

QUALIDADE DE POTÊNCIA - ASPECTOS METODOLÓGICOS E DE CUSTOS

Dalton O.C Brasil Nelson Kagan Carlos M. V. Tahan Marcos R. Gouvêa

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas
Av. Prof. Luciano Gualberto, Trav. 3, n. 158, CEP 05508-900 - São Paulo (SP)
e-mail: nelsonk@pea.usp.br

Resumo - O objetivo deste artigo é apresentar alguns aspectos metodológicos para abordagem da qualidade de potência, incluindo aspectos de avaliação de custos de soluções alternativas para mitigar os principais problemas de qualidade. Dentro deste contexto, apresenta-se uma visão geral dos fenômenos associados à qualidade de potência. Assim procede-se à identificação e caracterização das principais atividades que envolvem a área de qualidade de potência, isto é, conceituação, avaliação, mitigação e regulamentação. Apresenta-se também um modelo para abordagem da “Qualidade e Investimentos em Ambientes Competitivos”, que possibilitará estudos interessantes, como a avaliação de custos marginais e níveis de tarifa em função dos níveis de qualidade de suprimento.

Palavras-chave - Qualidade de Potência. Planejamento de Investimentos. Custos Marginais.

Abstract - This paper aims at presenting some methodological aspects to approach power quality, including aspects for evaluation of the costs of alternative solutions to mitigate the main problems related to quality. In such context, a general overview of the main phenomena associated to power quality is outlined. Following that, an identification and a characterization of the main activities involving power quality are considered, i.e., concept, evaluation, mitigation and regulation of power quality aspects. A model for the analysis of Quality and Investments in Competitive Environments is also proposed. Such model will allow for interesting studies, such as the evaluation of marginal costs and tariffs as a function of the quality of service.

Keywords - Power Quality. Investment Planning. Marginal Costs.

1. INTRODUÇÃO

A área de qualidade de potência tem atraído cada vez mais a atenção do setor elétrico e eletrônico mundial nos últimos tempos. A razão principal disto é a preocupação com a proliferação de cargas utilizando eletrônica de potência que, ao mesmo tempo em que são mais sensíveis a variações na qualidade de potência, introduzem, por sua vez, também mais perturbação na rede, principalmente em termos de distorção harmônica. Por outro lado esta preocupação oferece várias oportunidades de colaboração para soluções integradas dos problemas, envolvendo concessionárias, consumidores, fabricantes, órgãos reguladores, instituições de ensino e pesquisa, etc.

Particularmente no Brasil, falar em qualidade de potência é difícil e oportuno. Difícil por que ainda temos problemas primários a enfrentar, tais como: alimentação a áreas remotas, regulação de tensão, nível de interrupção por falhas, etc. e, portanto, devemos tomar o cuidado de abordar o problema de maneira adequada. Oportuno por causa da alteração que se processa nas instituições do setor elétrico brasileiro em termos de competitividade e privatização, sem que se disponha, até o momento, de padrões abrangentes de qualidade já estabelecidos.

Com o advento da globalização da economia, a busca da competitividade esgotou o modelo baseado no estado empreendedor, passando a ser o

mercado o novo agente regulador da economia. No surgimento deste novo modelo, que inclui a privatização do setor elétrico, a atuação do estado como agente fiscalizador dos serviços e indutor do crescimento se reveste de particular importância. Naturalmente, neste novo conceito de negócios é importante agregar, no processo de planejamento de investimentos, outros condicionantes além daqueles ora em uso. Assim, o planejamento deve buscar soluções balanceando o trinômio Investimentos x Qualidade x Tarifa. A proposta de um modelo para planejamento de investimentos em sistemas de distribuição considerando a qualidade, busca como objetivo principal, desenvolver metodologias e ferramentas para encontrar a solução deste problema de otimização.

2. VISÃO GERAL DOS FENÔMENOS ASSOCIADOS À QUALIDADE DE POTÊNCIA

Para se ter uma visão geral dos vários fenômenos eletromagnéticos associados à qualidade de potência é conveniente agrupá-los nas categorias de fenômenos transitórios, de característica impulsiva ou oscilatória; fenômenos temporários, de curta (até 1 min) e longa duração (acima de 1 min) e fenômenos relativos à distorção na onda de tensão, de caráter permanente [1]. Também é importante procurar identificar as causas e efeitos

dos problemas associados à qualidade de potência, bem como os principais meios de mitigação,

conforme está apresentado de forma preliminar na Tabela 1.

Tabela 1 - Fenômenos Associados à Qualidade de Potência
Principais Causas, Preocupações e Condicionamento

Categoria	Causas	Consequências	Dispositivos de Condicionamento (1)
Transitórios Impulsivos	Desc. Atmosféricas Manobra Carga	Distúrbios Dispositivos Eletrônicos	Pára-Raios Filtros Trafo Isolamento
Transitórios Oscilatórios	Desc. Atmosféricas Manobra Linha, Cabo, Capacitor, Trafo, Carga	Distúrbios Dispositivos Eletrônicos	Pára-Raios Filtros Trafo Isolamento
Variações Curta Duração	Faltas Remotas Manobra Carga	Distúrbios Processos Industriais	Trafo Tensão Constante (2)
Variações Longa Duração	Partida Motor Variação Carga Manobra Capacitor Sobrecargas	Distúrbios Processos Industriais	Regulador Tensão Trafo Tensão Constante
Interrupções	Faltas Manobra Disjuntor	Distúrbios Processos Industriais	Sistemas UPS (3) Geradores Reserva
Desequilíbrio de Tensão	Cargas Desequilibradas		
Componentes CC	Distúrbios Geomagnéticos	Saturação Trafos Solic. Extra Isolamento	
Harmônicas	Cargas Não Lineares	Sobreaquecimento Capacitor Distúrbios Contadores	Filtros Trafo Isolamento
Interharmônicas	Conv. Estáticos Freq. Dispositivos a Arco	Flicker em Vídeos Problema Sinais PLC	
Notching	PE's c/ Comutação de Corrente entre Fases		
Ruído	Manobra PE's (4) Arcos Radiação E/M	Distúrbio em PC's e Controladores Programáveis	Aterramento Bobina Bloqueio, Filtro Blindagem
Flutuação de Tensão	Cargas Intermitentes Cargas a Arco Partida Motor	Flicker (Cintilação)	Comp. Estáticos Capacitor Série
Variação da Frequência	Variação de Carga e Geração	Afeta Operação Máquinas Girantes / Contadores	

Notas:
 (1): Dispositivos de Condicionamento de Potência são dispositivos com o objetivo de isolar a barra de carga de vicissitudes da barra de suprimento de potência
 (2): Transformadores de Tensão Constantes (*Constant Voltage Transformer - CVT*)
 (3): Sistemas de Suprimento Ininterrupto de Potência
 (4): Manobra de Equipamentos com Eletrônica de Potência

3. CARACTERIZAÇÃO DAS ATIVIDADES

O diagrama da Figura 1 apresenta uma divisão da área da qualidade de potência em sub-áreas principais:

Conceituação

Estão incluídas as seguintes atividades:

- Estabelecimento dos principais conceitos, definições e terminologia;
- Formação de uma base bibliográfica sobre o tema;
- Identificação das principais causas dos fenômenos associados à qualidade de potência;

- Identificação dos principais efeitos, isto é, levantamento e pesquisa relativa à "sensibilidade dos equipamentos e dispositivos" dos consumidores.

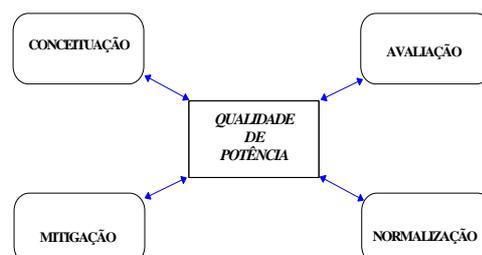


Figura 1 - Atividades relativas à qualidade de potência

Avaliação

Esta sub-área contempla atividades de desenvolvimento, pesquisa e engenharia com o fim de avaliar a qualidade de potência, compreendendo:

- Estabelecimento de uma base de dados:
 - . Dados do sistema da concessionária;
 - . Dados da rede do consumidor;
 - . Dados dos equipamentos.
- Monitoramento da qualidade de potência em uma determinada rede/consumidor:
 - . Instrumentação;
 - . Protocolos e campanhas de medição;
 - . Análise da forma de onda;
 - . Tratamento estatístico.
- Análise de casos:
 - . Métodos de Análise (domínio do tempo ou frequência) [02];
 - . Modelagem do sistema;
 - . Ferramentas:
 - * Fluxo de carga;
 - * Curto-circuito;
 - * Impedância Harmônica;
 - * Transitórios (EMTP).
 - . Simulações.
- Ensaio em laboratório.

Mitigação

De forma geral há três alternativas básicas para solucionar / mitigar problemas relacionados à qualidade de potência, quais sejam:

- Condicionamento de potência: ao nível da carga ou do equipamento ou na entrada do consumidor;
- Alterações no sistema da concessionária, na rede do consumidor ou em procedimentos de operação;
- Modificações no projeto das cargas sensíveis, de forma a torná-las menos sensíveis à variações na qualidade de potência.

Para a decisão da alternativa mais atrativa deverão ser ponderados:

- Aspectos técnicos, econômicos e políticos;
- Questões relativas à divisão de custos e responsabilidades entre consumidor, concessionária e fabricante.

Normalização [03]

As seguintes atividades referem-se a atividade de normalização:

- Levantamento e análise de normas e regulamentações internacionais (americanas e européias) e nacionais;
- Propostas de projetos de normas.

4. MODELO DE PLANEJAMENTO ENFOCANDO A QUALIDADE *versus* INVESTIMENTOS

Neste item descreve-se metodologia referente à “*Qualidade e Investimentos na Distribuição de Energia Elétrica em Ambientes Competitivos*” que tem como objetivo principal estabelecer metodologias e ferramental para abordar a questão da qualidade de potência no âmbito do planejamento da distribuição. Neste modelo a área de distribuição compreende tanto a rede de subtransmissão, como a de distribuição primária, incluindo, portanto, os sistemas onde se concentram a grande maioria dos equipamentos sensíveis, poluidores e condicionadores no que se refere à qualidade.

Planejamento de Investimentos em Sistemas de Distribuição Considerando a Qualidade

Este modelo compreende uma expansão da metodologia empregada no ferramental SISPAI - Sistema para Planejamento Agregado de Investimentos nas Redes de Distribuição com ênfase na parte de qualidade de fornecimento [04], com inclusão e tratamento de outros indicadores que refletem o nível de qualidade de potência. Através deste modelo, denominado SISPAQ, pode-se obter os seguintes produtos principais:

- Estabelecimento e priorização de volumes de investimentos, correspondentes a obras de reforços na rede ou a instalação de equipamentos específicos para mitigar problemas de qualidade (condicionadores de potência), necessários para garantir um nível de qualidade especificado;
- Levantamento de custos associados à qualidade de potência, bem como a avaliação das medidas que proporcionam melhor taxa de rentabilidade, além da avaliação do impacto de corte de investimentos na qualidade da distribuição de energia;
- Levantamento e análise dos níveis típicos de qualidade das redes de distribuição brasileiras e subsídios para os órgãos de regulamentação e normalização quanto ao estabelecimento de valores limites.

O diagrama da Figura 2 apresenta as principais etapas deste modelo. A seguir apresenta-se uma descrição sumária de cada uma destas etapas:

Levantamento e Análise de Indicadores de Qualidade - No que se refere aos indicadores da qualidade do suprimento, deve-se, em princípio, considerar particularmente aqueles provenientes de fenômenos que possam ser caracterizados através de grandezas em regime permanente, ou seja:

- Interrupções:
 - . Momentâneas e sustentadas (energia não distribuída, END);
 - . Duração da energia cortada (DEC);
 - . Frequência de interrupção (FEC).
- Regulação de Tensão (ΔV máximo).
- Afundamentos (sag) e elevações (swell) de tensão.
- Desequilíbrio de tensão.
- Distorção da onda (harmônicas).
- Flutuação de tensão

As atividades relacionadas no item 3 fazem parte desta etapa.

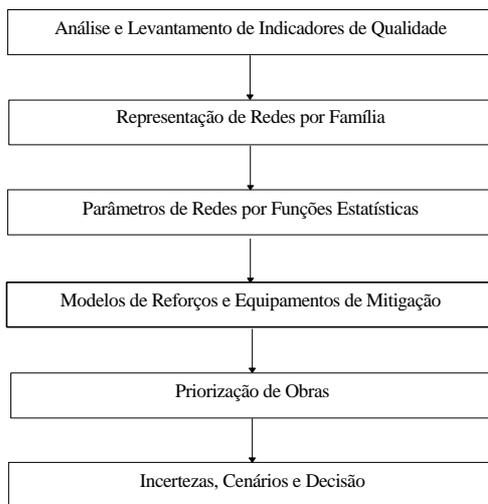


Figura 2 - Diagrama esquemático das etapas do modelo

- **Representação de Redes por Famílias** - Nesta etapa são analisadas estatisticamente as subestações e alimentadores componentes de uma rede de distribuição real, com o objetivo de agrupá-las em subconjuntos que apresentem similaridade em determinados atributos técnicos e operacionais pré-estabelecidos, definindo, assim, famílias de alimentadores e subestações. A partir destas famílias, pode-se formar redes típicas de distribuição para serem consideradas nas etapas subsequentes.

Os principais atributos que definem uma rede de distribuição típica estão relacionados a seguir:

- Número e potência de transformadores da SE;
- Número e bitola dos alimentadores;
- Potência de curto-circuito da SE;
- Área de ação dos alimentadores;
- Taxa de crescimento das cargas;
- Composição de cargas, incluindo:
 - . Cargas não-lineares (fonte de harmônicas);
 - . Cargas intermitentes (arco elétrico);
 - . Grau de desequilíbrio entre fases;
 - . etc.

- **Parâmetros de Redes por Funções Estatísticas** - Nesta etapa são ajustadas funções “potência” que correlacionam os parâmetros operacionais e os

índices de qualidade das redes com suas características técnicas, topológicas e de carga.

Em termos de parâmetros operacionais e índices de qualidade tem-se: regulação e queda máxima de tensão, corrente admissível, perdas máximas, energia não distribuída (END), DEC, FEC, afundamentos e elevações temporárias de tensão, distorções harmônicas individuais e totais, níveis de desequilíbrio e de flutuação de tensão, etc.

Por outro lado, as características técnicas, topológicas e de carga que são consideradas como variáveis independentes compreendem basicamente os atributos definidos para as famílias, complementadas por outras, tais como: confiabilidade (critérios de alocação de chaves de política de socorro, tempo de interrupção), fator de potência, etc.

O estabelecimento destas funções “potência” é realizado através de ajustes, pelo método dos mínimos quadrados, em um espaço de dimensão n , onde são geradas, de um lado, redes arborescentes aleatórias com características técnicas, topológicas e de carga definidas (variáveis independentes) e de outro lado, são calculadas, por metodologia e leis adequadas, os parâmetros operacionais e os índices de qualidade (variáveis dependentes). Da correlação entre as variáveis independentes e dependentes resultam as funções desejadas.

- **Modelos de Implementação de Reforços e de Equipamentos de Mitigação** - A implantação de reforços e/ou equipamentos mitigadores na rede é norteada pela necessidade de seguir os critérios estabelecidos (índices mínimos ou desejados de qualidade), através de meios que sejam atrativos do ponto de vista de custos e benefícios, respeitando um nível pré-estabelecido de orçamento anual.

Cada rede típica é analisada ano a ano, de modo a identificar eventuais transgressões em critérios e a avaliar os custos e os benefícios de todas as possíveis implementações, sejam para o atendimento de critérios ou para a melhoria. Os custos associados a cada obra referem-se aos custos de operação, manutenção e investimento anualizados. Os benefícios podem ser, para algumas obras, quantificados monetariamente (por exemplo, o benefício de uma obra que reduz a energia não distribuída pode ser avaliado pelo produto do custo social médio de interrupção em US\$/MWh pela variação correspondente na END). Para outras obras, os benefícios podem ser expressos de maneira qualitativa, por exemplo, determinada obra que leva a uma variação da distorção harmônica total de faixa inaceitável para uma faixa razoavelmente satisfatória. Desta forma, pode-se associar, a cada obra, um índice de mérito, que poderia ser, por exemplo, uma grandeza “fuzzy”, que agrega todos os benefícios, o que permite a tomada de decisão e a seleção/priorização de obras por índices de mérito qualitativos e/ou quantitativos.

São propostas obras de natureza diversas, tais como, reforços em subestação, implantação de subestação nova, novos alimentadores, reforços existentes, equipamentos condicionadores de

potência (filtros, UPSs, etc.). Com isto é elaborada uma tabulação de todas as obras possíveis e correspondentes parâmetros técnicos e econômicos associados, proporcionando a avaliação do atendimento dos critérios e dos valores de custos e benefícios, com correspondentes índices de mérito.

- **Priorização de Obras** - A tabulação de todas as implementações possíveis, para cada ano e família, oferece um quadro que considera todos os elementos para a priorização, pois contém todos os indicadores técnicos de atendimento e os índices de mérito para o processo de seleção das *melhores* obras.

A diretriz básica de priorização consiste em selecionar implementações que ofereçam os maiores índices de mérito e que atendam os critérios estabelecidos, respeitando o nível de orçamento disponível. Além disto, é possível comparar a atratividade de diferentes alternativas básicas de mitigação, isto é, reforço na rede ou condicionadores de potência. O critério de priorização a ser adotado, embora não represente uma otimização absoluta, busca uma relação ordenada de implementações na direção de uma trajetória ótima.

- **Incertezas, Cenários e Decisão** - Nesta etapa, as influências de aspectos econômicos, financeiros, tecnológicos e sócio-econômicos são representadas simplificadamente através de parâmetros do modelo. Tais influências são representadas da seguinte forma:

- Econômico: através de restrição no orçamento;
- Financeiro: taxa de atualização do capital;
- Tecnológico: custo de instalações;
- Sócio-econômico: taxas de crescimento do mercado, custos de perdas, energia não suprida, etc.

Combinações destes parâmetros definem cenários em que as alternativas se desenvolvem. A cada um destes cenários estará associado um plano de investimento e correspondentes níveis de qualidade. Procura-se então determinar nesta etapa um orçamento que garanta um determinado nível de qualidade, com um risco pré-estabelecido.

Cálculo de Custos Marginais e Estrutura Tarifária

A aplicação do modelo de planejamento descrito no item anterior fornece os resultados da priorização de obras, através da qual pode-se proceder aos cálculos dos custos marginais de expansão da rede de distribuição para atender diferentes critérios de qualidade de suprimento.

A partir disto é analisada e proposta uma base tarifária, incluindo os seguintes pontos:

- Níveis de tarifa em função dos níveis de qualidade de suprimento;

- Estabelecimento de diretrizes para definir níveis máximos de perturbação da qualidade de suprimento que um consumidor individual pode introduzir na rede, bem como penalidades caso estes níveis sejam ultrapassados.

5. CONCLUSÕES

O fato das cargas elétricas e eletrônicas presentes nas redes apresentarem características distintas das do passado, em termos de sensibilidade, aliado ao novo ambiente de competitividade e privatização da economia exigem o desenvolvimento de novos modelos de planejamento dos sistemas elétricos, nos quais a qualidade de potência é um fator de grande importância que, porém, deve ser considerada de forma economicamente viável. O modelo proposto no presente artigo foi concebido com o objetivo de fornecer uma metodologia nesta direção. A aplicação deste modelo está prevista para ser desenvolvida a seguir, como parte de um trabalho de doutorado. Espera-se, com isto, oferecer à comunidade os seguintes principais produtos:

- Ferramental adequado para o planejamento de investimentos em redes de distribuição considerando também a qualidade de potência;
- Propostas referentes à regulamentação de índices de qualidade de potência, bem como de valores limites;
- Proposta de estrutura tarifária considerando aspectos de qualidade.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] IEEE Recommended Practice on Monitoring Electric Power Quality, IEEE Std 1159-1995.
- [02] DOMIJAN, A.; HEYDT, G. T.; MELIOPOULOS, A. P. S. - Directions of Research on Electric Power Quality, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 1, January 1993.
- [03] KOVAL, D. - Power Quality Standards, Workshop on Power Quality, IEE/CED - USP, São Paulo, July 1996.
- [04] GOUVÊA, M. R. Bases Conceituais para o Planejamento Agregado de Investimentos em Sistemas de Distribuição. Tese de Doutorado, EPUSP, 1993.