

# Implantação de Projeto de Eficiência Energética com controle de tensão e compensação de energia reativa em complexo hospitalar

1-Jose Starosta  
Ação Engenharia e Instalações Ltda  
São Paulo –SP- Brasil  
[jstarosta@acaoenge.com.br](mailto:jstarosta@acaoenge.com.br)

2-Paulo Gasparini  
Ação Engenharia e Instalações Ltda  
São Paulo-SP – Brasil  
[pgasparini@acaoenge.com.br](mailto:pgasparini@acaoenge.com.br)

3-Eduardo Dalton  
Ação Engenharia e Instalações Ltda  
São Paulo-SP – Brasil  
[edalton@acaoenge.com.br](mailto:edalton@acaoenge.com.br)

**Resumo** — Apesar da existência de boas referências [1],[2] e [3], os aspectos da implantação de projeto de eficiência energética com o controle da tensão e compensação reativa ainda são escassos pelo lado da carga/consumidor. Este documento apresenta a implantação de projeto de eficiência energética, decorrente da modificação do perfil da tensão de alimentação do sistema de geração de água gelada em complexo hospitalar. Considerando que boa parte deste tipo de carga possui características de impedância constante (inversores), o controle da tensão de alimentação é uma boa ferramenta para a obtenção de operação com menor consumo de energia. São apresentados os conceitos e premissas que foram considerados no projeto e as provas necessárias ao processo de M&V (medição e verificação), conforme PIMVP (protocolo internacional de medição e verificação de performance). Ao final apresenta-se a quantificação das economias e a comparação às premissas iniciais com as devidas justificativas.

**Palavras-chaves** — Eficiência Energética, controle de tensão, compensação reativa tempo real, CVR, PIMVP, instalações elétricas hospitalares.

## I. INTRODUÇÃO

Os custos de energia elétrica no Brasil possuem importante participação dentre os custos operacionais em instalações hospitalares, considerando a operação em turnos de 24x7. Em especial, as cargas de climatização podem responder por 30% a 40% do consumo total da unidade. Aspectos de sustentabilidade indicam a necessidade em se manter operações energeticamente eficientes, reduzindo as emissões relativas à geração de energia. No Brasil cuja matriz energética depende de fontes hidrelétricas nem sempre disponíveis, tornam os cuidados com as fontes e consumo de energia como estratégicos; os eventos do passado recente ilustram a dependência da economia do Brasil das fontes hídricas e a eficiência energética é uma ótima ferramenta para a preservação dos lagos. A geração térmica promove o aumento da tarifa com as bandeiras tarifárias aplicadas mensalmente [4], [5].

### A. Eficiência energética nas Instalações Elétricas Hospitalares

Instalações elétricas de maior porte (industriais e comerciais) são consideradas eficientes sob o ponto de vista clássico de eficiência energética quando em condições de operação apresentam as perdas em vazio e as perdas Joule (em carga) controladas e minimizadas. O controle das perdas Joule é relacionado ao controle de impedâncias e correntes ( $RI^2$ ), nas etapas de projeto, operação e manutenção. Outros cuidados são tomados nas máquinas elétricas como os motores e transformadores. De fato, a redução da corrente (incluindo as correntes harmônicas) reduz as perdas nos enrolamentos dos transformadores, motores e circuitos de alimentação (perdas em carga) e esta redução é também obtida com a

compensação da energia reativa associada a filtros de harmônicas que promovem a redução de correntes harmônicas e perdas associadas [6]. O ponto ora tratado considera a eficiência energética obtida com o ajuste adequado dos níveis de tensão de operação dos barramentos de alimentação das cargas e equipamentos em conjunto com filtros construídos como compensadores estáticos de energia reativa [7] [8].

## II. MODELAGEM DAS CARGAS e CONTROLE DE TENSÃO PELO LADO DA CARGA

A referência [9] apresenta a modelagem que foi adotada, considerando o comportamento das cargas em modelos de impedância, corrente e potência constante. Na medida em que as tensões nos barramentos que alimentam as cargas possam ser controladas, maior será o potencial de economia de energia. Há de se considerar a relação de compromisso entre a operação confiável sob o ponto de vista de qualidade de energia e o da eficiência energética. Além dos outros pontos clássicos de eficiência energética considerados pelo consumidor (cargas eficientes, por exemplo), o tema a ser ora tratado é o ajuste do melhor ponto de operação e que considera a otimização da relação entre as fontes, as cargas e os filtros. Em outras palavras o projeto busca pelo melhor perfil da tensão de operação considerando os aspectos da eficiência energética, ou com qual perfil de tensão a planta opera com menor consumo de energia. Tudo isso, considerando ainda a forma como a distribuidora fornece a tensão. Nestes aspectos cabem as avaliações:

- Perfil de tensão da fonte
- Existência de TAP's nos transformadores da instalação
- Estratégia de operação em função de diversos trafos e barramentos e medições adequadas de variáveis elétricas nos principais barramentos com recursos de domínio do tempo.
- Regime de tensão adotado nos barramentos para a "preservação da vida"; em muitos casos adota-se regime de tensão superior à nominal para prevenir afundamentos decorrentes da operação das próprias cargas ou do perfil da distribuidora.
- Análise da operação eficiente, interpretando os níveis mínimos de tensão de operação; nem sempre o ponto ótimo é aquele correspondente à tensão nominal da carga e equipamentos.
- Especificação da solução de equipamento auxiliar ou filtro que permita cortar picos de potência reativa da carga, o controle de harmônicas e outras facilidades.
- Simulações de operação.
- Implantação do projeto

- Verificação dos resultados, medição e verificação e avaliação das economias.

### III. O PROTOCOLO INTERNACIONAL DE MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO DE PERFORMANCE - PIMVP

O protocolo internacional de medição e verificação de performance-PIMVP [10] que foi utilizado para determinação das economias do projeto é aplicável na determinação confiável da economia de um projeto de eficiência energética. Um processo de medição e verificação (M&V) utiliza medições para determinar de forma confiável a economia real gerada em uma instalação por um programa de gestão energética. A aplicação de um programa com o PIMVP requer algumas etapas sequenciais onde são definidas as etapas do M&V Algumas definições:

- Avaliação “ex-ante”: Avaliação preliminar baseada em dados conhecidos, estimados e teóricos; conhecido como “pré-diagnóstico”.
- Avaliação “ex-post”: Considera aplicação de medições, verificação de linhas de base e define qual será o modelo matemático do M&V inicial e critérios de avaliação das economias. A etapa de M&V tem importância na caracterização do processo de medição da economia de energia. Esta etapa é normalmente tratada como “diagnóstico”
- Etapa da implantação das Ações de Eficiência Energética (AEE). Neste período as AEE são realizadas e implantadas e os ajustes de operação são efetuados, normalmente outras variáveis são encontradas nesta etapa podendo-se ampliar os resultados inicialmente previstos.
- Etapa do período da determinação da economia. São iniciadas as medições e verificações da economia; é o período de conclusões sobre as economias auferidas, incluindo ainda os ajustes que podem depender de fatores externos relacionados, por exemplo a mudança de perfil de produção.
- Relatório final: Contempla a descrição de todas as etapas e descreve os resultados obtidos na etapa das verificações da economia comparados as previsões da avaliação “ex-post”. Deve descrever e mesmo justificar as diferenças, se encontradas.
- Fronteiras de medição: Estabelece os limites da medição da energia fornecida e os consumidores desta energia, podendo-se ainda estabelecer dentro de uma fronteira outras “sub fronteiras” melhorando a percepção do consumo de energia.
- Métodos de medição: São definidas no PIMVP as opções de medições: A medição de toda instalação, como efetuada por um medidor da distribuidora é a “opção C”, já a medição isolada ou específica são as opções A (com estimativa parcial e medição de outros parâmetros) e a opção B que se preocupa com medições de todas as variáveis. A opção D é efetuada por simulações calibradas na não existência de dados ou da instalação, e pode ser aplicada em instalações que ainda não existem.

Linha de base: Relação de consumo de energia com outra variável que representa o período anterior ao da implantação do projeto de eficiência energética e que possui boa correlação linear ( $R^2$  maior que 0,75) com

esta outra variável. O período da linha de base deve ser relevante e representativo do comportamento do processo podendo durar desde 2 minutos (lâmpadas), dezenas de minutos ou algumas horas nos processos industriais repetitivos e estáveis ou alguns dias ou mesmo meses em situações mais complexas. Outros fatores: O PIMVP considera alguns outros fatores como os efeitos interativos que ocorrem durante a implantação de uma AEE como as variáveis independentes que ocorrem rotineiramente impactando na variação da energia consumida. Os fatores estáticos são caracterizados por interferir no consumo de energia que não foram considerados no projeto e devem corrigir as avaliações, como o número de leitos ocupados de um hospital (dentro da fronteira de medição).

### IV. LEVANTAMENTOS, SIMULAÇÕES E PRE-DIAGNOSTICO.

Foram efetuados os levantamentos das instalações dos pontos relacionados ao suprimento de energia elétrica da central térmica do hospital e cargas relativas com o apoio das informações já disponíveis no sistema supervisor de gestão das utilidades (energia consumida da rede elétrica de suprimento dos equipamentos e carga térmica gerada pelo sistema de refrigeração). Também foram efetuadas medições de variáveis elétricas em alta resolução com instrumento classe A com 1024 amostras por ciclo em cada um dos 3 transformadores que alimentam as cargas e que em conjunto com os dados da instalação elétrica (impedância de rede e componentes, da distribuidora e outros) serviram de base para as simulações considerando-se a operação em outros patamares de tensão e injeção de compensação reativa pelo compensador estático. Esta etapa deve validar a relação entre as variáveis de entrada e saída, permitindo que o projeto seja aderente ao PIMVP. A avaliação da correlação entre a carga térmica gerada e a energia elétrica consumida do grupo das centrifugas geraram os relatórios iniciais (pré-diagnóstico) e previsão da economia projetada pelas simulações. A figura 2 apresenta o resultado do comportamento da demanda da carga medida e a simulado no transformador 1 (nos outros transformadores foram efetuadas simulações semelhantes) e a tabela I apresenta os resultados desta etapa de pré-diagnóstico com a previsão da redução da potência consumida com a variação de tensão da figura 1. A simulação considera a análise das medições de tensões e potências consumidas e a determinação da característica da carga, definindo-se então o potencial de eficiência energética. Os resultados obtidos com a redução de correntes harmônicas se mostraram desprezíveis em relação aqueles previstos pela redução da tensão e não foram considerados.

#### A. Imunidade:

Foram avaliados os limites das tensões registradas, verificando se houve algum impacto na carga em decorrência do novo perfil de tensão. Desta análise

dependerá a estratégia da análise da imunidade da carga à variação de tensão a ser implementada. Por duas semanas o sistema foi mantido sob observação com foco na operação adequada. A figura 1 apresenta o comportamento da tensão durante a mudança do TAP.

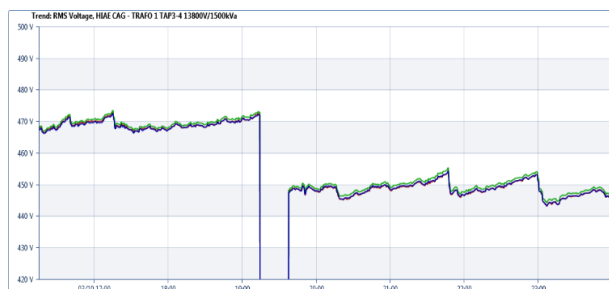


Figura 1 – Comportamento da tensão nos períodos antes e depois da redução do TAP

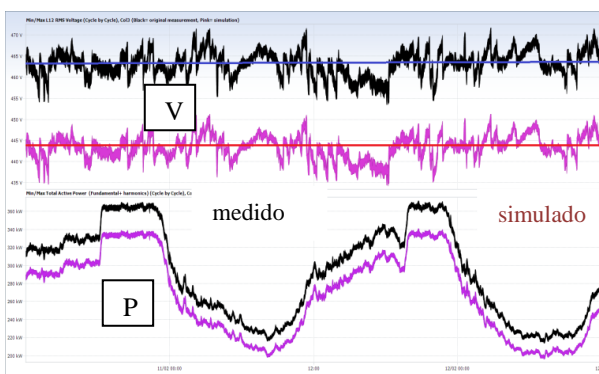


Figura 2 – Simulação do comportamento de tensão e potência em secundário de transformador com redução de TAP e inserção de compensador estático

TABELA I – RESUMO DA REDUÇÃO DA POTÊNCIA CONSUMIDA-SIMULAÇÃO

Simulações para Coluna 1-TR 1	Simulações para Coluna 3-TR2	Simulações para Coluna 6-TR3	
<b>Redução de energia em função da redução de corrente</b>	- 0,02%	- 0,06%	Redução de energia em função da redução de corrente -0,06%
<b>Redução de energia em função do Controle da Tensão (5%)</b>	- 8,69%	- 8,35%	Redução de energia em função do Controle da Tensão (5%) -8,39%
<b>Total de Reduções previstos</b>	- 8,71%	- 8,41%	<b>Total de Reduções previstos</b> -8,45%

## V. DEFINIÇÃO DO PLANO DE M&V

O plano ou opção do M&V foi escolhido como o de “Opção B” pela existência dos registros da carga térmica total produzida, caracterizando a fronteira de medição como as centrifugas (geração de frio) em suas entradas e saídas. O modelo de operação considerou a operação pelas centrifugas 1, 4 e 5, sem operação das demais. A figura 3 apresenta a definição da linha de base inicial com as medições de carga térmica e consumo de energia. Foi então definida a linha de base com coeficiente de correlação

aceitável ( $R^2$ -bem superior aos 75% mínimos aceitáveis) a ser considerada na avaliação dos resultados após as AEE.

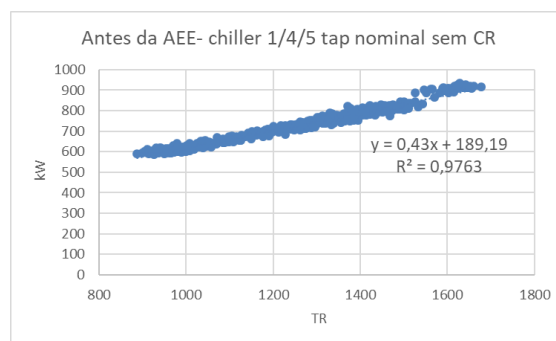


Figura 3 – Definição da linha de base – medições antes das AEE-demanda elétrica em função da carga térmica

A potência elétrica considera a soma das demandas dos transformadores 1 e 2 que alimentam as centrifugas 1, 4 e 5. A tabela II ilustra o comportamento verificado e esperado pela mudança de tensão no TAP do Trafo 1. Enquanto a redução da tensão proporcionada pela mudança do TAP é de aproximadamente 4,3%, a compensação reativa eleva a tensão, reduzindo a variação de tensão total para valores da ordem de 3,5%.

TABELA II – RESUMO DA VARIAÇÃO DE TENSÃO

<b>V1p</b>	<b>13200 V</b>
<b>V2p</b>	<b>13800 V</b>
<b>RTP 1</b>	<b>28,7</b>
<b>RTP 2</b>	<b>30</b>
<b>delta RTP</b>	<b>0,957</b>
<b>delta V</b>	<b>4,348%</b>
<b>delta V com compensação reativa</b>	<b>3,522%</b>

## VI- MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO FINAL

A fase final do projeto foi concluída quando a Ação de Eficiência Energética (AEE) e foi implantada no sistema com todos os transformadores que tiveram seus TAP's ajustados e compensadores estáticos ativados com tempo de compensação em 16 milissegundos. Os TAP's foram alterados para a posição '3-4 -13.800V'. Foram efetuadas novas leituras a fim de se verificar o consumo de energia e sua relação com a carga térmica produzida. De acordo com os protocolos seguidos foi efetuada então a determinação da economia gerada no período pós AEE. Os resultados estão ilustrados na figura 4:

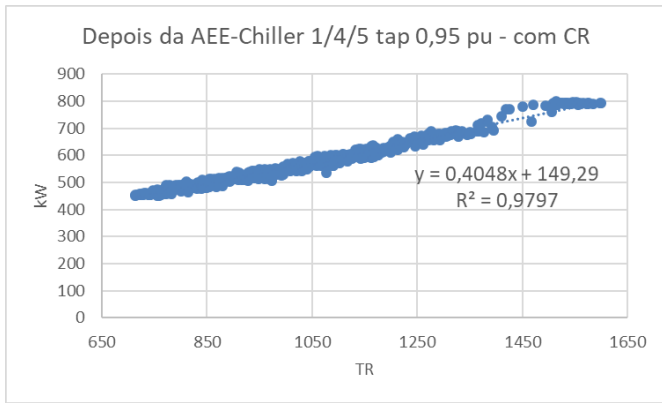


Figura 4 - Demanda elétrica (kW) em função da carga térmica (TR) – PÓS AEE (ação de eficiência energética)

**A-Comentários:**

A avaliação inicial – figura 3, apresenta uma correlação com coeficiente ( $R^2$ ) de 0,9763 e a final na figura 4 de 0,9797. Verifica-se que apesar dos coeficientes possuírem um bom grau de aderência, o “R<sup>2</sup>” relativo ao período “pós-implantação” tem melhor comportamento conferindo ao processo melhor grau de confiabilidade na análise. Do resultado foi possível aferir a economia de energia e o consequente aumento do COP (coeficiente de performance) nos dois períodos selecionados. A tabela 3 apresenta a síntese dos resultados. Considerando os dois períodos analisados o resultado apresenta um rendimento médio de 0,59 kW/TR antes da AEE e 0,55 kW/TR depois da AEE, com aumento da eficiência energética de 6,39%, ilustrada na tabela 3. O gráfico da figura 5, montado em função do comportamento das figuras 3 e 4 apresenta as duas correlações da potência média consumida kW em função da carga térmica gerada TR antes e depois da AEE e os gráficos das figuras 6 e 7 apresentam o comportamento médio das duas correlações (kW/TR) em função da potência térmica gerada nas duas etapas, concluindo assim o processo de M&V (verificação final).

**B- O CVR**

O coeficiente tratado por CVR ou “conservative voltage reduction” considera a variação da energia consumida pela variação da tensão. Neste caso o CVR aferido foi de 6,39%/3,52%=1,81

TABELA 3 - TABELA RESUMO DA ECONOMIA AFERIDA. PÓS AEE

	TRh total	kWh total	kW/TR médio
<b>Pré-AEE</b>	63.030	37.052	0,588
<b>Pós AEE</b>	54.961	30.245	0,550
<b>Economia %</b>			6,39%

Pode-se ainda observar que durante os períodos de análise (diagnostico e observação das economias) existia uma diferença de carga térmica. O período pós AEE foi de menor geração de carga térmica contribuindo ainda mais para a confiabilidade do resultado alcançado, uma vez que a CAG trabalha com curvas de rendimento que melhoram com o aumento do carregamento. Em outras palavras o que se espera é que cargas térmicas maiores aumentem o valor de economia determinado em perfil de operação pré-definido.

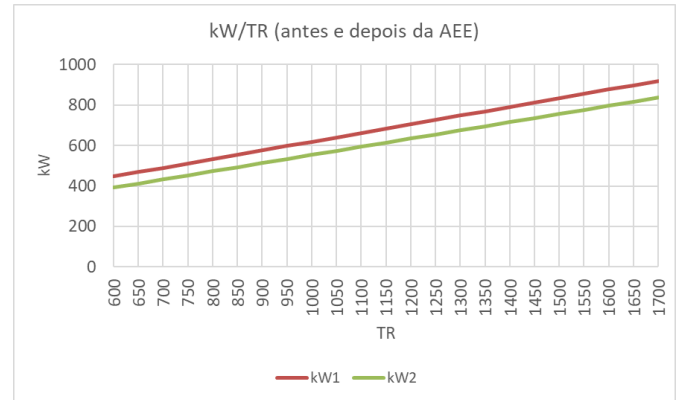


Figura 5 – Comparação dos rendimentos em kW/TR nas duas situações ( antes e depois da AEE)

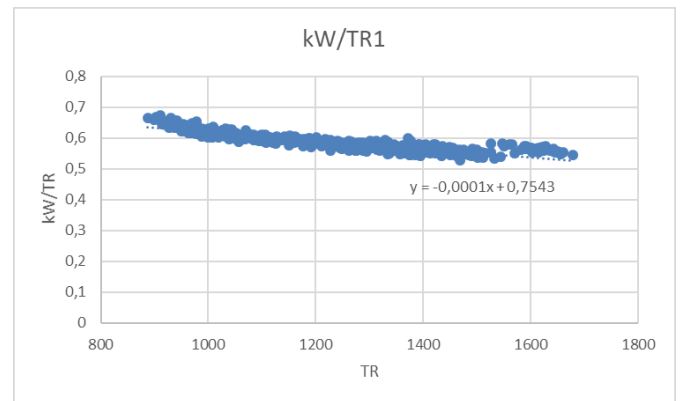


Figura 6 – Avaliação da relação kW/TR pela carga térmica – antes da AEE

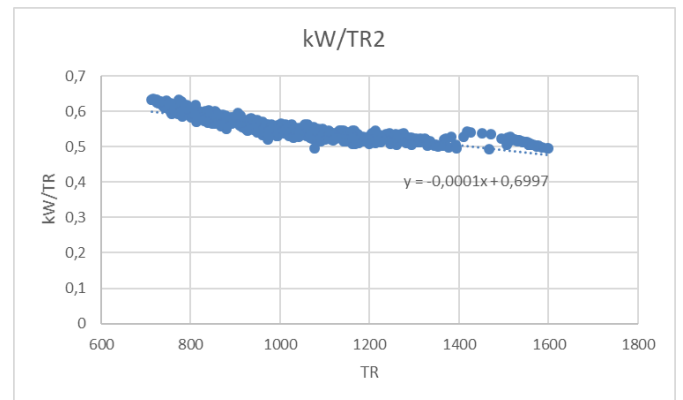


Figura 7 – Avaliação da relação kW/TR pela carga térmica – depois da AEE

**VII COMPENSAÇÃO ESTÁTICA DE ENERGIA REATIVA TEMPO REAL**

A compensação estática de energia reativa tem sido usada nas industriais como solução de mitigação da tensão nas plantas industriais na presença de cargas com elevado consumo de energia reativa, possibilitando melhoria da regulação de tensão, redução das correntes harmônicas em função projeto do filtro e correção do fator de potência. Devido ao tempo de resposta e isenção de transientes de manobra é uma

ferramenta que tem possibilitado o aumento de produtividade das plantas pelo aumento da confiabilidade operacional [11], [12] e [13]. A figura 8 ilustra os principais componentes do equipamento de compensação reativa tempo real (chaves estáticas, controlador, e grupos LC).

### VIII – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O projeto foi concluído com um resultado aferido de 6,39% de economia de energia considerando a operação com as centrifugas citadas. Os valores se mostraram inferiores aos estimados das simulações iniciais previstas de pouco mais que 8,5%. A diferença é justificada pelo comportamento da tensão durante os períodos de observação e na fase de implantação da AEE, ligeiramente acima do estimado. Esta diferença foi prevista no início do projeto que considerou uma economia real prevista de 5 a 6%, quando das avaliações das relações de custo-benefício. Os resultados obtidos possuem muito boa correlação elevando a confiabilidade dos resultados obtidos.

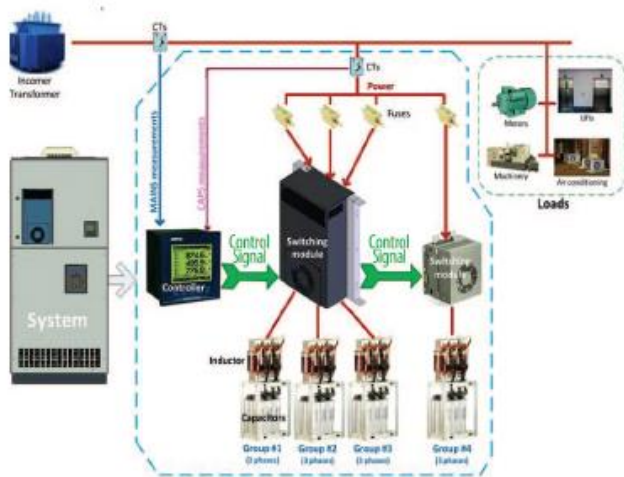


Figura 8 – Esquema da solução de compensação estática de energia reativa (tempo real). – Fonte: Elspec Ltd.

### IX. REFERÊNCIAS

[1] U.S. Department of Energy – Electricity Delivery and Energy Reliable Application of automated controls for voltage and reactive power managements – initial results – dec 2012  
 [2] Pankaj K.Sen; Keun Hyuk Lee – “Conservation Voltage Reduction Technique: An Application Guideline for Smarter Grid”; IEEE Trans on Industry Applications, vol. 52, no. 3, may/june 2016 pp. 2122- 2127  
 [3] J. G. DeSteele; B. W. Kennedy; S. B. Merrick – Conservation Voltage  
 [4] ANEEL – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST- Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica  
 [5] ONS – Operador Nacional do Sistema – [www.ons.gov.br](http://www.ons.gov.br)  
 [6] Starosta, Jose – Uso Racional de Energia Elétrica em Instalações Comerciais – dissertação de mestrado – Escola Politécnica USP- 1997  
 [7] Starosta, Jose – Eficiência Energética com o controle da Tensão – Revista o setor elétrico – Outubro de 2016  
 [8] Elspec Ltd – Energy Efficiency method for energy saving calculation  
 [9] Starosta, Jose – Eficiência Energética com o controle da Tensão – CBQEE 2017  
 [10] Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance – EVO  
 [11] Starosta, Jose – Qualidade de Energia nos processos industriais e produtividade- Revista Setor Elétrico Outubro de 2006  
 [12] Starosta, Jose – Mas afinal para que servem os capacitores em instalações elétricas de BT- Revista Setor Elétrico Fevereiro, Maio e Junho /2006.  
 [13] Elspec Ltd– Fast Response, transient free, Reactive Power Compensation systems

### X-SOBRE OS AUTORES

- 1- Jose Starosta -Engenheiro Eletricista pela Escola de Engenharia Mauá em 1982.Mestre em Engenharia pela Escola Politécnica da USP em 1998;Diretor de Engenharia da Ação Engenharia e Instalações desde 1993. Atual. Áreas de Interesse: Qualidade de Energia e Eficiência Energética em instalações elétricas com diversos trabalhos publicados na área.
- 2- Paulo Gasparini: Engenheiro Eletrônico pela Escola de Engenharia de Lins em 1995, coordenador de engenharia da Ação Engenharia e Instalações, áreas de interesse: Automação e instalações industriais.
- 3- Eduardo Dalton: Engenheiro Mecânico pela Universidade Cruzeiro do Sul em 2016; em curso pós graduação em Gestão de Energia e EE para climatização, SENAI. Analista Técnico na Ação Engenharia e Instalações Ltda. Áreas de Interesse: HVAC, EE e Instalações técnicas.

Além das ações de eficiência energética realizadas, recomenda-se avaliar o carregamento das centrifugas durante a operação, bem como a operação das bombas estabelecendo o aumento de rendimento na operação. Recomenda-se manter esta rotina de análise de forma a calibrar a melhor solução e combinação de sistemas para a operação das centrifugas. Há uma interessante relação de compromisso que envolve os aspectos de qualidade de energia, eficiência energética, produção e custos industriais. O correto conhecimento e gerenciamento das variáveis elétricas nas plantas com uso de tecnologia e técnicas adequadas possibilitam importantes reduções de custos e obtenção de importantes ganhos com importantes reflexos nos aspectos de sustentabilidade e meio ambiente.