

# Pesquisa sobre Percepção da Qualidade e Custos de Interrupção em Clientes de Alta e Média Tensão – Metodologia, Resultados Parciais e Aplicação

Marcelo Ap. Pelegrini<sup>1</sup>, Juan C. Cebrian Amasifen<sup>1</sup>, Gabriel R. A. Cunha<sup>1</sup>, Valdomiro V. García<sup>2</sup>, Ivo O. Cyrillo<sup>2</sup>, Tiago P. de Souza<sup>2</sup>, Cecília H. Magalhães<sup>2</sup>, Fabiana A. Toledo Silva<sup>3</sup>, Silvio Baldan<sup>4</sup>

**Resumo** — Este artigo apresenta os resultados parciais de uma pesquisa aplicada a clientes de alta e média tensão da AES Eletropaulo a respeito da qualidade da energia percebida. Em geral, fenômenos relacionados à interrupção da energia podem resultar em sérias consequências para o cliente industrial ou comercial. Isto motivou o cálculo, a partir dos resultados da pesquisa realizada, do custo de interrupção incorrido pelos clientes individualmente, com base em 12 categorias de gastos, e este resultado foi validado por comparação com os gastos reais incorridos durante uma intervenção em um grande cliente industrial.

**Palavras-chave** — Custo de interrupção, Qualidade da Energia, Clientes Industriais.

## I. INTRODUÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do P&D n° 0390-029/2007 intitulado “Sistema de estudo de viabilidade técnica, econômica e financeira e implementação de soluções para problemas de qualidade de energia, com foco no cliente” a ser finalizado em Agosto de 2011, tendo como entidade contratante a AES Eletropaulo e como entidades executoras a Sinapsis Inovação em Energia, a CH Consultoria e a Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia (FDTE).

Com o surgimento e acessibilidade de novas tecnologias capazes de aferir grandezas elétricas com precisão, assim como processos mais avançados de informática e automação para uso industrial, houve grande aumento de complexidade na questão da qualidade da energia. Os problemas de qualidade da energia são hoje mais bem monitorados e acarretam maiores impactos econômicos, resultando em um aumento da exigência dos clientes industriais e comerciais.

---

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL), realizado em Fortaleza/CE, no período de 17 a 19 de agosto de 2011.

<sup>1</sup> M. A. Pelegrini, J. C. Cebrian A, G. R. A. Cunha trabalham na Sinapsis Inovação em Energia (e-mails: [marcelo.pelegrini@sinapsisenergia.com](mailto:marcelo.pelegrini@sinapsisenergia.com), [juan.cebrian@sinapsisenergia.com](mailto:juan.cebrian@sinapsisenergia.com), [gracunha@gmail.com](mailto:gracunha@gmail.com)).

<sup>2</sup> V. V. Garcia, I. O. Cyrillo, T. P. Souza trabalham no Energ/USP (e-mails: [valdomirovega@ieee.org](mailto:valdomirovega@ieee.org), [ivocyrillo@gmail.com](mailto:ivocyrillo@gmail.com); [tiagopoles@pea.usp.br](mailto:tiagopoles@pea.usp.br))

<sup>3</sup> C. H. Magalhães e F. T. Silva trabalham na CH Consultoria (email: [chconsultoria@uol.com.br](mailto:chconsultoria@uol.com.br); [fabiana.atoledos@uol.com.br](mailto:fabiana.atoledos@uol.com.br))

<sup>4</sup> S. Baldan trabalha na AES Eletropaulo (e-mail: [silvio.baldan@aes.com](mailto:silvio.baldan@aes.com)).

No Brasil, o custo da energia não distribuída (CEND) é um parâmetro amplamente utilizado para otimização de investimentos na qualidade da rede; e a agência reguladora estabelece limites mínimos, sob pena de multa à concessionária, para os indicadores de frequência e duração total das interrupções de mais de três minutos. No entanto, tais indicadores não têm a precisão necessária para refletir a qualidade esperada pelos clientes atualmente. Este trabalho busca quantificar economicamente o montante das perdas causadas por problemas de qualidade de energia e determinar as melhores práticas para minimizar estes efeitos, analisando soluções tanto do lado do consumidor quanto do lado da distribuidora.

Na primeira etapa deste trabalho, uma pesquisa de qualidade da energia foi realizada com cerca de 100 grandes clientes industriais e comerciais de alta e média tensão (13,8kV a 88kV) da região metropolitana de São Paulo. Os participantes foram questionados sobre os usos finais da eletricidade, o impacto do custo do consumo elétrico, a percepção da qualidade e dos trabalhos da distribuidora, os principais impactos causados por problemas de qualidade de fornecimento e os prejuízos resultantes. Na segunda etapa, medidores de qualidade foram instalados em um pequeno número de clientes. O cruzamento das informações obtidas na pesquisa com os resultados das medições permitiu a consolidação e verificação da relevância estatística dos resultados, evitando distorções.

## II. PROBLEMAS DE QUALIDADE

Os diversos tipos de problemas de qualidade de energia têm efeitos negativos tanto no consumidor quanto na concessionária, referentes à interrupção das atividades, gastos com equipe de manutenção, quebra ou queima de equipamentos, e danos à imagem. Esses fenômenos podem ter causas internas às instalações do cliente, quando há problemas no projeto da rede, presença de defeitos e maus contatos, perturbações por cargas de processos internos, ou falhas nos dispositivos de proteção e controle. As causas internas de um cliente podem gerar perturbações em outros clientes ligados à mesma barra, o que configura uma causa externa de problemas de qualidade. Fenômenos meteorológicos e outros acidentes também são causas externas relevantes.

Essencialmente, há três formas de se reduzir o impacto dos problemas de qualidade da energia: reduzir o nível de perturbações diretamente na origem, aumentar a imunidade do processo, ou minimizar o acoplamento entre a fonte causadora e o equipamento sensível. Muitas vezes, os problemas de qualidade se propagam em uma ampla região servida por um

mesmo alimentador, o que sugere que intervenções devam ser feitas pela distribuidora. No entanto, é possível que haja perdas somente em alguns clientes com maior sensibilidade; e neste caso é mais interessante realizar uma intervenção unicamente nos clientes afetados. Uma análise completa dos custos e benefícios deve considerar todas essas possibilidades em função do tipo de problema de qualidade enfrentado.

#### A. *Variações de tensão de longa duração (VTLD)*

Esta categoria de defeitos corresponde às interrupções de mais de três minutos, levadas em conta nos indicadores da ANEEL. Interrupções de longa duração são em geral associadas a uma manobra no sistema alimentador, provocando parada imediata se não há suprimento de retaguarda. Consideram-se também as sobretensões e subtensões, quando a tensão fornecida desvia por mais de 10% da tensão nominal, podendo causar aquecimento, queda da performance e redução da vida útil de determinados equipamentos. Trata-se de uma situação anormal, que pode estar associada a um controle inadequado da tensão em condições de carga pesada.

#### B. *Variações de tensão de curta duração (VTCD)*

Este tipo de defeito engloba afundamentos com tensão inferior a 90% da tensão nominal, elevações acima de 110% da tensão nominal e interrupções de fornecimento de duração de até 3 minutos. São muitas vezes provocados por um curto-circuito temporário, com abertura e religamento de disjuntores. Afundamentos e elevações também podem ser causados pela entrada ou saída de grandes impedâncias, e interrupções por influência do clima ou pelo contato de árvores e animais com os cabos. A ocorrência de VTCDs está freqüentemente ligada à sensibilidade de um equipamento, que pode ser desproporcional devido a uma má distribuição das cargas ou desgaste do equipamento. Equipamentos eletrônicos e dispositivos de controle, no entanto, são inerentemente sensíveis, e devem receber atenção especial.

#### C. *Distorções de tensão*

São assim denominados os problemas de qualidade que alteram apenas a forma da onda da energia fornecida, mantendo a amplitude da tensão entre 90% e 110% da tensão nominal. O problema mais freqüente dessa categoria é o aparecimento de harmônicos por influência de cargas não-lineares tais como dispositivos a arco elétrico e conversores de potência. Os harmônicos aumentam o valor eficaz da corrente, o que gera perdas adicionais e sobreaquecimento em condutores. Outros problemas similares, como os inter-harmônicos, notching, alteração da freqüência e ruído, podem também ter sua causa nos transformadores, compensadores e conversores da rede distribuidora.

#### D. *Transitórios*

Caracterizam-se por um grande pico de curta duração (até 50ms) na tensão fornecida, usualmente de origem atmosférica. Em alguns casos, pode haver danos aos equipamentos ou

dispositivos de proteção; e freqüentemente têm como consequência uma interrupção no fornecimento.

#### E. *Flutuações na tensão*

Neste tipo de problema, a amplitude da tensão varia ciclicamente, devido à presença de grandes cargas variáveis. Em geral, a amplitude da flutuação é pequena e não há efeitos significativos no processo, embora possa haver desconforto causado pelo flicker em lâmpadas elétricas quando a freqüência das flutuações ultrapassa o limiar de percepção humano.

#### F. *Desequilíbrio trifásico*

Ocorre quando as tensões e/ou correntes nas três fases não estão equilibradas, devido a uma assimetria na distribuição de impedâncias ou de transformadores. Em cargas monofásicas, este fenômeno é enxergado como uma variação na tensão de alimentação, mas os efeitos são especialmente danosos em motores assíncronos, que sofrem queda de potência, redução da vida útil, aumento da vibração e aquecimento. Pode haver ainda distúrbios em sistemas de controle e a atuação indesejável de sistemas de proteção.

### III. PESQUISA DE QUALIDADE DE ENERGIA

Com esta pesquisa, buscou-se analisar o custo da qualidade de energia através de duas metodologias diferentes em paralelo. A primeira utiliza dados internos da empresa para calcular o valor da energia com base nas perdas, danos e lucros observados, o que permite a determinação do custo médio mensal decorrente dos problemas de qualidade de energia, assim como o cálculo do prejuízo social decorrente de uma interrupção específica. Já o segundo método envolve a determinação do valor percebido da energia pelo cliente através do questionamento direto a respeito da sua disposição a pagar (Willingness to Pay – WTP) por um ganho de qualidade de fornecimento de energia. Em tese, este questionamento permite determinar um valor associado ao ganho de qualidade que vai além dos prejuízos diretos para o cliente.

#### A. *Metodologia de pesquisa*

Devido às características muito discrepantes da classe de consumo em alta tensão (AT, entre 88 kV e 138 kV) e média tensão (MT, de 13,8 kV a 34,5 kV), optou-se por formar dois grupos de foco para estudo do universo estudado. Para cada um deles, foram convidadas dez empresas representativas, com as quais foi feita uma discussão e análise qualitativa do serviço de fornecimento de energia elétrica. Observou-se que os clientes percebiam uma melhoria na qualidade da energia, embora tímida na opinião dos clientes MT; e que os clientes ligados em final de ramal reclamam muito mais. As informações obtidas destes grupos permitiram um refinamento da metodologia de acordo com as necessidades e expectativas dos clientes antes da elaboração do questionário final.

Para a etapa seguinte, foram selecionados em consenso com a Eletropaulo 100 clientes para responder à pesquisa, obedecendo ao critério de atividade e porte de consumo. O questionário foi aplicado pelo Instituto de Qualidade (IQ) nos meses

de agosto e setembro de 2009. A pessoa entrevistada foi um responsável pelo setor de energia da empresa, usualmente um gerente, supervisor ou diretor, de modo a garantir maior confiabilidade das respostas.

Com base nos dados coletados, foram realizados os cálculos relevantes para determinação do custo de interrupção médio, normalizado por kWh interrompido, para cada uma das empresas. Numa próxima etapa deste estudo, será elaborada uma ferramenta on-line para expansão da base de dados de custo de interrupção, o que permitirá extrapolar as tendências de cada classe de consumo com maior confiabilidade.

### B. Perfil das empresas pesquisadas

Os respondentes ao questionário incluíam 24 clientes AT e 76 clientes MT. Entre as empresas pesquisadas, 38% têm mais de 1000 funcionários, e outras 38% possuem de 300 a 1000 funcionários (incluindo terceirizados). A maioria delas funciona em múltiplos regimes: 17% têm horas de trabalho normais apenas de segunda a sexta no horário comercial; enquanto 49% trabalham 24 horas por dia, incluindo sábado e domingo.

Quanto ao ramo de atividade, 78% das empresas participantes são indústrias de transformação, enquanto 6% correspondem ao setor de serviços públicos, 4% à atividade comercial, e 12% ao setor de serviços segundo a classificação CNAE (Classificação Nacional de Atividades Econômicas). Para se realizar a regressão dos dados, seria necessário um número mínimo de questionários, o que seria impossível para a maioria dos setores de atividade analisados. Como experimento, foi feito um novo agrupamento dos ramos de atividades, indicado na Tabela 1. A coluna "Setores CNAE" indica o número de setores similares que foram agrupados para a formação da classe.

TABELA I. CLASSES DE CLIENTES ESTUDADAS

Classe de consumo	Setores CNAE	Clientes total	Clientes AT	Média de energia para força motriz
Serviços essenciais	7	9	2	36 %
Grande circulação	5	9	1	5 %
Alimentos/Bebidas	2	9	1	41 %
Embalagens/Gráfica	3	9	1	67 %
Veículos/Equipamentos	2	10	5	40 %
Plástico/Borracha	1	9	2	72 %
Química/Farmacêutica	5	10	1	43 %
Têxtil	1	9	0	70 %
Mecânica/Metalúrgica	6	8	1	51 %
Siderurgia	1	10	5	32 %
Papel/Vidro/Gases	3	8	4	75 %

Devido às características de cada classe, a presença dos clientes AT não é uniformemente distribuída entre as classes, como evidenciado na coluna "Clientes AT" da Tabela 1. Devido à falta de dados, não é possível tratar os clientes AT e MT separadamente dentro de cada classe de atividade. Espera-se que, após a etapa de coleta de dados on-line, conclusões mais detalhadas possam ser tiradas.

Também está representado na Tabela 1 o valor médio do percentual da energia consumida dedicado à força motriz. Para 61% das empresas pesquisadas, esta é a parcela mais relevante do consumo de energia; correspondendo a mais da metade do consumo total para 53% dos clientes industriais

pesquisados. No setor de grande circulação, nos quais estão representados: o segmento comercial; serviços financeiros e hotelaria, o principal gasto (43% da energia em média) é com ar-condicionado e ventilação, seguido de gastos com iluminação (23%) e computação (17%). No setor de siderurgia, embora o gasto com força motriz seja o segundo mais alto, 40% da energia é direcionada para fornos e aquecedores.

Um total de 83% das empresas entrevistadas faz algum tipo de monitoramento da qualidade de energia elétrica: 65% das empresas possuem algum tipo de equipamento para monitoramento sistemático de interrupções e/ou qualidade; e 21% contratam esse tipo de serviço esporadicamente.

### C. Percepção da qualidade da energia

Numa das questões da pesquisa, o cliente deveria expressar sua opinião sobre a qualidade da energia fornecida em função do horário (das 17h às 20h ou das 21h às 16h) e da época do ano (inverno ou verão), classificando o serviço de 1 (péssimo) a 5 (ótimo). 13% dos clientes consideraram a qualidade da energia inferior durante o horário de pico, enquanto 7% responderam o inverso; e 21% afirmaram que a qualidade diminui durante o verão, quando ocorrem chuvas fortes na região, enquanto 5% observaram o efeito contrário. De maneira geral, estes dois fatores analisados não impactam muito a qualidade da energia percebida pelo cliente.

Uma grande discrepância foi observada entre os clientes de alta e média tensão nesta avaliação da qualidade. Entre os clientes AT, 63% consideraram boa ou ótima a qualidade da energia fornecida, enquanto entre os clientes MT este número foi de 44%. O serviço foi considerado ruim ou péssimo por 25% dos clientes MT pesquisados, contra apenas 4% dos clientes AT. Este comportamento é coerente com o que foi observado nos grupos de foco: embora os clientes AT, em geral, considerem boa a qualidade da energia fornecida, seus prejuízos quando problemas de qualidade de fato ocorrem são muito elevados.

Para explicar essa divergência, vale lembrar que, enquanto os clientes AT contam com linhas de distribuição exclusivas e atendimento preferencial da empresa, as redes de média tensão de cada região seguem uma grande gama de padrões diferentes, apresentando diferenças físicas que impactam na qualidade de energia.

O cliente também respondeu a respeito da criticidade relativa de diversos eventos de qualidade da energia. Em relação ao horário, a tarde é o período mais crítico para a maioria das empresas, mas algumas têm seu pico de prejuízo durante a madrugada, devido à falta de pessoal capacitado para realizar intervenções. Ao todo, 61% dos entrevistados afirmam que uma interrupção de madrugada é pior ou tão ruim quanto uma ocorrida à tarde. De forma análoga, interrupções no sábado e no domingo são em média menos críticas, sendo considerados os mais graves ou tão graves quanto nos outros dias da semana por 65% e 43% dos clientes respectivamente. Em relação aos meses do ano, 17% dos clientes afirmaram que a interrupção no mês de janeiro é um pouco menos crítica que nos outros meses, contra 5% no mês de novembro. Estes limites indicam as épocas de máxima e mínima criticidade no ano, embora a diferença seja mais sutil. Já sobre a ocorrência

de interrupções de duração fracionada em uma mesma semana, quase todos disseram preferir uma única interrupção com a duração total: 87% dos respondentes consideram uma interrupção de 3 min muito melhor que três interrupções de 1 min.

Uma grande maioria dos clientes (90%) concorda que a interrupção longa é um problema extremamente grave. Além disso, 68% dos entrevistados atribuíram à interrupção curta o nível máximo de gravidade, enquanto este número foi de 51% para variações de tensão, 45% para uma parada programada com aviso de uma hora de antecedência, 44% para micro-interrupções, e 44% para variações na frequência. Observou-se que o aviso com boa antecedência ajuda a mitigar os prejuízos de uma interrupção: embora apenas 38% dos entrevistados tenham afirmado que teriam no mínimo “alguma” redução de prejuízos com um aviso antecipado de 1h, esse número sobe para 65% quando há um aviso antecipado de 6h. A antecedência mínima necessária para mitigar completamente os prejuízos varia bastante de empresa para empresa, e foi calculada como sendo em média de 12,5h para os clientes em alta tensão e 8,8h para os clientes em média tensão.

Finalmente, foi perguntado o número e duração das interrupções observadas nos 2 meses, 6 meses e 12 meses anteriores à pesquisa. Constatou-se que algumas das respostas obtidas não eram coerentes, de maneira que uma comparação com o banco de dados da AES Eletropaulo se faz necessária. Esta comparação com as informações da distribuidora permitirá uma correção destes indicadores de qualidade e um consequente refinamento dos custos de interrupção obtidos; além de fornecer novas informações sobre distorções na percepção do cliente.

#### D. Custo de interrupção

Para a determinação do custo de interrupção, em primeiro lugar foi realizada uma análise qualitativa dos diferentes tipos de impacto causados por uma interrupção: os clientes deveriam classificar 12 categorias de custo como causadoras de nenhum prejuízo, pouco, algum, muito ou prejuízo total. Na etapa quantitativa, foram atribuídos pesos a cada categoria de prejuízo de acordo com esta resposta (respectivamente peso 0, 0,25, 0,5, 0,75 e 1).

Estão representados na Tabela 2 o número de clientes que declarou um impacto maior do que zero em cada categoria de custo de interrupção, assim como a média dos pesos acima de zero obtidos.

TABELA II. CATEGORIAS DE CUSTO DE INTERRUPÇÃO

Categoria de custo	Clientes	Peso médio
	>0	>0
Gastos com horas extras	74	0,53
Perda de produção	90	0,79
Retomada de operação	92	0,74
Gasto com gerador de energia	74	0,66
Reparos e substituição de equipamentos	86	0,56
Perda de dados/comunicação	89	0,56
Perda de matéria-prima	60	0,62
Perda de produto em processo	75	0,68
Perda de produto acabado	22	0,59
Perda de vendas	67	0,57
Atraso nas entregas/multas	78	0,54
Gastos com meio ambiente	31	0,47

Observa-se que os gastos com retomada da operação e perda de produção não apenas apresentaram peso mais alto nas indústrias em que esse custo foi verificado, como também são as categorias que atingem maior número de clientes. Vale notar ainda que os custos relevantes ao meio ambiente ainda são fracamente percebidos, e associados principalmente à obtenção de licenças ambientais para instalação de geradores e suas posteriores emissões.

1) *Custo de horas extras (CHH), produção perdida (CPP) e de retomada de operação (CROP):* Estão entre os custos de maior magnitude, e por isso foram averiguados com maior detalhe para cada um dos clientes. O cliente deveria estimar o custo de interrupções de diferentes durações (1 min, 3 min, 30min, 60min, e saturação), resultando em uma curva empírica para o custo em função da duração do evento  $j$ .

O custo de horas extras é computado quando o estabelecimento prolonga seu período normal de funcionamento, de modo a recuperar o tempo perdido com uma interrupção. Quando a produção é considerada irrecuperável, fala-se em custo de produção perdida. Já o custo de retomada da produção é consequência do período que a indústria leva para retomar o ritmo normal de produção após uma interrupção. No questionário, o CROP foi perguntado diretamente, mas também seria possível aferi-lo a partir do tempo de retomada de operação TROP, considerando que o tempo não-produtivo corresponde efetivamente a uma produção perdida:

$$CROP(DUR_j) = CPP \times TROP(DUR_j) \quad (1)$$

2) *Custo de geração própria (CG) e de proteção (CP):* Estes dois custos incorrem da prevenção contra problemas de qualidade. O primeiro se refere ao gasto com geradores para dar continuidade à operação mesmo durante uma falta de energia, enquanto o segundo está relacionado a equipamentos de proteção como no-breaks. Uma parcela importante destes dois custos é um valor fixo no curto prazo, ligado ao custo de capital investido nos equipamentos. Este custo é representado por uma série uniforme de  $n_k$  pagamentos atualizados por uma taxa  $i$ , resultando no custo de proteção de um determinado evento  $j$  segundo (2).

$$CP(j) = \frac{1}{NI_{ano}} \times \sum_k \frac{INVP_k \times i}{(1+i)^{n_k} - 1} \quad (2)$$

Onde  $NI_{ano}$  corresponde ao número total de interrupções observadas em média em um ano;  $INVP_k$  é o valor investido no equipamento de proteção  $k$ ;  $i$  é a taxa de juros anual, admitida de 10% para investimentos de baixo risco; e  $n_k$  é a vida útil do equipamento  $k$ . A equação para o custo de geração apresenta um termo de custo fixo CFG de estrutura idêntica a (2), mas incorpora também um custo variável relacionado principalmente ao custo do combustível. Tomando o custo operacional da geração COG e o número de horas de operação por ano HGG para cada equipamento  $k$  e normalizando este termo em função da duração DUR do evento, pode-se escrever:

$$CG(j) = CFG(j) + \frac{DUR_j}{DUR_{ano}} \times \sum_k COG_k \times HGG_k \quad (3)$$

3) *Custo de reparos e substituição (CRS)*: Estes custos ocorrem quando os problemas de qualidade provocam danos a equipamentos de diversos tipos. O cálculo é simples, bastando conhecer o gasto anual com reparos e substituição CRS:

$$CRS(j) = \frac{CRS}{NI_{ano}} \quad (4)$$

4) *Custo de perdas de informação (CINF)*: É o custo associado a perdas de informações eletrônicas devido a uma interrupção. Por hipótese, foi considerado um tempo de cobertura  $T_{CINF}$ , abaixo do qual não há perda de dados e por consequência o prejuízo é zero. Para interrupções que ultrapassam o tempo de cobertura, há um custo fixo.

$$CINF(DUR_j) = \begin{cases} 0 & \text{se } DUR_j < T_{CINF} \\ CINF & \text{se } DUR_j \geq T_{CINF} \end{cases} \quad (5)$$

5) *Custo de perda de matéria-prima (CMP), produto em elaboração (CPE) ou produto acabado (CPA)*: São custos decorrentes de materiais em processo ou estocados que se deterioram, estragam ou perdem valor durante uma interrupção. Esses tipos de custo dependem da duração de uma interrupção  $j$  segundo uma função semelhante a uma sigmóide: assim, o custo é muito próximo de zero até determinado limiar, quando ele cresce rapidamente até um valor máximo. Devido a esse formato, foi assumido que a função de custo destas três categorias pode ser razoavelmente aproximada por uma função análoga a (5), com os parâmetros prejuízo máximo e tempo de “cobertura” obtidos do questionário.

6) *Custo de outros fatores (CEXTR)*: São custos associados a outros fatores não contemplados nas questões anteriores. Gastos com o meio ambiente e com contratos, por exemplo, foram limitados a esta seção, visto que não são relevantes para um grande número de empresas. Alguns clientes levantaram outros custos de alta relevância, como o risco de depreciação do patrimônio de empresas de serviços públicos, ou a impossibilidade de trocar ações na bolsa para o setor bancário. Para simplificar o sistema, estes custos extras foram modelizados de forma semelhante a (5).

#### E. Resultados Parciais do Custo de Interrupção

Os custos totais de interrupção para a amostra de clientes estão sendo calculados, permitindo-se obter como resultado os custos médios de interrupção em 10 setores econômicos escolhidos, em função da duração das interrupções. Para tanto estão sendo utilizadas informações dos questionários e informações sobre número e duração das interrupções da base técnica da empresa.

Em uma primeira aproximação, utilizando como base a percepção dos clientes a respeito das interrupções ocorridas, foram obtidos os seguintes valores médios preliminares:

- Custo Médio de uma interrupção: R\$ 3.192,42
- Custo Médio do kWh interrompido: R\$ 17,52

Cabe observar que estes valores serão revalidados e apresentados em detalhe após o cálculo que leva em conta os valores reais de interrupção obtidos da base técnica da empresa.

#### F. Determinação da disposição a pagar (WTP)

O método de cálculo da disposição a pagar parte do princípio de que há um ganho real subjetivo associado a uma melhoria de qualidade da rede, que não pode ser diretamente ligado às perdas econômicas causadas pela interrupção da energia. Para isto, os consumidores foram questionados sobre o benefício que esperavam obter se a concessionária desenvolvesse um projeto de melhoria de qualidade do fornecimento: 82% das empresas pesquisadas julgaram que isto resultaria em muitos benefícios para elas; e apenas 6% afirmaram que haveria pouco ou nenhum benefício. Em seguida a esta avaliação qualitativa, o cliente foi lembrado que seriam necessários investimentos na rede para a realização de melhorias, e foi indagado se estaria disposto a prestar um auxílio para custear a operação – destacando bem que essa resposta não seria utilizada pela Eletropaulo como pretexto para aumentar o valor cobrado. Depois da resposta espontânea inicial, foram sugeridos custos adicionais mais elevados, de modo a obter o valor de saturação da disposição a pagar.

Apesar do elevado ganho esperado com obras de melhoria, 67% das empresas afirmaram que não estão dispostas a aceitar nem mesmo um adicional de 1% na conta de luz mensal com essa finalidade. Este fenômeno é observado em análises da disposição a pagar quando os consumidores interrogados entendem que já têm direitos adquiridos. A disposição a pagar declarada igual a zero não indica que as empresas não acreditam no benefício do investimento, mas que acreditam que o valor pago pelo serviço atualmente já deveria cobrir esta necessidade. Assim, as disposições a pagar zero dos clientes que alegam que o custo da conta já é alto (67%) ou que os novos investimentos são de responsabilidade da concessionária (84%) não refletem o real retorno esperado deste investimento, e devem ser descartadas. Por outro lado, os consumidores que acreditam que a qualidade do serviço já atende às suas necessidades (8%) possuem uma disposição a pagar efetiva de zero, que deve ser levada em conta no cálculo da média.

A disposição a pagar em R\$ por kWh interrompido pode ser calculada a partir de (6); onde AD corresponde ao adicional percentual aceito à conta de luz segundo a resposta espontânea; e  $\overline{R\$/kWh}$  ao custo médio pago pelo kWh, característico da curva de carga da empresa. A constante 525600 é utilizada para adimensionalizar a duração total de interrupções  $DUR_{ano}$ , inicialmente em minutos por ano.

$$WTP = \frac{AD}{100} \times \overline{R\$/kWh} \times \frac{525600}{DUR_{ano}} \quad (6)$$

#### IV. APLICAÇÃO EM UM CLIENTE INDUSTRIAL

Após a coleta dos resultados da pesquisa, foi realizada uma intervenção em um grande cliente da área siderúrgica que vinha se queixando da qualidade da energia elétrica fornecida, causadora de grandes perdas no seu processo produtivo. Nesta etapa, depois de o cliente ter respondido ao questionário da etapa anterior, foram instalados dois medidores de qualidade de energia na planta do cliente: o primeiro no ponto de conexão com a rede elétrica e o segundo em um processo indicado como especialmente sensível a problemas de qualidade. Foi solicitado que a empresa registrasse os eventos de qualidade que afetaram o processo e as consequentes perdas sofridas ao longo das semanas seguintes, e os dados da percepção do cliente foram comparados às medições efetivamente observadas em um período de 40 dias.

Classificação do Evento para Análise	Valores da Magnitude de Tensão que Caracterizam o Evento (pu)
Afundamento	$0.1 < V_{rms} < 0.9$
Interrupção	$V_{rms} < 0.1$
Elevação	$V_{rms} > 1.1$

A Tabela III apresenta os três eventos apontados pela empresa como causadores de parada nos processos industriais durante o intervalo de medição.

TABELA III. PERCEPÇÃO DOS EVENTOS DE QUALIDADE DE ENERGIA PELA EMPRESA PESQUISADA

Evento	Duração Total (hh:mm)	Tipo de evento
1	00:15	Subtensão
2	05:10	Falta de Energia
3	00:05	Falta de Energia

#### Registros de Medições – Ponto de Acoplamento Comum e Processos Sensíveis

Os medidores de QEE foram instalados na cabine primária da empresa, registrando a tensão de fornecimento de energia e, internamente, na alimentação de um processo mais sensível escolhido pela empresa, para a verificação da sensibilidade do processo.

Na Fig.1 estão apresentados os gráficos de registros de valores eficazes das tensões de ambos medidores durante todo o intervalo de medição.

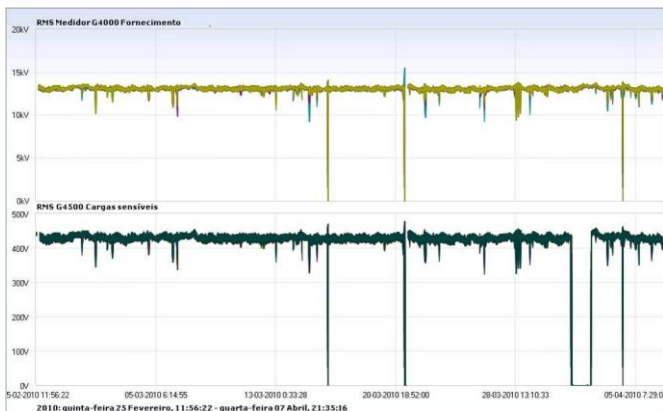


Fig. 1. Valores Eficazes das Tensões

É possível identificar na Fig. 1 a ocorrência de três interrupções no fornecimento da energia da cabine primária, identificado pelo título “RMS Medidor G4000 Fornecimento”. Nos registros da alimentação dos processos sensíveis, identificados pelo título “RMS G4500 Cargas sensíveis”, pode-se observar também, além das três interrupções identificadas na cabine primária, uma interrupção com duração mais longa que ocorreu entre o período de 01/04/2010 a 02/04/2010.

Além das interrupções registradas, pode-se notar a ocorrência de diversos afundamentos na tensão monitorada. Estes afundamentos também serão analisados, embora não pareçam ter causado problemas nos processos industriais.

#### III. ANÁLISE DOS REGISTROS

Os registros de tensão eficaz coletados pelos medidores foram organizados através da classificação apresentada na Tabela IV, segundo [6].

TABELA IV. CLASSIFICAÇÃO DOS EVENTOS SEGUNDO A MAGNITUDE DE TENSÃO

Para os afundamentos e elevações de tensão, a classificação e duração do evento serão determinadas pela fase com maior amplitude de variação.

#### A) Afundamentos de Tensão

Na Tabela V são apresentados os afundamentos de tensão detectados a partir dos registros obtidos diretamente do medidor, na alimentação dos processos sensíveis. Em total 51 afundamentos foram detectados no intervalo de medição, mas devido ao espaço, só são apresentados 16 deles.

TABELA V. REGISTRO DE EVENTOS NO PROCESSO SENSÍVEL (16/51)

Evento	Instante do Início do Evento	Duração (s)	$V_{RMS}$ mínima (V)	Magnitude Afundamento (pu)
1	28-02-2010 11:57:55.611	0.073	375.910	0.85
2	01-03-2010 08:32:52.534	0.018	342.169	0.78
3	02-03-2010 03:02:12.983	0.010	344.103	0.78
4	02-03-2010 10:29:38.978	0.018	382.510	0.87
5	06-03-2010 15:38:55.439	0.089	334.260	0.76
6	21-03-2010 09:01:35.081	48.342	44.021	0.10
7	22-03-2010 16:16:42.255	0.081	364.905	0.83
8	22-03-2010 16:16:54.972	0.364	359.107	0.82
9	03-04-2010 13:09:22.665	0.017	366.440	0.83
10	03-04-2010 13:14:50.683	0.017	349.070	0.79
11	03-04-2010 13:14:51.849	0.017	386.270	0.88
12	03-04-2010 13:25:59.758	0.033	361.630	0.82
13	03-04-2010 20:32:08.743	0.033	371.7813	0.84
14	03-04-2010 20:32:09.918	0.042	351.4688	0.80
15	04-03-2010 19:29:37.702	0.017	343.6875	0.78
16	04-03-2010 19:29:38.877	0.029	362.7188	0.82

TABELA VI. VTCDs CLASSIFICADAS POR DURAÇÃO E MAGNITUDE

Magnitude (pu)	Duração (segundos)									Total
	0,00 a	0,01 a	0,02 a	0,1 a	0,5 a	1 a	3 a	20 a	60 a	
	0,01	0,02	0,1	0,5	1	3	20	60	180	
0,85 a 0,9	2	2	5	0	0	0	0	0	0	9
0,7 a 0,85	2	8	24	5	2	0	0	0	0	41
0,4 a 0,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,1 a 0,4	0	0	0	0	0	0	0	1*	0	1*
Total	4	10	29	5	2	0	0	1*	0	51

\* O evento marcado corresponde a um transitório anterior a uma interrupção plena da tensão de fornecimento e não será contabilizado como afundamento de tensão.

Os eventos que foram agrupados em pares de cores na Tabela V representam uma característica repetitiva no sistema, na qual ocorre um segundo afundamento, de menor magnitude, aproximadamente 1 segundo após o primeiro. Segundo a concessionária, os eventos repetitivos e a maioria dos outros, são produzidos pela atuação de disjuntores localizados no circuito da empresa. Um exemplo desta característica é apresentado na Fig. 2, que representa os eventos 10 e 11 da Tabela III. A parte superior da Fig. 2 representa o valor eficaz, e a inferior a forma de onda.



Fig. 2. Afundamentos de Tensão, eventos 10 e 11 consecutivos

1) Análise Estatística de Afundamentos de Tensão – Indicadores de VTCDs:

Usando os dados da Tabela III, é possível classificar o número de ocorrências de VTCDs (Variações de Tensão de Curta Duração) em faixas de duração e magnitude [7]. Os resultados foram organizados na Tabela IV.

Outra forma de apresentar os dados da Tabela IV é através de um histograma de frequências, onde o número de ocorrência é ilustrado em função da duração e a magnitude do afundamento. O histograma do período de medições é apresentado na Fig. 3.

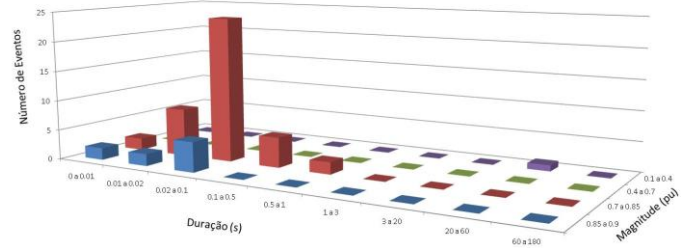


Fig. 3. Histograma de Frequências das VTCDs por Magnitude e Duração

Na Tabela IV, pode-se observar que o maior número de ocorrências tem duração na faixa de 0,02 a 0,1 segundos, com magnitude dentro da faixa de 0,7 a 0,85 pu, somando um total de 24 dos 51 afundamentos detectados, compreendendo 47% dos afundamentos.

Somente 1 afundamento foi considerado crítico, com magnitude na faixa de 0,1 a 0,4 pu e duração de 20 a 60 segundos, mas através de uma análise mais cuidadosa este afundamento foi identificado como o transitório inicial de uma interrupção. Desta forma, este evento será analisado posteriormente.

Para a análise do comportamento de uma barra ou de um sistema elétrico, o indicador mais utilizado para VTCDs é o SARFI (do inglês, System Average RMS Frequency Index) ou “índice médio de frequência de valores eficazes do sistema”. É possível obter este índice através da soma das frequências das ocorrências de VTCDs, independente de sua duração[7].

Os afundamentos com magnitude menor ou igual a 90% são chamados de SARFI<sub>90%</sub>. Para valores inferiores a 70% e a 40%, temos o SARFI<sub>70%</sub> e o SARFI<sub>40%</sub>, respectivamente. A partir da Tabela IV, eliminando o registro de afundamento identificado como parte de uma interrupção, podemos obter os valores dos SARFI:

$$\begin{aligned} \text{SARFI}_{90\%} &= 51 & (1) \\ \text{SARFI}_{70\%} &= 0 & (2) \\ \text{SARFI}_{40\%} &= 0 & (3) \end{aligned}$$

O indicador SARFI<sub>X%</sub> só percebe a severidade do evento em relação à sua magnitude. Há uma forma de calcular a severidade das VTCDs em relação à sua magnitude e duração fazendo o uso de um único indicador: o SARFI<sub>ITIC</sub>. Este indicador contabiliza os eventos de VTCDs que estão nas regiões críticas da curva de sensibilidade ITI (do inglês, Information Technological Industry Council[6][7], anteriormente conhecida por CBEMA – Computer Business Equipment Manufacturers Association), a qual foi desenvolvida pelo EPRI-PEAC para estabelecer a tolerância a afundamentos e elevações de tensão de equipamentos da tecnologia da informação (TI), como microcomputadores e equipamentos semelhantes. A curva ITI é apresentada na Fig. 4.

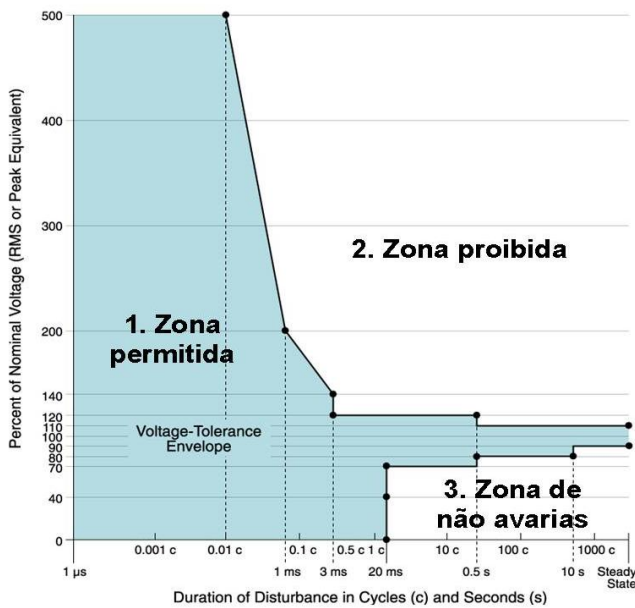


Fig. 4. Curva ITI (antiga CBEMA)

Na Fig. 5 está representada a curva ITI contendo todos os eventos registrados pelo medidor instalado nos processos sensíveis.



Fig. 5. Curva ITI contendo os VTCDs medidos nos Processos Sensíveis

Nesta curva é possível observar que dois afundamentos se encontram na zona de mau funcionamento (região inferior direita, indicado por um círculo verde), os quais podem afetar o funcionamento de alguns equipamentos sensíveis, como computadores usados para o controle dos processos industriais e equipamentos equivalentes.

Os registros de valores eficazes das tensões durante a ocorrência de um dos afundamentos estão detalhados na Fig. 6.

Na Fig. 6, o gráfico superior representa o valor eficaz da tensão, registrado pelo medidor instalado na cabine primária da empresa, e o gráfico inferior representa a medição da alimentação dos processos sensíveis. O segundo afundamento tem características similares ao primeiro. Estes dois afundamentos ocorreram devido a causas externas da rede que levaram à operação dos disjuntores dos alimentadores vizinhos.

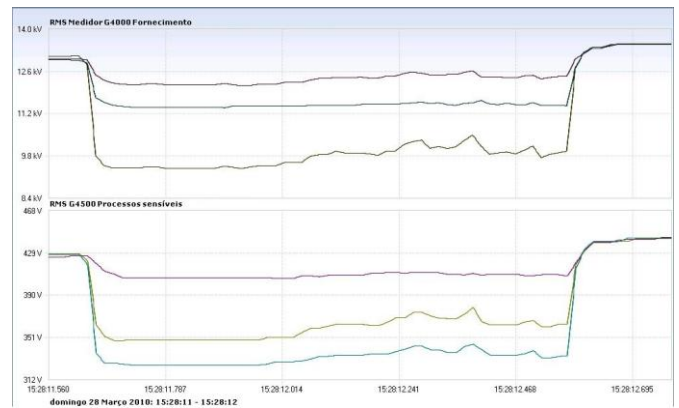


Fig. 6. Afundamento de Tensão na zona de mau funcionamento

Embora estes afundamentos estejam localizados em uma zona de risco, a empresa siderúrgica não fez reclamações de paradas nos processos devido aos afundamentos de tensão identificados.

### B) Elevações de Tensão

Através de uma análise mais criteriosa dos registros do medidor instalado nos processos sensíveis, foi possível identificar uma breve elevação de tensão ocorrida imediatamente antes da interrupção no dia 21/03/2010. A TABELA VII apresenta esta elevação de tensão observada no sistema, sendo a única elevação detectada no intervalo de medição considerado.

TABELA VII. ELEVAÇÃO DE TENSÃO REGISTRADA NA ALIMENTAÇÃO DOS PROCESSOS SENSÍVEIS

Evento	Instante do Início do Evento	Duração (s)	V <sub>RMS</sub> mínima (V)	Magnitude do Afundamento (pu)
52	21-03-2010 09:02:00.677	0.042	485.25	1.109

TABELA VIII. INTERRUPTÕES DE TENSÃO REGISTRADAS NA ALIMENTAÇÃO DOS PROCESSOS SENSÍVEIS

Evento	Início do Evento	Duração (hh:mm:ss.sss)	VRMS mín (V)	Magnitude do Afundam.(pu)
53	16-03-2010 10:06:54.660	00:00:01.014	0.024	0.000055
54	21-03-2010 09:02:23.572	05:21:22	0.000	0.000
55	01-04-2010 04:59:28.695	18:03:03	0.039	0.000089
56	04-04-2010 12:42:02.795	00:00:01.058	0.065	0.00015

O valor eficaz máximo da elevação não representa perigo segundo a curva ITI da Fig. 4, onde pode-se verificar que elevações de tensão com magnitude de 1.2 pu (120% do valor nominal) com até 0.5 segundos de duração se encontram dentro da zona permitida.



### C) Interrupções de Tensão

A Tabela VIII apresenta as interrupções registradas pelo medidor instalado na alimentação dos processos internos sensíveis da empresa siderúrgica.

Na Tabela IX são apresentadas as operações dos disjuntores pertencentes ao circuito que alimenta a empresa (Tabela fornecida pela concessionária).

TABELA IX. OPERAÇÃO DE DISJUNTORES E CHAVES NO CIRCUITO ALIMENTADOR

Evento	Data e Hora	Equipamento	Evento
53	16/03/10 10:06:18	Disjuntor 13.8	EST ABERTO
	16/03/10 10:06:20	Disjuntor 13.8	EST FECHADO
54	21/03/10 09:00:00	Chave 13.8	EST ABERTO
	21/03/10 15:18:00	Chave 13.8	EST FECHADO
56	04/04/10 12:41:24	Disjuntor 13.8	EST ABERTO
	04/04/10 12:41:26	Disjuntor 13.8	EST FECHADO

Fazendo a correlação das Tabelas III, VIII e IX, e as informações de manutenção da concessionária tem-se o seguinte:

- A primeira interrupção ocorrida na data de 16/03/2010, reportada pela siderúrgica segundo a Tabela III, correspondendo ao evento 53 da Tabela VIII e IX com duração de 1,014 segundos. O evento corresponde a um religamento do disjuntor.
- A segunda interrupção da data 21/03/2010, também reportada pela empresa, corresponde ao número de evento 54 da Tabela VIII e IX com duração de 5 horas, 21 minutos e 22 segundos. O evento corresponde a um desligamento programado pela concessionária. A empresa foi avisada desta interrupção com antecedência, segundo a concessionária, de forma que não deveria ter causado problemas de perdas nos processos da indústria;
- A terceira interrupção, reportada pela siderúrgica na data 04/04/2010, corresponde ao número de evento 56 da Tabela VIII e IX com duração de 1,058 segundos. O evento corresponde a um religamento do disjuntor.
- Por último, a interrupção de número de evento 55 da Tabela VIII, é percebida só pelo medidor instalado nas cargas sensíveis, e não na cabine primária da empresa. Embora identificado, este evento não é reportado pela siderúrgica, o que representa um possível procedimento de manutenção interno.

Realizando uma análise extensiva dos resultados das medições efetuadas na entrada do processo sensível da indústria, foram identificados 51 afundamentos de curta duração, 1 elevação de tensão de curta duração, duas interrupções de curta duração, e duas interrupções de longa duração. Em sua maioria, os eventos de curta duração foram causados pela atuação de disjuntores no circuito alimentador.

Os três eventos apontados pela empresa participante puderam ser ligados às duas interrupções de curta duração e a uma das interrupções de longa duração: a outra VTLD foi atribuída a uma parada de manutenção, visto que a tensão na alimentação da indústria se manteve e este evento não foi apontado pelo cliente como fonte de perdas. Os mesmos eventos da Tabela III são indicados na Tabela X conforme registrados pelo medidor instalado.

TABELA X. INTERRUPTÕES DE TENSÃO REGISTRADAS NA ALIMENTAÇÃO DOS PROCESSOS SENSÍVEIS

Evento	Duração Total (hh:mm:ss.sss)	V <sub>RMS</sub> mínima (V)	Magnitude do afundamento (pu)
1	00:00:01.014	0.024	0.000055
2	05:21:22	0.000	0.00000
3	00:00:01.058	0.065	0.00015

Os dados observados pelo cliente são bastante precisos em termos de horário; no entanto, observa-se que o cliente tem uma tendência a interpretar erradamente as micro-interrupções: Enquanto os eventos 1 e 3 da Tabela X configuram interrupções de pouco mais de um segundo, o cliente os atribuiu a uma subtensão de 15 minutos e uma interrupção de 5 minutos respectivamente. Outra conclusão a que se pode chegar é que, visto que nenhum dos outros eventos causou parada, o processo é robusto o suficiente para resistir a afundamentos de até 0,73 pu e duração de até 0,94 segundos.

Analisando os dados registrados pelo medidor antes das interrupções e depois do restabelecimento da tensão normal, verificou-se que a corrente elétrica demorou cerca de 7 horas para alcançar novamente o patamar em que se encontrava antes da interrupção, o que indica um período em que a produção ficou comprometida. No questionário, o cliente estimou um tempo médio de 8 horas para restabelecimento do processo (TROP), o que é compatível com esta observação.

O relatório das perdas ocorridas fornecido pela empresa informou que, no período de medição, houve prejuízo com perda de material e retomada de produção no valor de R\$ 58.976,28, sendo o processo indicado como sensível responsável por 78% desse prejuízo. Este valor foi comparado ao custo de interrupção médio mensal calculado pelo questionário, resultando em R\$ 79.876,52 por mês. No entanto, é importante frisar que este valor inclui diversos custos, como o custo de geração e de substituição de equipamentos, que não foram levados em conta na análise da empresa. Considerando apenas os custos de horas extras, retomada de produção, perda de produção e reposição de matéria-prima, chega-se um valor de R\$ 56.432,62. Este resultado, com discrepância inferior a 5%, indica que os parâmetros obtidos no questionário são bastante coerentes com a realidade.

É importante ressaltar que estes dados devem ser revistos e corrigidos com boa frequência, de modo a mantê-los atualizados: não é mais possível garantir a confiabilidade destes dados, coletados em 2009. Isto evidencia mais um papel importante da continuidade do trabalho através de pesquisas online.

### V. CONCLUSÕES

O trabalho de busca de soluções ótimas para mitigar os impactos de problemas de qualidade da energia elétrica é complexo, por exigir um acordo entre a concessionária e o cliente. O custo de fazer múltiplas intervenções nos clientes afetados deve ser comparado ao custo de uma intervenção única, mas exigindo muito mais investimento, na rede de distribuição.

Este trabalho de quantificação do custo social da interrupção em grandes clientes determina um parâmetro de base, que

pode ser comparados ao custo de investimento na melhoria da qualidade do serviço.

No caso observado na etapa de aplicação, recomendou-se que a empresa pesquisada realize um estudo dos seus processos, para avaliar possíveis soluções para dessensibilizá-los. O custo de eliminação das micro-interrupções observadas (Tabela X, eventos 1 e 3) na rede de distribuição seria muito alto; de modo que uma intervenção no próprio cliente seria mais eficaz. Os resultados deste questionário puderam ser utilizados para comparar o custo de uma intervenção com a diferença entre os custos de interrupção na situação atual e projetada após a intervenção.

Numa próxima etapa, intenciona-se automatizar esta metodologia, com o uso de um portal na internet disponível para acesso dos clientes da distribuidora. As informações de cada cliente seriam salvas em um banco de dados, que guarda os custos de interrupção individuais dos consumidores já cadastrados e permite a extrapolação dos custos para outros clientes da mesma classe de consumo. Esta ferramenta, com base no critério de maximização do benefício esperado ou de maximização da relação benefício-custo, funcionará como suporte à tomada de decisão a respeito de investimentos na rede para melhoria da qualidade.

## REFERÊNCIAS

- [1] CIGRE Task Force 38.06.01, *Methods to Consider Customer Interruption Costs in Power System Analysis*, 2000
- [2] K. Samdal; G. Kjølle; B. Singh; F. Trengereid, "Customers' interruption costs - what's the problem?", in *17<sup>th</sup> International Conference on Electricity Distribution - CIGRE*, 2003
- [3] M. J. Sullivan, T. Vardell, M. Johnson, "Power interruption costs to industrial and commercial consumers of electricity", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1997
- [4] C. H. N. Magalhães, M. R. Gouvêa, F. A. T. Silva, C. M. V. Tahan, L. G. C. Araujo Filho, "Avaliação do custo social de interrupção do fornecimento de energia elétrica do lado da demanda no estado de São Paulo.", *XVI Sem. Nac. de Prod. e Trasm. de Energia Elétrica - SNPTEE*, Brazil, 2003
- [5] I. O. Cyrillo, M. A. Pelegrini, F. G. Borger, F. Annuati Neto, W. Jr. Belluzzo, *et al.* "Consumers' Perceived Economical Evaluation of Power Quality" in *20<sup>th</sup> International Conference on Electricity Distribution, CIGRE*, 2009
- [6] IEEE 519, "Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems", 1992.
- [7] Cebrian, J.C.; Kagan, N.; "Hybrid Method to Assess Sensitive Process Interruption Costs Due to Faults in Electric Power Distribution Networks", *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.5, iss.3, pp. 1686-1696, 2010.