



**XXI SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO -010

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS- GDS

**IMPACTOS ECONÔMICOS ASSOCIADOS A FENÔMENOS DE QUALIDADE DE ENERGIA:
VISÃO DO CONSUMIDOR**

Mateus D.Teixeira (*)
LACTEC

Arthur F. Bonelli (*)
LACTEC

Alexandre R. Aoki (*)
LACTEC

Rodrigo A. Peniche ()**
COPEL

Ivandro A. Bacca ()**
COPEL

Anselmo Chaves Neto (*)**
PPGMNE- DEST/UFPR

Marcos T. A. Cordeiro (*)**
PPGMNE/UFPR

RESUMO

As concessionárias de energia elétrica adotam metodologias para a tomada de decisão no que tange à priorização de obras de melhorias e expansão das redes elétricas, onde os custos associados à má qualidade de energia elétrica (QEE) deveriam estar incluídos. Porém, a obtenção de tal parcela é muito onerosa inviabilizando sua utilização. Buscando preencher esta lacuna, este artigo mostra os resultados de um trabalho da COPEL onde foram entrevistados cerca de 1000 consumidores industriais e cujo objetivo principal foi avaliar os custos mais relevantes causados por problemas de QEE, e, desta forma, contribuir no direcionamento dos recursos financeiros da empresa.

PALAVRAS-CHAVE

Custos, Interrupções de Energia, Pesquisa de Campo, Processos Industriais, Qualidade de Energia.

1.0 - introdução

Desde o início do século XX, quando as indústrias passaram a empregar a energia elétrica maciçamente para alimentar seus processos industriais, essas empresas passaram a sofrer com problemas relacionados à perda da qualidade da tensão elétrica de fornecimento, fosse pela falta desta, fosse por oscilações em seu valor nominal de fornecimento. Desde então, com a maior dependência dos processos fabris da energia elétrica fornecida pelas companhias de energia, estas sofrem cada vez mais com a perda da qualidade do fornecimento energético, agora não somente pela falta ou oscilação do sinal de tensão como anteriormente, mas por diversos outros distúrbios como desequilíbrios entre fases, distorções na forma de onda, flutuações de tensão, variações de tensão de curta duração e transitórios eletromagnéticos, usualmente chamados de fenômenos de qualidade de energia elétrica (QEE).

Tais distúrbios conduzem a um número cada vez maior de paradas de operação das indústrias devido, principalmente à maior sensibilidade das cargas, causada essencialmente pela inserção de sistemas de proteção contra variações da tensão. Assim, as paradas acarretam, na maioria das vezes, em prejuízos financeiros por diversos motivos que vão desde perda de matéria prima até multas contratuais por atraso na entrega de produtos.

(*) Centro Politécnico da UFPR, BR 116, km 980, nº 8813, CEP 81.531-980, Curitiba-PR, Brasil – Tel: (+55 41) – Fax: (+55 41) 3361-6007 – Emails: mateus.teixeira@lactec.org.br, arthur.bonelli@lactec.org.br, aoki@lactec.org.br, (**) Av. Padre Agostinho, nº 2600, CEP: 80.710-000, Curitiba-PR, Brasil – Tel: (+55 41) 3331-2660 – Email: rodrigo.peniche@copel.com, (***) Centro Politécnico da UFPR, Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 210, CEP 81531-970, Curitiba-PR, Brasil – Tel: (+55 41) 3361-3415 – Emails: anselmo@ufpr.br, mtacordeiro@gmail.com.

Desta forma, seja uma parada total ou parcial de uma indústria devido a problemas de qualidade de energia, quase sempre a concessionária responsável pelo fornecimento deverá ser acionada para responder sobre tal evento e consequentemente se posicionar sobre as medidas a serem tomadas para se evitar episódios futuros. Quase sempre as medidas a serem adotadas passam por investimentos financeiros em manutenção, reforma e ampliação de sua rede elétrica.

Neste sentido, as concessionárias de energia, como a COPEL, adotam metodologias que lhes auxiliem na tomada de decisão sobre a prioridade de investimentos que busquem melhorar suas redes de energia, aumentando a confiabilidade das mesmas, e melhorando sua imagem junto aos consumidores (1). Desta maneira, a COPEL, vem realizando uma série de estudos visando incluir em sua metodologia o custo da má qualidade de energia elétrica fornecida a seus clientes industriais como item a ser considerado para a tomada de decisão sobre investimentos, especialmente aqueles voltados a expansão da rede de distribuição.

Para tanto, foi realizada uma ampla pesquisa de campo baseada em entrevistas com os responsáveis técnicos de mais de mil indústrias no estado do Paraná, com intuito de conhecer os reais impactos e custos envolvidos da perda da qualidade de energia para estes consumidores. Assim, as seções seguintes apresentam, não somente os resultados estatísticos desta pesquisa junto aos consumidores, mas também a metodologia para seleção amostral, onde foram considerados todos os ramos de atividades industriais do Paraná.

2.0 - Seleção amostral

A partir dos dados disponibilizados pela Concessionária, além de outras informações definidas em (8) foi elaborado o procedimento utilizado para a determinação da seleção amostral de consumidores. O procedimento usado consistiu, basicamente, em considerar os ramos de atividades industriais como estratos e em sortear as amostras dentro de cada estrato. Dessa forma aplicou-se a técnica da amostragem aleatória estratificada e, portanto, tomou-se uma amostra aleatória de tamanho n_i de cada um dos $k = 33$ estratos das atividades industriais. A amostra total

para todas as indústrias é, portanto, $n = \sum_{i=1}^{33} n_i$. Esse procedimento foi escolhido em razão da necessidade de se

garantir uma maior representatividade da amostra a ser obtida, pois indústrias de todos os ramos de atividades devem fazer parte da amostra.

Uma amostra aleatória simples poderia ter sido utilizada. No entanto, como algumas características desta população (estrato industrial) são conhecidas a priori (principalmente o fato de que indústrias pertencentes a um mesmo ramo de atividade são bastante semelhantes entre si), um plano amostral que leve em consideração a existência dessas características que agrupam as indústrias em estratos, mostrar-se-á mais eficiente, isto é, produzirá estimativas intervalares (intervalos de confiança) dos parâmetros populacionais com uma amplitude menor.

2.1 DETALHAMENTO DO PROCESSO DE AMOSTRAGEM – UNIVERSO DA AMOSTRA

O universo amostrado de indústrias com uma cardinalidade N está distribuído em 33 ramos de atividades no estado do Paraná. O processo de amostragem foi conduzido da seguinte forma:

- Dimensionamento da amostra do universo composto por 61.924 indústrias, distribuídas em 33 ramos de atividade, obtendo-se o tamanho amostral n .
- Tamanho da amostra de indústrias, n , será repartido segundo os ramos de atividade de forma proporcional às suas dimensões.

2.2 AMOSTRAGEM PROPORCIONAL PARA OS 33 RAMOS DE ATIVIDADE

A amostra dimensionada de tamanho n (indústrias) foi distribuída proporcionalmente ao número de indústrias do ramo de atividade, resultando em $n_1, n_2, n_3, \dots, n_{33}$ de acordo com a proporção $n_i = \frac{nI_i}{N}$ para $i=1, 2, 3, \dots, 33$

Nos ramos de atividade, onde o consumo médio de energia elétrica ultrapassou 50 kWh, acrescentaram-se unidades adicionais ao tamanho obtido proporcionalmente. De forma que, a amostra definitiva foi fixada em 1.033 unidades consumidoras, divididas nos 33 ramos de atividades conforme mostrado pela figura 1.

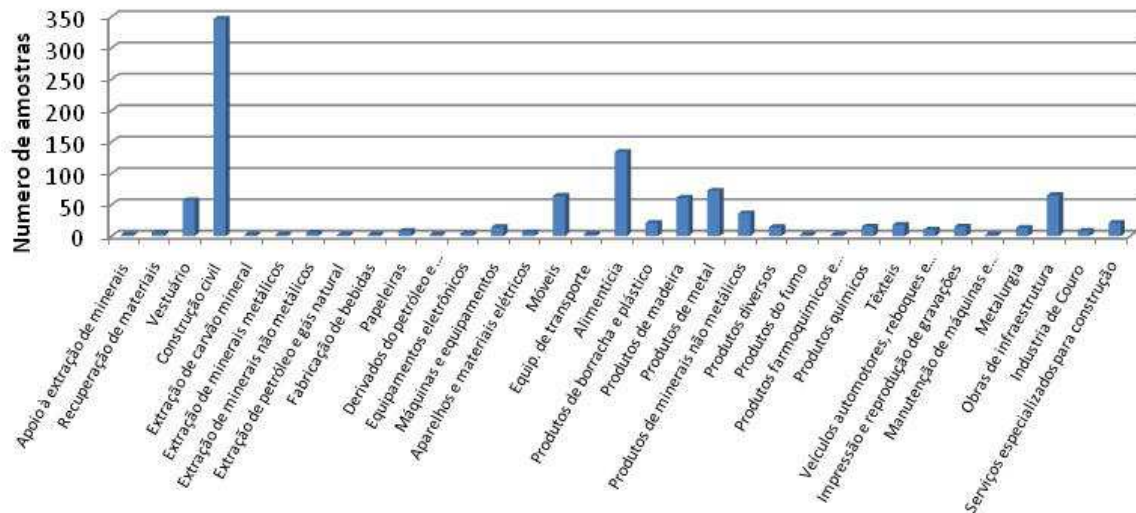


FIGURA 1 – Ramos de atividades contemplados pela pesquisa

3.0 - Definição do Questionário e aplicação da Pesquisa

Projeto de pesquisas desta natureza, onde o objetivo principal é conhecer o impacto da má qualidade de energia do ponto de vista do consumidor, é extremamente importante a realização de pesquisa junto aos consumidores, seja pela aplicação de questionários via telefone, email ou de forma presencial. Contudo, as pesquisas de mercado (pesquisa presencial ou pesquisa em campo) são as mais indicadas, visto que os consumidores talvez estejam na melhor posição para avaliar o impacto da falta de energia em suas atividades e devido ao fato de se disporem a responder com mais facilidade do que quando realizada de outra forma.

Assim, para a realização deste trabalho julgou-se relevante a execução da pesquisa na forma presencial e, neste sentido, houve a necessidade de aplicação de questionários técnico-econômicos nas mais de mil indústrias selecionadas, onde, as perguntas foram direcionadas para a obtenção de informações relativas às características técnicas da planta industrial bem como, a sua relação com os problemas da Qualidade da Energia.

Para a elaboração deste questionário buscou-se informações de diversos estudos já realizados [2 – 7]. Desta maneira, a partir das análises destas referências bem como a experiência do grupo de pesquisa envolvido neste desenvolvimento, o questionário foi concebido com as seguintes características:

- Informações gerais sobre o(a) entrevistado(a). Estas perguntas têm por objetivo coletar informações da(s) pessoa(s) entrevistada(s);
- Informações gerais sobre a empresa. Nesta parte, as perguntas estão relacionadas com o levantamento das características gerais da empresa, como: regime de trabalho, número de funcionários, etc.
- Custos associados à interrupção no fornecimento de energia elétrica. As questões desta parte têm como objetivo principal avaliar o comportamento da empresa, mais especificamente do seu processo produtivo, diante de interrupções no fornecimento de energia elétrica.
- Custos associados à qualidade da energia elétrica. As questões desta parte têm como objetivo principal avaliar o comportamento da empresa, através do seu processo produtivo, diante de problemas da qualidade da energia.
- Custos associados à interrupção da energia elétrica – Cenários. As questões desta parte possuem o objetivo de avaliar os impactos que as interrupções no fornecimento de energia elétrica causam na indústria. Para tal análise, foram elaborados 4 (quatro) cenários de forma a simular situações que possam ocorrer na indústria.

Uma vez concebido o relatório, este foi implementado em software de coleta de dados IMPACT utilizando-se a plataforma de desenvolvimento SuperWaba e o ambiente integrado de desenvolvimento (*Integrated Development Environment – IDE*) Eclipse com o plugin SuperWaba IDE. Tal software foi implantado em 50 assistentes pessoais digitais (Personal Digital Assistant – PDA) ou computador de mão (handheld) Palm Z22.

O uso dessas tecnologias garantiu um rápido desenvolvimento do sistema de coleta de dados. Tal informatização permitiu que o processo de pesquisa ocorresse de forma ágil e com elevada qualidade. Características estas, importantes para o sucesso da mesma.

4.0 - Resultados da pesquisa

Como informado no item anterior, muito embora o questionário aplicado às indústrias tenha objetivado obter dados referentes aos custos do setor industrial com a perda da qualidade da energia elétrica, algumas outras questões, também foram muito importantes para compreender a abrangência dos problemas causados por distúrbios de qualidade de energia, sobretudo as VTCD's e as interrupções.

Assim, dentre as questões mais relevantes no que diz respeito às indústrias está aquela relacionada ao faturamento anual. O conhecimento de tais valores deve ser considerado para qualquer análise de impacto financeiro. A Figura 2 mostra que a grande maioria das indústrias não fatura mais que R\$ 1 milhão por ano, ou seja, a maioria destas se encaixa no perfil de micro e pequenas indústrias.

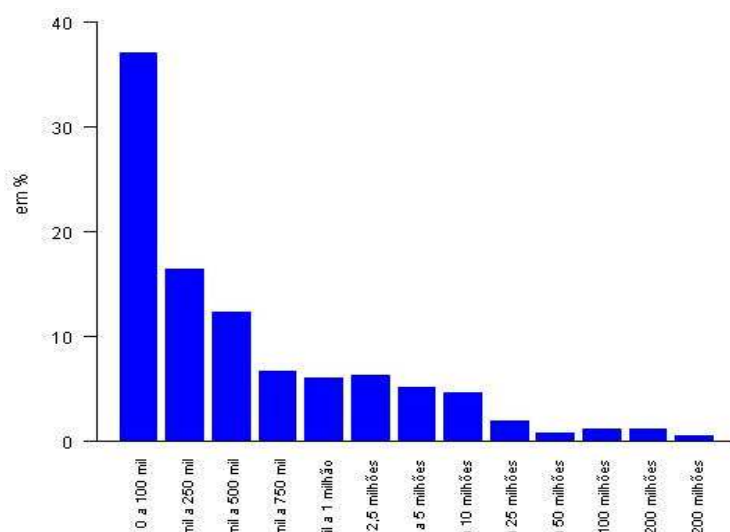


FIGURA 2 – Faturamento anual das indústrias.

Outro dado importante obtido na pesquisa foi a estimativa de quanto, percentualmente, a energia elétrica participa como insumo nos custos totais da produção, muito embora, em termos de importância ela deva ser considerada como dos mais importantes, em termos financeiros ela representa muito pouco perante outros, conforme Tabela 1.

A pesquisa tratou de avaliar também quais os principais motivos de parada de processos produtivos. Neste sentido, foi solicitado ao entrevistado que ordenasse, segundo a frequência de eventos, a causa da parada, atribuindo um valor de 1 a 3, onde 3 seria o evento mais frequente e 1, o menos frequente. A Tabela 2 apresenta as médias dos escores, atribuídos com vista a frequência de ocorrência dos eventos, para cada uma das causas de parada do processo de produção apontadas. Para os entrevistados, o item Interrupção no fornecimento de energia foi o evento mais frequente.

Tabela 1 – Porcentagem de Insumos

Insumos	Média (em %)
Recursos humanos	5,58
Matérias-primas	7,48
Compra de equipamentos	2,93
Reparos e manutenção de equipamentos	3,70
Manutenção de equipamentos de geração auxiliar (emergência)	2,93
Energia elétrica	4,67
Outros	48,01

Tabela 2 – Média dos escores atribuídos com relação a frequência de ocorrência de eventos

Eventos	Médias
Interrupção no fornecimento de energia	2,226
Avárias em equipamentos	2,031
Outros problemas no fornecimento de energia	1,743

A Tabela 3 traz dados que confirmam uma tendência nacional de automação de processos fabris, ou seja, alta dependência de equipamentos eletrônicos. Isto significa que, por um lado estas empresas são geradores de distúrbios para a rede (Harmônicos, desequilíbrios, flicker, etc.), por outro, são extremamente sensíveis às variações de tensão (VTCD e VTLD).

Tabela 3 – Principais tipos de equipamentos presentes nas linhas de produção

Tipos de equipamentos	Frequência	Proporção (em %)
Computadores industriais para o processo de manufatura	226	21,7
Controladores lógicos programáveis (CLPs)	221	21,2
Sistemas digitais de controle distribuído (SDCD)	87	8,3
Motores de indução	677	65,0
Motores de corrente contínua	538	51,6
Motores síncronos	262	25,1
Soft Starters	139	13,3
Conversores estáticos (retificadores, inversores, cicloconversores, etc).	204	19,6
Servidores de rede de computadores	292	28,0
Equipamentos de sistemas de automação	247	23,7
Sistemas de refrigeração industrial	160	15,4
Fornos elétricos	150	14,4

No que tange aos custos que mais oneram as indústrias, quando se pensa na parada de produção por falta de energia elétrica, está aquele relativo ao pagamento de horas extras para os funcionários a fim de se alcançar à meta de produção de um determinado dia ou mês. A Figura 3 mostra uma comparação desses valores para o setor industrial atendido pela COPEL.

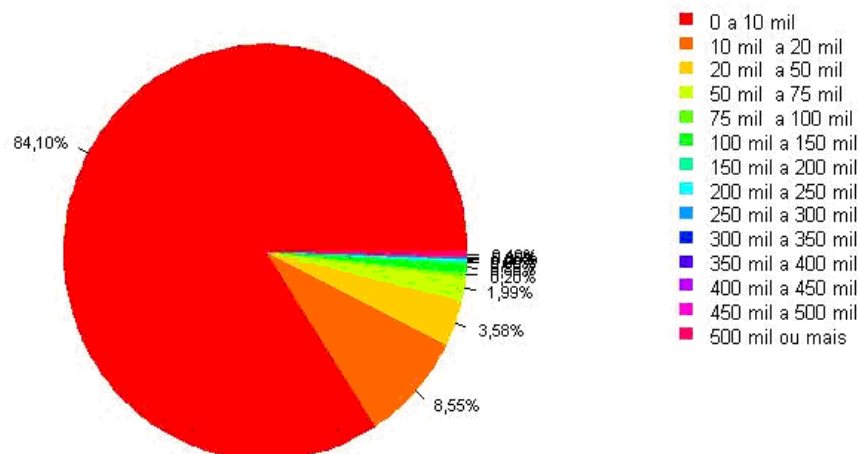


FIGURA 3 – Custo anual associado às horas-extras devido à interrupção do processo devido à má qualidade ou falta da energia elétrica.

Verifica-se que para mais de 84% das empresas, os custos de horas extras devido aos problemas de qualidade de energia e/ou interrupção do fornecimento não ultrapassam R\$10 mil/ano. Contudo, não obstante este valor pareça pequeno, quando se leva em conta à média do faturamento anual das indústrias percebe-se que tais perdas são bastante relevantes.

Outra despesa relevante seja para clientes industrial, comercial ou residencial, são aquelas associadas a reparos ou substituição de equipamentos danificados devido à má qualidade no fornecimento de energia elétrica. O gráfico da Figura 4 mostra que esses valores também são elevados, considerando o faturamento anual das empresas.

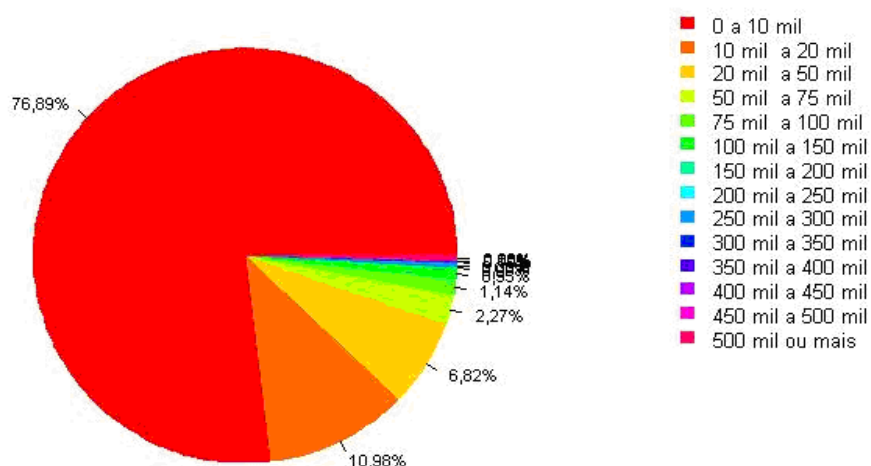


FIGURA 4 – Custo anual associado a reparos ou substituição de equipamentos devido à má qualidade no fornecimento de energia elétrica.

O custo relacionado à recuperação do processo industrial devido a interrupções no fornecimento de energia elétrica é retratado na Figura 5.

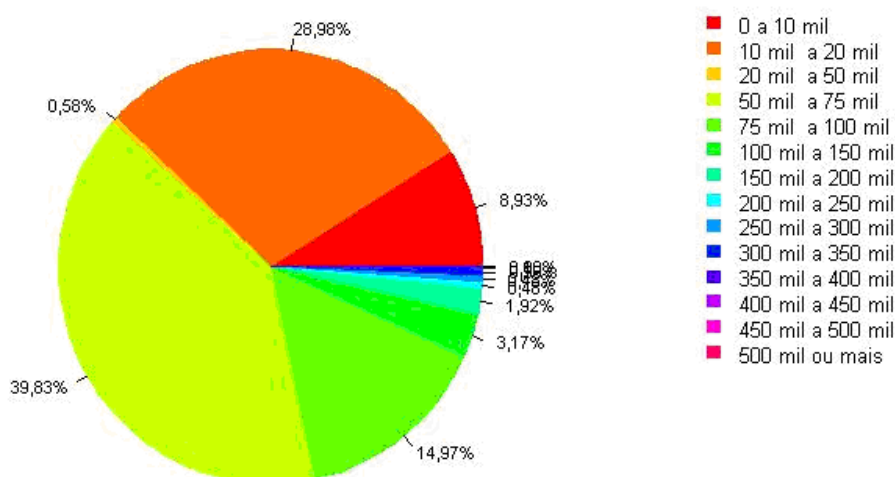


FIGURA 5 – Custo anual associado à recuperação do processo industrial devido a interrupções no fornecimento de energia elétrica (em R\$).

Como na maioria das vezes é necessário o descarte de matéria-prima e produtos finais ou mesmo retrabalho ocasionado pela má operação de algum processo devido a um determinado distúrbio de qualidade de energia, há um relevante dispêndio financeiro destinado ao custeio das perdas de matérias-primas e/ou produtos acabados devido à falta de qualidade e/ou interrupções no fornecimento de energia elétrica, o qual é retratado na Figura 6.

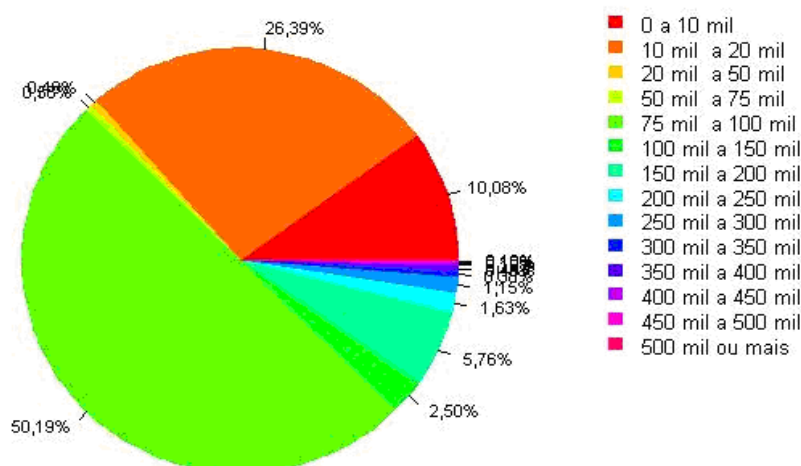


FIGURA 6 – Custo anual associado às perdas de matérias-primas e/ou produtos acabados devido a interrupções ou má qualidade no fornecimento de energia elétrica (em R\$).

Finalmente, vale mencionar que outros custos e questões de mesma relevância também foram abordados pela pesquisa, todavia os resultados indicados nesta seção são suficientes para mostrar a importância de se considerar os custos da perda da qualidade de energia como parcela importante dos valores que envolvem a produção industrial. Da mesma forma, é natural se pensar que tal parcela mereça ser considerada quando se realiza qualquer estudo para ampliação ou melhoria de redes de distribuição, sobretudo aquelas dedicadas ao atendimento de clientes industriais.

Com estes valores agrupados por ramo de atividades e consumo, poder-se-á, numa etapa futura, alcançar os custos totais da qualidade de energia para um determinado alimentador de distribuição prioritariamente industrial, e assim otimizar as ferramentas matemáticas para priorização de obras utilizadas hoje pela COPEL.

5.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho teve por objetivo mostrar alguns dos relevantes resultados obtidos através de uma pesquisa de campo baseada em entrevistas com responsáveis técnicos de mais de mil indústrias pertencentes a 33 ramos de atividade industrial do estado do Paraná. A pesquisa procurou identificar os principais custos associados à perda da qualidade de energia para o setor industrial. De posse destes custos, pretende-se empregá-los para auxílio na tomada de decisão sobre investimentos futuros em melhorias e expansão das redes de distribuição da COPEL.

Assim, a pesquisa indicou que a má qualidade do fornecimento de energia representa uma série de custos para as empresas que impactam diretamente na composição de seu custo final. Também pôde ser confirmado que o impacto de eventos de qualidade de energia produz não somente paradas de processos, que resultam em grandes despesas com horas extras, mas também geram perdas de equipamentos e insumos produtivos, além de penalizações e gastos com a compra, operação e manutenção de fontes alternativas de energia e equipamentos como filtros harmônicos e sistemas tipo “no-break”.

Desta maneira, o trabalho aqui desenvolvido possibilitará a COPEL aperfeiçoar ainda mais o emprego de seus recursos de forma a propiciar a seus clientes uma melhor confiabilidade e qualidade no seu fornecimento de energia, contribuindo significativamente para sua imagem perante a estes consumidores.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) COPEL, “Priorização de Obras de Distribuição – Método do PAYOFF”. Superintendência de Engenharia de Distribuição (SED), Curitiba, Fevereiro, 2002.
- (2) R. M. B. Marques. “Ferramenta Computacional para Avaliação do Impacto Econômico da Qualidade da Energia Elétrica no Setor de Produção das Indústrias”, Dissertação de Mestrado – UFC, Jan. 2006
- (3) EPRI – Electric Power Research Institute. “The Cost of Power Disturbances to Industrial & Digital Economy Companies”, USA, June 2001.

- (4) A. G Massaud; M. T. Shilling.and J. P. Hernandez, "Electricity restriction costs", IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution, Vol. 141, No. 4, pp. 299-304, July 1994.
- (5) G. Wacker and R. Billinton. "Customer Cost of Electric Service Interruptions", Proceedings of the IEEE, Vol.77, No.6, pp.919-930, Jun. 1989.
- (6) ELETROBRÁS. "Relatório da Pesquisa sobre Custo de Interrupção no Fornecimento de Energia Elétrica", Grupo Coordenador para Operação Interligada – Comitê de Distribuição – Comitê Coordenaria da Operação Norte/Nordeste, São Paulo-Brasil, Março 1991.
- (7) COSTA, J. G. "Avaliação do Impacto Econômico do Afundamento de Tensão na Indústria", Dissertação de Mestrado, PUC Minas, Fevereiro 2003.
- (8) M. T. A. Cordeiro, "Desenvolvimento de Programa em Ambiente Web para Avaliar a Qualidade de Serviços Usando a Metodologia Servqual", Dissertação de Mestrado, UFPR Novembro, 2010
- (9) WABA, <http://waba.sourceforge.net/>, Maio de 2010.
- (10) SuperWaba, <http://www.superwaba.com.br/>, Maio de 2010.
- (11) PALM, <http://www.palm.com/br/products/handhelds/z22/>, Maio de 2010

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Mateus Duarte Teixeira

Graduado em Engenharia Industrial Elétrica pela Universidade Federal de São João del-Rei (2001) e mestre em Qualidade de Energia pela Universidade Federal de Uberlândia (2003). Atualmente é pesquisador pleno do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, tendo ocupado anteriormente a gerência de negócios da Unidade de Negócios de Qualidade de Energia da ARTECHE EDC, onde foi responsável pela implantação e gerência da unidade até 2010. Têm atuado em projetos de P&D, estudos técnicos e consultorias que envolvam modelagem de sistemas elétricos, aplicação de bancos de capacitores e filtros harmônicos, estudos de eficiência energética e fontes alternativas de energia.



Arthur Fernando Bonelli

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia em 2008 e mestrado em Qualidade da Energia Elétrica pela mesma instituição em 2010. Atualmente é pesquisador do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC. Têm atuado em diversos projetos de P&D, estudos técnicos e consultorias. Têm experiências em qualidade da energia elétrica, geração eólica, máquinas elétricas, conversores de potência, modelagens de equipamentos na plataforma ATP, entre outros.

Alexandre Rasi Aoki

Obteve sua graduação, mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá, respectivamente em 1996, 1999 e 2003. Atualmente é Pesquisador Sênior na Divisão de Sistemas Elétricos do Instituto de Pesquisa para o Desenvolvimento – LACTEC e Professor Adjunto no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná – UFPR. Seus interesses de pesquisa incluem aplicações de sistemas inteligentes para sistemas de potência e smart grids. Ele também é membro do Comitê de Estudos C6 – Sistemas de Distribuição e Geração Distribuída do Cigré Brasil.

Rodrigo Antonio Peniche

Possui graduação em engenharia elétrica pela Universidade Federal de São João del-Rei e mestrado em Ciências pela Universidade Federal de Uberlândia (2004), nesta mesma escola cursa atualmente o doutorado como aluno especial. Sua experiência profissional inclui o Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) e a Companhia Paranaense de Energia (COPEL), onde atua na área de planejamento da expansão do sistema de distribuição em alta tensão. Tem experiência na área de engenharia elétrica, com ênfase em sistemas de potência, atuando principalmente nos seguintes temas: qualidade da energia, ressarcimento de danos, modelagem computacional de dispositivos elétricos, monitoração e diagnósticos da qualidade da energia elétrica, análise de vida útil de equipamentos elétricos, dentre outros.

Ivandro Antônio Bacca

Nasceu em Coronel Vivida-PR, Brasil. Graduou-se em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT). Mestre em Qualidade de Energia pela Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia (2007). Atualmente é engenheiro de manutenção na COPEL, na área eletromecânica e de linhas de transmissão.

Anselmo Chaves Neto

Possui graduação em Matemática (1971) e Engenharia Civil (1975) pela Universidade Federal do Paraná em Curitiba, Especialização em Processamentos de Dados pela FAE-Curitiba (1982), Mestrado em Estatística pela Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP (1985) e Doutorado em Sistemas Estocásticos e Estatística pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (1991). Atualmente é Professor Associado III do Departamento de Estatística da Universidade Federal do Paraná atuando no Programa de Pós-graduação em Métodos Numéricos em Engenharia.

Marcos Tadeu Andrade Cordeiro

Possui graduação em Estatística (2007) pela Universidade Federal do Paraná em Curitiba e Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia no Programa de Pós-graduação em Métodos Numéricos em Engenharia da Universidade Federal do Paraná (2011).