

Eficiência Energética e o Comportamento da Tensão em Instalações Elétricas Industriais e Comerciais.

Jose Starosta, IEEE member
Ação Engenharia e Instalações Ltda
jstarosta@acaoenge.com.br

Resumo — O perfil da tensão de alimentação nas instalações industriais e comerciais tem forte dependência do fornecimento da distribuidora local, da concepção das instalações (projeto), dos modelos e da forma de operação das cargas com suas tipicidades operacionais. Considerando que boa parte das cargas industriais 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. O trabalho aponta ferramentas de controle com uso de simulação dinâmica, ajuste de TAP's e sistemas de compensação reativa e filtros adequados de forma a ser obter operação mais eficiente com tensões tão próximas da ideal quanto possíveis.

Palavras-chaves — Eficiência Energética, controle de tensão, compensação reativa tempo real, CVR.

I. INTRODUÇÃO

Os custos de energia possuem alto grau de importância dentre os custos operacionais em indústrias e grandes complexos comerciais como data-centers, hospitais, shopping centers e outros. Aspectos ambientais e de sustentabilidade corroboram com a necessidade de se manter operações energeticamente eficientes, notadamente no caso do Brasil cuja matriz energética depende de fontes hidrelétricas nem sempre disponíveis, tornando estes recursos 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 com combustíveis fósseis é utilizada como complemento à geração com fontes renováveis conforme estratégia adotada pelo Operador Nacional do Sistema – ONS. A figura 1 ilustra a evolução da geração hidrelétrica e térmica no Brasil nos últimos 6 anos. Note-se que a falta de água nos reservatórios incrementa o consumo de combustíveis fósseis sujando a matriz energética e aumentando os custos de geração. As bandeiras tarifárias estão diretamente associadas à geração térmica.

II. ASPECTOS DAS INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS E COMERCIAIS

Instalações elétricas 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 nos circuitos magnéticos dos motores e transformadores, seus carregamentos e perdas em vazio. De fato, a redução da corrente (incluindo as correntes harmônicas) reduz as perdas nos enrolamentos dos transformadores, motores e circuitos de alimentação (perdas

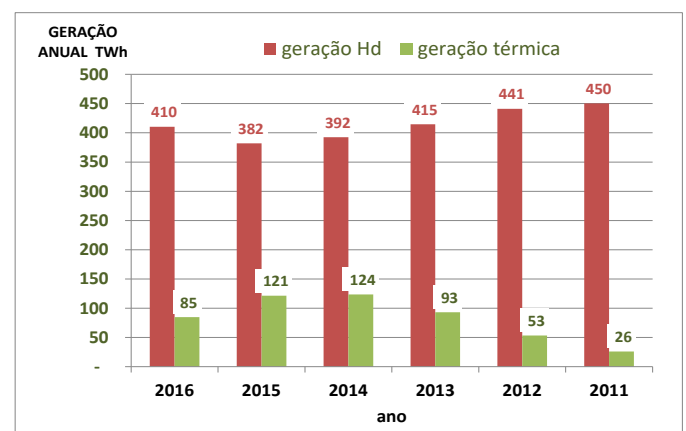


Fig. 1 – Geração Anual de Energia no Brasil: fontes Hidráulicas e Térmicas- Fonte: Compilado do site O.N.S. [3]

em carga) e esta redução é também obtida, por exemplo, com a compensação da energia reativa adequada associada ou não a filtros de harmônicas (ativos ou passivos) que promovem a redução de correntes harmônicas e perdas associadas [16]. O ponto a ser tratado neste trabalho considera a eficiência energética que pode ser obtida adicionalmente com o ajuste adequado dos níveis de tensão de operação dos barramentos de alimentação das cargas e equipamentos. Em função da característica da carga, este fator pode ter maior grau de importância que os demais relatados. As justificativas para esta pesquisa são relacionadas aos crescentes custos de energia no Brasil, aspectos ambientais e sustentabilidade e redução de investimentos em infraestrutura.

III. MODELAGEM DAS CARGAS

As cargas elétricas são modeladas em função de suas características; de impedância constante, corrente constante e potência constante. O equacionamento da modelagem das cargas é apresentado em [9] e reproduzido em (1) e (2):

$$P = P_0 [a_p + b_p (U/U_0) + c_p (U/U_0)^2] \quad (1)$$

$$Q = Q_0 [a_Q + b_Q (U/U_0) + c_Q (U/U_0)^2] \quad (2)$$

Onde:

a_p , a_Q são as parcelas de cargas ativa/reativa modeladas como potência constante,

b_p , b_Q são as parcelas de cargas ativa/reativa modeladas como corrente constante c_p , c_Q são as parcelas de cargas ativa/reativa modeladas como impedância constante, e

$a_p + b_p + c_p = 1$; $a_Q + b_Q + c_Q = 1$. P_0 e Q_0 são as potências ativas e reativas de referências e P e Q os novos valores de potencia ativa e reativa. O modelo de tipologia das cargas é também tratado na literatura internacional como “ZIP model” [6], sendo Z (impedância constante); I (corrente constante) e P (potência constante). No equacionamento exposto em (1) uma carga de impedância constante teria o comportamento: $P/P_0 = (U/U_0)^2$ e portanto caso ocorra uma variação de 1% na tensão ($U/U_0 = 0,99$), a consequência seria uma variação de 2% da demanda de potencia ativa ($(0,99)^2 = 98\%$). Já uma carga de corrente constante mantém a relação de 1% de variação de potencia ativa para cada 1% de variação de tensão e a carga de potência constante não apresenta variação de potencia consumida com a variação de tensão. Nos casos específicos de cargas de impedância constante (por exemplo, os acionamentos com inversores de frequência), o consumo de energia é proporcional à tensão ao quadrado, e esta característica assume elevada importância nas ações de eficiência energética. Na medida em que os barramentos de alimentação das cargas possam ter controladas suas tensões de operação, 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.

IV. SUPRIMENTO DE TENSÃO PELAS DISTRIBUIDORAS:

De acordo com as resoluções ANEEL, especificamente o Prodist- modulo 8, as companhias distribuidoras devem operar os circuitos em regime permanente dentro de limites especificados e que são decorrentes das próprias condições operacionais. Assim, um circuito com tensão de alimentação de 13,8kV ou 34,5kV (típicos nos centros urbanos) pode operar em regime permanente nos limites definidas pelo atendimento de forma qualitativa como “adequado”, “precário” ou “crítico”, reproduzidos na tabela I:

TABELA I. CLASSIFICAÇÃO DE TENSÕES EM REGIME PERMANENTE-1 A 69 KV	
Tensão de Alimentação (TA)	Faixa de Variação de Tensão de Leitura (TL) em relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,90TR \leq TL < 0,93TR$
Crítica	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,05TR$

Fonte: ANEEL – Prodist modulo 8 – rev8 [1]

Portanto, em condições tidas como adequadas, a tensão pode variar entre -7% até +5% da tensão de referência. Para que consiga fornecer a tensão dentro dos limites, a distribuidora utiliza as ferramentas conhecidas como controle de tensão por TAP's nos transformadores de distribuição, reguladores de tensão e bancos de capacitores (em geral bancos fixos)

instalados ao longo dos circuitos que tratam de adequar aos níveis exigidos em função da operação e do comportamento das cargas dos consumidores. Novas estratégias de controle (hardware e software) vêm sendo estudadas e implantadas de acordo com os conceitos de redes inteligentes (“smart grid”) [6]. A figura 1 ilustra o comportamento da tensão que foi medida em circuito de distribuição em 34,5 kV, com integração de 1 ciclo em instrumento classe A (IEC).

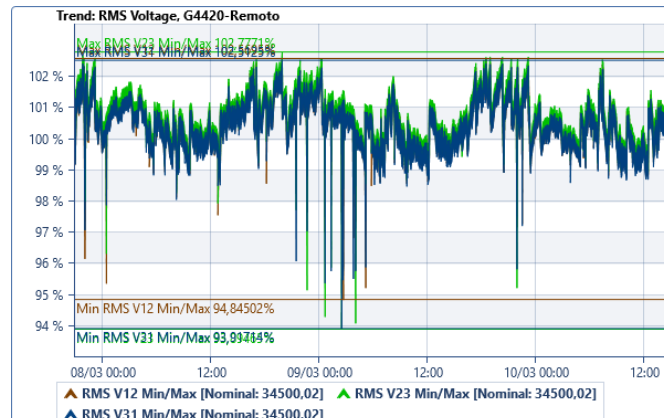


Fig.2 - Comportamento da tensão de circuito de distribuição em 34,5 kV. Fonte: Ação Engenharia e Instalações Ltda

Da análise da medição de tensão deste circuito durante três dias, expressa na figura 2, observa-se que a tensão de operação variou desde 0,94 pu até 1,03 pu sem consequências para a carga e os aparentes afundamentos de tensão (na verdade nem chegaram a 0,9 pu e a rigor não são classificados como VTCD), foram possivelmente causados por variações de carga no circuito de distribuição por outros consumidores diferentes do ponto da medição, uma vez que o comportamento da potencia ativa e reativa da carga no ponto da medição não justificaria tais afundamentos. Na maior parte do tempo a tensão se manteve em níveis entre 0,99 pu e 1,02 pu. A estratégia da distribuidora em manter a tensão em regimes operacionais conforme os limites possíveis e adequados à tabela 1 não é exatamente aquela esperada pelo consumidor que deseja minimizar o consumo de energia.

V. ESTRATÉGIA DE CONTROLE PELO LADO DO CONSUMIDOR:

De forma a minimizar o consumo de energia, outros objetivos devem ser considerados pelo lado do consumidor, normalmente relacionados á busca pelo regime ideal de tensão relacionado à própria operação da planta com a preservação das cargas em operação normal, além dos cuidados com os aspectos de dimensionamento e proteção de forma adequada. O ponto a ser ora tratado é o ajuste do melhor ponto de operação com foco em eficiência energética e que considera a relação entre as fontes, ás cargas e os filtros. Por fim a característica a ser desenvolvida, considera a 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, apesar da forma como a concessionária fornece a tensão, já que as plantas são dotadas de subestações e passíveis de instalação de filtros. 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
- 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 controle de harmônicas e outras facilidades.
- Simulações de operação.
- Implantação do projeto
- Verificação dos resultados e medição e verificação

A) *Análise do perfil de tensões*

Nesta etapa serão avaliados os limites das tensões registradas, verificando se há impacto na carga na ocorrência das tensões de níveis inferiores. Normalmente a operação com tensões menores que as nominais são bem aceitas pela maioria dos equipamentos e desta análise dependerá a estratégia de controle a ser implementada.

B) *Definição do melhor ajuste dos TAP's e solução com equipamento auxiliar.*

Decorrente dos resultados anteriores será definido o novo TAP a ser ajustado em conjunto com a definição da solução auxiliar que poderá ser um compensador estático de energia reativa com solução antirressonante ou sintonizada ou ainda operando em conjunto com filtro ativo de harmônicas.

C) *Simulação da operação com novos ajustes e solução auxiliar*

É importante que se efetue a simulação dinâmica considerando a medição efetuada (ciclo a ciclo) e características das instalações com o conhecimento de todas as impedâncias para que se estabeleça o modelo. Conhecida a característica da carga pelas medições, define-se então a nova situação de operação com ajuste de TAP e qual seria a influência, importância e comportamento da solução auxiliar. É então possível se estimar qual será o comportamento da potência ativa e reativa e por consequência a energia ativa/reativa consumida nesta nova situação a ser proposta. A diferença de consumo de energia real consumida e a simulado nos indica a eficiência energética obtida com o projeto.

D) *Detalhamento em um projeto: Redução do consumo de energia com o controle da tensão.*

A tensão de alimentação nos barramentos deve ser controlada com o objetivo de redução do consumo de energia mesmo com cargas extremamente variáveis. Normalmente as

instalações são mantidas em regime de operação em tensões superiores às nominais de forma a garantir a operação dos equipamentos em casos de afundamentos de tensão por razões externas ou mesmo interna; tanto as fontes como as cargas possuem seus limites de operação e o compromisso em princípio seria manter uma faixa operacional adequada mais estreita que a da distribuidora com o propósito de menor consumo de energia. Curiosamente nem sempre uma modificação na planta que estaria associada a uma determinada melhoria ou ação de eficiência energética atinge o objetivo esperado, é o caso de um sistema de compensação de energia reativa e por melhor que este seja (não estamos abordando aqui ressonâncias ou outras falhas típicas inseridas), irá promover uma operação com tensão maior que aquela que traria operação mais eficiente para a instalação. Neste caso, apesar da redução das correntes e perdas associadas, a elevação da tensão de operação poderá aumentar o consumo de energia. Com base na observação do comportamento dinâmico das fontes e cargas, o modelo de simulação considera a estimativa de um novo comportamento com TAP modificado e energia reativa compensada, na busca do melhor ajuste para a tensão de operação do sistema e limitação de sobtensões causadas por razões internas. A partir das informações dos dados construtivos dos sistemas elétricos (impedâncias, distâncias e constituição de circuitos, fontes e cargas) e das medições elétricas efetuadas com resolução adequada e em períodos significativos, é possível se efetuar as simulações de comportamento que definirão o potencial de economia com a otimização da tensão de operação com as medidas citadas com ajustes de TAPs e outras medidas como a instalação de filtros ou compensadores.

E. *Resultado da simulação:*

Os gráficos das figuras 3a e 3b apresentam o comportamento da potência ativa consumida em uma instalação comercial em função da tensão de alimentação. As indicações em preto nos gráficos se referem aos valores medidos e em magenta os valores simulados. Com a implantação de compensação reativa tempo real com manobra estática (tempo de resposta de 16 milissegundos) e redução da tensão de operação com manobra de TAPs; pode-se obter redução da potência ativa de 3,95% (redução da tensão em 2,5%) ou 8,35% (com a redução da tensão em 5%), conforme apresentado na tabela II; constituindo-se como uma boa oportunidade de eficiência energética. Alguns compromissos devem ser atingidos na simulação, observando se durante a medição se teria ocorrido perda de carga devido à alguma subtensão e garantir que o comportamento da tensão será adequado com o novo ajuste. Devido, portanto à compensação reativa adequada e variação dos TAP dos transformadores pode-se obter neste caso, economia de energia em função do novo comportamento das fontes e cargas.

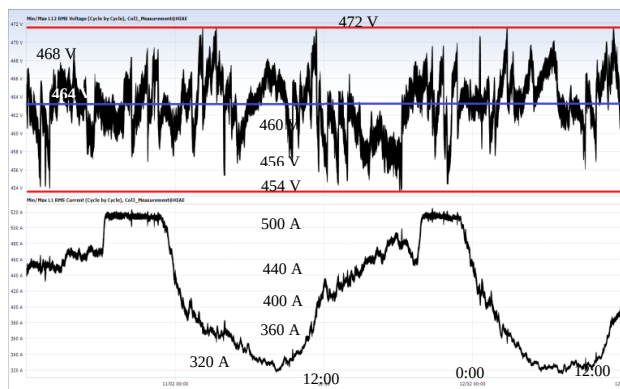


Figura 3a – Comportamento de tensão e corrente em secundário de transformador

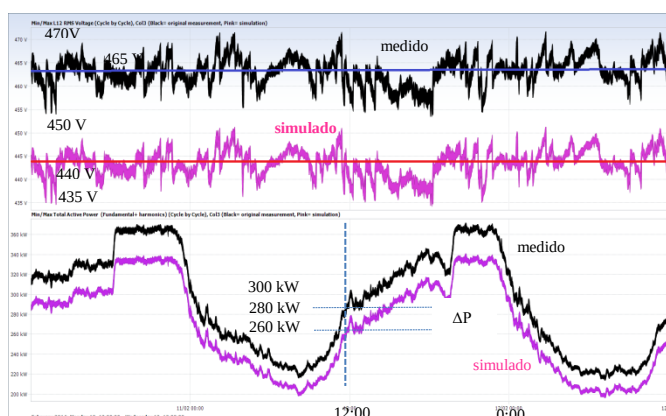


Figura 3b – Comportamento de tensão e potência em secundário de transformador com redução de TAP e inserção de compensador estático;

Tabela II – Resumo da redução da potencia consumida

Descrição	Potencia (kW)	Diferença
Potência Consumida Original	292	
Potência consumida com compensador estático de 250 kvar e sem mudança de TAP	295	+0,96%
Idem, porém com mudança de TAP em (-2.5%)	281	-3,95%
Idem porém com mudança de TAP em (-5%)	267	-8,35%

VI. A COMPENSAÇÃO ESTÁTICA DE ENERGIA REATIVA EM TEMPO REAL

A compensação estática de energia reativa tem sido usada há décadas 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 potencia. Devido ao tempo de resposta e isenção de transientes de manobra é uma

ferramenta que tem possibilitado o aumento de produtividade evitando o afundamento das tensões dos barramentos causados pelo consumo da potencia reativa de cargas com regime de operação bastante variável [17]. A figura 4 ilustra os principais componentes do equipamento de compensação reativa tempo real (chaves estáticas, controlador, e grupos LC). A figura 5 ilustra a operação de um compensador estático; com o comportamento da potencia reativa da carga e a potencia reativa injetada, observando-se o comportamento na regulação de tensão, a redução da distorção de tensão e redução da corrente da fonte (transformador).

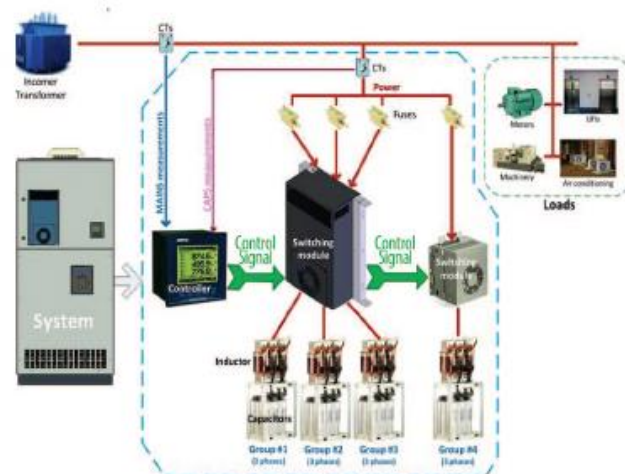


Figura 4 – Esquema da solução de compensação estática de energia reativa (tempo real). – Fonte: Elspec

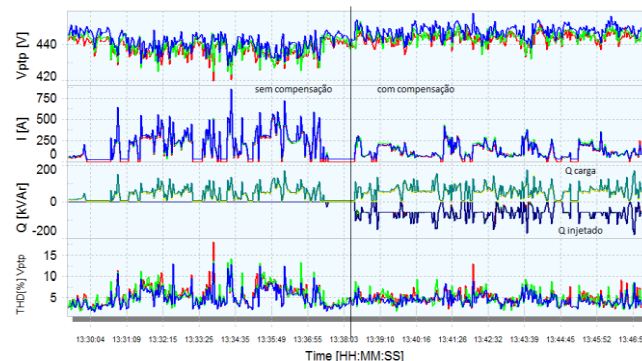


Figura 5 – comportamento das variáveis elétricas com a inserção da compensação reativa tempo real

VII. O CVR (“CONSERVATION VOLTAGE REDUCTION”)

Diversos autores [2] [6] [7] têm indicado e executado projetos, geralmente pelo lado das distribuidoras aplicando o controle da tensão de operação como ferramenta para redução do consumo de energia e picos de demanda utilizando-se de estratégias com as ferramentas típicas como reguladores de tensão e manobra de bancos de capacitores com o controle da potencia reativa. A técnica denominada de CVR (“conservation voltage reduction”) e que pode ser expressa matematicamente como a relação entre a variação da potência ativa (ou energia ativa) com a tensão ou da mesma forma a potencia reativa (ou energia reativa) com a variação da tensão.

São então definidos dois CVR's (a variação da energia ativa e a variação da energia reativa variam diferentemente com a variação da tensão). A técnica é inspirada em outra semelhante quando se controla a tensão com o controle da potência reativa e é tratada como VVC (volt/var control).

A definição do CVR é equacionada como:

$$\text{CVR} = \Delta\% E / \Delta\% U \quad (3)$$

Onde:

- CVR é o coeficiente de variação da energia com a variação da tensão, ou como definido “conservative voltage reduction”
- $\Delta\%E$ é a variação da energia (ativa ou reativa), também tratada por “quantidades” na literatura referenciada.
- $\Delta\%U$ é a variação da tensão.

Apesar deste texto só tratar o CVR relativo à potência ativa, convém que se adote para melhor entendimento a terminologia CVR_P relacionado à redução do consumo de energia ativa e CVR_Q relacionado à redução do consumo de energia reativa.

Dentre os documentos relativos a esta aplicação, destacam-se alguns mais recentes que incluem o CVR como parte integrante de um modelo sustentável de “*smart grid*” integrado a outros controles. De fato, a automação adequada dos sistemas de distribuição permitirá melhor ajuste em função do comportamento dinâmico das fontes das cargas e dos filtros. Os estudos apresentam diferentes valores para o CVR e observa-se uma convergência para $\text{CVR}=1$ [6]; em outras palavras a cada variação de tensão de 1%, seria obtido uma redução no consumo de energia de também 1% e assim sucessivamente (como se as cargas resultantes tivessem o comportamento equivalente de corrente constante). Do ponto de vista da planta industrial o uso de estratégia de redução de 2,5% a 5% da tensão de operação com manobra nos TAP's se assemelha aquela aplicada pelas distribuidoras para redução da energia consumida. O resultado dependerá do “mix de cargas” e da dependência da variação de tensão conforme o modelo preponderante (quanto mais próximo do modelo de impedância constante for a carga resultante, melhor será o resultado). Em aplicação de redução de TAP em 5% seria então obtido uma expressiva redução de 5% do consumo de energia em um modelo geral, valor mais conservador que o projeto apresentado na tabela II.

VIII. INVESTIMENTOS:

Os investimentos estão associados às atividades preliminares de levantamentos, medições e estudos da operação e comportamento da carga, com estudos das estratégias de ajuste de TAP's e instalação de filtros e compensadores em função da configuração da planta, fontes e cargas. Em se viabilizando o projeto, a segunda etapa considera a implantação das soluções estimadas e pelas técnicas de medição e verificação [18] acompanhar a operação, medindo e aferindo os resultados.

IX. CONCLUSÕES:

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. Os investimentos necessários para incremento da qualidade da energia nas plantas podem ser inicialmente justificados pela eficiência energética e consequente redução dos custos de energia tornando as plantas mais eficientes pelo aumento da qualidade e sustentáveis pela redução do consumo de energia. Por outro lado, a monitoração da qualidade da energia (e da própria energia consumida) nas plantas permite aumento do aprendizado e produção de ferramentas e métricas que promovam busca de ganho contínuo. Linhas de financiamento e crédito compatíveis devem ser desenvolvidas na abordagem deste tema em função dos aspectos relacionados.

X. REFERÊNCIAS:

- [1] ANEEL – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST- Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica
- [2] U.S. Department of Energy – Electricity Delivery and Energy Reliable **Application of automated controls for voltage and reactive power managements – initial results – dec 2012**
- [3] ONS – Operador Nacional do Sistema – www.ons.gov.br
- [4] IEEE1159-Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality
- [5] IEEE 519-1992 Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems
- [6] 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
- [7] J. G. DeTeese; B. W. Kennedy; S. B. Merrick – Conservation Voltage reduction: Estimating Methodology for a large regional application – American Power Conference- April 13-15, 1992- Chicago
- [8] Starosta, Jose – Eficiência Energética com o controle da Tensão – Revista o setor elétrico – Outubro de 2016
- [9] Neves, Marcelo Silva – dissertação de mestrado UFJF
- [10] Ação Engenharia e Instalações Ltda.- relatórios técnicos de medições de parâmetros elétricos
- [11] Elspec Ltd– Fast Response, transient free, Reactive Power Compensation systems
- [12] Elspec Ltd – Energy Efficiency report for Client
- [13] Elspec Ltd – Energy Efficiency method for energy saving calculation
- [14] Starosta, Jose –Qualidade de Energia nos processos industriais e produtividade- Revista Setor Elétrico Outubro de 2006.
- [15] Nizemblat, Pol – ELSPEC; General Overview of Harmonics in Power Networks with PFC Capacitors
- [16] Starosta, Jose – Uso Racional de Energia Elétrica em Instalações Comerciais – dissertação de mestrado – Escola Politécnica USP- 1997
- [17] Starosta, Jose –Mas afinal para que servem os capacitores em instalações elétricas de BT- Revista Setor Elétrico Fevereiro, Maio e Junho /2006.
- [18] Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance - EVO

XI. SOBRE O AUTOR:

Nascido em 30/09/59 em São Paulo-Engenheiro Eletricista pela Escola de Engenharia Mauá em 1982 e Mestre em Engenharia pela Escola Politécnica da USP em 1998. Diretor dede Engenharia da Ação Engenharia e Instalações desde 1993 e docente de programas de pós-graduação. Atual presidente do conselho fiscal e ex-presidente da ABESCO no período 2010-2013; membro do IEEE. Colunista e consultor da revista “O Setor elétrico”. Coordenador técnico do CINASE. Membro do DEINFRA da FIESP. Áreas de Interesse: Qualidade de Energia, Eficiência Energética e instalações elétricas industriais com diversos trabalhos publicados na área.