



V SBQEE
Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica
17 a 20 de Agosto de 2003
Aracaju – Sergipe – Brasil



Código: AJU 04 132
Tópico: Análise, Diagnósticos e Soluções

PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DA SENSIBILIDADE DE CARGAS E PROCESSOS INDUSTRIAIS FRENTE A AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Roberto Chouhy Leborgne*	José Policarpo G. de Abreu	Alexandre Afonso Postal
José Maria de Carvalho Filho	Thiago Clé de Oliveira	Luiz Henrique Zaparoli
Universidade Federal de Itajubá	Universidade Federal de Itajubá	DME - Poços de Caldas

RESUMO

Este trabalho propõe uma metodologia para caracterização da sensibilidade de cargas e processos industriais frente a afundamentos de tensão, apoiado num sistema de monitoração de Qualidade de Energia e de coleta de dados de processo. A metodologia proposta é aplicada a uma indústria de manufatura de cabos de alumínio e condutores de eletricidade. São apresentados os resultados obtidos da caracterização da sensibilidade de um processo desta indústria frente a afundamentos de tensão.

PALAVRAS-CHAVE

Afundamentos de tensão, Sensibilidade de cargas, Monitoração da qualidade da energia elétrica.

1.0 - INTRODUÇÃO

A sensibilidade de equipamentos eletro-eletrônicos vem sendo apresentada através de uma curva num gráfico bi-dimensional que relaciona a intensidade e a duração dos distúrbios que afetam o funcionamento normal destes dispositivos.

Duas curvas são amplamente utilizadas para representar de forma geral a sensibilidade dos equipamentos frente a afundamentos de tensão [1]. A primeira, mais antiga, conhecida como

curva CBEMA e a segunda publicada mais recentemente, chamada de curva ITIC. No entanto, estas curvas somente consideram a intensidade e a duração dos distúrbios, e são aplicáveis a equipamentos monofásicos.

Diversas publicações assinalam que os equipamentos são sensíveis a evolução de outras características dos afundamentos de tensão, tais como o salto do ângulo de fase, o desequilíbrio e assimetria dos fasores de tensão e o ponto de início do afundamento [2]. Estes artigos indicam a necessidade de caracterizar os afundamentos de tensão através da sua intensidade, duração e de algum outro parâmetro adicional, dentre aqueles mencionados anteriormente.

Na literatura, também é proposta uma caracterização alternativa dos afundamentos de tensão através de um único parâmetro [1][2]. Através desta metodologia torna-se mais simples a comparação dos eventos do ponto de vista da severidade, mas as publicações alertam sobre a possível inconsistência no cálculo de sensibilidade de equipamentos através destas metodologias a um parâmetro.

Embora os afundamentos de tensão sejam um item de grande relevância no desempenho dos processos industriais, ainda não existe uma norma que estabeleça os procedimentos para determinar a sensibilidade destes processos, frente ao distúrbio em questão, através da monitoração da qualidade da energia elétrica fornecida.

Neste contexto, a principal contribuição deste trabalho é a proposição de uma metodologia para

caracterizar a sensibilidade de processos industriais frente a afundamentos de tensão.

2.0 - METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia proposta para caracterização da sensibilidade de processos industriais frente a afundamentos de tensão através da monitoração de QEE consta das seguintes etapas [6]:

- Especificação do sistema de monitoração;
- Escolha dos processos a serem monitorados;
- Escolha dos locais de monitoração;
- Metodologia para caracterização dos distúrbios;
- Método para avaliar o impacto dos distúrbios.

2.1 Especificação do sistema de monitoração

Os requisitos mínimos estabelecidos para o sistema de monitoração de QEE são:

- Registro de intensidade e duração dos afundamentos em cada fase;
- Gravação da oscilografia de no mínimo 60 ciclos da onda de tensão com uma taxa de amostragem mínima de 16 pontos por ciclo;
- Exportação dos dados brutos, ou seja, da oscilografia para pós tratamento por outros programas;
- Cálculo do valor RMS da tensão através de uma janela de 1 ciclo com periodicidade de $\frac{1}{2}$ ciclo. Desta forma é possível registrar afundamentos com duração de até $\frac{1}{2}$ ciclo;
- Memória mínima de 4 Mbytes, que permite uma autonomia aproximada de 2 meses de monitoração sem perda de registros.

Levando-se em consideração a limitação dos monitores para caracterizar os eventos segundo as diversas metodologias indicadas neste trabalho, considera-se um requisito imprescindível para a caracterização alternativa dos eventos, a capacidade do sistema de monitoração de fornecer os dados amostrados da oscilografia do sinal de tensão. De posse destes dados, é possível aplicar qualquer metodologia de caracterização dos afundamentos de tensão, através da utilização de programas, tais como, MS-Excel e MatLab.

2.2 Escolha dos processos a serem monitorados

A metodologia para escolha dos processos pode seguir vários critérios definidos, dentre eles: o critério de maior custo devido a paradas não programadas e o critério de maior número de paradas dos equipamentos devido a afundamentos de tensão.

Primeiramente, devem ser identificados os processos dentro da planta industrial. Um processo está definido pelas suas cargas e seu sistema de controle. Cada processo identificado deve possuir o mínimo de interligações, elétricas ou mecânicas com os outros processos. Para cada processo devem ser estimados os custos ocasionados por cada interrupção não programada e o número de paradas anuais devidas a distúrbios na tensão de suprimento.

O custo das paradas não programadas pode ser estimado através da contabilização dos seguintes itens:

- Perdas materiais: perda de matérias primas processadas, perda de capacidade de produção, etc;
- Perda de Homens-hora, custo de manutenção, reinício de produção, Homens-hora para produção perdida, etc;
- Custos auxiliares: custos devido a atraso na entrega dos produtos, multas, perda de oportunidades, etc.

A Figura 1 ilustra tal procedimento, onde cada processo aparece com seus indicadores associados. Também são representados através de setas as interdependências da parada de um processo nos demais. Por exemplo, a parada do processo A implicará na parada dos processos B e C. Desta maneira, pode-se visualizar qual é o processo que impacta mais setores da produção quando pára de funcionar intempestivamente.

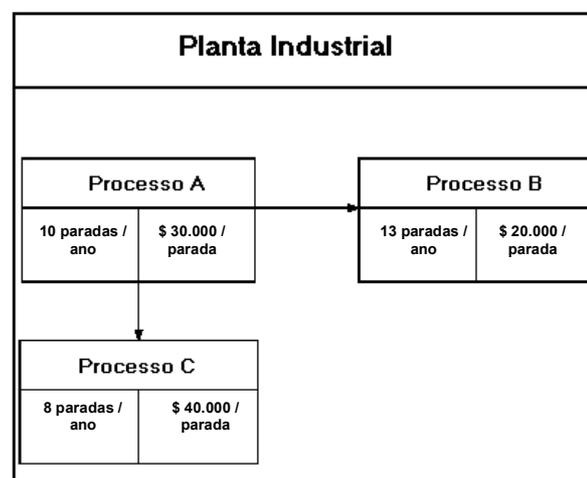


Figura 1 – Esquema dos processos numa industria.

2.3 Escolha dos locais de monitoração

Quando o objetivo da monitoração da QEE é determinar a sensibilidade de cargas e processos frente a afundamentos de tensão, é recomendado que a monitoração seja realizada no ponto mais próximo de conexão da carga objeto de análise.

Considerando-se também a necessidade do estudo da propagação do distúrbio, com o objetivo de analisar as suas causas e assim propor soluções que mitiguem seus efeitos sobre cargas sensíveis, torna-se necessário a instalação de mais monitores. Normalmente, devem-se instalar os monitores em diferentes níveis de tensão para facilitar o estudo da propagação do distúrbio. É desejável que todos os monitores possam ser sincronizados no tempo, por exemplo, através de sistema GPS.

2.4 Duração do período de monitoração

A duração do período de monitoração deve ser analisada em função das sazonalidades das causas dos distúrbios. Considerando-se que as faltas na rede de distribuição são uma das principais causas dos afundamentos de tensão, deve-se estabelecer um período de medição que contenha a estação onde se espera a maior ocorrência de faltas na rede. Por exemplo, na região sudeste o período de monitoração deve contemplar a estação das chuvas, uma vez que existe forte correlação entre incidência de descargas atmosféricas e ocorrências de afundamentos de tensão. Considerando-se o exposto, recomenda-se um ano de período mínimo de monitoração.

2.5 Caracterização dos distúrbios

A metodologia apresentada propõe que os afundamentos de tensão sejam caracterizados segundo a metodologia clássica, isto é, intensidade e duração, realizando-se agregação de fases quando ocorrerem distúrbios trifásicos, e também segundo metodologias alternativas. Dentro das metodologias alternativas propõe-se a caracterização do afundamentos segundo os tipos A, B, C e D do método proposto por Bollen [3], como mostrado na Figura 2; através de métodos a um parâmetro e também através de outras características tais como tensão fundamental complexa, salto do ângulo de fase e ponto de início do afundamento.

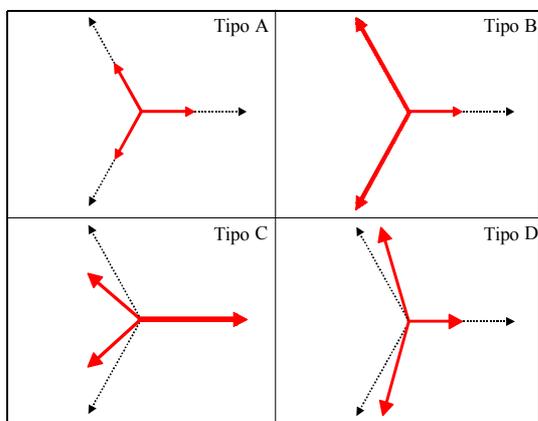


Figura 2 – Classificação dos afundamentos de tensão segundo os tipos A, B, C e D.

Dos métodos de caracterização a um parâmetro são focados neste trabalho a "perda de tensão", a "perda de energia" e o método proposto por Heydt – Thallam [1]. O método de caracterização chamado de "perda de tensão" (L_V) representa a área no gráfico de tensão vs tempo, compreendida entre a tensão de referência e a tensão medida durante o afundamento. Esta grandeza é calculada utilizando-se (1).

$$L_V = \int (1 - (V_S / V_R)) dt \quad (1)$$

onde V_S é a tensão registrada durante o afundamento e V_R é a tensão nominal das cargas analisadas.

O método da "perda de energia" (L_E) representa a energia não fornecida durante o afundamento de tensão, assumindo o modelo de impedância constante para a carga. Este parâmetro é calculado utilizando-se (2).

$$L_E = \int (1 - (V_S / V_R))^2 dt \quad (2)$$

O método proposto por Heydt - Thallam [1] propõe a utilização de um outro parâmetro para o cálculo dos afundamentos de tensão, que representa a "energia perdida no evento de afundamento" (W), considerando que os eventos sobre a curva CBEMA possuem a mesma perda de energia. A energia perdida (W) é calculada segundo (3).

$$W = \int (1 - (V_S / V_R))^{3.14} dt \quad (3)$$

2.6 Método para avaliar o impacto dos distúrbios

O método para avaliar o impacto dos afundamentos de tensão sobre processos industriais depende dos meios disponíveis para realizar tal avaliação.

Quando é avaliado o processo de forma global a análise é focalizada no produto resultante do processo. Neste caso, deve ser escolhido um conjunto de parâmetros mensuráveis do produto. Para cada parâmetro escolhido devem ser definidos os valores considerados aceitáveis, sendo que enquanto o produto final atende aos valores estabelecidos como aceitáveis, o processo será classificado como insensível aos distúrbios registrados. Caso contrário, o processo será classificado como sensível ao distúrbio e o mesmo será registrado como severo.

Uma outra maneira de avaliação mais simples consiste em classificar o processo como operativo, ou não operativo. Assim os afundamentos que resultarem numa mudança do estado operativo para o estado não operativo do processo serão considerados severos, e o processo será classificado como sensível a estes eventos.

É recomendável que quando os parâmetros de controle do processo ou do produto fogem aos valores considerados aceitáveis possa ser disparada automaticamente a gravação de registros do monitor de QEE. Esta prática permite o cruzamento mais efetivo de dados entre distúrbios na rede de suprimento e falhas no funcionamento das cargas que compõem o processo analisado.

No entanto, quando não se dispõe de um mecanismo automático de monitoração dos processos, o sucesso da análise está no treinamento das pessoas responsáveis pelo registro das ocorrências das cargas monitoradas.

3.0 - ESTUDO DE CASO

A fábrica onde foi realizado o estudo de caso possui uma carga instalada de 5 MVA e é suprida em 13,8 kV, conforme Figura 3. O suprimento de energia dentro da fábrica é realizado através de um anel em 440 V, existindo 4 subestações que interligam este anel à rede interna de 13,8 kV.

Para o estudo de caso foram especificados e adquiridos três monitores de qualidade. O primeiro foi instalado junto às cargas dos processos analisados do consumidor industrial, o segundo foi instalado no sistema de distribuição da concessionária, no ponto de conexão da unidade fabril, e o terceiro foi instalado no sistema de subtransmissão da empresa supridora de energia, identificados como M1, M2 e M3, conforme mostrado na Figura 3.

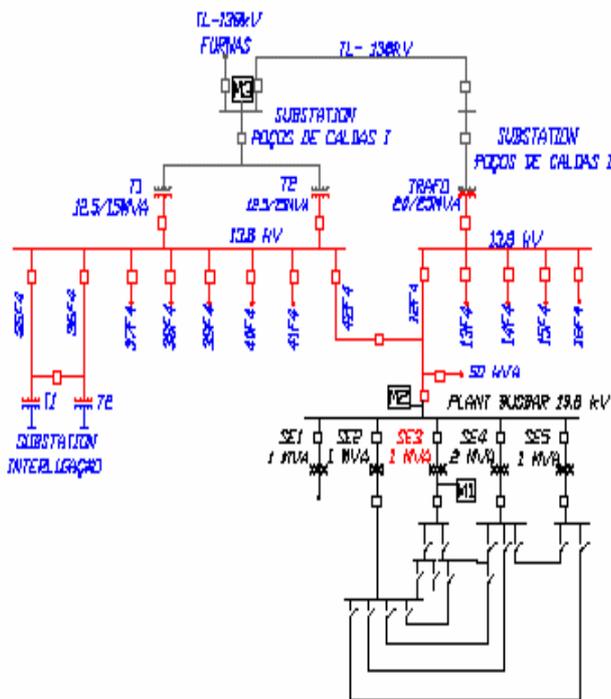


Figura 3— Diagrama unifilar com monitores de QEE.

Os processos monitorados foram escolhidos segundo os seguintes critérios:

- Importância destas áreas dentro do processo de fabricação;
- Frequência de paradas de produção devido a distúrbios na rede elétrica;
- Custos associados às paradas de produção não programadas: perda de matéria prima, tempo de retomada de produção, etc.

O processo escolhido para estudo foi a catenária 44, responsável pela fabricação de cabos com múltiplas camadas de isolamento. Cujas principais cargas são conversores CA/CC e CA/CA.

Neste estudo de caso foram utilizadas as seguintes metodologias de caracterização a um parâmetro: perda de tensão, perda de energia [2], e metodologia de Heydt - Thallam [1]. As equações (1) - (3) foram aplicadas ao afundamento registrado em cada fase e os resultados foram adicionados para obter os parâmetros dos eventos trifásicos.

Para a caracterização clássica dos eventos foi realizada a agregação de fases dos afundamentos de tensão trifásicos para obter um único valor de intensidade e duração. O critério utilizado para realizar a agregação de fases é o critério proposto pelo EPRI/Electrotek [4]. Segundo este critério, as características do evento trifásico são definidas pelas características da fase que apresenta a menor tensão remanescente durante o afundamento.

Também foi realizada a agregação temporal de eventos consecutivos. Para isto foi utilizada uma janela temporal de 1 minuto. Todos os afundamentos de tensão que aconteceram dentro deste período foram caracterizados como um único evento. O afundamento com menor intensidade, ou seja, de menor tensão remanescente neste período, foi o escolhido para representar o evento agregado.

A intensidade dos afundamentos foi calculada em p.u.. A base de tensão utilizada para este cálculo foi a tensão nominal das cargas monitoradas.

Para registrar as paradas dos processos foi elaborada uma planilha onde a equipe de manutenção registrou todos os eventos, indicando: data, horário e motivo da parada de produção. Estes dados foram comparados com os registros de eventos obtidos dos monitores de QEE.

A Tabela 1 mostra as características dos alguns dos eventos registrados durante o período de monitoração. Os eventos que causaram parada do processo analisado são indicados como "PT", os eventos severos que poderiam ter ocasionado

problemas nos processos, se estes não estivessem inoperantes, são indicados como “NC” e os eventos não severos são indicados como “NS”.

Tabela 1 – Registros de afundamentos de tensão.

Timestamp dd/mm/yyyy @ hh:mm:ss.ms	Perda Tensão [p.u.-ms]	Perda Energia [p.u.-ms]	Heydt-Thallam [p.u.-ms]	Magnitude [p.u.]	Duração [ms]	Tipo	Processo
29/07/2002@14: 50:01.377	162	239	42.10	0.40	166	C	PT
09/08/2002@15: 03:46.426	321	569	14	0.73	514	A	NS
07/09/2002@03: 57:08.902	313	465	79	0.40	230	A	NC
13/10/2002@06: 43:59.351	247	326	112	0.21	133	C	NC
15/10/2002@11: 43:48.323	11.94	21.71	0.34	0.77	37	C	NS
29/10/2002@08: 47:47.810	264	338	132	0.09	369	D	PT
29/10/2002@23: 29:00.810	42.58	63.96	10.76	0.33	41	C	PT
29/12/2002@16: 53:11.239	123	190	23.2	0.47	141	C	NC
06/02/2003@18: 00:28.965	21.5	37.1	1.48	0.64	43	C	PT
22/02/2003@13: 08:53.457	20.6	36.0	1.13	0.67	47	C	PT
22/02/2003@13: 36:10.259	292	444	61.2	0.44	208	A	NC
04/03/2003@15: 57:16.821	9.50	16.5	0.53	0.71	38	D	NS

As Figuras 4 a 6 mostram a sensibilidade do processo quando os distúrbios foram caracterizados através das metodologias a um parâmetro. Observa-se que nenhuma destas metodologias foi totalmente consistente, existindo superposição das regiões de imunidade e de sensibilidade.

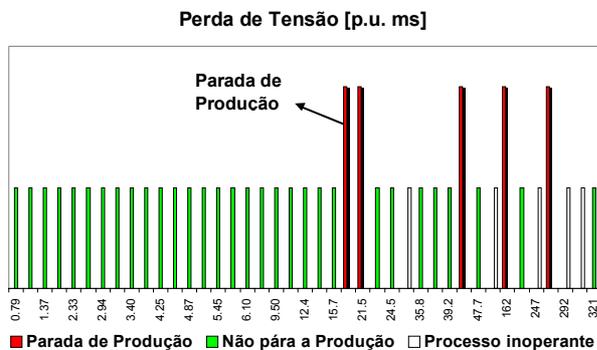


Figura 4 - Sensibilidade da Catenária 44 – Método da “perda de tensão”.

Perda de Energia [p.u. ms]

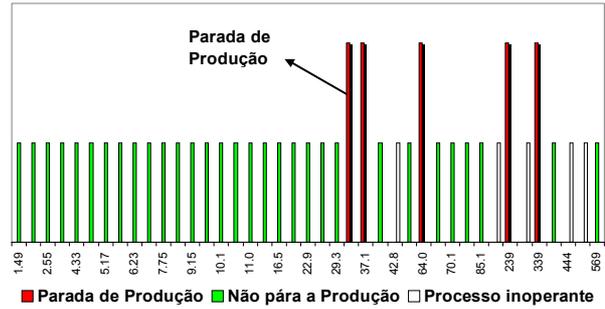


Figura 5 - Sensibilidade da Catenária 44 – Método da “perda de energia”.

Metodologia de Heydt-Thallam [p.u. ms]

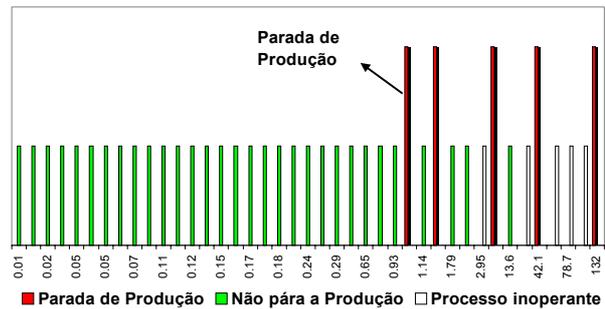


Figura 6 – Sensibilidade da Catenária 44 – Método de Heydt - Thallam.

Verifica-se que a caracterização da sensibilidade, utilizando-se a metodologia de Heydt - Thallam, apresentou um maior grau de consistência, segundo indica a Tabela 2. O grau de consistência pode ser calculado através de (4).

$$Consistência = 1 - \frac{MAN - MAS}{MVC} \quad (4)$$

onde MAN é o maior afundamento não severo, MAS é o menor afundamento severo e MVC é o maior afundamento registrado.

Tabela 2 – Consistência das metodologias a um parâmetro.

	Perda de Tensão [p.u. x ms]	Perda de Energia [p.u. x ms]	Heydt - Thallam [p.u. x ms]
Maior Valor Calculado - MVC	321	569	132
Menor Afundamento Severo - MAS	21	36	1,1
Maior Afundamento não Severo - MAN	321	569	13,6
Percentagem de consistência	6,5 %	6,3 %	90,5 %

A Figura 7 mostra a caracterização da sensibilidade do processo através do gráfico intensidade vs duração do evento. Observa-se

que a região de sensibilidade está bem definida através desta metodologia. Havendo mais registros de ocorrências, o gráfico da Figura 7 pode ser reeditado considerando cada tipo de afundamento, A, B, C, e D. Neste caso, se estaria analisando a influência da assimetria e do desequilíbrio da tensão na sensibilidade do processo analisado.

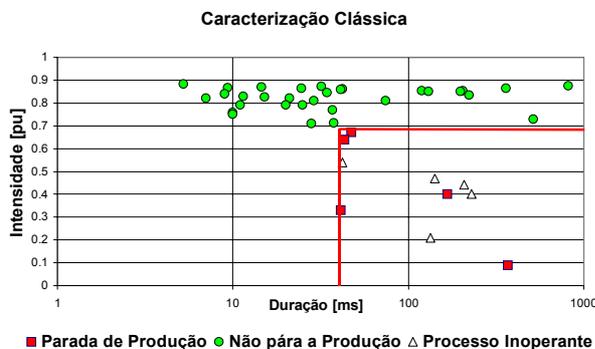


Figura 7 – Sensibilidade da Catenária 44 – Método clássico.

Por último, a sensibilidade foi caracterizada apenas levando em consideração a intensidade dos afundamentos de tensão, conforme a Figura 8. Observando esta figura, conclui-se que não há superposição das regiões de imunidade e sensibilidade. Este fato indica que este processo é apenas sensível à intensidade do distúrbio.

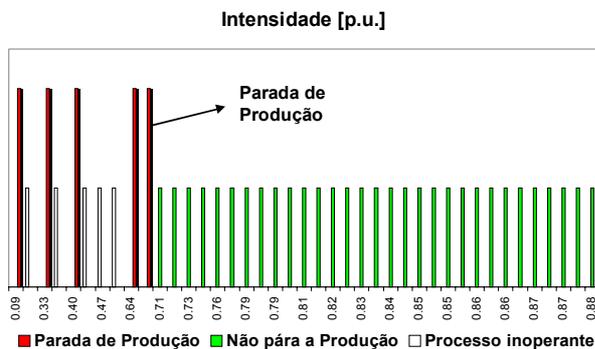


Figura 8 – Sensibilidade da Catenária 44 – Método da Intensidade.

4.0 - CONCLUSÕES

A metodologia para caracterização da sensibilidade de processos industriais frente a afundamentos de tensão foi testada em um processo de fabricação de cabos de eletricidade.

Quando a sensibilidade do processo foi analisada através do método clássico, ou seja, intensidade vs duração, foram obtidas as regiões de sensibilidade e imunidade em forma satisfatória. O período de monitoração de 1 ano não forneceu um número suficiente de paradas de processo para poder analisar a sensibilidade do mesmo frente a cada tipo de afundamento (A, B, C e D). Neste caso, estar-se-ia levado em consideração a

assimetria e o desequilíbrio associado ao afundamento de tensão.

Na caracterização da sensibilidade dos processos através de um parâmetro, obteve-se um sucesso relativo, levando em conta que as regiões de imunidade e sensibilidade se superpõem. Esta superposição impede caracterizar de maneira precisa o limiar de sensibilidade dos processos frente a afundamentos de tensão. Dentre as metodologias alternativas, a metodologia proposta por Heydt - Thallam foi a que apresentou maior consistência devido ao fato desta metodologia dar maior relevância à intensidade do que a duração do afundamento de tensão. Assim, pode-se inferir que a carga monitorada apresenta maior sensibilidade à intensidade do distúrbio do que a sua duração. Fato comprovado pela consistência da caracterização da sensibilidade através da intensidade dos eventos.

Finalmente, recomenda-se automatizar os procedimentos de registros de paradas de produção. Em algumas ocorrências, constatou-se falhas no processo de registro manual por parte dos operadores / equipe de manutenção das ocorrências.

Evidentemente, que para generalizar esta metodologia será necessário aplicá-la em outras cargas/processos industriais.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. S. Thallam, G. T. Heydt, "Power Acceptability and Voltage Sag Indices in the Three Phase Sense," IEEE PES Summer Meeting, July 2000, Seattle, USA.
- [2] IEEE, Voltage Sags Indices – Draft 2 – Working document for IEEE P1564 and CIGRE WG 36-07, December 2000, Available at www.grouper.ieee.org
- [3] L. D. Zhang, M. H. J. Bollen, "A method for characterizing unbalanced voltage dips (sags) with symmetrical components", IEEE-PES Power Engineering Review, Vol.18, Issue: 7, Page(s): 50 - 52, July 1998.
- [4] M. H. J. Bollen, L. D. Zhang, "Analysis of Voltage Tolerance of AC Adjustable-Speed Drives for Three-Phase Balanced and Unbalanced Sags," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.36, No.3, May/June 2000.
- [5] D. L. Brooks, R. C. Duncan, M. Waclawiack, A. Sundaram, "Indices for Assessing Utility Distribution System RMS Variation Performance", Available at www.pqnet.electrotek.com
- [6] Roberto Chouhy Leborgne, "Uma Contribuição à Caracterização da Sensibilidade de Cargas e Processos Industriais frente a Afundamentos de Tensão", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajuba, Brasil, maio 2003.