

Monitoramento de Afundamentos Momentâneos de Tensão em Laboratório da UFMG

Patrícia de Souza Carletto, Igor Amariz Pires e Braz de Jesus Cardoso Filho

patricia.carletto@terra.com.br; iap@ufmg.br; cardosob@ufmg.br

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Minas Gerais – Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Resumo — Um dos fatores de degradação da Qualidade de Energia Elétrica (QEE) no Setor Industrial é o afundamento momentâneo de tensão (AMT). Por ser um problema estocástico, são necessários dados estatísticos para escolha da solução mais apropriada a fim de mitigar este fenômeno. Este artigo apresenta afundamentos momentâneos de tensão ocorridos no Laboratório Tesla Engenharia de Potência localizado na Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais durante o ano de 2016. Os distúrbios medidos foram classificados por tipo, duração e magnitude.

Palavras-chaves — Afundamentos Momentâneos de Tensão, Mitigação, Qualidade de Energia.

I. INTRODUÇÃO

O afundamento momentâneo de tensão (AMT) é um dos problemas de qualidade de energia do setor industrial mais importantes, devido aos danos que podem causar aos processos produtivos. Apesar de serem fenômenos de curta duração, podem interromper o fluxo produtivo, gerando perdas e atrasos de produtividade, refugos e perda de qualidade, devido ao tempo de retomada da produção.

Os afundamentos são caracterizados como uma redução nos valores de tensão (rms) com faixas específicas de variação de tensão residual e magnitude. De acordo com a IEEE 1159 [1], o afundamento momentâneo de tensão é caracterizado como uma redução nos valores de tensão entre 0,1 a 0,9 pu (tensão residual), com duração de 0,5 a 30 ciclos. Para a IEC 61000-4-11 [2], o afundamento é definido de forma distinta para 50 e 60 Hz, separados por classes 1, 2, 3 ou 4 referentes à proteção eletromagnética do produto, com número de ciclos e magnitudes variados.

De acordo com o PRODIST [3], o afundamento de tensão é uma variação de tensão de curta duração com desvios significativos no valor eficaz da tensão em curtos intervalos de tempo. São divididos em variação momentânea de tensão e variação temporária de tensão. O monitoramento apresentado nesse artigo trata das variações momentâneas de tensão, denominadas afundamentos momentâneos de tensão. A duração do AMT deve ser superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos (1). A magnitude ou amplitude da tensão (valor eficaz) em relação a tensão de referência deve ser superior ou igual a 0,1 pu e inferior a 0,9 pu (2).

$$1 \text{ ciclo} \leq \text{AMT}_{(\text{tempo})} \leq 3 \text{ segundos} \quad (1)$$

$$0,1 \text{ pu} \leq \text{AMT}_{(\text{magnitude})} < 0,9 \text{ pu} \quad (2)$$

Muitas cargas são sensíveis aos afundamentos, especialmente as cargas eletrônicas. O tipo de afundamento monofásico, bifásico ou trifásico, tanto quanto a sua magnitude e tempo de duração determinam as cargas susceptíveis aos afundamentos [4]. Sendo assim, há necessidade de conhecer o perfil de ocorrência dos eventos, para determinar a melhor solução para mitigação destes afundamentos.

Foi feito um monitoramento no Laboratório Tesla da UFMG durante 12 meses, com o objetivo de conhecer as características dos afundamentos. Os resultados são apresentados neste trabalho.

Com os resultados do monitoramento foi possível fazer uma análise utilizando compensadores série de tensão para mitigação dos afundamentos.

Este artigo possui 5 seções. A próxima seção detalha o sistema de medição utilizado. Na seção III o resultado dos afundamentos monitorados serão apresentados. A seção IV mostra uma análise da compensação dos distúrbios, utilizando compensadores série de tensão. E por fim, conclusões são mostradas na seção V.

II. O SISTEMA DE MEDIÇÃO

O sistema de medição projetado para detecção e armazenamento do AMT foi desenvolvido no Laboratório Tesla Engenharia de Potência, laboratório pertencente a Escola de Engenharia da UFMG. Este sistema foi denominado como Sag Captor Fig. 1 [5], composto por um microcomputador, um condicionador de sinais alimentado por um Nobreak com autonomia de 30 minutos e uma placa de aquisição de dados.

O sistema condicionador de sinais permite a aquisição de 12 sinais de tensão com magnitude de 440 V com uma frequência de amostragem de 2 kHz. A placa de aquisição utilizada é o modelo DAQCard 6062E de fabricação da National Instruments (NI).

O software de aquisição de dados e análise da qualidade de energia dispõe de recursos que permitem a visualização dos sinais adquiridos [6].

O presente trabalho foi realizado com o apoio financeiro da CAPES – Brasil.



Fig. 1. Sistema de Medição Sag Captor

III. RESULTADO DA MONITORAÇÃO

Os resultados a serem apresentados são do período de janeiro a dezembro de 2016. O monitoramento feito em um ano completo facilita a visualização e análise, pois, contempla as quatro estações do ano, visto que o fenômeno em análise possui uma correlação com questões climáticas, principalmente em relação a precipitação [6].

O ano de 2016 teve um total de 102 afundamentos de tensão, detalhado mês a mês na Fig. 2. A média mensal, portanto, foi de 8,5 afundamentos/mês.

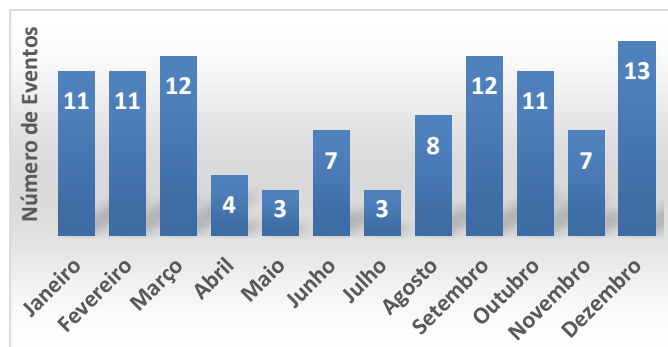


Fig. 2. Número de Afundamentos registrados em 2016

A Fig. 3 mostra o índice de precipitação em milímetros na região em que os afundamentos foram monitorados. Há uma relação dos meses chuvosos com o número de afundamentos, mas não tão direta quanto nos anos anteriores [6]. A tendência é que meses mais chuvosos possuam mais afundamentos de tensão. Exemplo seriam janeiro e dezembro com precipitações de 279 e 350 mm/mês e AMT de 11 e 13 eventos/mês. Por outro lado, meses de maio e julho que tiveram baixa precipitação (23 e 18 mm/mês) tiveram 3 e 3 afundamentos, respectivamente.

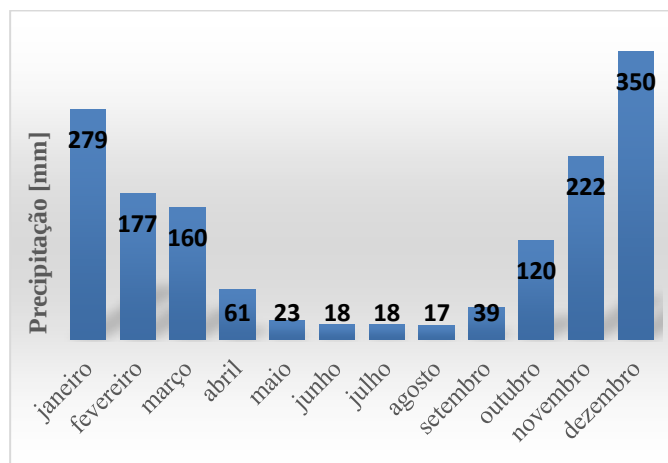


Fig. 3. Precipitação no ano de 2016

Os eventos por tipo de afundamento são representados na Fig. 4. Ocorreram 33 afundamentos monofásicos, 39 bifásicos e 30 trifásicos. Os afundamentos bifásicos foram os mais representativos com 38% dos eventos. Os monofásicos representam 32% e trifásicos 30% do total de afundamentos monitorados.

Os 39 eventos bifásicos, 38% em um total de 102 eventos, estão distribuídos por fase de acordo com a Fig. 5. Nas fases AB ocorreram 11 eventos, representando 28% dos afundamentos. Nas fases BC foram 6 eventos, ou seja, 15%. Nas fases CA 22 eventos, representando 57%.

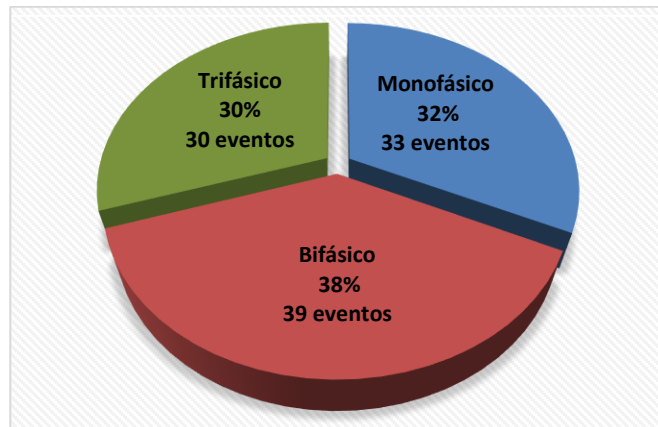


Fig. 4. Eventos por tipo de afundamentos

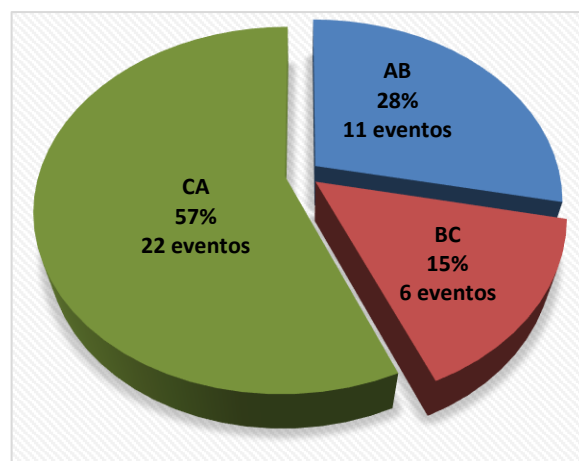


Fig. 5. Eventos bifásicos por fase

A Fig. 6 representa os 33 afundamentos monofásicos distribuídos no gráfico por fase afetada. A fase A participa com 16 eventos, 49%. A fase B com 7 eventos e 21%. A fase C com 10 eventos e 30%. A fase mais afetada nos distúrbios monofásicos foi a fase A seguida da fase C. Esta concentração de afundamentos em uma fase, fenômeno também observado na Fig. 5, pode ser explicado pela distribuição desigual de cargas ou mesmo, pela proximidade de uma fase a galhos de árvores, por ter-se na região, um sistema distribuído convencional aéreo. Estudos estão sendo realizados para obter-se uma explicação definitiva.

A Fig. 7 representa o número de eventos por hora do dia. Os afundamentos ocorrem em maior número no período da tarde, com maior incidência no horário de 17:00 às 18:00 h com 12 eventos. A explicação da concentração neste horário também é ligada à precipitação, principalmente chuvas de verão, que normalmente ocorrem no fim do dia na região monitorada.

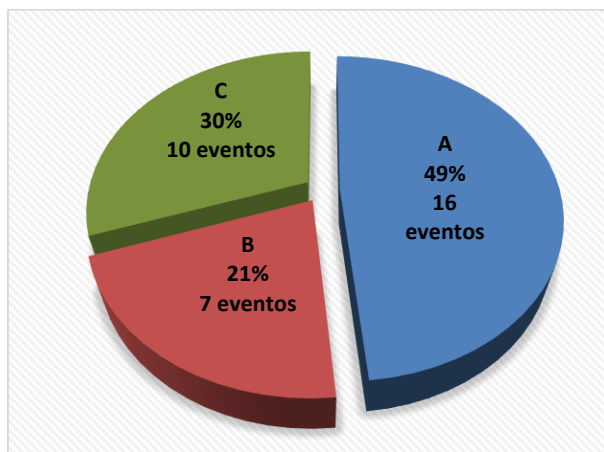


Fig. 6. Afundamentos monofásicos por fase

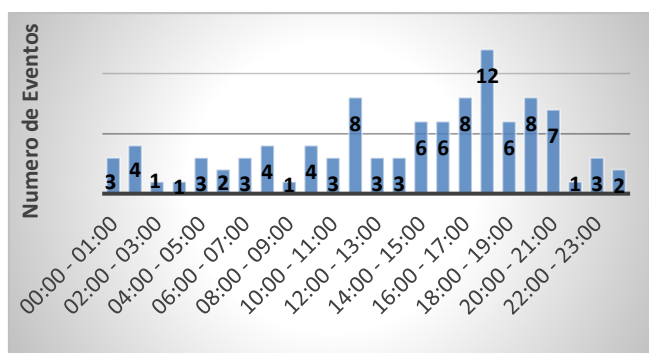


Fig. 7 – Número de Eventos por hora do dia

A fig. 8 representa o número de eventos em função da duração do afundamento em ms. O percentual de eventos entre 1 ciclo e 100 ms é de 62%, com ocorrência de 63 eventos. Eventos entre 100 ms e 200 ms representam 21% com 21 eventos. O maior número de eventos ocorreu nos afundamentos com menor tempo de duração, 1 ciclo a 200 ms que representam 83% dos distúrbios com 84 eventos.

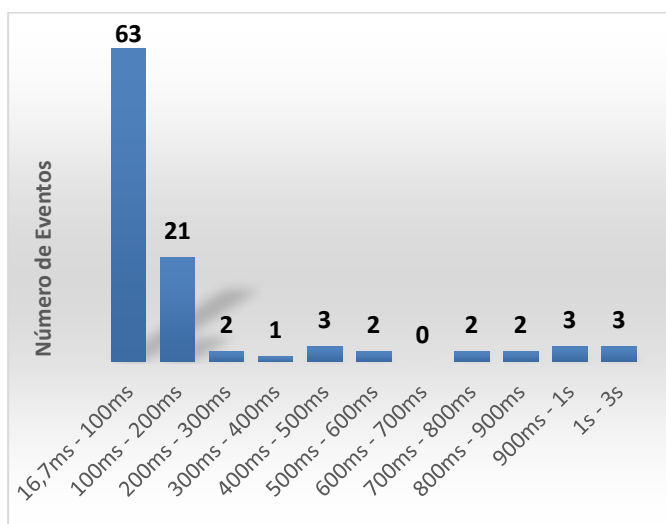


Fig. 8 – Número de afundamentos por duração

Na Fig. 9 é possível observar a maior incidência de eventos com tensão residual entre 60% e 90%. Eventos acima de 80% representam 23 afundamentos (23% do total). Eventos acima de 70% e menores que 80% representam 34 afundamentos (33% do total). Eventos acima de 60% e menores que 70% representam 24 afundamentos (23% do total). Assim, o total de eventos com tensão residual acima de 60% foi de 81

afundamentos de tensão, representando 79% de todos os afundamentos que ocorreram.

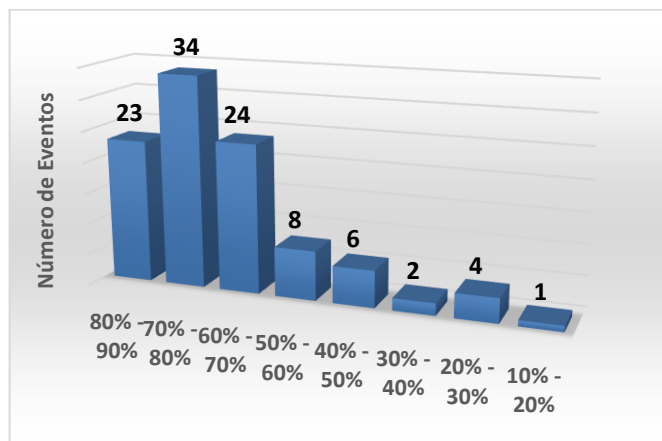


Fig. 9. Número de afundamentos por tensão residual

A Fig. 10 representa um afundamento monofásico que ocorreu na fase A, com tensão residual de 71,48% com duração de 116,0 ms. A fase B e C permaneceram durante o evento com tensão acima de 90%. A Fig. 11 mostra a forma de onda no instante do afundamento.

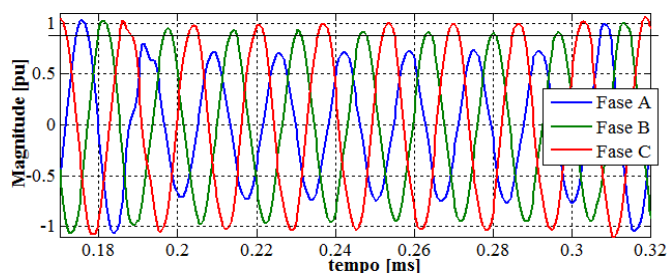


Fig. 10. Ondas senoidais - afundamento monofásico - fase A

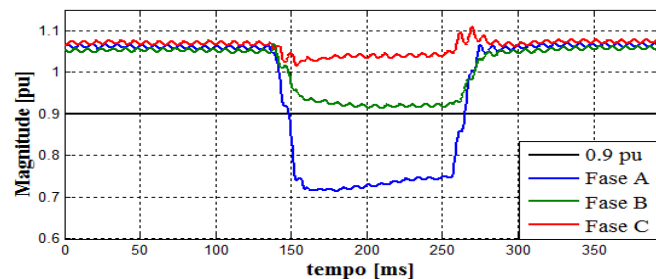


Fig. 11. Forma de onda do afundamento - fase A - 71,48% - 116,0 ms

A Fig. 12 representa um afundamento bifásico que ocorreu nas fases B e C. A tensão residual nesse afundamento na fase mais afetada foi de 82,85% durante 65,0 ms. A Fig. 13 mostra a forma de onda no instante do afundamento.

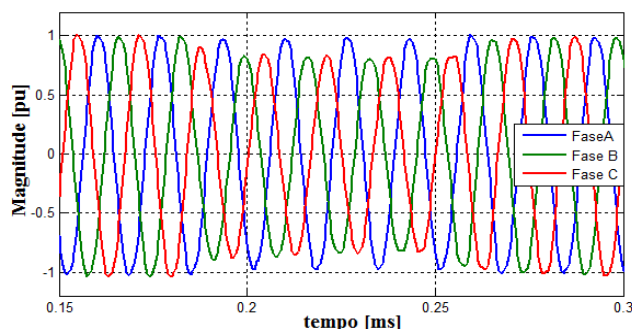


Fig. 12. Ondas senoidais - afundamento bifásico - fases BC

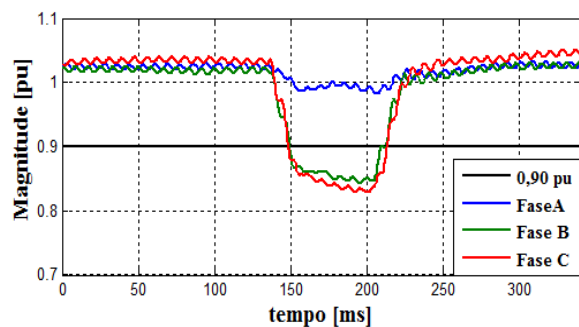


Fig. 13. Forma de onda do afundamento - fases BC – 82,85% - 65,0 ms

A Fig. 14 representa um afundamento trifásico com tensão residual na fase mais afetada de 71,42% (fase A) com duração de 1,04 s. As fases B e C durante o afundamento estavam com a tensão residual de 71,70% e 73,86%, respectivamente. A Fig. 15 mostra a forma de onda no instante do afundamento

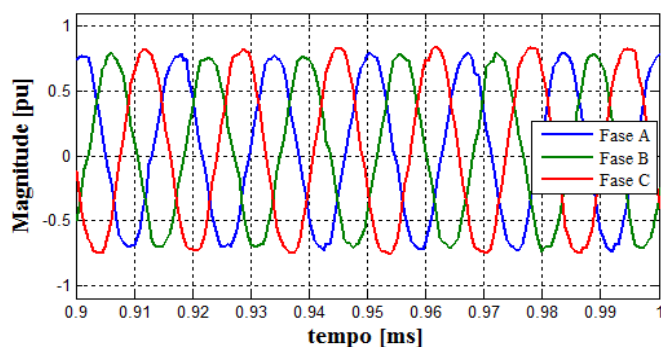


Fig. 14. Ondas senoidais - afundamento trifásico – fases ABC

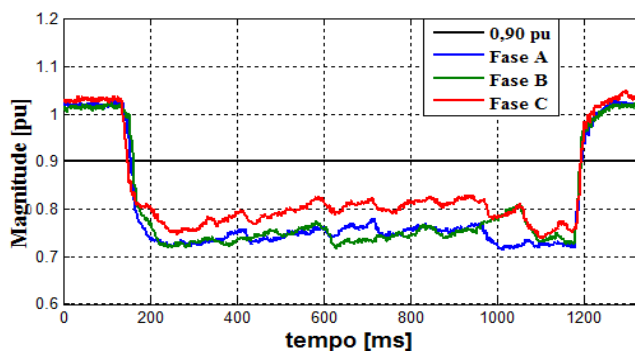


Fig. 15. Forma de onda do afundamento -fases ABC – 71,42% - 1,04 s

Somando o número de eventos por fase nos afundamentos monofásicos, bifásicos e trifásicos, obtêm-se o número de eventos por fase, conforme Tabela I.

Para obter o número de eventos por fase [7] soma-se o número de eventos trifásicos (30) ao número de eventos bifásicos, fase AB (11) e CA (22) aos eventos da fase A (16). Exemplo:

$$\text{Fase A} = 30 (\text{ABC}) + 11 (\text{AB}) + 22 (\text{CA}) + 16 (\text{A})$$

$$\text{Fase A} = 79 \text{ eventos.}$$

$$\text{Fase B} = 30 (\text{ABC}) + 11 (\text{AB}) + 6 (\text{BC}) + 7 (\text{B})$$

$$\text{Fase B} = 54 \text{ eventos}$$

$$\text{Fase C} = 30 (\text{ABC}) + 6 (\text{BC}) + 22 (\text{CA}) + 10 (\text{C})$$

$$\text{Fase C} = 68 \text{ eventos}$$

Observando a Tabela I, ocorreram mais afundamentos na fase A do que na fase B e C. Na fase A o percentual é de 39%, na fase B de 27% e na fase C de 34%.

TABELA I. AFUNDAMENTOS POR FASE

Fase	Trifásico	Bifásico	Monofásico	Total	%
A	30	33	16	79	39%
B	30	17	7	54	27%
C	30	28	10	68	34%

O desequilíbrio (D) dos afundamentos bifásicos é mostrado na Tabela II. O afundamento é considerado equilibrado se a relação da magnitude entre a tensão residual das fases afetadas pelo afundamento for menor ou igual a 2%. Será desequilibrado se a relação entre os valores de tensão residual das fases afetadas for maior do que 2%.

A Tabela II representa o desequilíbrio dos afundamentos bifásicos por fase afetada. O total de afundamentos bifásicos com desequilíbrio maior do que 2% é de 34 afundamentos, 87%. Apenas 5 afundamentos foram equilibrados, ou seja, 13% dos afundamentos bifásicos são equilibrados.

TABELA II. DESEQUILÍBRIO DOS AFUNDAMENTOS BIFÁSICOS

Fases afetadas	Equilíbrio ≤ 2%	Desequilíbrio > 2%
AB	2	9
BC	1	5
CA	2	20
Total	5	34
Percentual Total	13%	87%

A Fig. 16 classifica os 34 afundamentos bifásicos desequilibrados por faixa de desequilíbrio. A primeira faixa é de afundamentos maiores do que 2% e menores ou iguais a 10%, que representam 38% ou 13 afundamentos desequilibrados. A segunda faixa é representada por desequilíbrio maiores do que 10% e menores ou iguais a 20%, que equivale a 11 eventos ou 32%. A terceira faixa é de afundamentos maiores do que 20% e menores ou iguais a 30%, com 10 eventos, representado 30% dos desequilíbrios dos afundamentos bifásicos.

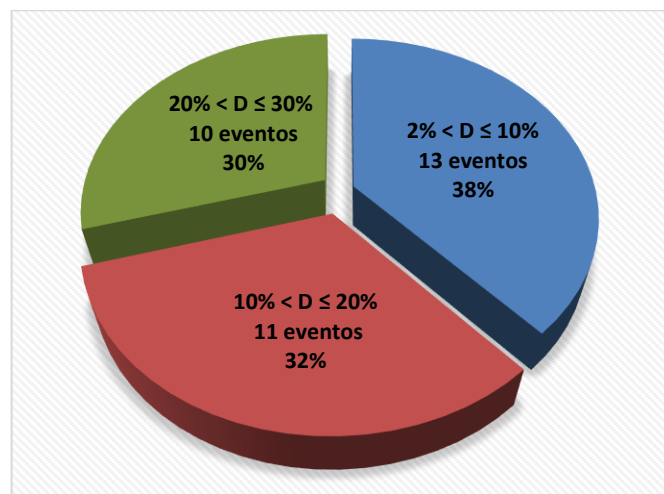


Fig.16. Desequilíbrio dos afundamentos bifásicos

A Fig. 17 representa um afundamento bifásico equilibrado, ou seja, a relação da tensão residual entre as fases afetadas é menor ou igual a 2%.

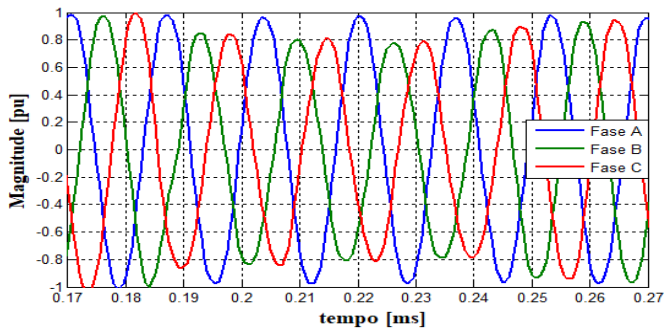


Fig. 17. Afundamento bifásico equilibrado – fases BC

A Fig. 18 representa um afundamento bifásico com desequilíbrio maior que 10% e menor ou igual a 20%. Nesse evento a Fase C não teve afundamento, pois a tensão residual ficou com 91,63%. A fase A com 62,75% e a Fase B com 82,08%. O desequilíbrio desse afundamento foi de 19,3%.

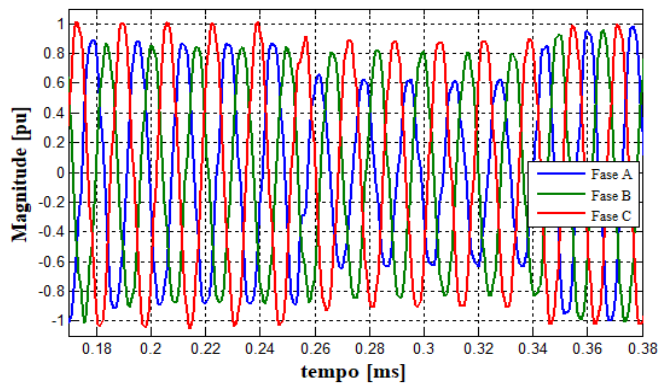


Fig. 18. Afundamento bifásico desequilibrado de 19,3% - Fase AB

Os desequilíbrios (D) dos afundamentos trifásicos foram calculados verificando o valor da tensão residual da fase mais afetada no afundamento, em relação a tensão residual da fase menos afetada. A Tabela III representa o desequilíbrio dos afundamentos trifásicos. Em 30 afundamentos trifásicos, 28 afundamentos foram desequilibrados e 2 afundamentos foram equilibrados. Em valores percentuais, 93% dos afundamentos são desequilibrados e apenas 5% dos afundamentos são equilibrados.

TABELA III. DESEQUILÍBRIO DOS AFUNDAMENTOS TRIFÁSICOS

Fases afetadas	Equilíbrio $\leq 2\%$	Desequilíbrio $> 2\%$
ABC	2	28
Percentual	7%	93%

Os desequilíbrios dos afundamentos trifásicos estão distribuídos em faixas de valores maiores do que os afundamentos bifásicos. Os trifásicos atingem valores até 70% de desequilíbrio e os bifásicos tiveram o maior valor na faixa de 20 a 30%.

Os desequilíbrios dos afundamentos trifásicos são classificados por faixa na Fig. 19. Os maiores números de desequilíbrios ocorreram acima de 2% e menores ou iguais a 10%, com 14 eventos ou 50% do total de 28 afundamentos desequilibrados. Os valores maiores que 10% e menores ou

iguais a 30% representam 3 eventos ou 11%. Afundamentos maiores que 30% e menores ou iguais a 50% representam 7 eventos ou 25%. Afundamentos maiores do que 50% e menores ou iguais a 70% são 4 eventos ou 14%.

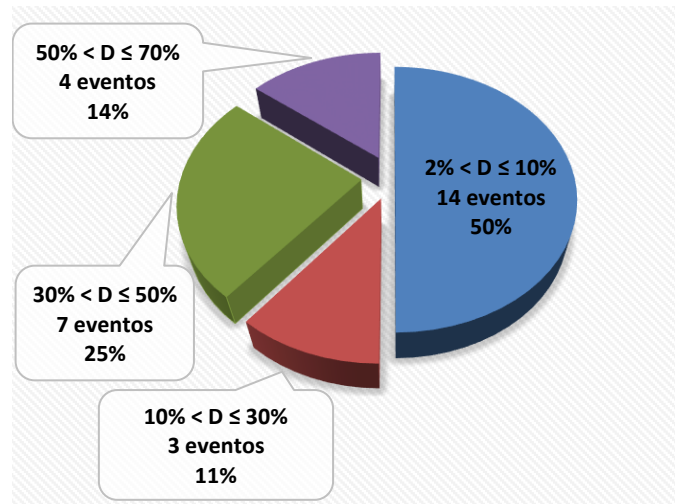


Fig.19. Desequilíbrio dos afundamentos trifásicos

A Fig. 20 representa um afundamento trifásico equilibrado. A tensão residual entre a fase mais afetada e a menos afetada é menor do que 2%.

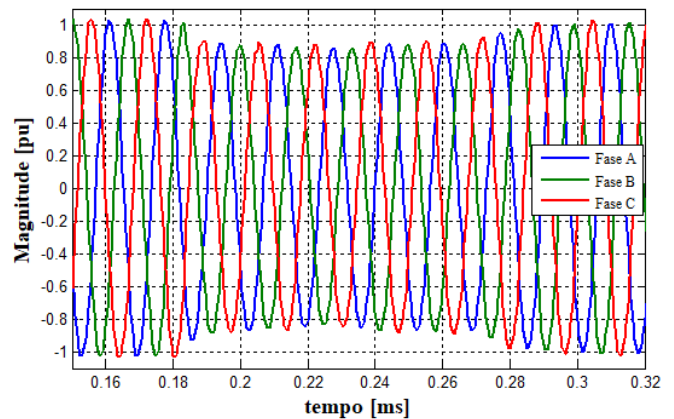


Fig. 20. Afundamento trifásico equilibrado

A Fig. 21 representa um afundamento trifásico com desequilíbrio de 73,7%. A Fase A tem uma tensão residual de 12,07%, a fase B de 78,61% e a fase C, que é a fase menos afetada de 85,75%. A diferença entre a fase menos afetada (C) para a fase mais afetada (A) é de 73,7%.

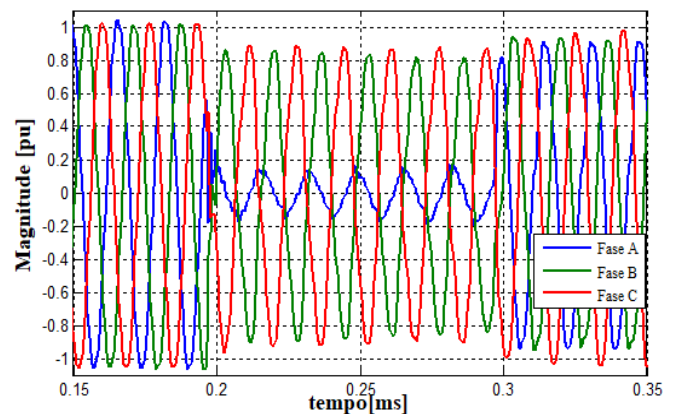


Fig. 21. Afundamento trifásico desequilibrado de 73,7%

IV. COMPENSAÇÃO DOS DISTÚRBIOS

A forma mais simples para mitigar afundamentos de tensão com custo praticamente irrisório é a mudança da carga para a fase menos afetada [7], que é a fase B com 27% dos afundamentos.

Outra forma de mitigação dos afundamentos é a instalação de um Compensador Série de Tensão (CST) para compensação dos distúrbios, que pode ser feita de acordo com a necessidade de mitigação dos afundamentos: na fase mais afetada ou na fase menos afetada.

O CST mostrado na Fig. 22 [8] é um dispositivo baseado em eletrônica de potência, instalado entre a rede e a carga a ser protegida. Na presença de um afundamento momentâneo de tensão, ele sintetiza e injeta a tensão faltante, para que a carga possa ter em seus terminais, uma tensão com valores nominais a todo instante.

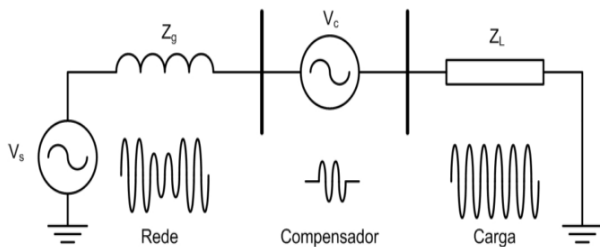


Fig. 22. Compensador Série de Tensão

A instalação de um compensador na fase mais afetada (fase A), reduz a mitigação dos afundamentos em 49%. E na fase menos afetada (fase B), reduz em 21%.

Em circuitos trifásicos deve ser avaliado e definido de acordo com o tipo de carga que será mitigado o afundamento. Pode ser instalado tanto na fase mais afetada quanto na menos afetada, depende do tipo de carga que está instalado nessa fase e do percentual de afundamentos que se deseja atenuar.

Em circuitos trifásicos, quando se instala um compensador na fase mais afetada, os afundamentos passam a ser somente bifásicos e monofásicos. Se a instalação ocorrer na fase A, os afundamentos monofásicos na fase A deixarão de ocorrer, reduzindo os afundamentos monofásicos em 49%, conforme Fig. 6. Afundamentos monofásicos por fase.

Os afundamentos bifásicos com incidência na fase A podem ser reduzidos em 85% em função dos afundamentos AB (28%) e CA (57%). Os afundamentos passariam a ser monofásicos, o que em algumas cargas trifásicas, pouca influência teria. Exemplo são alguns conversores de frequência que possuem excelente ride-through perante afundamentos monofásicos [7].

V. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou afundamentos momentâneos de tensão ocorridos no ano de 2016 no Laboratório Tesla Engenharia de Potência, localizado na Universidade Federal de Minas Gerais. Analisando os dados coletados, o tipo de afundamento mais recorrente foi o bifásico. A fase mais afetada foi a fase A, independente do tipo de AMT.

Diante dos dados coletados, algumas propostas de mitigação são apresentadas. A mais simples e de menor custo

seria remanejar as cargas monofásicas mais sensíveis para a fase menos afetada (fase B).

Para mitigar uma quantidade maior de afundamentos o ideal é instalar um CST na fase mais afetada (fase A), reduzindo assim 49% dos eventos em circuitos monofásicos, Fig. 6. Afundamentos monofásicos por fase.

Quanto ao tempo de duração dos eventos, a maior parte está concentrada entre 1 ciclo e 200ms, Fig. 8. Número de afundamentos por duração.

Quanto à tensão residual o maior número de eventos ocorrerem entre 60% a 90%, Fig. 9. Número de afundamentos por tensão residual.

Quanto ao desequilíbrio, a maior parte dos afundamentos são desequilibrados, tanto os bifásicos (87%) quanto os trifásicos (93%), Fig. 16 e 19. Desequilíbrio dos afundamentos.

O maior número de afundamentos que ocorreram durante a monitoração dos dados desse trabalho foram os afundamentos bifásicos. Esse fato pode ter ocorrido devido ao tipo de ligação do transformador. Transformadores abaixadores (Δ -Yn), na ocorrência de distúrbios monofásicos, por exemplo, do tipo B [4] fazem com que, na baixa tensão, o fenômeno seja equivalente a um afundamento do tipo C, ou seja, bifásico. Assim, a ocorrência de faltas fase-terra em sistemas de alta e média tensão fazem com que a baixa tensão tenha um fenômeno não propriamente de afundamento monofásico.

Os números apresentados auxiliam no projeto e desenvolvimento de Compensadores Série de Tensão, principalmente nos cálculos do barramento c.c..

REFERÊNCIAS

- [1] IEEE Transmission and Distribution Committee, *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. 2009.
- [2] IEC, "INTERNATIONAL STANDARD IEC 61000-4-11 TEST Testing and measurement techniques – Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests," *Control*, 2004.
- [3] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, "Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional - PRODIST," *Módulo 8 - Qual. da Energ. elétrica, Revisão 7*, Brasília, 2016.
- [4] M. H. Bollen, *Understanding Power Quality Problems*. New York, USA, IEEE, 1999.
- [5] S. M. Silva, "Estudo E Projeto de uma Restaurador Dinâmico de Tensão," *Dissertação de Mestrado*, UFMG, 1999.
- [6] F. dias de Oliveira, "Monitoramento e Análise de Afundamentos Momentâneos de Tensão," *Dissertação de Mestrado*, UFMG, 2015.
- [7] I. Pires, F. de Oliveira, S. Silva, and B. de Filho, "On the Application of Single-phase Voltage Sag Compensators in Three-Phase Systems," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 9994, no. c, p. 8, 2016.
- [8] I. A. Pires, B. D. J. Cardoso Filho, and S. M. Silva, "Compensador série de tensão em onda quadrada para mitigação de afundamentos de tensão," *Sba Control. Automação Soc. Bras. Autom.*, vol. 23, no. 2, pp. 164–178, Apr. 2012.