

Impacto da Qualidade da Energia Elétrica em um Ambiente de Mercado Desregulamentado

José Rubens M. Jr.; José Wilson Resende, Milton Itsuo Samesima, Davi B. Gomes, Leandro M. Couto; ESCELSA; Universidade Federal de Uberlândia - UFU

RESUMO

Este trabalho analisa o impacto da perda da Qualidade da Energia Elétrica em um sistema elétrico, com ênfase nas perdas joulicas desenvolvidas nos componentes e equipamento, quando o sistema supre cargas não-lineares bem como trata da estimativa do custo do minuto interrompido sob o ponto de vista da distribuidora. Para calcular as perdas, foram implementadas subrotinas no programa computacional de estudos de penetração harmônica denominado HARMFLOW. Neste artigo são apresentados resultados que quantificam estas perdas. O processo de cálculo do custo relacionado a afundamentos momentâneos de tensão para as distribuidoras é exemplificado através de exemplo.

PALAVRAS-CHAVE

Fluxo harmônico, afundamentos de tensão, modelagens, perdas.

I. INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico das instalações elétricas, ao mesmo tempo que proporciona benefícios tais como maior eficiência e uso racional da energia elétrica, tem causado preocupações com relação às perdas devido à circulação de correntes harmônicas pela rede. Isso acontece porque muitas cargas elétricas industriais que utilizam as novas técnicas de eletrônica de potência, apresentam características altamente não-lineares. Isso proporciona um aumento no valor eficaz verdadeiro das tensões e correntes ao longo dos circuitos de distribuição, alterando, conseqüentemente, os fluxos de potências ativas e reativas nos referidos circuitos.

Em um sistema no qual haja uma significativa parcela de correntes harmônicas, haverá conseqüentemente, um acréscimo nas perdas joulicas nos componentes do sistema, tais como linhas de transmissão e transformadores. Desta forma, a empresa distribuidora de energia poderá estar sofrendo uma quantidade de perdas joulicas não contabilizadas, devido ao fluxo dessas correntes harmônicas, mesmo estando dentro das normas aceitáveis de distorção harmônicas.

Este trabalho tem como objetivo avaliar e quantificar as perdas desenvolvidas nas redes de distribuição típicas de uma concessionária de energia elétrica, suprindo cargas com comportamentos não lineares, tais como: fornos a arco, laminadores, controladores a velocidade variável, etc. Este estudo é muito importante porque, de uma maneira geral, as perdas RI_h^2 (para as frequências harmônicas de ordem h) nos diversos componentes e equipamentos da rede, normalmente não são incluídas nos estudos de fluxo de carga (cálculos feitos apenas para a frequência de 60 Hz) e, por conseguinte, não contabilizadas na composição do percentual total de perdas técnicas da empresa.

Estas perdas adicionais, devido à circulação de correntes harmônicas, serão obtidas a partir do programa de simulação digital de fluxo harmônico denominado HARMFLOW. Este programa, dentro outros aspectos [1], possui modelos adequados para a representação dos equipamentos e componentes da rede e também inclui o efeito *skin* envolvido com as frequências harmônicas. Assim, a partir de medições efetuadas nos pontos de acoplamento entre as cargas e a rede distribuidora de energia elétrica, é possível calcular o montante da energia elétrica não quantificada na composição de perdas técnicas.

A partir dessas informações pode-se avaliar, técnica e economicamente, se medidas corretivas para minimização das perdas técnicas aqui focalizadas são viáveis ou não.

II. BREVE DESCRIÇÃO DO PROGRAMA HARMFLOW

O programa HARMFLOW foi desenvolvido para os estudos típicos de fluxo de carga em 60 Hz e de penetração harmônica.

A metodologia desenvolvida neste programa para os cálculos nas frequências harmônicas é centrada na seguinte equação:

$$[I]=[Y].[V] \quad (1)$$

onde:

[I]: vetor de correntes harmônicas injetadas nas barras pelas cargas não-lineares;

[Y]: matriz admitância da rede para cada frequência harmônica;

[V]: vetor de tensões harmônicas.

II.1 Estudos de penetração harmônica a partir de medições

Com a obtenção, por medição, dos valores de correntes harmônicas em uma ou mais barras de um sistema, forma-se o vetor [I] da equação (1). Em seguida, calcula-se, para cada frequência harmônica, o vetor [V] da equação matricial (1).

II.2 Inclusão do cálculo de perdas joulicas

A figura 1 representa, simplificada, um ramo entre duas barras i e j:

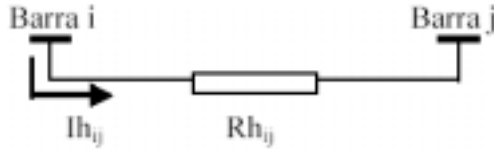


FIGURA 1 – Ramo entre duas barras.

Quando uma corrente $I_{h_{ij}}$ percorrer o ramo ij, constituído de uma resistência $R_{h_{ij}}$, haverá perdas joulicas que podem ser calculadas por (2):

$$P_{j_{harm}} = R_{h_{ij}} \cdot I_{h_{ij}}^2 \quad (2)$$

em que:

$P_{j_{harm}}$: perda joulica no ramo ij, devido à corrente de ordem harmônica “h”.

$R_{h_{ij}}$: resistência do ramo ij, na frequência harmônica “h”.

$I_{h_{ij}}$: corrente harmônica de ordem “h”, da barra i para j.

O valor da corrente harmônica $I_{h_{ij}}$ é dado pela seguinte equação:

$$I_{h_{ij}} = \frac{V_{h_i} - V_{h_j}}{Z_{h_{ij}}} \quad [3]$$

onde:

V_{h_i} e V_{h_j} : são as tensões nas respectivas barras i e j.

Essas tensões são calculadas pelo programa.

O programa HARMFLOW calcula todas as perdas joulicas, associadas à correntes harmônicas, presentes no sistema de energia, desde a fundamental até a última harmônica existente, considerando a correção no valor da resistência dos elementos do sistema, pelo efeito Skin.

III. EXEMPLO ILUSTRATIVO

A figura 2 mostra um sistema de 9 barras, para o qual serão calculadas as perdas joulicas fundamentais e harmônicas, através do programa HARMFLOW.

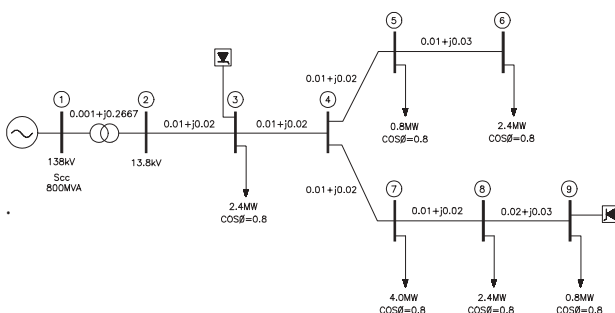


FIGURA 2. Sistema de 9 barras

Os resultados do estudo estão na figura 3. As perdas são apresentadas por ramo (o que possibilita identificar em qual ramo está ocorrendo a maior perda joulica). Embora não mostrado nesta figura, o programa mostra as perdas também por harmônica (o que facilitará na indicação da frequência a ser eventualmente filtrada).

| PERDAS JOULICAS POR RAMO (WATTS) | | | | |
|----------------------------------|-----------------|-------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| BARRA EMISSORA | BARRA RECEPTORA | PERDA DEVIDO A CORRENTE FUND. | PERDA DEVIDO A HARMONICAS | PERDAS TOTAIS FUND. + HARM. |
| UM | DOIS | 10.1721 | .1841 | 11.1562 |
| DOIS | TRES | 180.7255 | .1414 | 181.5669 |
| TRES | QUATRO | 40.6295 | .2021 | 41.0316 |
| QUATRO | CINCO | 1.1174 | .1004 | 1.0178 |
| CINCO | SEIS | 1.1234 | .1002 | 1.0236 |
| QUATRO | SETE | 25.2691 | .2143 | 25.4834 |
| SETE | OITO | 11.1661 | .2321 | 11.3982 |
| OITO | NOVE | 10.1561 | .4876 | 11.3444 |
| PERDAS TOTAIS | | 211.5602 | 2.1626 | 213.6228 |

FIGURA 3. Resultado de um estudo via cálculo de um sistema de 9 barras

IV ESTUDOS DE CASOS REAIS

Os estudos de perdas a serem mostrados a seguir se referem a um sistema de 138 kV, com 78 barras.

IV.1- Um sistema de transmissão com apenas um grande consumidor gerando harmônicas

Nesta seção serão calculadas as perdas joulicas harmônicas devido a apenas um grande consumidor. A figura 4 mostra os valores das correntes harmônicas injetadas por este consumidor (em [pu] da corrente fundamental), as quais foram medidas no ponto de acoplamento com o sistema da distribuidora de energia.

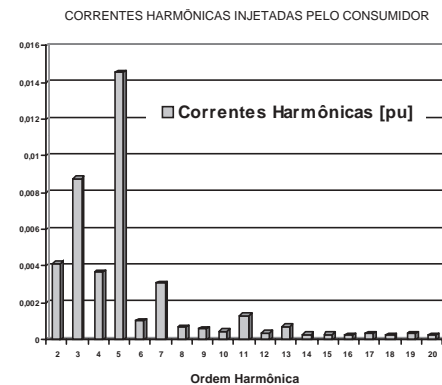


FIGURA 4. Correntes harmônicas injetadas por um grande consumidor.

Os correspondentes valores para a média diária das perdas joulicas ao longo de toda a rede, para cada ordem harmônica, estão ilustradas na figura 5. O valor total dessas perdas é da ordem de 1,62 kW.

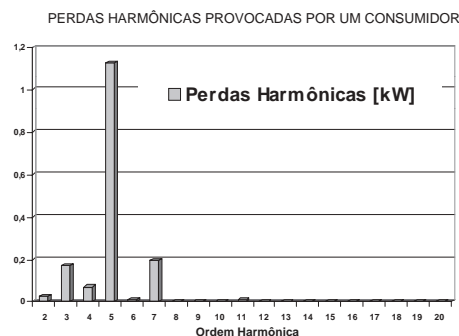


FIGURA 5. Perdas joulicas por harmônicas em todo o sistema devido a um grande consumidor

Já a média das perdas joulicas totais devido a esse consumidor ao longo de 24 horas, considerando quatro tipos de cargas, leve (das 00:00 às 07:00), média 1 (das 07:00 às 18:00), pesada (das 18: às 21:00) e média 2 (das 21:00 às 24:00), são ilustradas na Figura 6.

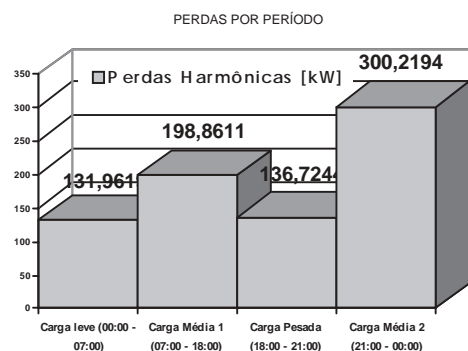


FIGURA 6. Perdas joulicas provocadas por um consumidor – média diária

Pode ser observado na figura 6 que o período de maior perdas joulicas devido a circulação de correntes harmônicas, injetadas pelo referido consumidor foi o de carga média 2 (das 21:00 às 24:00). No período de carga pesada pode-se constatar uma das menores perdas, e isto se deve ao fato de que neste intervalo de tempo este consumidor realiza uma diminuição de sua demanda para atendimento ao horário de ponta estabelecido em contrato junto à distribuidora de energia elétrica local.

IV.2- Sistema de transmissão com todos os grandes consumidores sendo incluídos nos cálculos de perdas harmônicas

Nesta seção são analisadas as perdas joulicas ao longo do mesmo sistema anterior, porém, agora, incluindo-se os 18 maiores consumidores. A figura 7 mostra a média diária das perdas joulicas, ao longo de toda a rede, devido a cada componente de corrente harmônica.

A figura 8 ilustra a média das perdas joulicas totais devido a todos estes consumidores, ao longo de 24 horas, novamente considerando os quatro tipos de cargas (leve (das 00:00 às 07:00), média 1 (das 07:00 às 18:00), pesada (das 18: às 21:00) e média 2 (das 21:00 às 24:00)). Nesta figura, observa-se que:

- O período de maior perda joulica do sistema é o de carga média 2, ou seja, entre 21:00 e 24:00.
- Apesar de, no período de carga pesada, a maioria dos grandes consumidores estarem com redução de demanda para atendimento ao horário de ponta das distribuidoras, as perdas joulicas continuam sendo significativas. Isto se deve ao fato de que neste intervalo (entre 18:00 e 21:00) há uma da geração de correntes harmônicas devido a cargas não lineares dos consumidores residenciais.

A média diária de perdas joulicas, devido às correntes harmônicas, de todo este sistema elétrico, é de 184,252 kW. Isto representa, em média, apenas 1,0 % (um por cento) do total de perdas técnicas da distribuidora de energia elétrica considerada.

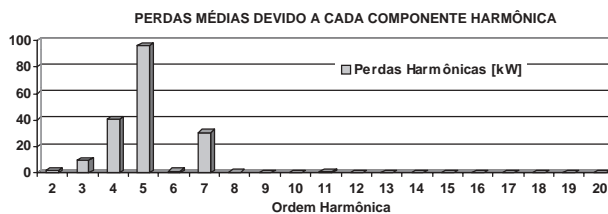


FIGURA 7 – Perdas Joulicas devido a cada componente harmônica

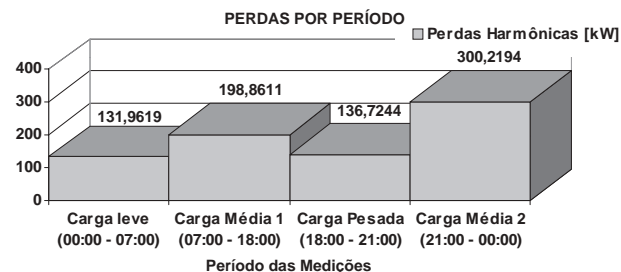


FIGURA 8 – Perdas ao longo de 24 Horas

V - CUSTO DO MINUTO INTERROMPIDO (SOB O ENFOQUE DA DISTRIBUIDORA)

Outro aspecto muito importante é a estimativa do custo do minuto interrompido, sob o ponto de vista da distribuidora. Neste sentido, para este trabalho, monitorou-se vários barramentos de uma empresa distribuidora, em relação aos Afundamentos Momentâneos de Tensão.

Relacionando-se os eventos registrados e as curvas de carga dos grandes clientes industriais monitorados, calculou-se o valor em MWh da energia elétrica não fornecida, devido à referida ocorrência.

O processo de cálculo do custo relacionado à afundamentos momentâneos de tensão para as distribuidoras, é exemplificado através do exemplo de que se segue.

A figura 9 mostra o registro de diversas ocorrências de afundamentos momentâneos de tensão no PAC de um determinado consumidor industrial da ESCELSA. O mais severo dos afundamentos está indicado na figura por uma seta.

A figura 10 apresenta o registro das variações dos valores eficazes das tensões nas 3 fases, para o afundamento de tensão em pauta (o qual ocorreu às 12h 48m do dia 22/10/2002). Ainda desta figura observa-se que o evento teve uma duração de 287,9 ms.

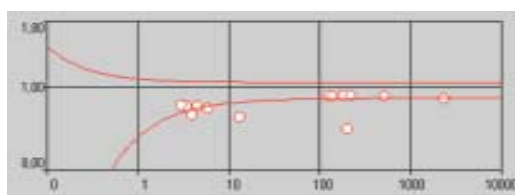


FIGURA 9 Registro de ocorrências no PAC de um consumidor industrial

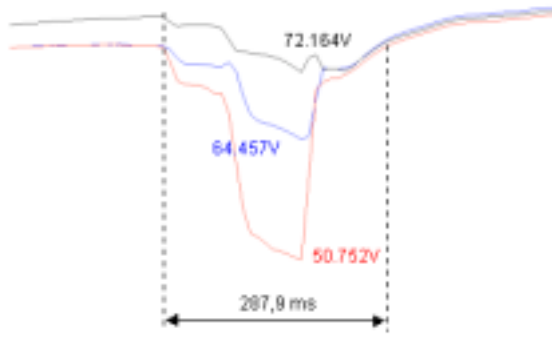


FIGURA 10: Variações dos valores eficazes das tensões nas 3 fases

Analisando-se, na figura 11, a curva de carga da indústria durante este período, observa-se que, considerando-se a curva de demanda média (indicada na figura por uma linha vermelha) e calculando-se a área abaixo desta curva após a ocorrência do evento até que a demanda média seja novamente restabelecida (área de cor amarelada), tem-se o consumo de energia elétrica **não fornecido** ao cliente devido ao afundamento momentâneo de tensão de 287,9 ms de duração.

O resultado desses cálculos indicou que a energia não fornecida para o cliente durante o evento, é de **63,98 MWh**. Considerando-se o custo do MIX de compra de energia elétrica pela distribuidora igual a R\$ 40,00 (valor fictício para fins de demonstração da metodologia) e a tarifa de fornecimento ao cliente igual a **R\$ 57,58 / MWh**, tem-se a tarifa líquida de lucro igual a:

$$TL = R\$ 57,58 - R\$ 40,00 = \mathbf{R\$ 17,58 / MWh}$$

Assim, aplicando-se aqui a denominada “Tarifa de Lucro à energia não fornecida”, tem-se:

$$\text{Energia Não Vendida} = R\$ 17,58 \times 63,98 = \mathbf{R\$ 1.124,77}$$

| DATA | HORA | kW | Demanda não fornecida [kW] |
|-------------------------------|----------|--------|------------------------------|
| 22/10/02 | 11:00:00 | 58.666 | 0 |
| 22/10/02 | 11:15:00 | 58.397 | 0 |
| 22/10/02 | 11:30:00 | 62.362 | 0 |
| 22/10/02 | 11:45:00 | 65.923 | 0 |
| 22/10/02 | 12:00:00 | 65.117 | 0 |
| 22/10/02 | 12:15:00 | 66.595 | 0 |
| 22/10/02 | 12:30:00 | 61.690 | 0 |
| 22/10/02 | 12:45:00 | 65.184 | 0 |
| 22/10/02 | 13:00:00 | 31.987 | 27.455 |
| 22/10/02 | 13:15:00 | 5.712 | 53.731 |
| 22/10/02 | 13:30:00 | 7.594 | 51.849 |
| 22/10/02 | 13:45:00 | 10.147 | 49.295 |
| 22/10/02 | 14:00:00 | 22.915 | 36.527 |
| 22/10/02 | 14:15:00 | 41.261 | 18.182 |
| 22/10/02 | 14:30:00 | 49.661 | 9.782 |
| 22/10/02 | 14:45:00 | 54.634 | 4.809 |
| 22/10/02 | 15:00:00 | 57.725 | 1.718 |
| 22/10/02 | 15:15:00 | 56.851 | 2.591 |
| 22/10/02 | 15:30:00 | 61.085 | 0 |
| 22/10/02 | 15:45:00 | 61.690 | 0 |
| 22/10/02 | 16:00:00 | 64.243 | 0 |
| ENERGIA NÃO FORNECIDA [MWh] | | | 63,98 |

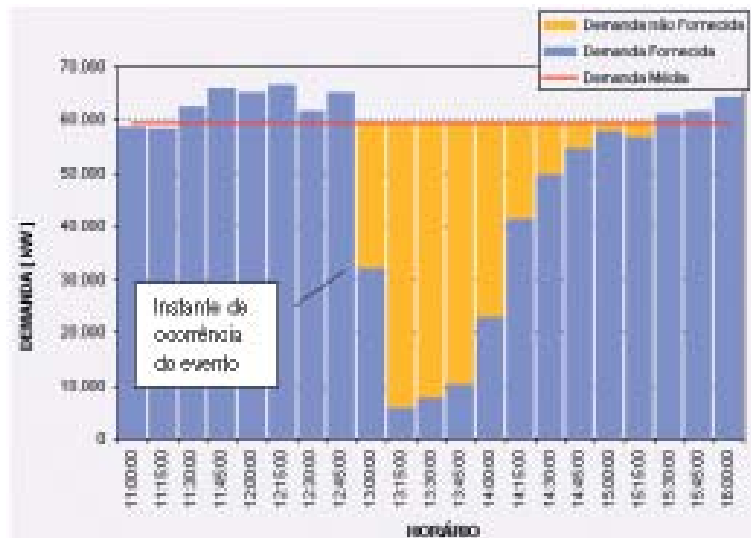


FIGURA 11: Curva de carga da indústria em análise

VI- CONCLUSÕES

A circulação de correntes harmônicas nos sistemas de distribuição das companhias distribuidoras de energia elétrica, não representam uma parcela significativa do total das perdas técnicas verificadas na rede.

Desta forma, investimentos que objetivam a diminuição das perdas técnicas devido à circulação de harmônicas, não são interessantes, sendo até mesmo inviáveis, devido ao baixo significado das mesmas em relação às perdas técnicas totais das empresas.

VII- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Resende, J.W., Tavares Jr., J.V., “Estudos integrados de fluxo de carga e de penetração harmônica em sistemas elétricos com cargas não-lineares”, grupo de Modelagem de cargas e equipamentos II, II Seminário Brasileiro da Qualidade da Energia Elétrica, São Lourenço (MG), 1997.
- [2] IEEE Std 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems