



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GCQ-02
19 a 24 Outubro de 2003
Uberlândia - Minas Gerais

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

**ESTUDO DE CASO DE SENSIBILIDADE DE EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS INDUSTRIAIS
FRENTE A AFUNDAMENTOS DE TENSÃO**

Rosana F. S. dos Santos*
FIAT Automóveis S. A.

Selênio Rocha Silva
DEE/ UFMG

RESUMO

Afundamentos de tensão são fenômenos eletromagnéticos de curta duração, freqüentemente presentes em sistemas elétricos industriais, descritos por duas características essenciais: magnitude e duração. A primeira grandeza podendo variar entre 0,1 a 0,9 pu e a última entre 0,5 ciclo e 1 minuto. Apesar de tais distúrbios, referentes à qualidade de energia elétrica, caracterizarem-se como variações de tensão de curta duração, os mesmos podem ocasionar sérios problemas em diversos tipos de equipamentos elétricos, tais como: computadores, acionamentos a velocidade variável, controladores lógicos programáveis, entre outros. Este artigo apresenta um estudo de caso em uma indústria automobilística direcionado para a investigação dos limites de tolerância apresentados por inversores de freqüência e controladores lógico programáveis quando submetidos a afundamentos de tensão.

PALAVRAS-CHAVE

Qualidade de Energia Elétrica. Distúrbios. Variação de Tensão de Curta Duração. Afundamento de Tensão. Controlador Lógico Programável - CLP.

1.0 - INTRODUÇÃO

Como os sistemas, hoje em dia, estão muito mais integrados, se um dispositivo proporcionar algum tipo de problema ao sistema as conseqüências serão mais relevantes (1). Por isso, é necessária a avaliação do sistema como um todo.

Afundamentos de tensão podem não ser tão danosos à indústria quanto as interrupções de curta ou longa duração. Mas, como ocorrem com maior freqüência o impacto total devido aos afundamentos de tensão é mais significativo. Os afundamentos de tensão são muito mais comuns que as interrupções já que os mesmos podem estar associados a faltas remotas, conforme (2), (3) e (4). Até mesmo afundamentos de tensão com duração de 4 a 5 ciclos podem causar falhas em uma grande faixa de equipamentos sensíveis, presentes no consumidor. Um consumidor pode estar até nove vezes mais susceptível a experimentar um afundamento de tensão do que uma interrupção momentânea (5).

Os equipamentos utilizados em plantas industriais estão se tornando cada vez mais sensíveis a afundamentos de tensão à medida que a complexidade de tais equipamentos aumenta (6). E a combinação de equipamentos sensíveis e afundamentos de tensão pode causar significativas paradas no processo produtivo. Prejuízos financeiros estão geralmente vinculados ao impacto destes distúrbios nos sistemas elétricos industriais.

Diante da crescente preocupação com a qualidade de energia elétrica e tendo em vista os impactos dos distúrbios elétricos já registrados, os fabricantes de equipamentos industriais estão conferindo uma certa imunidade a seus equipamentos no que se refere aos distúrbios de qualidade de energia elétrica (7). Entretanto, tais fabricantes estão inseridos em um mercado extremamente competitivo e têm que contrabalançar performance, exigências dos consumidores e custo.

* BR 381 - Km 429 - CEP 32.530-000 - Betim - MG - Brasil
Tel.: (031) 3529-3823 - Fax: (031) 3529-3839 - E-mail: rosana.santos@fiat.com.br

Equipamentos menos sensíveis podem estar disponíveis, mas o projetista deve conhecer as características do sistema elétrico para fazer a melhor escolha entre a imunidade do equipamento e o custo do equipamento (8).

O desenvolvimento do presente trabalho surgiu da necessidade de se investigar impactos advindos de afundamentos de tensão analisando suas respectivas consequências em equipamentos definidos como sensíveis e processos.

Foi examinada a qualidade de energia elétrica na área de funilaria de uma fábrica de automóveis com grande variedade de equipamentos e processos. A fábrica em questão é a Fiat Automóveis S. A., localizada em Betim e a unidade estudada é a Unidade Operativa Funilaria, denominada U.O. F. A unidade produtiva em questão é responsável pela soldagem das peças que compõem uma carroceria. Os processos de soldagem de tais peças devem garantir, para cada modelo, pontos de solda de qualidade e a geometria exata da carroceria.

2.0 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO

O barramento trifásico de chegada do sistema de distribuição de energia elétrica da fábrica é de 138 kV. Cargas como compressores são alimentadas através de um barramento de 6,9 kV.

A distribuição de energia elétrica realizada para as unidades produtivas é feita através de barramento trifásico de 13,8 kV. Cada unidade possui cabines abaixadoras de tensão para distribuição, geralmente, em 440 e 220 V. A U.O.F. possui duas cabines elétricas denominadas 8 e 9, conforme pode ser visto no diagrama esquemático na Figura 1.

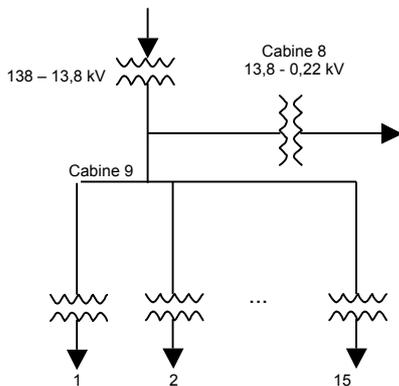


FIGURA 1 - Diagrama esquemático U.O.F.

A cabine 9 (Figura 1) alimenta todas as cargas diretamente ligadas à produção através de 12 plataformas com transformadores de 13.800 para 440 V, dois circuitos específicos para força-motriz em 440 V e outro circuito para iluminação industrial com saída de 220 V. A cabine 8 (Figura 1) está destinada especificamente para alimentação de cargas referentes aos escritórios, restaurantes e portaria, utilizando-se de um transformador de 13.800 para 220 V. Em resumo, ao todo são 15 transformadores diretamente conectados

ao barramento da cabine 9 e apenas um conectado ao barramento da cabine 8.

Todos os transformadores utilizados no sistema possuem conexão triângulo/estrela solidamente aterrada. Este dado é de fundamental relevância na definição dos possíveis tipos de afundamentos de tensão pertinentes ao sistema elétrico industrial estudado.

3.0 - METODOLOGIA

A metodologia empregada buscou concatenar as etapas a seguir:

- Análise de relatórios de manutenção dos operários posicionados nas linhas de produção;
- avaliação do diagrama unifilar do sistema elétrico industrial;
- identificação dos possíveis tipos de afundamentos de tensão;
- identificação das cargas elétricas com a posterior definição das mais sensíveis;
- realização de uma extensa pesquisa sobre os limites toleráveis de variações lentas e rápidas de tensão para inversores de frequência e CLP's;
- realização de um teste de sensibilidade.

4.0 - RESULTADOS

4.1 Tipos de Afundamentos de Tensão

De posse dos dados relativos às conexões dos transformadores (triângulo/estrela aterrada) e da carga considerada como típica (conexão triângulo) foram definidos os tipos de afundamentos - conforme (9), (10) e (11) - aplicáveis ao sistema industrial em estudo para os casos de ocorrência de faltas trifásicas, faltas fase-fase e faltas monofásicas, conforme Tabela 1.

TABELA 1 - Tipos de afundamentos de tensão

Falta	Secundário Trafo Barra 13,8 kV	Secundário Trafo Barra 440 V	Terminais Carga Típica
Trifásica	A	A	A
Fase-fase	D	C	D
Monofásica	C*	D	C*

Depois de definidos os tipos de afundamentos aplicáveis, a próxima etapa foi o cálculo dos valores de tensão remanescentes, utilizando-se as equações presentes na Tabela 2.

TABELA 2 - Equações para cálculo de magnitude de tensão

Tipo A	Tipo D	Tipo C*
$V_A = V$	$V_A = V$	$V_A = 1$
$V_B = \left[\frac{1}{2}V \right] \left[\frac{1}{2}jV\sqrt{3} \right]$	$V_B = \left[\frac{1}{2}V \right] \left[\frac{1}{2}j\sqrt{3} \right]$	$V_B = \left[\frac{1}{2} \right] \left[\frac{1}{2}jV\sqrt{3} \right]$
$V_C = \left[\frac{1}{2}V + \frac{1}{2}jV\sqrt{3} \right]$	$V_C = \left[\frac{1}{2}V + \frac{1}{2}j\sqrt{3} \right]$	$V_C = \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2}jV\sqrt{3} \right]$

4.2 Definição de cargas elétricas sensíveis

Foram listadas as cargas do sistema elétrico industrial em questão e, dentre estas foram definidas as de maior importância para o estudo de qualidade de

energia elétrica. Ficou estabelecido que as cargas a serem estudadas detalhadamente seriam: CLP's, inversores de frequência, máquinas de solda a arco, máquinas de solda a ponto, microcomputadores e motores com potência acima de 10 cv. Das cargas analisadas, os CLP's e os inversores de frequência foram definidos como cargas que estão mais sujeitas aos impactos indesejáveis dos distúrbios elétricos gerados no sistema elétrico industrial estudado.

4.3 Limites Toleráveis

A planta industrial apresenta equipamentos eletrônicos adquiridos de diversos fabricantes em diferentes épocas. O fato de existirem em funcionamento, simultaneamente, equipamentos tão diversos enriqueceu a pesquisa de variações lentas e rápidas de tensão. Por isso foi possível elaborar planilhas com os percentuais de variação tolerados, declarados pelos fabricantes, pelas cargas definidas como as mais sensíveis, os inversores de frequência e os CLP's.

4.3.1 Variações Lentas de Tensão

Com relação à Tabela 3, a denominação aplicada às famílias de CLP's é numérica e quanto maior o valor do algarismo mais atual é a família de CLP's. É possível que a tolerância média para variações lentas de tensão tenha aumentado devido à modernização dos equipamentos do fornecedor A. Já para o fornecedor C acontece o contrário, ou seja, os produtos pertencentes às famílias mais recentes podem ser menos tolerantes à variação de tensão que seus antecessores.

TABELA 3 - Faixas médias de tolerância à variação de tensão para CLP's

Fornecedor	Família	CLP's Instalados		Tolerância Média p/ 220 VAC (%)
		Qtde.	%	
A	1	3	4,7	-6,82
	2	1	1,6	-11,82
	3	52	81,3	-11,48
	4	7	10,9	-22,73
B	1	-	-	-22,73
	1	-	-	-29,17
C	2	-	-	-25,00
	3	-	-	-20,00
	1	1	1,6	-13,26

Vale ressaltar que na planta industrial em questão 98,4% dos CLP's foram adquiridos do fabricante A. Através da Tabela 3 percebe-se que a tolerância com relação ao decréscimo de tensão para variações lentas de tensão aumentou ao longo do tempo considerando-se o fabricante adotado pela planta industrial em estudo. Segundo os especialistas da engenharia de manutenção, a tendência de substituir CLP's defeituosos e adquirir possíveis *back-up's* da família 4 provenientes do fabricante A se confirmou através do levantamento de tolerâncias realizado.

Na Tabela 4 são apresentados percentuais de tolerância para tensões inferiores às especificadas como valor nominal pelo fabricante. Foram pesquisadas faixas de tolerância para inversores de frequência com potência variando entre 1,5 e 16,0 kVA

e foram encontrados percentuais iguais de tolerância para cada fabricante. Alguns inversores de frequência presente na U.O.F. foram adquiridos do fabricante C há mais de dez anos. Os inversores dos fabricantes A, B e D foram adquiridos recentemente.

TABELA 4 - Faixas de tolerância à variação de tensão para inversores

Fornecedor	Inversores Instalados		Tolerância para 440 VAC (%)
	Qtde.	%	
A	7	7,7	-10
B	64	70,3	-10
C	19	20,9	-15
D	1	1,1	-

Investigando-se as faixas de tolerância de inversores de frequência às variações lentas de tensão (Tabela 4) verifica-se a possibilidade de que os equipamentos atuais possam ser mais sensíveis que os instalados quando da construção da fábrica de automóveis em questão, em torno de vinte e seis anos atrás. 79,1% dos inversores de frequência presentes no sistema suportam apenas 10% de redução com relação à tensão nominal especificada.

4.3.2 Variações Rápidas de Tensão

Os fornecedores de CLP's A, C e D, presentes na Tabela 5, estão em conformidade com a norma EN 61000-4-11 que possui como equivalente o padrão IEC 1000-4-11. Ambas descrevem os testes e as técnicas de medição de afundamentos de tensão, de interrupções e de variações de tensão com o objetivo de verificar a imunidade de equipamentos eletrônicos em relação a tais distúrbios.

TABELA 5 - Afundamentos de tensão tolerados por CLP's

Fornecedor	Magnitude Tensão (%)	Duração Evento (ms)
A	70	10
B	-	-
C	70	10
D	70	10

As fontes de alimentação dos CLP's dos fabricantes A, C e D (Tabela 5) são submetidas a afundamentos de tensão de 70% durante 10 milissegundos, interrupções com magnitude de até 5% do valor nominal de tensão durante 5 segundos e flutuações de tensão de 10% também do valor nominal. Após submetidos às condições supracitadas os equipamentos devem permanecer em condições normais de funcionamento.

Após contato com o fornecedor A, o mesmo confirmou as condições sob as quais os CLP's são submetidos e o correto funcionamento de tais dispositivos diante de tais parâmetros. Não foram referenciadas normas relativas a testes de afundamentos de tensão pelo fornecedor B.

Não constam informações relativas às normas utilizadas pelos fabricantes de inversores de frequência em seus catálogos (Tabela 6).

TABELA 6 - Afundamentos de tensão tolerados por inversores

Fornecedor	Magnitude Tensão (%)	Duração Evento (ms)
A	70	10
B	70	10
C	-	-
D	-	-

4.4 Teste de Sensibilidade

O teste de sensibilidade a afundamentos de tensão foi realizado com o objetivo de validar os dados apresentados pelo fabricante do CLP testado. Para a execução do referido teste foram utilizadas as seguintes ferramentas de trabalho:

- controlador lógico programável (CLP);
- fonte CA programável;
- *notebook*;
- software específico para realização da interface entre o CLP e o *notebook*.

Vale salientar que o teste de sensibilidade foi realizado utilizando-se o tipo de CLP mais comumente encontrado na planta industrial estudada (fabricante A). O CLP utilizado no presente teste é composto de fonte, "rack" e "cpu". Um detalhe importante é que o CLP testado não continha nenhum cartão de entrada ou de saída e, portanto nenhuma carga, ou seja, estava a vazio. A fonte de CLP testada é monofásica e sua tensão nominal é 120 V.

O fabricante A (Tabelas 3 e 5) apresenta algumas considerações sobre o dispositivo testado, em catálogo específico de fontes de alimentação. Segundo o mesmo, CLP's da família 3 (Tabela 3) continuam a operar por um pequeno período de tempo caso a tensão de entrada da fonte de alimentação esteja fora da faixa de operação de tensão recomendada, que neste caso varia entre 85 e 132 V, ou seja, uma redução de 30% ou um aumento de 10% em relação a tensão nominal. O CLP continua a realização da varredura do programa do usuário e também dos controles de entrada e saída durante o tempo supracitado.

Conforme o fabricante os controladores do CLP se desligarão, ou seja, encerrarão a varredura e desabilitarão suas saídas, caso a tensão de entrada da fonte de alimentação seja removida ou reduzida a um valor inferior ou superior ao estabelecido como faixa de operação de tensão quando excedido o tempo de "hold-up" da "cpu". O controlador volta a operar automaticamente quando a tensão de entrada retorna ao seu valor normal, ou melhor, dentro da faixa recomendada.

Nas especificações gerais apresentadas no catálogo supracitado são descritos tempos de "ride-through" para situações a plena carga e sem carga. Para o primeiro caso o tempo descrito é de 20 ms (1,2 ciclos) e para o segundo 3000 ms (180 ciclos).

A comunicação utilizada entre o microcomputador e o CLP é a assíncrona e a taxa de transmissão foi de 19200 Kbps.

De posse das ferramentas supracitadas foram simulados progressivos afundamentos de tensão. Durante o experimento foram variados dois parâmetros: a magnitude (10 a 90% do valor nominal) e a duração (2 a 3600 ciclos).

O processo de simulação dos afundamentos de tensão foi realizado manualmente, ou seja, a cada mudança de quaisquer um dos dois parâmetros testados o programa armazenado na fonte CA foi configurado novamente.

Foi delineada a Tabela 7 como resultante do comportamento do CLP durante o teste e dos dados informados pelo fabricante, o que permitiu uma análise comparativa.

TABELA 7 - Status CLP (L=ligado, D=desligado, D*=desligado com falha na comunicação)

Mag. (%)	Ciclos											
	2	10	20	21	22	23	24	25	50	120	3600	
90	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
80	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
70	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
60	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
50	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
45	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
44	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
43	L	L	L	L	L	D*	D	D	D*	D*	D*	D*
42	L	L	L	L	L	D*	D	D	D*	D*	D	D*
41	L	L	L	L	L	D	D*	D*	D	D	D	D
40	L	L	L	L	L	D	D	D*	D*	D*	D	D
30	L	L	L	L	L	D	D	D	D	D*	D*	D*
20	L	L	L	L	L	D	D	D	D*	D*	D	D
10	L	L	L	L	L	D*	D*	D	D*	D	D*	D*
0	L	L	L	L	L	D	D	D*	D*	D*	D*	D*

Na Tabela 7 foram listados os três estados de operação do CLP definidos como possíveis de ocorrer: (1) ligado ou L, ou seja, a operação permaneceu normal; (2) desligado com religamento ("restart") automático ou D e (3) desligado com perda da comunicação entre o "notebook" e a "cpu" ou D*. É possível notar através da Tabela 7 que o equipamento testado foi sensível a afundamentos de tensão com duração a partir de 23 ciclos ou 383,3 ms e para magnitudes inferiores a 43% ou 51,6 V.

Vale ressaltar que para afundamentos de tensão dentro da faixa evidenciada na Tabela 7, ou seja, na área de sensibilidade do equipamento, ocorreram falhas de comunicação entre o microcomputador utilizado para o monitoramento e a "cpu" do CLP. Dentro da referida área de sensibilidade o sistema não foi capaz de executar religamento automático. Este fato deve estar, provavelmente, vinculado à utilização de comunicação assíncrona.

Na seção 4.1 foram definidos os tipos de afundamentos de tensão aplicáveis ao sistema elétrico industrial da U.O.F, conforme Tabela 1. Aplicando-se as equações presentes na Tabela 2 foram calculadas

as magnitudes de tensão mínimas possíveis de serem atingidas para os tipos de afundamentos de tensão A, C* e D, os quais são explicitadas na Tabela 8.

TABELA 8 - Valores de tensão resultantes de afundamentos de tensão do tipo A, C* e D de magnitude 10%

Tipo	Magnitude da Tensão (%)		
	V _a	V _b	V _c
A	10,0	10,0	10,0
C*	100,0	50,7	50,7
D	10,0	86,7	86,7

Confrontando-se a tolerância apresentada pelo CLP testado com os valores de tensão remanescentes de afundamentos de tensão (Tabela 8) pode-se concluir que o dispositivo testado apresentará falhas em sua operação apenas quando submetido a afundamentos do tipo A ou D. Falhas poderão ocorrer quando o CLP estiver conectado a qualquer uma das fases quando submetido a afundamentos do tipo A ou na fase definida como **a** quando se tratar de afundamentos do tipo D. Este fato pode ocorrer já que o CLP apresentou falhas no funcionamento a partir de magnitudes iguais a 43% do valor nominal de tensão especificado pelo fabricante.

5.0 - CONCLUSÃO

Os principais ganhos obtidos após o desenvolvimento do presente trabalho foram, sem dúvida alguma, o conhecimento das cargas elétricas existentes na planta industrial estudada e o comportamento das cargas definidas como as mais sensíveis quando submetidas a afundamentos de tensão.

Foi demonstrado que os CLP's presentes na planta, adquiridos do fornecedor A (Tabela 3), podem ter se tornado menos sensíveis à medida que novas gerações foram lançadas no mercado, quando submetidos a tensões inferiores às especificadas para variações lentas de tensão. Ou seja, provavelmente os CLP's presentes no sistema industrial foram projetados de modo a tolerar valores de tensão cada vez menores aos especificados para variações lentas de tensão.

Para a especificação do comportamento dos equipamentos sensíveis quando submetidos a variações rápidas de tensão foram encontradas poucas informações. Apesar da crescente conscientização com relação aos fenômenos de qualidade de energia elétrica, alguns fornecedores ainda não apresentam dados necessários para avaliação de seus equipamentos frente a tais fenômenos.

Foi testada a sensibilidade de um CLP a afundamentos de tensão e o comportamento apresentado pode vir a demonstrar maior robustez com relação à maioria dos CLP's testados em pesquisas anteriores. Talvez este fato venha comprovar a união de fornecedores e consumidores com o objetivo de desenvolver dispositivos mais tolerantes a distúrbios de qualidade de energia.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) DUGAN, R. C.; McGRANAGHAN, M. F.; BEATY, H. W. *Electrical Power Systems Quality*. McGraw-Hill, 1996. 265 p.
- (2) CONRAD, L.; LITTLE, K.; GRIGG, C. Predicting and Preventing Problems with Remote Fault-Clearing Voltage Dips. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 27, n. 1, p. 167-172, Jan./Feb. 1991.
- (3) LAMOREE, J. et al. Voltage Sag Analysis Case Studies. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 30, n. 4, p. 1083-1089, July/ Aug. 1994.
- (4) IEEE. Std 446-1995: IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power and Commercial and Industrial Applications - IEEE Orange Book. New York, 1996. 309 p.
- (5) EPRI PEAC. Performance of AC Motor Drives During Voltage Sags and Momentary Interruptions. *PQ Commentary*, n. 3, 12 p., Dec. 1998.
- (6) McGRANAGHAN, M. F.; MUELLER, D. R.; SAMOTYJ, M. J. Voltage Sags in Industrial Systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 29, n. 2, p. 397-403, Mar./Apr. 1993.
- (7) VAN WAGNER; ANDRESHAK, A.; STANIAK, J. Power Quality and Factory Automation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 26, n. 4, p. 620-626, July/Aug. 1990.
- (8) CONRAD, L. E.; BOLLEN, M. H. J. Voltage Sag Coordination for Reliable Operation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 33, n. 6, p. 1459-1463, Nov./Dec. 1997.
- (9) BOLLEN, M. H. J. Characterization of voltage sags experienced by three-phase adjustable-speed drives. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 12, n. 4, p. 1666-1671, Oct. 1997.
- (10) BOLLEN, M. H. J. *Understanding Power Quality Problems: Voltage sags and interruptions*. Piscataway: IEEE Press, 2000. 543 p.
- (11) BOLLEN, M. H. J.; THATVATCHAI, T.; GÜLALI, Y. Assessment of the Number of Voltage Sags Experienced by Large Industrial Customer. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 33, n. 6, p. 1465-1471, Nov./Dec. 1997.