS16_500_90	0,553174	0,095871249	0,055137951
BUS16_500	0,556866	0,095871249	0,054934757
BUS13_138	0,846074	0,127806072	0,054841599
BUS12-BUS13_138_90	0,846306	0,127806072	0,054828878
BUS12-BUS13_138_80	0,84654	0,127806072	0,054816049
BUS12-BUS13_138_70	0,846775	0,127806072	0,054803169
BUS12-BUS13_138_60	0,84701	0,127806072	0,054790292
BUS12-BUS13_138_50	0,847246	0,127806072	0,054777363
BUS12-BUS13_138_40	0,847483	0,127806072	0,054764382
BUS12-BUS13_138_30	0,847721	0,127806072	0,05475135
BUS12-BUS13_138_20	0,847959	0,127806072	0,05473832
BUS12-BUS13_138_10	0,848199	0,127806072	0,054725185
BUS12_138	0,848438	0,127806072	0,054712107

5.5 Considerações finais

O índice I_{ALPLAN} definido neste capítulo considera a influência dos principais parâmetros de afundamentos de tensão: intensidade, frequência de ocorrência e duração. O avanço com relação aos desenvolvimentos anteriores se dá pela incorporação do *fator tempo* τ desenvolvido no capítulo anterior.

A inclusão do índice I_{ALPLAN} em procedimentos de análise de planejamento permite avaliar o desempenho do sistema frente a afundamentos de tensão de uma forma mais refinada, já que as análises passam a considerar a influência do parâmetro duração de afundamento de tensão de uma forma mais ponderada.

Diante dos resultados da análise realizada para o sistema teste utilizado na dissertação, percebe-se o quão relevante pode ser o parâmetro duração de afundamentos de tensão para a análise de desempenho de SEP.

6

Conclusões e Propostas de Continuidade do Trabalho

Procurar minimizar ou, até mesmo, evitar a ocorrência de Afundamentos de Tensão nos sistemas elétricos tem se tornado uma das grandes preocupações do setor elétrico, tanto por parte das empresas concessionárias quanto dos consumidores, tendo em vista os grandes prejuízos que podem causar. Vários têm sido os esforços neste sentido e, dentre eles, se enquadra esta dissertação de mestrado.

Apesar dos desenvolvimentos já realizados para tratar do fenômeno nas etapas de expansão, de forma preventiva, este é um tema ainda inovador, merecedor de investigações e aperfeiçoamentos.

As pesquisas realizadas nesta dissertação acerca do tema afundamento de tensão levaram a um maior aprofundamento sobre a forma de melhor ponderar o parâmetro duração do fenômeno na composição de índices de desempenho.

O fator tempo τ , baseado em uma função ganho harmônico, foi proposto e utilizado na composição do índice I_{ALPLAN} . Os resultados da aplicação desta proposta se apresentam bastante consistentes, sendo considerados no mesmo nível dos demais parâmetros (intensidade e frequência). Desta forma, o uso de índices de desempenho no planejamento da expansão se torna mais preciso quanto à identificação de pontos críticos do SEP, com cada parâmetro sendo ponderado por fatores propostos em um mesmo patamar de detalhamento.

Como continuidade direta desta pesquisa, tem-se a implementação do índice I_{ALPLAN} na ferramenta PlanSag, possibilitando a utilização de todo o ambiente de análise de afundamentos de tensão que esta permite. Desta forma, vários sistemas elétricos reais de grande porte podem ser simulados, incluindo estudos comparativos entre diferentes alternativas de expansão.

Adicionalmente, com o uso do índice na prática de planejamento, conforme tratado no capítulo 4, a média harmônica poderia ser “sintonizada” por meio de pequenos ajustes, tornando a técnica ainda mais refinada.

Espera-se que este trabalho possa contribuir para o processo de decisão realizado pelas equipes de planejamento das empresas de energia e, com isto, propiciar uma melhor qualidade de energia suprida pelas mesmas, trazendo benefícios para todo o setor elétrico, principalmente os consumidores.

7

Referências Bibliográficas

- [ANEEL, 2011] Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, **“PRODIST – Procedimentos de Distribuição, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica”**, 2011.
- [AspenTM, 2009] Advanced System for Power Engineering, Inc – ASPENTM, **“Supporting Documents”**, Version 11.3. www.aspeninc.com.
- [Bollen, 2000] Bollen, M.H.J., **“Understanding Power Quality Problems – Voltage Sag and Interruption”**, New York, IEEE Pres 2000, 541p.
- [Campici, 2009] Campici, P.P.F., **“Afundamentos de Tensão no Contexto da Expansão dos Sistemas Elétricos: Proposta de Índices Considerando Dados do Sistema de Detecção de Raios”**, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Fevereiro de 2009.
- [CEMIG, 1995] Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG, **“Relatório de Acompanhamento do Desempenho das LT do Sistema Cemig sob a ação de Descargas Atmosféricas – Período 1970 a 1993”**, Belo Horizonte – 30.000 ST/DN3-011, 1995.
- [Cigré, 2004] Joint WG CIGRE C4.07/CIRED, **“Power Quality Indices and Objectives”**, Technical Brochure 261, October 2004.
- [Cigré, 2009] **CIGRE Brochure Voltage Dip Evaluation and Prediction Tools**, nº. 372, pp. 1-100, TF C4.102, February 2009.
- [Dias, 2006] 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, Dezembro de 2006.
- [IEEE, 1995] Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE, **“IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality”**, Standard 1159 – 1995, 1995. www.ieee.org.
- [IEEE, 1997] Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE, **“IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems”**, (IEEE Gold Book), IEEE Standard 493 – 1997, 1997.

- [Matlab[®], 2004] Matlab[®], Version 7.0.1.24704. <http://www.mathworks.com>.
- [Menezes, 2003] Menezes, T.V., “**Crítérios e Procedimentos para Identificação e Avaliação de Barras Suscetíveis a Afundamentos de Tensão**”, Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica – SBQEE, 2003.
- [Menezes, 2007] Menezes, T.V., “**Estratégia para Análise de Afundamento de Tensão no Planejamento do Sistema Elétrico**”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Outubro de 2007.
- [ONS, 2010] Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, “**Submodulo 2.8 – Gerenciamento dos Indicadores de Desempenho da Rede Básica e dos Barramentos dos Transformadores de Fronteira, e de seus Componentes**”, Setembro de 2010.
- [P&D D-224, 2010] Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento ANEEL–CEMIG–LRC/UFMG, “**Desenvolvimento de uma Ferramenta Computacional para Analise de Afundamento de Tensão Aplicada ao Planejamento da Expansão**”, ciclo 2005 – 2006, finalização em 2010.
- [Rel. 4-3,2010] **Relatório Técnico 4-3 – Estudo de Casos Testes**, Projeto ANEEL P&D D-224 – LRC/UFMG – CEMIG, Dezembro de 2010.
- [Vale, 2006] 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**”, International Lightning Detection Conference (ILDC2006), Tucson, USA, April 2006.
- [Vale, 2010] Vale, M. H. M.; Dias, R. N.; Menezes, T. V.; Visacro, S., “**A Useful Tool Using Lightning Location System Data for Computing Voltage Sag Analysis into Expansion Planning Activities**”, International Conference on Lightning Protection (ICLP’2010), September 2010.
- [Vale, 2011] Vale, M.H.M.; Cardoso, A.G.G.; Dias, R.N.; Visacro, S; Pinto, W.L.F.; Menezes, T.V., “**Aplicativo PlanSag –Avaliação de Afundamentos de Tensão no Planejamento da Expansão do Sistemas Elétricos**”, XIV Encontro Ibero-americano do CIGRÉ – ERIAC, 2011.
- [Visacro, 2005] Visacro, S. F. “**Descargas Atmosféricas – Uma Abordagem de Engenharia**”, São Paulo, ArtLiber, 2005, 272p.