



**GRUPO XIII
GRUPO DE ESTUDO DE INTERFERÊNCIAS, COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E QUALIDADE DE
ENERGIA – GCQ**

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

Roberto Chouhy Leborgne¹, José Maria Carvalho Filho¹, José Policarpo G. de Abreu¹, Thiago Clé de Oliveira¹, Alexandre Afonso Postal², Luiz Henrique Zaparoli².

¹ Grupo de Estudos Sobre a Qualidade da Energia Elétrica (GQEE), Instituto de Engenharia Elétrica (IEE), Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI).

² Departamento Municipal de Eletricidade de Poços de Caldas (DME).

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 e de coleta de dados instalado no sistema de subtransmissão e distribuição de uma concessionária de distribuição e na rede elétrica de baixa tensão de um consumidor industrial analisado.

PALAVRAS-CHAVE

Variações de tensão de curta duração. Afundamentos de tensão. Sensibilidade de cargas. Curva de sensibilidade. Monitoração da qualidade da energia elétrica.

1.0 - INTRODUÇÃO

Os afundamentos de tensão têm sido um dos principais itens da qualidade de energia elétrica (QEE) pesquisados na última década, surgindo um volume considerável de publicações sobre este assunto.

A tolerância 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 vêm sendo 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 de distúrbios monofásicos.

Diversas publicações assinalam que os equipamentos são sensíveis à evolução de outras características dos afundamentos de tensão, tais como o salto 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.

Por outro lado, uma serie de artigos propõem 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.

Embora os afundamentos de tensão sejam um item de grande relevância no desempenho dos processos industriais, todavia não existe uma norma que estabeleça os procedimentos para determinar a tolerância destes processos frente ao distúrbio em questão.

Neste contexto, a principal contribuição deste trabalho é a proposição de formas alternativas de caracterização da sensibilidade de cargas industriais frente a afundamentos de tensão. Com este objetivo

foram consideradas as diversas metodologias alternativas de caracterização dos eventos, tais como, caracterização com um único parâmetro ou caracterizações que contemplam o desequilíbrio e a assimetria dos fasores de tensão durante a ocorrência dos afundamentos de tensão.

Como resultado, este trabalho indica quais das metodologias apresentam maior consistência para caracterizar a sensibilidade de um determinado processo frente a estes distúrbios, apoiado num sistema de monitoração de qualidade de energia e de coleta de dados.

2.0 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAÇÃO

Para realizar esta pesquisa foram especificados monitores de qualidade de energia elétrica (QEE) com uma ampla e flexível capacidade de parametrização, de maneira a otimizar a utilização da memória do monitor e assim aumentar sua autonomia para armazenar registros durante períodos maiores de monitoração.

Os dados armazenados nos monitores de QEE têm sido gravados em um *laptop* com uma frequência mensal. Portanto, os monitores devem possuir memória suficiente para armazenamento de no mínimo um mês de registros. Procurou-se monitores que permitam versatilidade na aquisição dos dados, onde o operador pode selecionar número de amostras por ciclo e quantidade de ciclos a serem registrados quando da ocorrência de afundamentos de tensão. Assim, otimizou-se ao máximo o uso da memória dos monitores.

Os requisitos mínimos estabelecidos para os monitores de QEE foram: registro de intensidade e duração dos afundamentos registrados em cada fase, gravação da oscilografia de no mínimo 54 ciclos da onda de tensão com 32 pontos por ciclo, cálculo do valor RMS da tensão a cada meio ciclo com uma janela de no máximo 1 ciclo, memória mínima de 4 Mbytes.

Levando-se em consideração a limitação dos monitores para caracterizar os eventos segundo as diversas metodologias utilizadas neste trabalho, considerou-se um quesito imprescindível para a realização do trabalho, ou seja, a capacidade do monitor fornecer os dados amostrados da onda 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.

Ao todo 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.

Assim, além de caracterizar os eventos na tensão de suprimento das cargas industriais, foi possível analisar

as causas dos afundamentos registrados e a direção da sua propagação, permitindo vislumbrar medidas que possam minimizar as paradas de processos e as consequentes perdas econômicas associadas. Na Figura 1 é mostrado o sistema de distribuição com os pontos escolhidos para monitoração da QEE, identificados como M1, M2 e M3.

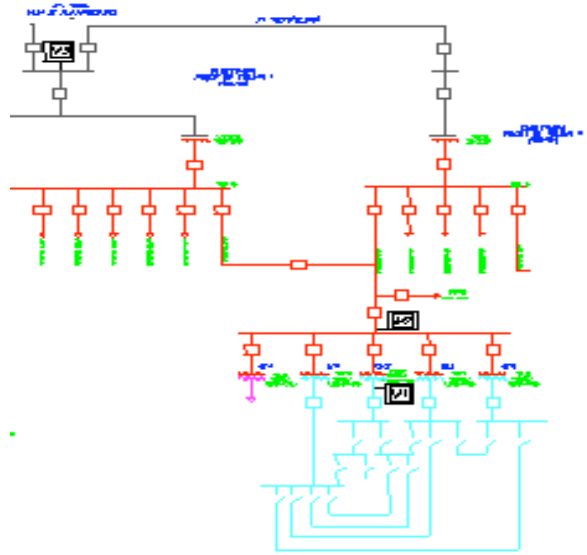


FIGURA 1 - DIAGRAMA UNIFILAR DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO E OS PONTOS DE MONITORAÇÃO ESCOLHIDOS

3.0 - CARACTERIZAÇÃO DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Os afundamentos de tensão foram caracterizados segundo a metodologia clássica, isto é, intensidade e duração do evento, e também utilizando-se metodologias alternativas a um parâmetro, tais como, perda de tensão, perda de energia, Thallam e Heydt [2]. Finalmente, os afundamentos de tensão foram caracterizados e classificados em A, B, C e D, segundo a proposta do Bollen [3], conforme mostra a Figura 2. A intensidade do afundamento foi definida pela menor tensão de linha remanescente.

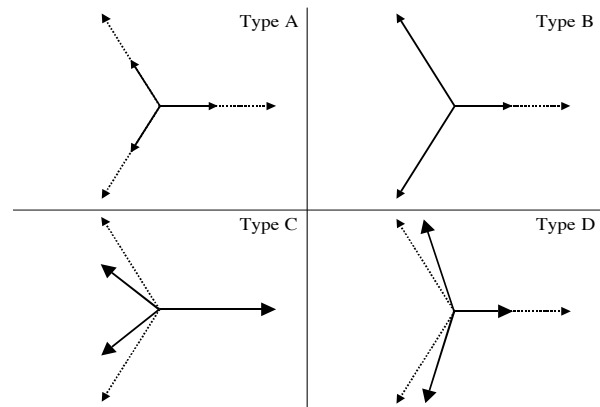


FIGURA 2 - CLASSIFICAÇÃO DOS AFUNDAMENTOS SEGUNDO OS TIPOS A, B, C, D

Os eventos trifásicos caracterizados através de intensidade e duração foram agregados para obter um único valor de intensidade e duração do evento. O critério utilizado para realizar a agregação de fases foi o critério proposto pelo EPRI/Electrotek [4]. Segundo este critério, as características do evento trifásico são definidas pelas características da fase que apresentou 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. Este é um assunto que as normas ainda não definem uniformemente, mas considerando que o objetivo deste trabalho é caracterizar sensibilidade de cargas, considerou-se que a tensão nominal das mesmas é a mais adequada para ser utilizada como referência para o cálculo dos afundamentos em p.u..

Dos métodos alternativos utilizados para a caracterização dos afundamentos de tensão, foram considerados: perda de tensão, perda de energia, Thallam, dentre outros.

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, como pode ser observado na Figura 3. 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.

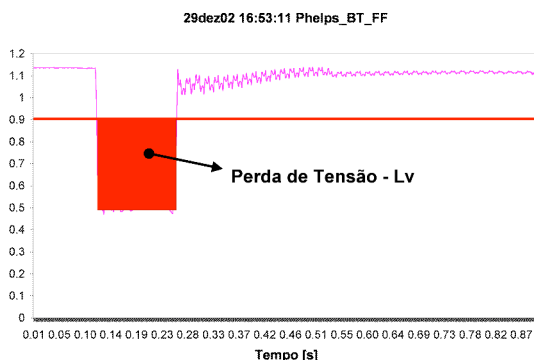


FIGURA 3 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA PERDA DE TENSÃO

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 sugerido por Thallam [2] propõe a utilização de um outro parâmetro para o cálculo dos afundamentos de tensão, que representa a “energia do afundamento de tensão” (E_{vs}), calculada através de (3).

$$E_{vs} = \int (1 - (V_s / V_r))^2 dt \quad (3)$$

Por último, Thallam e Heydt [1] introduzem o conceito da “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 (4).

$$W = \int (1 - (V_s / V_r))^3 dt \quad (4)$$

As equações de (1) a (4) foram aplicadas ao afundamento registrado em cada fase e os resultados foram adicionados para obter os parâmetros dos eventos trifásicos.

4.0 - CARGAS E PROCESSOS ANALISADOS

A fábrica onde esta pesquisa foi desenvolvida possui uma carga instalada de 4 MVA e é suprida em 13,8 kV. Esta unidade fabril possui diversos processos contínuos para fabricação de condutores de alumínio e de cabos de baixa e média tensão de alumínio e cobre.

O suprimento de energia dentro da fábrica é realizado através de um anel em 440V, existindo 3 subestações que interligam este anel à rede interna de 13,8 kV, conforme mostrado na Figura 1.

Os processos mais sensíveis aos afundamentos de tensão possuem inversores de frequência e conversores CA/CC. Os processos a serem 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.

Desta forma, os processos escolhidos para caracterização da sensibilidade foram: catenária 44, laminador Spiden e laminador Properzi. A catenária 44 é um processo de fabricação de cabos com múltiplas camadas de isolamento e os laminadores são responsáveis pelo processamento do alumínio líquido que vem do forno. Através deste último processo o alumínio é transformado primeiro em uma barra de alumínio e a seguir em um vergalhão. Este vergalhão de alumínio é a matéria prima que será utilizada para a fabricação dos cabos.

As principais cargas destes processos são descritas a seguir:

- (a) Catenaria 44
- Extrusora 6": motor CA, inversor de frequência 700V, 600A, 250CV (1997).
 - Extrusora 2,5": motor CC 40Hp, conversor CA/CC 440Vca, 60Hz, 500Vcc, 60A.
 - Extrusora 3,5": motor CC 65Hp, conversor CA/CC 440Vca, 60Hz, 500Vcc, 100A.
 - Pull out: motor CC 7,5Hp, conversor CA/CC 500Vca, 130A, 60Hz, 520Vcc, 150A.
 - Bobinadeira: motor CC 7,5Hp, conversor CA/CC 220Vca, 60Hz, 120Vcc, 56A.
 - Helper: motor CC 5Hp, conversor CA/CC 120Vca, 60Hz, 120Vcc, 37A.
 - Metering: motor CC 5Hp, conversor CA/CC 500Vca, 52 A, 60Hz, 520Vcc, 60A.
- (b) Laminador Spiden
- Motor principal: motor CC, conversor CA/CC 440Vca, 60Hz, 500Vcc, 300A, 190Hp;
 - Motor da roda: motor CC, conversor CA/CC 440Vca, 60Hz, 500Vcc, 30A.
- (c) Laminador Properzi
- Motor principal: motor CC, conversor CA/CC 440Vca, 60Hz, 500Vcc, 120A, 190Hp;
 - Motor da roda: motor CC, conversor CA/CC 440Vca, 60Hz, 600Acc.

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

Neste artigo serão apresentados os resultados de caracterização de sensibilidade apenas para o processo da catenária 44. Este foi o processo que mais experimentou paradas de produção durante os 9 meses de monitoração, ou seja, de maio/2002 a janeiro/2003.

5.0 SENSIBILIDADE DO PROCESSO - RESULTADOS OBTIDOS

Conforme já comentado, os dados registrados e armazenados nos monitores de QEE, são transferidos mensalmente para um *laptop*. As bases de dados em formato SQL com todos os registros de eventos são processadas com o programa que acompanha os monitores de QEE. Este programa disponibiliza de forma direta os registros dos afundamentos de tensão em cada fase, através das características de magnitude e duração. O programa também mostra as formas de onda do sinal de tensão, os fasores e os valores das componentes simétricas.

Os dados de oscilografia da onda de tensão são exportados para uma planilha de MS-Excel para realizar os cálculos que permitem caracterizar os eventos segundo as metodologias alternativas. Este procedimento também foi utilizado para o cálculo da intensidade e duração do afundamento, considerando as tensões de linha. A monitoração foi realizada entre fase e neutro, mas, considerando que as cargas

analisadas estão ligadas entre fases, o evento foi finalmente avaliado pelas tensões de linha.

A Tabela 1 mostra as características dos eventos registrados durante o período de monitoração. Os eventos que causaram problemas nos processos analisados são indicados em cor vermelha (sombreado escuro), e os eventos severos que poderiam ter ocasionado problemas nos processos, se estes não estivessem inoperantes, são indicados em cor amarela (sombreado claro).

TABELA 1 – REGISTRO DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO CARACTERIZADOS PELAS DIVERSAS METODOLOGIAS

Data / horário	Perda de Tensão	Perda de Energia	Thallam	Heydt	Intensidade	Duração	Tipo
30/04/2002@17:47:12	1.3	2.5	0.2	0.02	0.87	9	C
03/05/2002@19:59:21	191	357	26	2.75	0.88	817	C
13/05/2002@11:44:51	6.1	11	1.17	0.18	0.87	32	C
19/05/2002@10:15:08	2.3	4.3	0.38	0.05	0.87	15	C
12/06/2002@05:10:26	37	70	3.83	0.29	0.86	358	D
17/07/2002@07:35:07	6.2	11	1.13	0.16	0.85	34	C
20/07/2002@12:23:48	3.1	5.5	0.75	0.15	0.75	10	C
27/07/2002@07:58:27	12	22	1.9	0.24	0.86	24	A
29/07/2002@14:50:01	161	239	84	42	0.40	166	C
01/08/2002@23:10:17	39	70	7.49	1.14	0.85	205	C
02/08/2002@12:55:39	35	65	6.50	0.93	0.85	198	C
02/08/2002@23:17:39	24	44	4.62	0.69	0.85	130	C
03/08/2002@10:59:22	2.9	5.1	0.71	0.14	0.76	10	C
04/08/2002@06:40:08	5.6	10	1.11	0.18	0.83	15	D
04/08/2002@13:26:20	47	85	10	1.79	0.83	222	C
09/08/2002@15:03:46	320	569	72	13	0.73	514	A
09/08/2002@19:11:07	15	29	2.09	0.21	0.85	119	D
06/09/2002@19:29:12	10	19	1.8	0.27	0.71	28	C
07/09/2002@03:57:08	313	464	162	78	0.40	230	A
29/09/2002@23:30:37	5.4	10	0.73	0.07	0.83	11	A
01/10/2002@11:35:23	3.4	6.2	0.56	0.07	0.82	21	C
09/10/2002@09:03:31	1.9	3.5	0.35	0.05	0.79	11	C
13/10/2002@06:43:59	246	325	167	112	0.21	133	C
13/10/2002@06:47:22	25	42	9.0	2.9	0.54	42	C
15/10/2002@11:43:48	11	21	2.1	0.34	0.77	37	C
27/10/2002@23:38:50	2.3	4.3	0.34	0.04	0.82	7	C
29/10/2002@08:47:47	264	338	189	132	0.09	369	D
29/10/2002@23:29:00	42	63	21	10.7	0.33	41	C
04/11/2002@15:14:38	4.7	8.9	0.53	0.05	0.86	42	C
03/12/2002@20:38:22	4.0	7.3	0.75	0.11	0.79	20	C
20/12/2002@13:08:10	4.2	7.7	0.76	0.11	0.79	25	D
29/12/2002@16:53:11	122	189	55	23	0.47	141	C
10/01/2003@20:19:44	1.2	2.2	0.17	0.02	0.84	9	C
17/01/2003@19:26:25	5.1	9.5	0.86	0.12	0.81	29	C
18/01/2003@11:02:35	15	28	1.8	0.17	0.81	74	D

Os resultados apresentados na Tabela 1 foram ordenados em ordem crescente de severidade para cada método de caracterização. Os resultados obtidos são apresentados em forma gráfica nas Figuras 4 a 7. Em cor vermelha, barra alta, estão indicados os afundamentos que foram severos, ou seja, aqueles que provocaram paradas dos processos analisados. Em cor verde, barra baixa escura, estão representados os afundamentos menos severos, que não provocaram paradas dos processos. Finalmente em cor amarela, barra baixa clara, são representados os afundamentos severos, mas que não podem ser considerados pois os processos não estavam operando quando ocorreram os afundamentos de tensão.

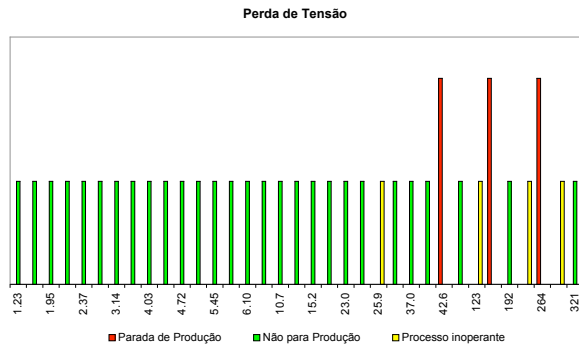


FIGURA 4 - CARACTERIZAÇÃO DA SENSIBILIDADE ATRAVÉS DA PERDA DE TENSÃO

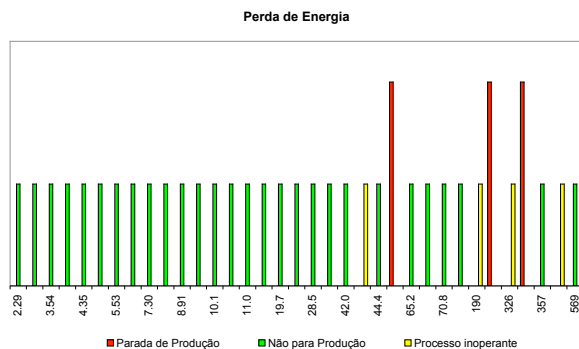


FIGURA 5 - CARACTERIZAÇÃO DA SENSIBILIDADE ATRAVÉS DA PERDA DE ENERGIA

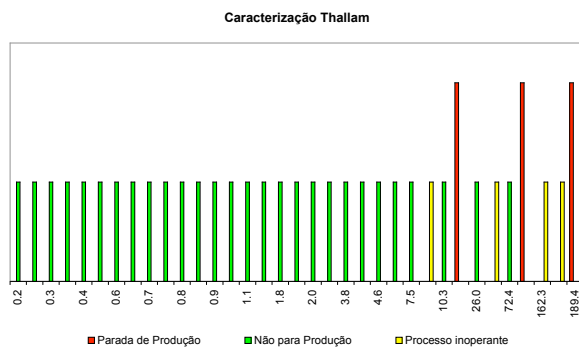


FIGURA 6 - CARACTERIZAÇÃO DA SENSIBILIDADE ATRAVÉS DO MÉTODO DE CARACTERIZAÇÃO DE EVENTOS PROPOSTO POR THALLAM

As Figuras 4 a 7 mostram a caracterização da sensibilidade quando os distúrbios são caracterizados

através de um único parâmetro, vinculando-se de alguma forma a intensidade e a duração dos eventos. Observa-se que nenhuma destas metodologias é totalmente consistente, existindo alguma superposição das regiões de imunidade e de sensibilidade do processo perante os distúrbios. Mesmo assim, verifica-se que a caracterização da sensibilidade, utilizando-se a metodologia de Heydt, apresenta um maior grau de consistência. Para o processo analisado, o limiar de sensibilidade estaria representado pelo valor 10 ms, acima do qual os eventos seriam capazes de sensibilizar o processo monitorado, ocasionando mal funcionamento ou parada do mesmo.

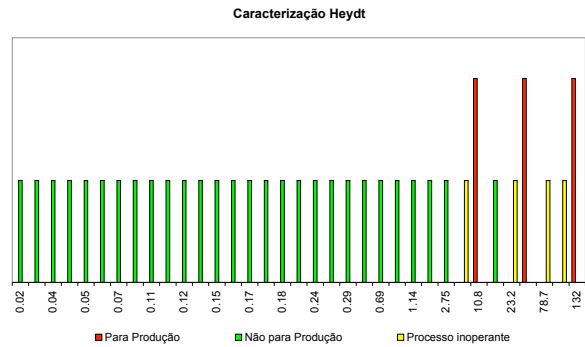


FIGURA 7 - CARACTERIZAÇÃO DA SENSIBILIDADE ATRAVÉS DO MÉTODO DE CARACTERIZAÇÃO DE EVENTOS DE HEYDT

A Figura 8 mostra a caracterização preliminar da sensibilidade do processo através do gráfico intensidade vs duração do evento. As linhas vermelhas, linha cheia, representam o contorno que identifica a região de sensibilidade do processo. Qualquer afundamento que venha a ser caracterizado abaixo da linha vermelha com certeza provocará a parada do processo analisado. Por outro lado, as linhas verdes, linha tracejada, identifica a região de imunidade ou tolerância do processo. Os afundamentos caracterizados acima da linha verde possivelmente não são capazes de sensibilizar o processo. A região compreendida entre as linhas verde e vermelha representa uma região de incerteza. Na medida que novas ocorrências forem registradas e analisadas, esta região tende a diminuir, aumentando-se a precisão dos resultados.

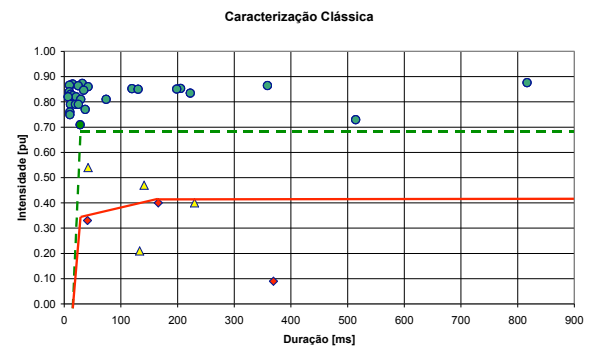


FIGURA 8 - CARACTERIZAÇÃO DA SENSIBILIDADE ATRAVÉS DO GRÁFICO INTENSIDADE VS DURAÇÃO DOS EVENTOS.

Da mesma forma, havendo mais registros de ocorrências, o gráfico da Figura 8 pode ser reeditado considerando cada tipo de afundamento, A, B, C, e D. Neste caso, estaria-se contemplando as variáveis assimetria e desequilíbrio na caracterização da curva de sensibilidade e tolerância do processo analisado.

Por último, quando os afundamentos são caracterizados apenas segundo a sua intensidade, a partir da Figura 9, observa-se que não há nenhuma superposição das regiões de imunidade e sensibilidade. Este fato indica a consistência desta sistemática para caracterizar a sensibilidade do processo analisado. Portanto, pode-se concluir que o processo monitorado é apenas sensível à intensidade do distúrbio e não à sua duração. Evidentemente, para generalizar esta metodologia será necessário aplicá-la em outras cargas/processos industriais.

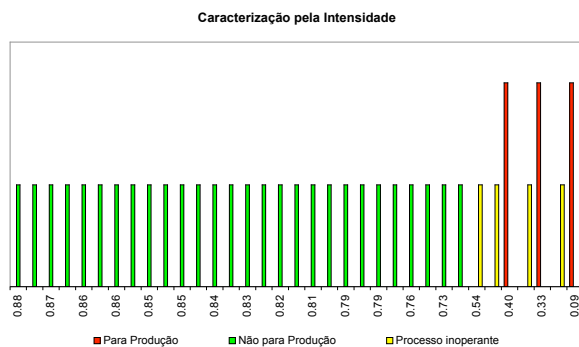


FIGURA 9 – CARACTERIZAÇÃO DA SENSIBILIDADE ATRAVÉS DA INTENSIDADE DOS AFUNDAMENTOS

6.0 - CONCLUSÕES

Quando a sensibilidade do processo foi analisada através do método convencional, através do gráfico intensidade vs duração, foram obtidas três regiões, sendo que as regiões de sensibilidade e imunidade classificam os eventos precisamente quanto a sua severidade. No entanto, existe uma região intermediária, de incerteza, na qual os eventos não podem ser avaliados de forma precisa. A fim de se obter melhoria para esta metodologia, propõe-se gerar distintos gráficos de sensibilidade, considerando os diversos tipos de afundamentos de tensão (A, B, C e D). Neste caso, estar-se-ia levado em consideração à assimetria e o desequilíbrio associado ao afundamento de tensão.

Na caracterização da sensibilidade dos processos através de um único 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 foi a que apresentou maior consistência. Isto se deve 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. Esta afirmativa pode ser comprovada quando se utilizou apenas a intensidade para a caracterização da sensibilidade do processo. Neste caso, não se observou superposição das regiões de imunidade e sensibilidade.

Para validar definitivamente as diversas metodologias de caracterização da sensibilidade de cargas/processos industriais, é imprescindível aumentar o número de registros de paradas de produção. Levando em consideração a característica aleatória das ocorrências dos afundamentos de tensão, acrescido ao fato do processo industrial em análise não operar continuamente, torna-se mister aumentar o período de monitoração. O período de nove meses de monitoração até então utilizado não foi suficiente para avaliar adequadamente todas as metodologias.

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

7.0 - 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