

# **XIV SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

## **DESENVOLVIMENTO DE UM PROJETO DE MONITORAÇÃO DE QUALIDADE DE ENERGIA EM UMA CONCESSIONÁRIA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

LUCIANO BRASIL <sup>(1)</sup>  
RICARDO PENIDO ROSS <sup>(2)</sup>  
LUIZ FELIPE WILLCOX DE SOUZA <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> RGE – RIO GRANDE ENERGIA  
<sup>(2)</sup> CEPEL – CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Palavras-chave: QUALIDADE DE ENERGIA – MONITORAÇÃO – DIAGNÓSTICO -  
CONSUMIDORES

## 1) INTRODUÇÃO

Este artigo apresenta o projeto de monitoração de Qualidade de Energia (QE) que foi realizado ao longo de 1999 na RGE. Este projeto foi desenvolvido em parceria com o Cepel e consistiu da instalação de 10 IED (*Intelligent Electronic Devices*) de monitoração de qualidade de energia em consumidores industriais em pontos estratégicos da área de concessão da RGE. Os principais objetivos deste projeto foram obter informações relevantes sobre a QE no sistema da RGE e identificar a metodologia mais adequada para um programa permanente de QE a ser implantado na empresa.

A etapa inicial do projeto consistiu da escolha dos pontos de monitoração. Para isso, foram escolhidos consumidores com indícios de problemas de QE, fazendo-se uma avaliação das características do processo industrial e das cargas mais sensíveis destes consumidores. Em seguida, as IED foram instaladas nestes pontos de monitoração e configuradas para registrar adequadamente os fenômenos desejados.

Os dados de medição foram coletados e armazenados em um banco de dados durante 6 meses. Posteriormente foi realizado o processamento das informações com objetivo de qualificar e quantificar os problemas encontrados, procurando identificar as origens dos mesmos e as soluções mais recomendadas para cada caso.

As metodologias e critérios adotados nas diversas etapas do projeto são aqui apresentados, desde a escolha dos pontos de monitoração até a análise dos dados de medição. Também serão apresentados neste artigo, em linhas gerais, os principais resultados e benefícios identificados pelo projeto, tanto para a concessionária quanto para os consumidores.

## 2) OBJETIVO

A RGE e o CEPEL realizaram um projeto de pesquisa visando à análise da qualidade de energia elétrica (*power quality*) fornecida a alguns clientes industriais da RGE. Este projeto teve como objetivos:

- Qualificar e quantificar os problemas da qualidade de energia elétrica fornecida aos clientes industriais selecionados;
- Diagnosticar e, quando for o caso, propor soluções para os problemas encontrados.

O projeto consistiu das seguintes etapas:

- Especificação de sistema de monitoração da qualidade de energia elétrica adquirido pela RGE;
- Visita a consumidores pré-selecionados para identificação de processos industriais sensíveis a problemas de qualidade de energia, visando à definição dos pontos de monitoração;
- Instalação das remotas e configuração do sistema de monitoração de qualidade de energia elétrica da RGE;
- Medição da qualidade de energia elétrica nos pontos de monitoração selecionados, com aquisição de dados por um período de seis meses;
- Análise dos resultados de medição objetivando diagnosticar problemas e apontar possíveis sugestões para minimizá-los.

### 3) SISTEMA DE MONITORAÇÃO UTILIZADO

O equipamento utilizado para a monitoração da qualidade de energia foi uma remota de medição de energia do tipo 7700 ION<sup>®</sup>, da empresa canadense Power Measurement Ltd (PML). As remotas são ligadas a transformadores de potencial (TP's) e de corrente (TC's) para aquisição dos sinais de tensão e corrente do consumidor.

A aquisição de dados é feita por modems ligados às remotas. O software que faz a comunicação, programação das remotas, aquisição de dados e armazenamento em banco de dados é o Pegasys 2.0<sup>®</sup>, também da PML.

As remotas foram configuradas para monitorar variações momentâneas de tensão, formas de onda e transitórios. Além disso, as remotas registraram a intervalos regulares de tempo (tipicamente uma hora) os valores de tensão rms, corrente rms, potência ativa, potência reativa, potência aparente, fator de potência, harmônicos de tensão e harmônicos de corrente.

### 4) CONSUMIDORES MONITORADOS

Foram selecionados dez consumidores industriais para monitoração da qualidade de energia elétrica. Foi instalado um medidor na entrada de cada um desses consumidores.

Dentre os consumidores selecionados, há uma grande variedade de tipos de indústria, cada qual com processos produtivos e cargas com características diferentes. Estes consumidores foram selecionados em diferentes regiões geográficas do sistema da RGE. Devido a esta diversidade, cada consumidor apresenta sensibilidades distintas a fenômenos de qualidade de energia elétrica [1]. Conseqüentemente, cada consumidor possui necessidades diferenciadas de qualidade de fornecimento.

A Figura 1 mostra como estão agrupados os consumidores de acordo com sua tensão nominal. Observa-se que a maioria dos consumidores monitorados está ligada a redes em 13,8 kV. Há ainda consumidores ligados em 23 kV e um consumidor ligado em 69 kV.

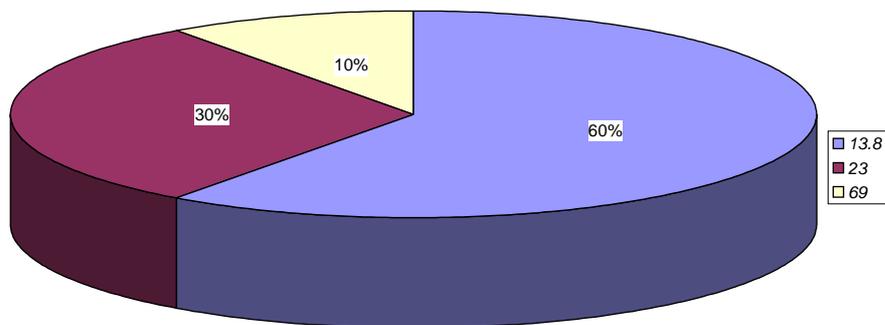


Figura 1 –Classificação dos Consumidores quanto a Tensão Nominal (kV)

A Figura 2 mostra uma comparação da carga instalada de cada consumidor. Os dez consumidores monitorados são identificados pelas letras de A a J. Este dado não foi disponibilizado para os consumidores E e G.

\* 7700 ION e Pegasys 2.0 são marcas registradas da Power Measurement Limited.

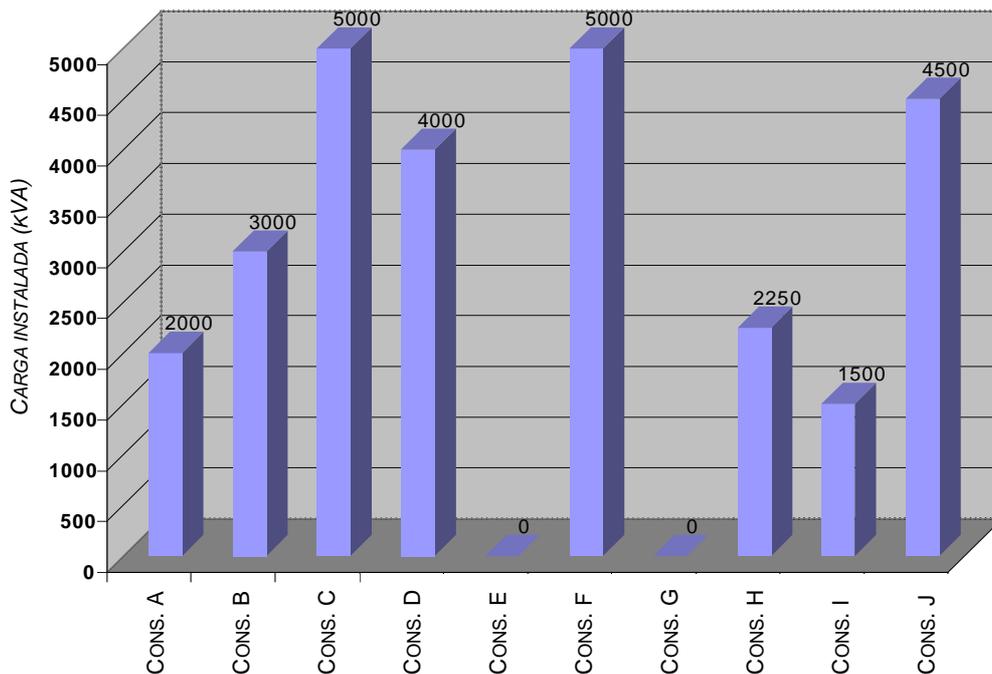


Figura 2 – Carga Instalada dos Consumidores

Os consumidores escolhidos apresentam uma grande diversidade de atividades industriais, conforme mostrado na Figura 3. Nota-se que quatro das dez indústrias são ligadas a atividades agrícolas (agroindústrias e máquinas agrícolas).

**Tipo da Indústria**

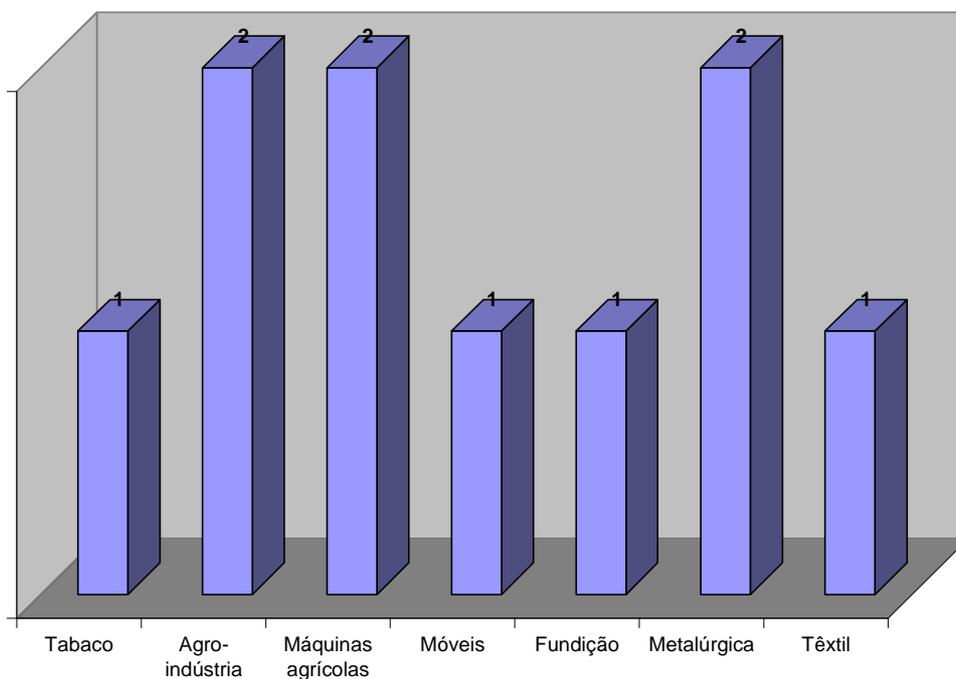


Figura 3 – Classificação dos Consumidores quanto a Atividade Industrial

A Figura 4 apresenta uma classificação dos consumidores de acordo com a tecnologia de automação adotada no processo industrial. Foram considerados consumidores com processos de baixa automação aqueles que se utilizam basicamente de motores de indução e demais equipamentos eletromecânicos. Os consumidores com tecnologia média são aqueles

que possuem parte do processo automatizada, utilizando equipamentos eletroeletrônicos tais como acionamentos eletrônicos de motores, Controladores Lógicos Programáveis (CLP's), etc. Os consumidores altamente automatizados são aqueles que possuem processos contínuos totalmente controlados por CLP's, acionamentos eletrônicos, microcontroladores, microprocessadores, robôs, etc.

É importante destacar que o grau de automação e aplicação de modernas tecnologias de um consumidor está intimamente ligado a sua sensibilidade a fenômenos de qualidade de energia [2], [3]. Enquanto os processos à base de equipamentos eletromecânicos são bem robustos, processos modernos geralmente são mais vulneráveis a afundamentos momentâneos de tensão, já que equipamentos tais como CLP's e acionamentos eletrônicos têm maior sensibilidade a estes fenômenos [4].

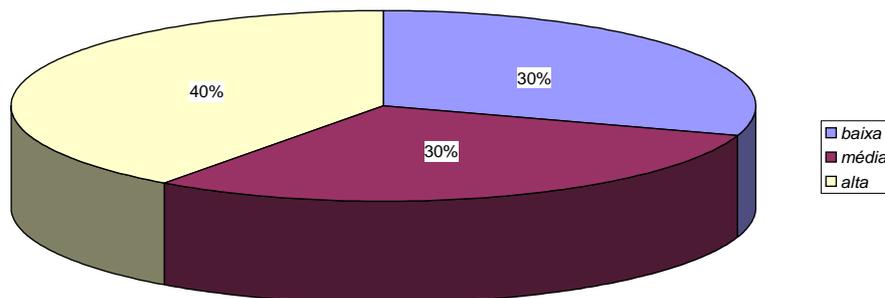


Figura 4 – Classificação dos Consumidores quanto a Automação do Processo Industrial

Após as visitas aos consumidores, fez-se um levantamento dos principais problemas e queixas encontrados em cada um deles. A Figura 5 mostra um gráfico dos principais problemas encontrados, agrupados em três categorias distintas. Cabe ressaltar que alguns consumidores reportaram mais de um problema, daí o total de problemas alegados ser superior ao número de consumidores monitorados.

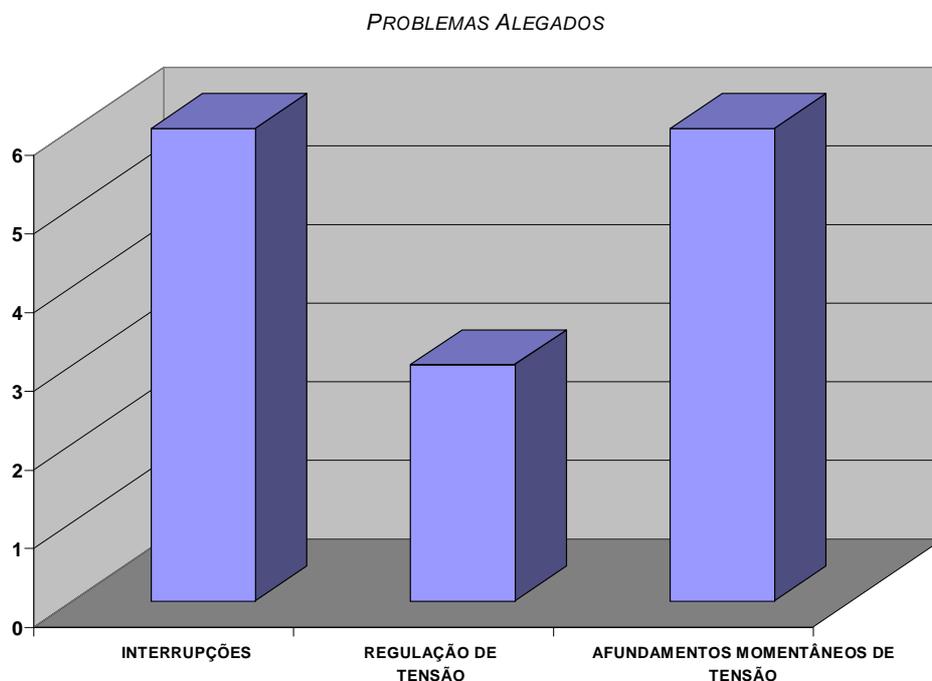


Figura 5 – Problemas Alegados pelos Consumidores

## 5) RESULTADOS OBTIDOS

A medição foi realizada entre julho de 1999 e dezembro de 2000, tendo durado um período total de seis meses.

A Figura 6 mostra a parcela das amostras de medição em cada consumidor para a qual a tensão esteve dentro dos limites adequados de fornecimento de energia. Estes limites, definidos na Portaria nº 47 do DNAEE [5], são +5% e -7,5% da tensão de fornecimento. Considerou-se que a tensão de fornecimento de cada consumidor é a sua tensão nominal. Pelo gráfico, observa-se que a tensão fornecida a cinco consumidores esteve entre 0,925 e 1,05 pu para todas as amostras registradas. A tensão fornecida a um dos consumidores esteve dentro dos limites adequados durante 97% do tempo de medição. A tensão fornecida a quatro consumidores apresentaram maiores problemas de regulação, estando dentro dos limites adequados de fornecimento durante 75% a 82% do período de medição.

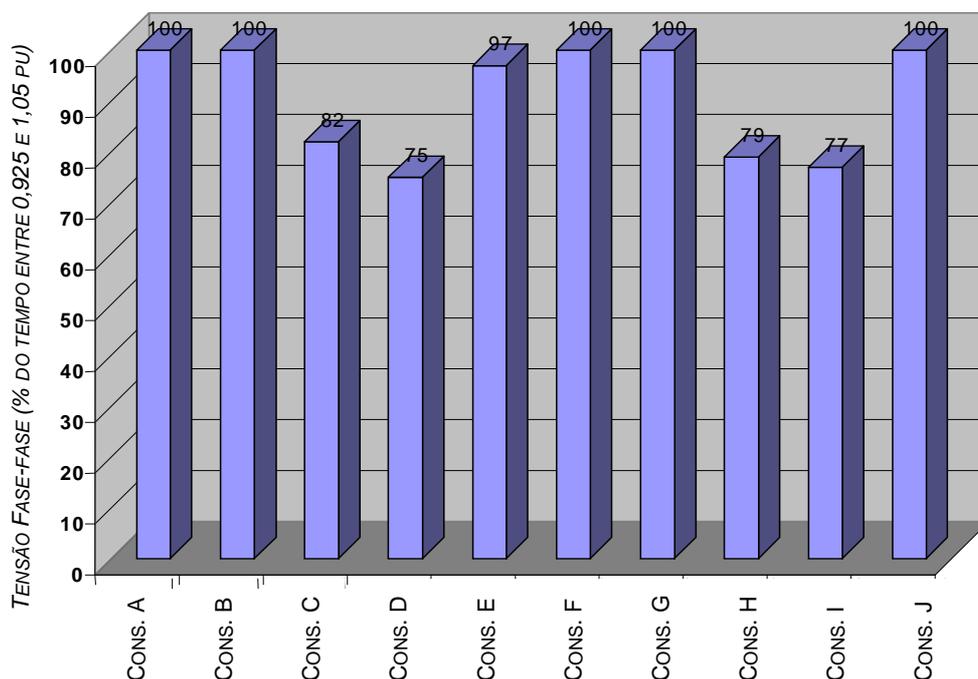


Figura 6 – Parcela do Período de Medição para a qual a Tensão Fase-fase esteve entre 0,925 e 1,05 pu

Vários consumidores apresentam problemas de baixos fatores de potência. O motivo principal é a presença de bancos de capacitores fixos que não são desligados à noite quando a fábrica pára de funcionar. Houve também dois consumidores (D e E) que apresentaram baixo fator de potência indutivo, provavelmente por sub-dimensionamento do banco de capacitores para correção do fator de potência. A Figura 7 mostra a parcela dos valores de fator de potência registrados em cada consumidor que estiveram acima de 0,92, seja capacitivo ou indutivo. O problema de baixo fator de potência é mais crítico no Consumidor I, cujo fator de potência esteve dentro dos limites de referência definidos pela Aneel [6] por apenas 25% do tempo de medição. Por outro lado, apenas o Consumidor J teve seu fator de potência dentro dos limites de referência durante todo o período de medição. De uma forma geral, os Consumidores A, B e F também apresentaram fatores de potência elevados durante grande parte do período de medição.

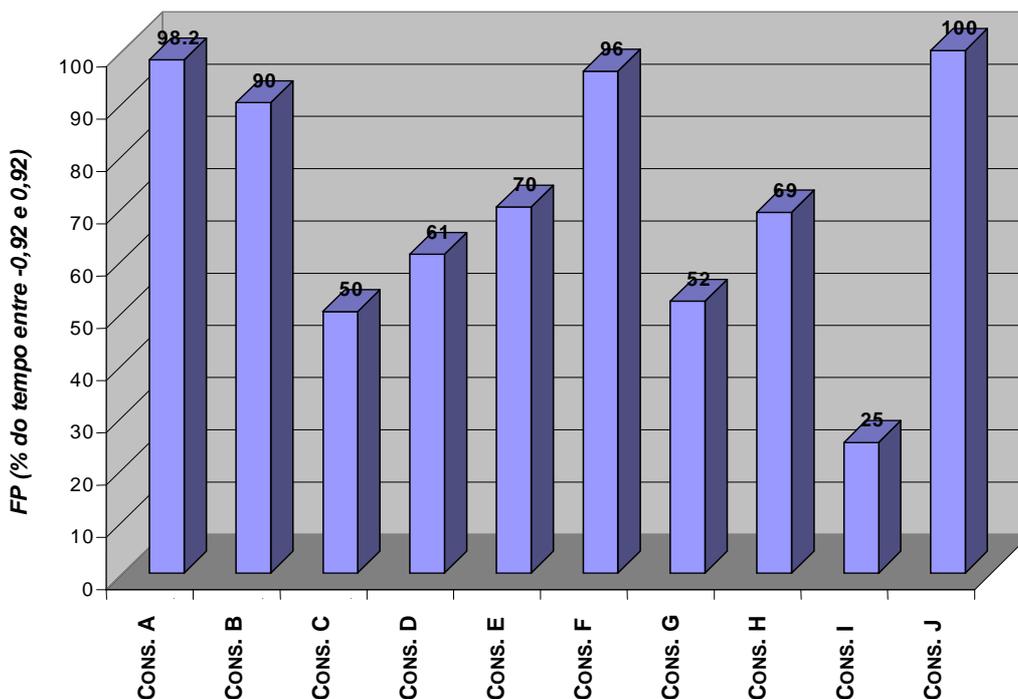


Figura 7 - Parcela do Período de Medição para a qual o Fator de Potência esteve acima de 0,92

A Figura 8 mostra os percentis de 95% das distorções harmônicas totais das tensões fornecidas aos consumidores. Alguns valores aparecem na figura como sendo iguais a zero, pois não foram registrados durante o período de monitoração. A maior distorção harmônica de tensão foi registrada no Consumidor D, onde o percentil de 95% é 9,5%. Este foi o único consumidor onde o percentil de 95% da distorção harmônica total de tensão esteve superior ao valor de referência de 6% estipulado pelo GCOI [7].

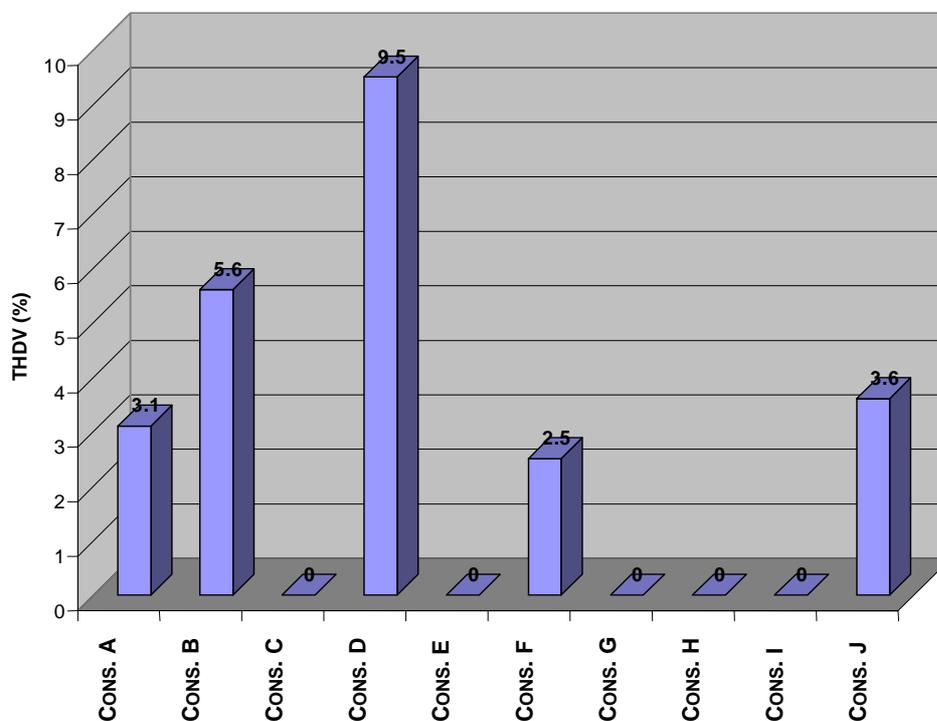


Figura 8 – Distorção Harmônica Total de Tensão – Percentil de 95%

As remotas utilizadas calculam a distorção harmônica total de corrente em valores percentuais, utilizando a corrente fundamental no instante da medição como valor base. Este índice pode levar a interpretações errôneas dos fenômenos, principalmente para períodos de baixa carga, uma vez que baixos valores de corrente podem apresentar altas distorções harmônicas de pouco significado prático [8]. Por este motivo, os harmônicos de corrente foram recalculados usando-se como base não mais a corrente fundamental, mas a corrente correspondente à potência ativa máxima registrada nos consumidores durante o período de medição, como mostrado a seguir.

Primeiramente, os valores de distorção foram convertidos para ampères considerando-se a corrente eficaz e a distorção harmônica total naquele instante, utilizando-se a seguinte fórmula:

$$I_h(A) = \frac{THD \cdot I_{RMS}}{100 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{THD}{100}\right)^2}}, \quad (1)$$

onde  $I_h(A)$  é a corrente harmônica,  $THD(\%)$  é a distorção harmônica total de corrente utilizando a corrente fundamental como valor base e  $I_{RMS}(A)$  é a corrente eficaz no mesmo instante. A partir do valor de corrente harmônica em A é calculada a distorção harmônica total de corrente na base da corrente à máxima carga:

$$TDD(\%) = \frac{I_h}{I_{máx}} \cdot 100, \quad (2)$$

onde  $TDD(\%)$  é a distorção harmônica total de corrente na base da carga máxima e  $I_{máx}(A)$  é a corrente para a carga máxima. A Figura 9 mostra o percentil de 95% da distorção total de corrente calculada desta forma para cada consumidor. Observa-se que a distorção harmônica no Consumidor I é substancialmente maior que as demais, muito embora a sua carga instalada seja baixa, conforme se vê na Figura 2. O Consumidor J possui a segunda maior distorção harmônica total dentre os consumidores monitorados, porém com carga instalada elevada.

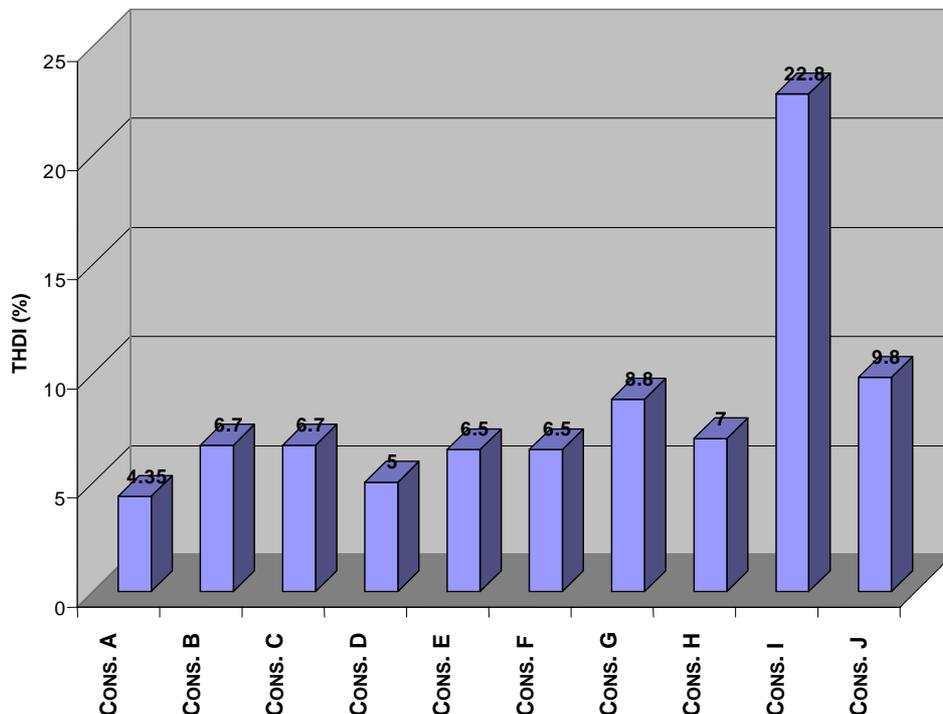


Figura 9 – Distorção Harmônica Total de Corrente – Percentil de 95%

A Figura 10 apresenta a média mensal de afundamentos momentâneos de tensão detectados em cada consumidor. Foram considerados apenas afundamentos cuja tensão resultante foi inferior a 80%. Estão incluídas neste total as interrupções de fornecimento de energia elétrica. Os afundamentos foram agrupados por intervalos de 5 min. Se em um intervalo de 5 min ocorreram vários afundamentos, apenas o mais grave de todos (maior queda de tensão) foi computado.

**Afundamentos Momentâneos de Tensão iguais ou inferiores a 80% (média mensal)**

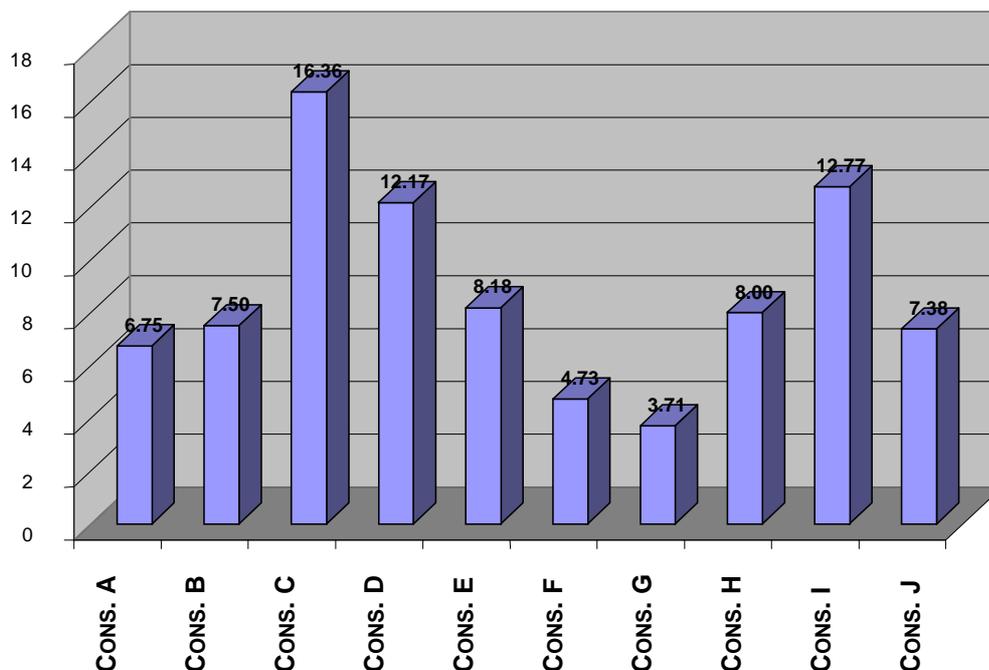


Figura 10 – Média Mensal de Afundamentos Momentâneos de Tensão nos Consumidores – Amplitudes Iguais ou Inferiores a 80%

Há consumidores com médias mensais de afundamentos elevadas (Consumidores C, D e I). No entanto, o número de afundamentos detectados por si só não diz nada a respeito da sensibilidade dos processos a estes afundamentos. A Figura 11 mostra uma comparação entre média mensal de paradas nos processos e média mensal de afundamentos detectados em cada consumidor. Nota-se que os consumidores que apresentam uma maior relação paradas/afundamentos são os Consumidores A e H. O caso do Consumidor A é interessante porque é um dos consumidores com menor número de afundamentos momentâneos detectados, mas cujo processo apresenta alta sensibilidade a estes afundamentos.

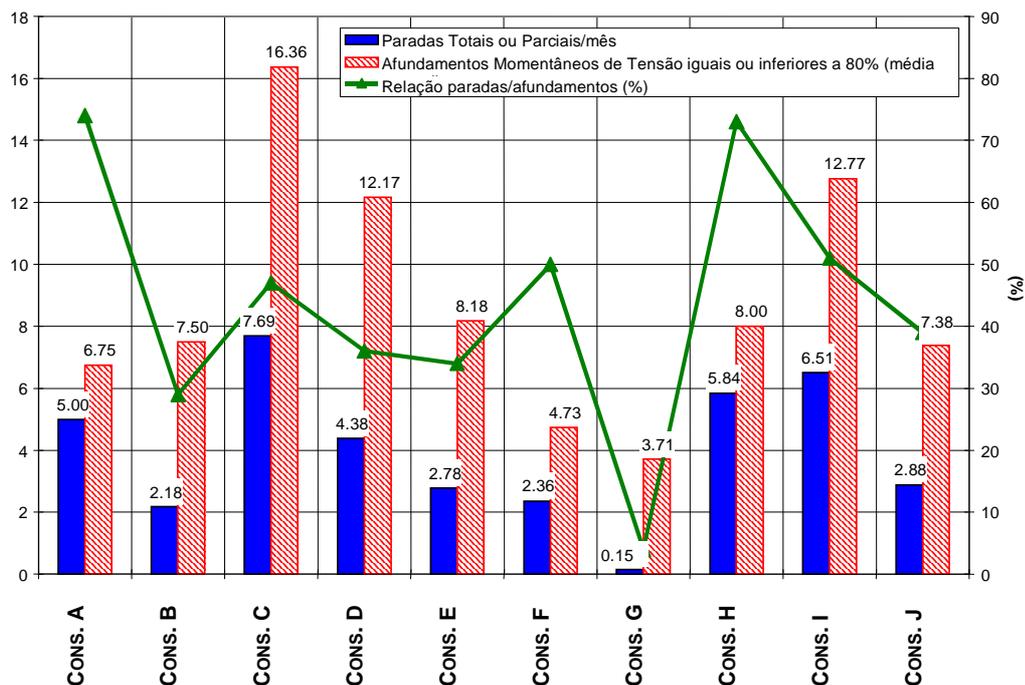


Figura 11 – Média Mensal de Paradas de Processos devidas a Afundamentos Momentâneos de Tensão – Comparação com Média Mensal de Afundamentos

A Figura 12 mostra uma comparação da duração individual de interrupção em cada unidade consumidora. A Figura 13 mostra uma comparação da frequência individual de interrupção em cada unidade consumidora. Os índices foram calculados considerando-se todas as interrupções de fornecimento com duração superior a 1 min, da forma estabelecida na portaria 24 da Aneel [9].

**DIC mensal (minutos)**

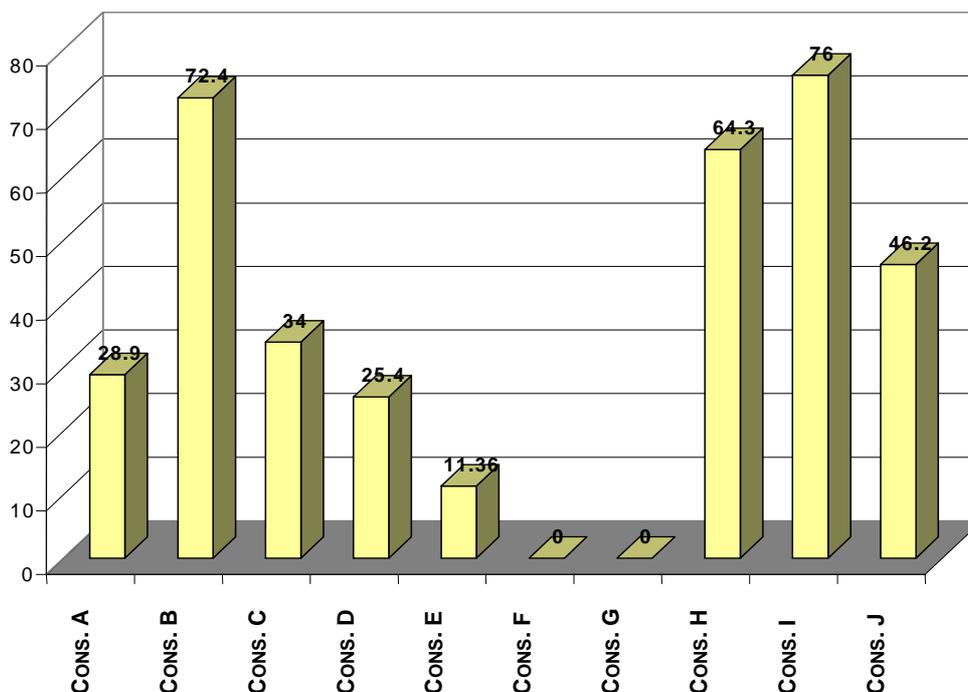


Figura 12 – Duração de Interrupção Individual Por Consumidor - Média Mensal

### FIC mensal

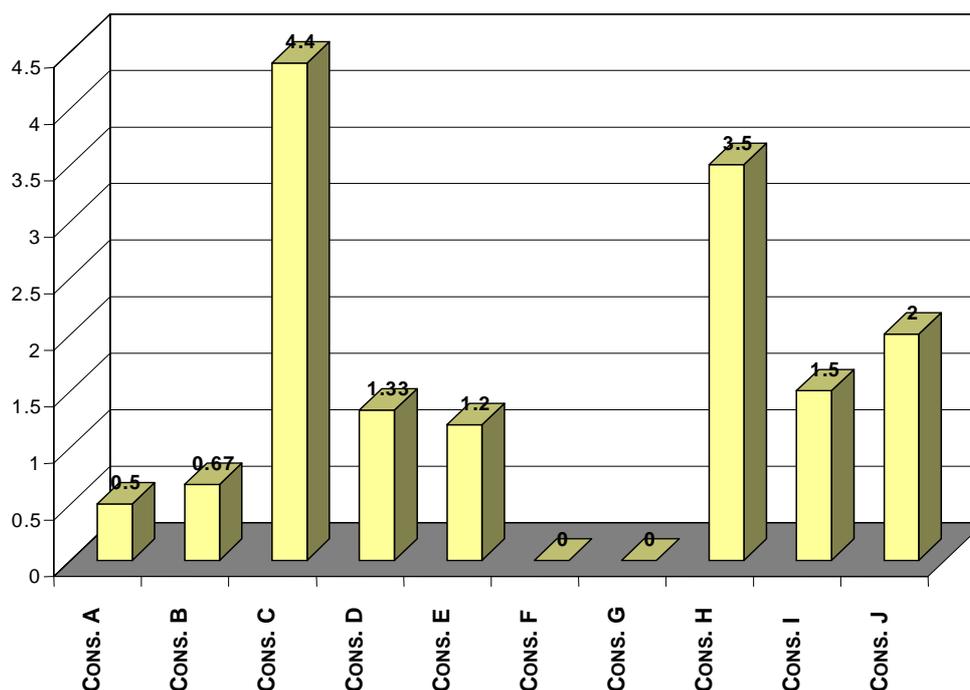


Figura 13 - Freqüência de Interrupção Individual por Consumidor - Média Mensal

## 6) ANÁLISE DOS RESULTADOS E RECOMENDAÇÕES

Após a etapa de medição, foi feita uma análise caso a caso dos resultados obtidos para cada consumidor. Os dados registrados pelas remotas foram confrontados com dados de interrupções obtidos junto à operação, em busca das principais causas de interrupções de fornecimento e afundamentos momentâneos de tensão. Também foram avaliadas as configurações e arranjos de alimentadores e subestações em busca de possíveis alternativas para o suprimento de energia aos consumidores [10].

Após o período de monitoração, foram inauguradas novas linhas de transmissão e subestações que modificaram bastante a configuração do sistema de suprimento aos Consumidores C e D. Estas modificações devem produzir uma sensível melhora na qualidade de fornecimento a estes consumidores. Será feita uma nova monitoração da qualidade de energia nestes consumidores com o objetivo de quantificar a melhora obtida na qualidade do fornecimento.

Os problemas de regulação de tensão registrados no Consumidor I estão sendo resolvidos através do recondutoramento do alimentador e da troca do transformador abaixador da subestação da RGE por outro de maior potência e com comutador de *tapes* sob carga. Este procedimento também deve diminuir o número de interrupções de fornecimento por sobrecarga. Já para os Consumidores B, D e H foram identificadas as principais causas de interrupções e afundamentos momentâneos (falhas em equipamentos, descargas atmosféricas, galhos de árvores, eventos com origem no sistema de transmissão, etc.). A RGE está atuando na mitigação destas causas, seja por manutenção, substituição de equipamentos, poda de árvores, instalação de pára-raios, etc.

Os Consumidores A e J possuem processos com elevado grau de automação, sendo portanto bastante sensíveis a afundamentos momentâneos de tensão. A principal causa de interrupções de fornecimento a estes consumidores foi por falhas de chaves fusíveis no sistema de distribuição da RGE. Tais chaves não interrompiam a corrente quando da sua operação, formando um arco elétrico e ocasionando um curto-circuito no alimentador ou ramal AT. Tal curto-circuito produzia afundamentos de tensão em todos os alimentadores ligados na

mesma barra da SE. Este problema está sendo solucionado através da substituição dos elos fusíveis antigos por novos elos fusíveis de alta performance, que garantem a interrupção de baixas correntes na chave. Assim, o número de interrupções de fornecimento a estes consumidores deve diminuir. Foi recomendado também que estes consumidores avaliassem seu processo industrial detalhadamente em busca de possíveis formas de diminuir sua sensibilidade a afundamentos momentâneos de tensão, seja por reconfiguração ou mudanças de ajustes no processo [11] [12], seja pela instalação de equipamentos condicionadores (*UPS*, *Dynamic Voltage Restorers*, etc.).

Não foi detectado nenhum problema na qualidade de energia fornecida ao Consumidor G. Foi constatado que os problemas alegados pelo consumidor tinham origem interna a suas instalações. A RGE assessorou este consumidor na especificação de um equipamento condicionador de energia para regulação da tensão dentro de sua indústria. Não foi detectada nenhuma interrupção de fornecimento de energia ao Consumidor F e a sua média mensal de afundamentos momentâneos de tensão é baixa. Todavia, este consumidor é bastante sensível a afundamentos, tendo sido detectadas paradas devidas a afundamentos cuja tensão resultante permaneceu próxima a 80%. Foi recomendado a este consumidor que fizesse uma avaliação dos processos mais sensíveis a afundamentos de tensão, procurando torná-los mais robustos através da reconfiguração ou mudanças de ajustes no processo, ou pela instalação de equipamentos condicionadores de energia.

## 7) CONCLUSÕES

O presente artigo teve como objetivo apresentar o Projeto de Monitoração de Qualidade de Energia desenvolvido pela RGE. As principais conclusões obtidas são:

- A monitoração dos consumidores permitiu obter um diagnóstico da qualidade de energia. Em alguns casos constatou-se que as reclamações dos clientes procediam. Em outros casos, percebeu-se que os problemas de qualidade de energia dos consumidores têm origem interna às suas instalações;
- Do ponto de vista do sistema de monitoração utilizado, o mesmo mostrou-se adequado às necessidades de monitoração da RGE, permitindo a obtenção de dados e análise de eventos imediatamente após a sua ocorrência. Desta forma, a RGE pôde informar aos consumidores quais fenômenos ocorreram;
- Cinco consumidores apresentaram problemas de regulação de tensão. Alguns deles não utilizam capacitores chaveados, o que contribuiu para elevar as tensões quando a carga da indústria é leve, causando eventualmente sobretensões temporárias;
- Vários consumidores experimentaram paradas no processo industrial devidas a afundamentos momentâneos de tensão, o que denota a sua grande sensibilidade a estes fenômenos;
- Foram avaliadas as melhores soluções para diminuir o número de afundamentos e interrupções de fornecimento de energia. As soluções estiveram relacionadas a modificações de procedimentos de manutenção das redes de distribuição, substituição e modernização de equipamentos, modificação da configuração de alimentadores e implantação de novas filosofias e práticas de eliminação de faltas na rede;
- Os consumidores também foram instruídos a avaliar o seu processo industrial e instalações, através da identificação de equipamentos mais sensíveis a afundamentos momentâneos de tensão. Lembra-se que a moderna indústria eletroeletrônica dispõe de uma ampla gama de produtos e equipamentos condicionadores de energia que podem ser considerados na alimentação das cargas sensíveis. Obviamente, o consumidor precisa avaliar a relação de benefício x custo de todas as alternativas;

- Atualmente, os consumidores cuja tensão de fornecimento seja igual ou superior a 69 kV e com demanda contratada igual ou superior a 3 MW podem tornar-se consumidores livres [13]. No âmbito dos consumidores analisados neste relatório, apenas um (consumidor C) poderá fazer a opção por se tornar um consumidor livre. Recomenda-se que nos próximos programas de medição sejam escolhidos mais consumidores que tenham este potencial, de forma que a RGE possa se antecipar às necessidades de seus clientes, atendendo-lhes de forma diferenciada e procurando evitar que estes consumidores contratem energia de outras distribuidoras ou diretamente no MAE;
- Ao final das etapas de monitoração e análise dos resultados, foi realizado um *workshop* sobre qualidade de energia elétrica. Este *workshop* envolveu os consumidores monitorados, outros consumidores e o corpo técnico da RGE. Dentre as atividades do *workshop*, houve uma visita ao COD da RGE em Caxias do Sul, um curso de qualidade de energia ministrado pelo pessoal do Cepel e apresentações dos fabricantes de equipamentos condicionadores de energia. Os objetivos do *workshop* foram apresentar os conceitos e problemas de qualidade de energia e propiciar uma maior integração dos consumidores com a concessionária;
- Como conclusão final, o projeto de monitoração de qualidade de energia de grandes consumidores se mostrou bastante interessante do ponto de vista estratégico, já que permitiu não só conhecer as características, problemas e anseios dos clientes, mas também uma maior aproximação dos mesmos. Isto possibilitará à RGE desenvolver um trabalho em parceria com os clientes, buscando a sua satisfação no que tange a qualidade de fornecimento de energia elétrica.

## 8) REFERÊNCIAS

[1] L. Brasil, R. P. Ross, L.F. W. de Souza, "Power Quality Investigation in a Distribution Utility in the South of Brazil", *Proceedings of IX International Conference on Harmonics and Quality of Power – ICHQP IX*, paper no. 0011CHP-098, October 2000.

[2] L. Conrad, K. Little, and C. Grigg, "Predicting and preventing problems associated with remote fault-clearing voltage dips," *IEEE Trans. Ind.Applicat.*, vol. 26, pp. 167–172, Jan./Feb. 1991.

[3] M. F. McGranaghan, D. R. Mueller, M. J. Samotyj, "Voltage Sag in Industrial Systems", *IEEE Trans. Ind.Applicat.*, vol. 29, no. 2, March 1993.

[4] M. H. J. Bollen, "Characterization of voltage sags experienced by three-phase adjustable-speed drives," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 12, pp. 1666–1672, Oct. 1997.

[5] Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE. Portaria nº 47, de 17 de Abril de 1978.

[6] Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE. Portaria nº 1569, de 23 de Dezembro de 1993.

[7] Grupo Coordenador de Operação Interligada – GCOI. "Critérios e Procedimentos para o Atendimento a Consumidores com Cargas Especiais" - GCOI / SCEL / GCPS / CTST / GTCP - Fevereiro 1993.

[8] "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. IEEE Std 519 - 1992" - IEEE Industry Applications Society / IEEE Power Engineering Society - April 1993.

[9] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Resolução nº 24 de 27 de Janeiro de 2000.

[10] Ross R.P.D., Assis, T. M. L., Solero, R. B., Lima A.G.G., "Análise de Afundamentos de Tensão" - SBQEE'99, Brasília, agosto 1999.

[11] Ross R.P.D., Lima A.G.G., Guarini A.P., Lourenço P., Mello A.J.C; "Qualidade de energia - estudos de casos reais - 2ª parte fornecimento à indústria siderúrgica que utiliza fornos a arco e laminadores" - SBQEE'96, Uberlândia, junho 1996.

[12] Ross R.P.D., Lima A.G.G; Costa R.S., Souza L.F.W.; "Qualidade de energia - estudos de casos reais - 3ª parte fornecimento à indústria de papel" - SBQEE'97, São Lourenço, novembro 1997.

[13] Lei nº 9.074, de 07 de julho de 1995.