

Análise da Qualidade da Energia Elétrica de Fornecimento a Cliente Industrial sob Condições de Incertezas dos Dados – Estudo de Caso

Wider Basílio Santos Sandro Machado Ferreira André Luiz Pereira da Cruz
Samuel Marinho Costa* Gustavo Henrique Vieira de Melo

1. RESUMO

Os trabalhos em qualidade da energia, para melhoria do desempenho operativo do cliente, com vistas a redução do número de paradas de produção por problemas atribuídos a qualidade da energia elétrica, estão sendo desenvolvidos pelas concessionárias de energia, em geral, adotando o “modelo condominial” disponível no setor.

As dificuldades para obtenção de resultados conclusivos que auxiliem a identificação de ações de melhoria do desempenho operativo do cliente, impostas pela “modelo condominial”, motivou a Celpe a desenvolver metodologia própria aplicada a este fim, validada pela monitoração que a Empresa realiza a seus clientes industriais desde de 1998.

Este artigo apresenta um dos estudos em qualidade da energia, que trata as variações de tensão de curta duração – VTCD, realizados pela Celpe em um de seus clientes industriais atendidos em 13,8 kV, onde foi aplicada a metodologia desenvolvida pela Empresa.

A metodologia proposta pela Celpe considera o elevado nível de incerteza dos dados e identifica três níveis de sensibilidade do cliente a VTCD.

PALAVRAS CHAVE

Qualidade da Energia Elétrica – QEE; Cargas Sensíveis; Variação Momentânea de Tensão; Cliente.

2. INTRODUÇÃO

A crescente necessidade de melhorias da qualidade da energia elétrica tem motivado as concessionárias de energia a trabalharem em parceria com seus clientes e fabricantes de equipamentos elétricos, na busca de soluções dos problemas associados a qualidade da energia, que resultam em perda do desempenho produtivo dos clientes.

Um trabalho de monitoração e análise da qualidade da energia elétrica de fornecimento a um cliente industrial inicia-se com a indicação do problema, seguido por levantamento de dados elétricos e conhecimento do processo produtivo do cliente, definição de modelo de comunicação de dados entre as partes e instalação de equipamentos registradores digitais de perturbação – RDP.

O empenho dos clientes no fornecimento de dados que deve ocorrer durante todo o trabalho, em geral, só se observa no momento inicial em que os equipamentos são instalados. Esse fato aumenta as incertezas dos dados, comprometendo assim os resultados obtidos através da “metodologia condominial” disponível no setor elétrico brasileiro, normalmente aplicada para análise da qualidade da energia elétrica das concessionárias.

A Celpe tem trabalhado no desenvolvimento de metodologia para análise da qualidade da energia elétrica de fornecimento a clientes sensíveis a variação de tensão de curta duração – VTCD, em que os dados de ocorrências dos mesmos apresente elevado nível de incerteza.

Este artigo apresenta um caso prático de monitoração da qualidade da energia elétrica de fornecimento a um cliente industrial da Celpe, atendido em 13,8 kV, os resultados obtidos com a aplicação de metodologia própria que considera as incertezas associadas aos dados de ocorrências do cliente, suas vantagens e limitações.

3. LEVANTAMENTO DOS DADOS DE OCORRÊNCIAS

Utilizando o procedimento tradicional para caracterização das ocorrências elétricas no sistema de potência, tem-se as seguintes ações que as precede:

- Identificação da origem da ocorrência;
- Identificação da causa da ocorrência;

Estas informações estão disponíveis nos relatórios do despacho de cargas da Celpe, sendo este consultado através dos relatórios diários de ocorrências – RDO.

O próximo passo é a caracterização da ocorrência propriamente dita, que indica a magnitude do seu fundamento e duração, bem como o número de fases afetadas no ponto de monitoração. A caracterização da ocorrência contemplando o número de fases afetadas foi proposta pela Celpe, a partir da constatação da inadequabilidade da “metodologia condominial” para identificação do nível de sensibilidade de cliente à VTCD [2].

Em complemento aos dados de ocorrências do sistema elétrico das concessionárias, tem-se os registros de interrupções de processos produtivos dos clientes, permitindo relacionar as causas aos efeitos das ocorrências, estruturando assim uma base de dados consistente e necessária para a identificação da sensibilidade dos processos produtivos dos clientes.

4. ANÁLISE DAS OCORRÊNCIAS

Durante o período de monitoração são levantadas informações de natureza operacional de todos os agentes envolvidos (transmissora, Celpe e cliente), dados de ocorrência no sistema elétrico e registros de medições especiais realizadas pelo RDP.

A partir de tais dados são realizadas duas análises complementares, uma de caráter geral, que é a análise das ocorrências, e a outra de caráter específico, que é a análise da qualidade de energia (alvo deste artigo).

Análise das Ocorrências: Análise de caráter quantitativo que identifica as ocorrências do sistema elétrico que provocaram variações de tensão no ponto de fornecimento de energia elétrica ao cliente, suas origens e conseqüências nos seus processos produtivos. Esta análise apresenta-se como instrumento importantíssimo para o planejamento da manutenção da Celpe.

Análise da Qualidade da Energia Elétrica: A qualidade da energia elétrica de fornecimento a um cliente pode ser expressa em termos do número de interrupções de seu processo num dado período de tempo. A análise não se propõe a atribuir responsabilidades pelas paradas produtivas, e sim identificar o nível de sensibilidade da carga a VTCD, de modo a

permitir o desenvolvimento dos trabalhos para proposições de ações de melhoria a serem realizadas pelas partes envolvidas, considerando sempre a otimização de recursos e facilidades de implementação.

5. NÍVEL DE SENSIBILIDADE

A falta de informações por parte do cliente sobre as paradas de produção devido a VTCD, torna o trabalho de identificação do seu nível de sensibilidade mais difícil, uma vez que passa-se a trabalhar com insuficiência de dados ou dados com elevado nível de incerteza.

A metodologia adotada para o tratamento dos dados sem as informações de parada do cliente está baseada nos registros das grandezas capturadas em baixa velocidade pelos RDP com medições realizadas em intervalos de 15 minutos, onde uma série de grandezas são coletadas, dentre elas a demanda. Através da observação de dois registros consecutivos, um anterior e outro posterior à ocorrência estudada, pode-se determinar se houve parada de parte ou da totalidade da produção do cliente.

A parada da produção do cliente, devido a VTCD, se caracteriza pela redução anormal e incompatível da demanda, quando comparada com a curva de carga característica deste cliente.

Por se tratar de um número elevado de ocorrências registradas, o procedimento descrito não é aplicado a todas as ocorrências. As VTCD, “suspeitas de terem provocado parada de produção no cliente”, deverão ser submetidas ao procedimento, de forma a caracterizá-la como sendo causadora ou não de parada. Para tanto, a Celpe necessitou desenvolver metodologia própria aplicada a este fim, que considerasse a incerteza dos dados e que permitisse, com razoável segurança, identificar o nível de sensibilidade do cliente a VTCD.

Embora o propósito deste artigo seja apresentar a aplicação da referida metodologia, é imprescindível colocar algumas considerações e conceitos adotados.

Tempo de restabelecimento: Pode ser definido como o tempo necessário para que as máquinas que compõem um determinado processo estejam aptas a retomar o funcionamento normal, fabricando os produtos dentro dos padrões de qualidade requeridos. Alguns processos necessitam de mais tempo

que outros, a depender de quão complexo seja o processo produtivo.

Uma vez que a cada processo produtivo está associado um tempo de restabelecimento da sua produção, dependendo do tempo de restabelecimento de alguns processos, corre-se o risco destes serem curtos o suficiente a ponto do RDP não ser capaz de registrar a redução da demanda dentro do período de medição utilizado, em nosso caso 15 minutos. Para processos com tempo de restabelecimento superior a 15 minutos não ocorre este tipo de problema, sendo a verificação da parada de processo sempre possível.

Para processos com tempo de restabelecimento inferior a 15 minutos, dois fatores devem ser considerados. O primeiro diz respeito ao momento em que ocorreu o afundamento de tensão e o segundo à quantidade de máquinas/processos sensibilizados pela VTCD.

Com relação ao momento em que ocorre a VTCD, pode-se exemplificar sua influência através de duas situações distintas.

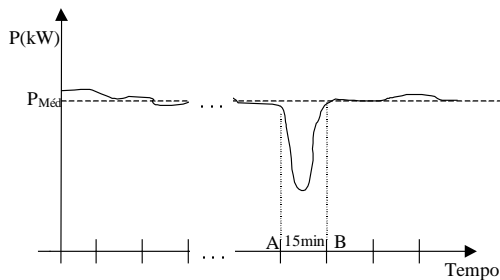


Figura 1

Na primeira situação, ilustrada pela figura 1, uma VTCD ocorre logo após uma das leituras de 15 minutos (ponto A). Neste caso, devido ao tempo de restabelecimento ser curto, quando a próxima leitura for realizada (ponto B) a demanda já terá sido normalizada e conseqüentemente a perda de produção não será identificada.

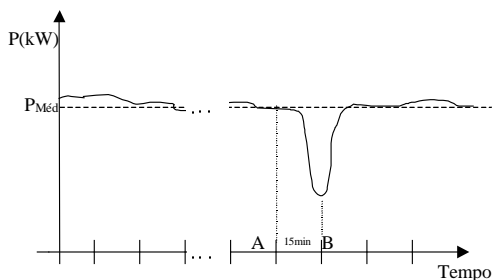


Figura 2

A segunda situação é ilustrada na figura 2, onde a VTCD ocorre bem depois do ponto A, possibilitando a detecção da diminuição de demanda através da leitura em B.

Como pode ser constatado através desses dois exemplos, mesmo com um tempo de restabelecimento inferior ao tempo de amostragem, é possível detectar a parada de produção, basta que a VTCD ocorra um pouco antes de uma das leituras programadas de 15 minutos.

A magnitude do afundamento é o valor eficaz mínimo atingido por quaisquer uma das fases durante a ocorrência, expressa em por unidade ou em percentual. A duração do evento é considerada como sendo o intervalo de tempo entre o instante em que a tensão da primeira fase viola o limite mínimo de 90% e o instante em que a tensão da última fase restabelece sua condição normal de operação – acima de 90% da tensão nominal.

No que diz respeito ao número de processos afetados pela VTCD, a priori, pode-se dizer que quanto maior o nº de processos sensibilizados, maior será o tempo necessário para que a fábrica volte a operar normalmente. Deve-se ressaltar a interdependência entre vários processos na linha de produção, onde ao interromper-se uma de suas partes, todo o resto será paralisado, sem que a causa para o desligamento do resto da fábrica tenha sido necessariamente a VTCD, mas a quebra da cadeia produtiva.

6. RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados aqui apresentados são frutos do trabalho de monitoração durante 13 meses a um cliente industrial da Celpe suprido em 13,8 kV.

Para todas as ocorrências registradas, são catalogadas, conforme mencionado no item 3, a magnitude do afundamento, a sua duração e o número de fases afetadas pela VTCD.

Fazendo uso das informações relativas ao número de fases atingidas, as ocorrências são separadas e estudadas de forma agrupada, preservando assim características inerentes ao tipo de afundamento em análise, seja ele, monofásico, bifásico ou trifásico. Adotando esta metodologia de desagregação das ocorrências, obtêm-se 3 níveis de sensibilidade ao invés de apenas um, com um nível de sensibilidade para cada tipo de afundamento[1].

6.1 Nível de Sensibilidade Monofásico

O afundamento monofásico é caracterizado pela variação da tensão ao patamar abaixo de 0,9 pu em uma única fase, durante toda a duração do evento. Seu efeito sobre as instalações dos clientes é reduzido devido à ligação dos transformadores, geralmente ΔY_n (Delta – Y aterrado), o que favorece a sua atenuação, tornando-o menos severo e conseqüentemente menos prejudicial ao processo produtivo.

Através da análise da figura 3 – onde estão representadas graficamente todos os afundamentos monofásicos capturadas pelo RDP, neste caso, pode-se identificar a existência de um ponto especialmente severo (indicado pela seta), se comparado aos demais. A tensão neste ponto chegou a 0 pu durante 20,1 ciclos. Porém, mesmo com a tensão de 0 pu e sendo aplicada a metodologia para identificação de paradas, não foram encontrados indícios de que o afundamento tenha sido suficientemente severo para sensibilizar o cliente.

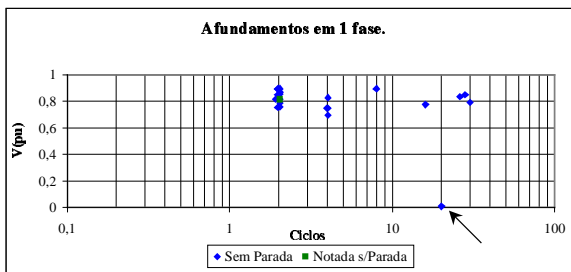


Figura 3

Analisando-se a segunda ocorrência mais severa (0,64 pu e 4 ciclos), tem-se a mesma conclusão anterior, levando-se a crer que o cliente seja insensível a afundamentos monofásicos.

6.2 Nível de sensibilidade Bifásico

O afundamento bifásico é caracterizado pela variação da tensão ao patamar abaixo de 0,9 pu em duas fases quaisquer, não sendo necessariamente iniciadas no mesmo instante, e podendo ou não, haver o restabelecimento simultâneo das fases afetadas. Sob o aspecto de severidade, as ocorrências bifásicas são obviamente mais críticas do que as monofásicas e menos críticas que as trifásicas.

A atenuação dos afundamentos bifásicos pelos transformadores é em menor

proporção se comparados com os monofásicos. No caso dos afundamentos trifásicos não há atenuação.

No que diz respeito à análise das ocorrências representadas na figura 4, em princípio não existe nenhum ponto que esteja em desconformidade com os demais. Isto é devido ao fato de que a única ocorrência com parada de produção, informada pelo cliente, é justamente a mais severa de todas, não deixando margem para contestação dos dados. No entanto, devido a proximidade da amplitude de algumas ocorrências com a amplitude da ocorrência mais severa, serão investigados cinco outros pontos julgados como críticos neste caso, e que por sua vez estão identificados como não causadores de parada do processo.

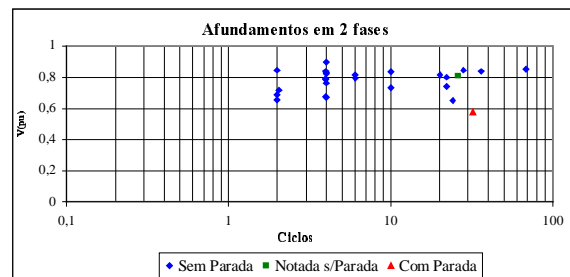


Figura 4

Abaixo está a lista com os pontos escolhidos para aplicação da metodologia descrita no item 5. O critério utilizado para a seleção dos pontos foi a magnitude do afundamento observado, sem levar em consideração a sua duração.

Nº	Tensão (pu)	Duração (ciclos)
1	0,649	24
2	0,654	2
3	0,672	4
4	0,676	4
5	0,718	2

Tabela 1

Investigando as ocorrências listadas na tabela 1, pôde-se determinar alguns pontos em que há indícios de parada do processo produtivo do cliente. Para destacar estes pontos, substituiu-se a cor dos mesmos por uma mais clara laranja. Como resultado, obteve-se o gráfico da figura 5.

Os pontos destacados na figura 5, são referentes às ocorrências listadas a seguir e correspondem a pontos julgados como suspeitos de parada de produção do cliente.

- Nº 2 – na qual houve redução de 220 kW na demanda do cliente.

- Nº 4 – na qual houve redução de 102 kW na demanda do cliente.
- Nº 5 – na qual houve redução de 94 kW na demanda do cliente.

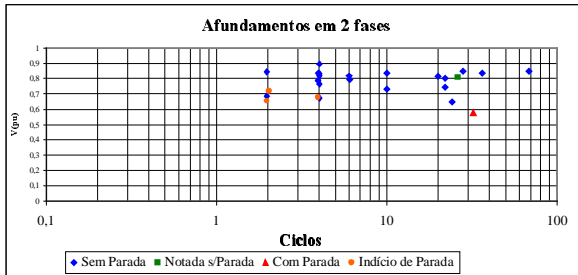


Figura 5

Pode-se observar através da figura 5 que em torno do patamar de 0,7 pu configura-se uma região de transição entre a área cujos pontos não causam parada do processo (pontos acima de 0,7) e a área em que os pontos causam paradas do processo (pontos abaixo de 0,7). Na região de transição não é caracterizada uma fronteira bem definida, observa-se a existência de uma faixa estreita de separação entre as duas áreas, onde para pontos próximos a 0,7 pu e diferentes durações, tem-se algumas ocorrências com indícios de parada do processo quase coincidentes a outras sem indicação alguma de parada. Esta quase sobreposição de pontos divergentes pode ser atribuída aos tempos de restabelecimento dos processos, comentado anteriormente, ou até mesmo ao regime operativo da fábrica no momento das ocorrências.

Com base nos registros das ocorrências capturadas pelo RDP e mesmo com as incertezas dos dados utilizados, pode-se afirmar, com relativa precisão, que o nível de sensibilidade do cliente para afundamentos em duas fases é em torno de 0,7 pu para qualquer duração.

6.3 Nível de Sensibilidade Trifásico

O afundamento trifásico é caracterizado pela variação da tensão ao patamar abaixo de 0,9 pu nas três fases, não sendo necessariamente iniciadas no mesmo instante, e podendo ou não, haver o restabelecimento simultâneo das fases afetadas, sem que necessariamente seja de forma simultânea.

Conforme mencionado anteriormente, os afundamentos causados por curtos-circuitos

trifásicos não sofrem atenuação dos transformadores, por se tratarem de defeitos equilibrados. É comum, no entanto, a incidência de defeitos monofásicos e bifásicos que ao serem propagados ao longo do sistema proporcionam afundamentos desequilibrados nas três fases no ponto de entrega ao cliente.

Dentre as causas dos afundamentos de tensão trifásicos, os curtos-circuitos bifásicos e monofásicos (para algumas situações específicas), além do próprio curto-circuito trifásico, constituem as principais causas de VTCD.

A figura 6 apresenta os afundamentos de tensão nas três fases, registradas pelo RDP no período de monitoração, no ponto de fornecimento de energia pela Celpe ao cliente.

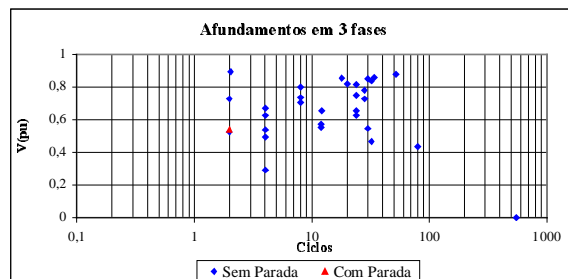


Figura 6

Adotando o mesmo procedimento aplicado aos afundamentos monofásicos e bifásicos, identificam-se muitas ocorrências que merecem uma atenção especial por apresentarem uma magnitude de afundamento muito severa e considerável duração. Tipicamente, afundamentos de tensão trifásicos abaixo de 0,8 pu, apresentam-se como de maior severidade e freqüentemente são causadores de paradas de produção. Razão pela qual serão analisadas minuciosamente as ocorrências que variaram a tensão a níveis inferiores a 80% para qualquer duração.

Na tabela 2, estão listadas as ocorrências que serão objeto de estudo mais aprofundado.

Analisando-se de maneira semelhante ao que foi feito para o caso bifásico, as ocorrências relacionadas na tabela 3 são consideradas como prováveis causadoras de parada de produção do cliente, por ter-se observado redução considerável da sua demanda.

Nº	Tensão (pu)	Duração (ciclos)	Nº	Tensão (pu)	Duração (ciclos)
1	0,493	4	12	0,798	8
2	0,627	4	13	0,469	32
3	0,572	12	14	0,706	8
4	0,653	24	15	0,539	4
5	0,555	12	16	0,727	28
6	0,781	28	17	0,729	2
7	0,523	2	18	0,656	12
8	0,626	24	19	0,435	80
9	0,736	8	20	0,673	4
10	0,748	24	21	0	551
11	0,292	4	22	0,547	30

Tabela 2

Nº	ΔkW	Nº	ΔkW
2	95	12	106
3	201	13	291
4	71	14	201
5	336	16	95
7	53	18	157
8	47	19	649
9	128	20	36
11	141	21	146

Tabela 3

Com base nos resultados obtidos através da análise das ocorrências da tabela 3, foi feito o gráfico dos afundamentos trifásicos no barramento do cliente, considerando as ocorrências, onde houveram reduções da demanda, como suspeita de parada. Na figura 7, os pontos mais claros representam os afundamentos em que há suspeita de parada do processo produtivo do cliente.

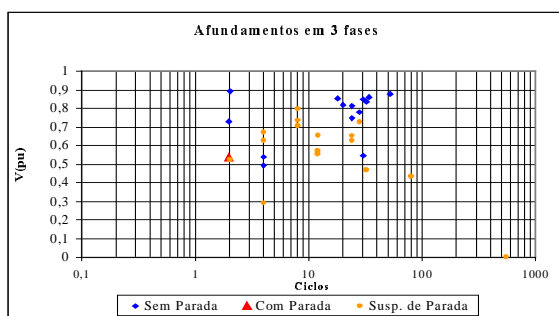


Figura 7

Ainda na figura 7, observa-se que a maioria das ocorrências com conseqüências mais severas para o cliente, estão abaixo de 0,8 pu. No entanto, existem três pontos abaixo de 0,6 pu sem paradas de produção do cliente a eles associadas - sem redução da demanda.

Mesmo com estas incertezas acerca de algumas ocorrências, pode-se determinar a sensibilidade do cliente como sendo em torno de 0,8 pu para qualquer duração.

7. CONCLUSÕES

A “metodologia condominial” não é adequada para a identificação do nível de sensibilidade do cliente a variação de tensão de curta duração – VTCD, por apresentar uma elevada dispersão dos dados quando associada às conseqüências das VTCD no processo produtivo do cliente.

A metodologia desenvolvida e aplicada pela Celpe, para identificação do nível de sensibilidade do cliente a VTCD, considera a insuficiência/inconsistência de dados para o estudo, apresenta níveis de sensibilidade do cliente a VTCD por fases afetadas e auxilia na identificação de ações de redução do número de paradas do processo produtivo do cliente, atribuídas a problemas de qualidade da energia elétrica.

A metodologia não elimina completamente os pontos duvidosos, mas há uma sensível melhora dos resultados, sobretudo naqueles referentes aos afundamentos trifásicos.

Para o caso estudado, foram obtidos três níveis de sensibilidade do cliente a VTCD e identificadas as seguintes ações para redução das paradas de produção do mesmo:

Níveis de sensibilidade:

- O cliente apresenta-se insensível a afundamentos monofásicos;
- O cliente apresenta-se sensível a afundamentos bifásicos para o patamar de 0,7 pu;
- O cliente apresenta-se sensível a afundamentos trifásicos para o patamar de 0,8 pu;

Ação para redução do número de paradas do processo produtivo do cliente:

- Intensificação de “programa de redução de queimadas” sob as linhas de transmissão.

8. BIBLIOGRAFIA

[1] Santos, W. B; Silva, S.F; Ferreira, S.M; Costa, S. M; Cruz, A. L. P; Melo, G. H. V. Metodologia para Identificação da Sensibilidade do Cliente Industrial à Variação Momentânea de Tensão; Enershow 2001 – São Paulo Brasil.

[2] Santos, W. B; Silva, S.F; Ferreira, S.M; Costa, S. M; Melo, G. H. V. Monitoração da qualidade da energia elétrica de fornecimento a clientes com cargas sensíveis – identificação do

nível de sensibilidade; IV SBQEE – Porto Alegre Brasil.