



**GRUPO X**

**GRUPO DE ESTUDO DE SOBRETENSÕES, COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO E INTERFERÊNCIAS (GSI)**

**DEGRADAÇÃO DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA CAUSADA POR EXCESSIVO CARREGAMENTO NO SISTEMA DE TRANSMISSÃO E PELA PRESENÇA DE CARGAS DINÂMICAS.**

Álvaro J. P. Ramos.\*  
UPE

Luiz Frederico B. Vasconcelos  
CHESF

Manfredo Correia Lima  
CHESF

**RESUMO:**

A regulação de tensão em regime permanente, ou seja, manter as tensões nos pontos de entrega dentro de faixas relativamente estreitas representa uma responsabilidade das empresas de transmissão e distribuição quanto à qualidade da energia elétrica no que diz respeito ao atributo conformidade(2). Assim, vários equipamentos, tais como fontes de potência reativa ou transformadores com LTC, são empregados para assegurar os níveis adequados de qualidade da energia elétrica frente às variações normais de carga ao longo da jornada diária da operação do sistema. O presente trabalho mostra como a regulação de tensão nos terminais de sistemas radiais se torna progressivamente difícil a medida que o nível de potência transmitida se eleva. Mostra-se que carregamentos muito elevados na transmissão tornam as tensões nos sistemas regionais (subtransmissão e distribuição) excessivamente sensíveis a distúrbios, causando uma ampliação das áreas de vulnerabilidade associadas com consumidores sensíveis à variações de tensão. Esta ampliação das áreas de vulnerabilidade resulta em maior incidência de interrupções dos processos fabris, o que indica uma degradação da qualidade da energia elétrica na distribuição e subtransmissão que tem origem na transmissão.

Tais questões revelam a necessidade de que limites de carregamento do sistema de transmissão sejam observados de forma a preservar o padrão de qualidade característico de cada ponto do sistema, definido pela sua potência de curto-circuito.

Tais questões, para as quais não existem ainda recomendações técnicas nem legislação no Brasil, são discutidas a partir de experiências reais.

**PALAVRAS CHAVE:** Qualidade da Energia Elétrica - QEE-Regulação de Tensão - Cargas Dinâmicas

**1.0 INTRODUÇÃO**

Face a elevada sensibilidade dos modernos processos fabris às variações momentâneas de tensão, conhecida na literatura internacional como “voltage sags”, um excessivo número de interrupções nestes processos vem ocorrendo nos últimos anos provocando prejuízos e reclamações crescentes. Um novo e elevado padrão de qualidade da energia elétrica passa então a ser exigido pelos consumidores às empresas de energia elétrica que, em geral, ainda não estão estruturadas para esta nova realidade, o que demanda preparação sob os pontos de vistas técnico, empresarial e comercial. Mesmo as entidades reguladoras do setor, o antigo DNAEE e seu sucessor ANEEL, ainda não puderam acompanhar a rapidez das transformações tecnológicas acima mencionadas. A legislação atual trata apenas de variações de tensão de regime permanente, não cobrindo este importante aspecto da qualidade da energia elétrica (qualidade do produto) responsável, em muitas situações, por expressivos impactos econômicos para os consumidores e na degradação da sua relação com a empresas fornecedora de energia elétrica. Discussões em inúmeros foros e vários trabalhos publicados permitem-nos constatar uma tendência a um consenso em reconhecer a complexidade do problema, onde novos conceitos são emanados para melhor caracterizar e entender o atual momento de transição tecnológica no uso da energia elétrica.

\* Av. Domingos Ferreira, 2215 – Sala 605 – Boa Viagem – Recife – PE  
Fone: +55 81 4675734 – FAX: +55 81 4652711 - E-mail: aramos@elogica.com.br

A visão simplista, segundo a qual cabe unicamente à empresa de energia elétrica a responsabilidade pela qualidade (ou falta desta) da energia elétrica torna-se inadequada, especialmente se considerarmos os cenários onde um diversificado número de agentes farão parte do sistema elétrico, constituindo um autêntico “condomínio” (4), onde produtores independentes, empresas de distribuição, co-geradores, empresas de transmissão e eventuais outros agentes deverão compartilhar o “ônus” e o “bônus” do “negócio” energia elétrica. As regras deste futuro e intrincado negócio com relação a qualidade da energia elétrica, é um dos maiores desafios para a agência de regulação e para o Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, dada as suas particularidades, onde a identificação de responsabilidade pelos problemas de qualidade da energia elétrica pode ser uma questão bastante complexa e controversa principalmente quando envolve custos/prejuízos vultosos.

Nos EUA, as questões de qualidade de energia elétrica ou “Power Quality” são usualmente consideradas um problema tipicamente de distribuição, face a elevada robustez e confiabilidade do sistema de transmissão ao mesmo tempo em que a distribuição nas pequenas e médias cidades é do tipo aérea e portanto mais vulnerável a defeitos. No Brasil, é comum a existência de sistemas radiais fracos, as vezes fortemente carregados o que resulta em maior severidade dos defeitos ocorridos na distribuição, conseqüência de maiores afundamentos de tensão na área afetada do sistema. Dependendo da existência de carga dinâmicas num montante significativo, existe ainda a possibilidade da ocorrência do fenômeno do restabelecimento lento da tensão, o que agrava sobremaneira a severidade dos defeitos. Estes fatores que promovem uma degradação da qualidade da energia elétrica nos níveis de subtransmissão e distribuição tendo como principal causa o carregamento da transmissão é o principal ponto tratado neste trabalho.

### 3.0 – ASPECTOS CONCEITUAIS.

Estudos de “regime permanente”, ou estudos de fluxos de carga são realizados com inúmeros objetivos, entre os quais, podemos citar a análise do controle de tensão, carregamento de equipamentos e linhas de transmissão, despacho de potência reativa, etc. Tais estudos, consideram condições extremas de carga (às vezes também carga média) de forma a se assegurar sempre, com os recursos disponíveis, tensões adequadas, dentro de faixas de valores solicitados pelo cliente ou exigidos pela legislação (2). Embora se costume analisar os sistemas de potência em “regime permanente” este está continuamente sujeito a

pequenas variações de carga, chaveamento de equipamentos e mesmo defeitos em pontos distantes no sistema de distribuição, percebidos na transmissão (nível de 230kV ou superior), ou mesmo na subtransmissão (69kV, por exemplo), como uma variação de potência ativa e reativa. Assim sendo, a capacidade do sistema em proporcionar tensões mais imunes à tais perturbações, intrínsecas ao seu cotidiano operacional, representa um atributo tão importante para a QEE quanto a capacidade de prover tensões, em “regime permanente” rigorosamente dentro de faixas estreitas e previamente acordadas. Tal atributo, que poderíamos designar como **robustez do sistema** está usualmente associado unicamente a potência de curto-circuito do ponto considerado. Embora seja esta uma questão bastante trivial para os especialistas dos problemas de instabilidade e colapso de tensão, a análise de um sistema simples com uma única linha atendendo uma barra de carga é capaz de revelar os efeitos essenciais presentes em situações reais, e relacionados à QEE. Mostraremos que, a robustez, ou seu inverso, a sensibilidade da tensão, pode ser afetada significativamente pelo carregamento do sistema de transmissão, representando pois um importante elemento de avaliação da QEE.

### 4.0 – FORMULAÇÃO MATEMÁTICA PARA UM SISTEMA SIMPLES.

Considere o sistema simples da Figura 1, constituído de uma única linha de transmissão alimentando uma carga na barra 2.

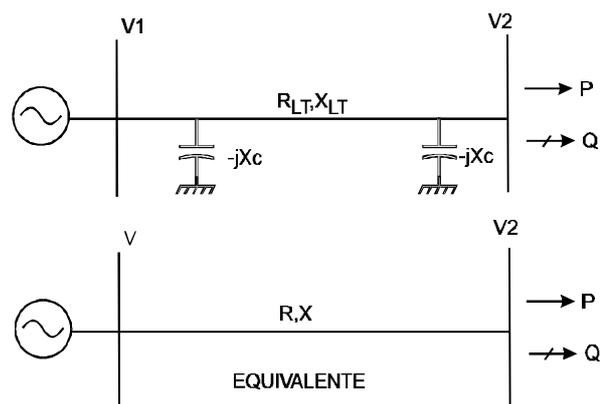


FIGURA 1 – Sistema Simples

A forma mais simples, e muito comum de expressar a variação da tensão na barra de carga é:

$$\Delta V_2 = -X \cdot \Delta Q = -\frac{1}{S_{CC}} \cdot \Delta Q \quad (1)$$

onde todas as grandezas estão em “pu”.  $S_{CC}$  é a potência de curto-circuito da barra 2 e  $X$  representa a reatância série equivalente, eliminando-se as reatâncias capacitivas “shunt” com o uso do teorema de Thevenin.

Se o efeito de variações de potência ativa forem consideradas, então a equação acima fica :

$$\Delta V_2 = -\frac{1}{S_{CC}} \cdot \Delta Q - \frac{R}{X} \frac{1}{S_{CC}} \Delta P \quad (2)$$

onde as grandezas são igualmente em “pu” e  $R$  representa a resistência série equivalente.

Observamos que o efeito das variações de  $P$  e  $Q$  sobre a tensão ocorre na proporção de  $R/X$ . Nesta equação a variação da tensão na barra da carga depende apenas da potência de curto-circuito, sendo válida para um sistema em vazio ou em carga leve. Com o crescimento do carregamento do sistema (2) passa a não expressar adequadamente a tensão na carga, que de forma geral é dada por ;

$$\Delta V_2 = \frac{\partial V_2}{\partial Q} \Delta Q + \frac{\partial V_2}{\partial P} \Delta P \quad (3)$$

onde :

$$\frac{\partial V_2}{\partial Q} = -\frac{Q(R^2 + X^2) + XV_2^2}{[2(RP + XQ) - V^2 + 2V_2^2]V_2} \quad (4)$$

$$\frac{\partial V_2}{\partial P} = -\frac{P(R^2 + X^2) + RV_2^2}{[2(RP + XQ) - V^2 + 2V_2^2]V_2} \quad (5)$$

Fazendo  $P=Q=0$  em (4) e (5), (3) se transforma em (2).

A Figura 2 mostra como os parâmetros acima variam em função do carregamento do sistema, com fator de potência constante, no caso, considerado unitário. Este exemplo se refere a uma linha de transmissão de 230km, projeto convencional em 230kV, 1 cabo por fase cujos parâmetros, na base de 100 MVA são:

$$R_{LT}=4\% ; X_{LT}=22\%, B_{LT}=36\% (X_C=5,56pu).$$

Usando o equivalente temos os valores que dão os resultados das curvas da Figura 2:

$$R=0,043pu, X=0,2287pu, V=1,041pu$$

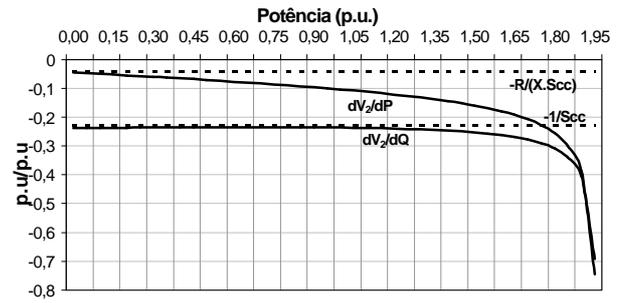


FIGURA 2 - Variação da sensibilidade da tensão com o carregamento da linha.

A observação da Figura 2 permite-nos verificar que a expressão (1) produz resultados razoáveis até uma potência ativa em torno de 1,2pu. Isto significa dizer que a potência de curto-circuito  $S_{CC}$  reproduz bem a robustez ou a sensibilidade da tensão da barra de carga para variações de  $Q$  até valores de  $P=1,2pu$ . A partir deste valor, a sensibilidade da tensão para variações de  $P$  e  $Q$  vão progressivamente se afastando daqueles valores previstos pela equação (2).

É evidente que, quanto maior for a potência de curto-circuito da barra, maior será a robustez (ou menor sensibilidade) o que representa um indicativo de melhor qualidade da energia elétrica fornecida. Poderíamos mesmo considerar  $S_{CC}$  como um dos padrões de QEE do ponto em questão, que poderá se degradar caso o sistema de transmissão opere com excessivo carregamento, para os quais a tensão torna-se extremamente sensível a variações de  $P$  e  $Q$ , como para  $P$  acima de 1,8pu no caso da Figura 2. Aqui a degradação ocorre com um valor ainda modesto de  $P$ , visto que a tensão da barra de carga é permitida afundar, sem recursos de controle tal como injeção de potência reativa.

Nos sistemas reais, entretanto, são usualmente instalados recursos de controle manuais e/ou automáticos que mantêm a tensão na barra de carga constante. Mantida a tensão na barra de carga constante igual a 1,0pu, a sensibilidade de  $V_2$  com relação a  $P$  e  $Q$  é mostrada na Figura 3, onde se verifica que o carregamento começa a ficar crítico, com sinais evidentes de degradação a partir de  $P=2,50$  pu.

Um parâmetro interessante para expressar a controlabilidade ou robustez da tensão seria  $\Delta Q / \Delta P$  (pu/pu), ou seja, o requisito de injeção de MVAR na barra para aumento de  $P$ , visando manter constante a tensão nesta barra. A referência (1) recomenda que este valor não ultrapasse 0,9pu/pu, além do qual seria recomendado reforço no sistema de

transmissão. No sistema simples do exemplo, com uma de potência de curto circuito de 500 MVA, este parâmetro atinge o valor 1,0pu/pu para P=230 MW, e 1,2pu/pu para P=270 Mw. A partir deste valor de P a degradação é progressiva e com taxas crescentes. A Figura 4 mostra como este parâmetro  $\Delta Q / \Delta P$  varia com o carregamento do sistema.

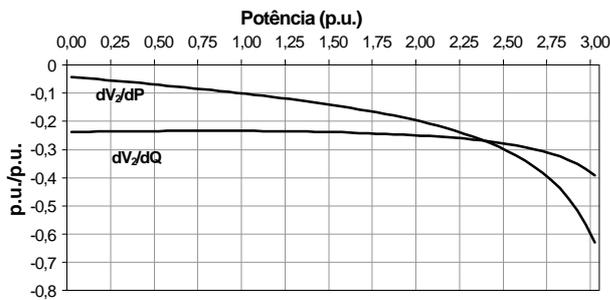


FIGURA 3 – Variação da sensibilidade da tensão com o carregamento da linha, com  $V_2=1,0$  pu.

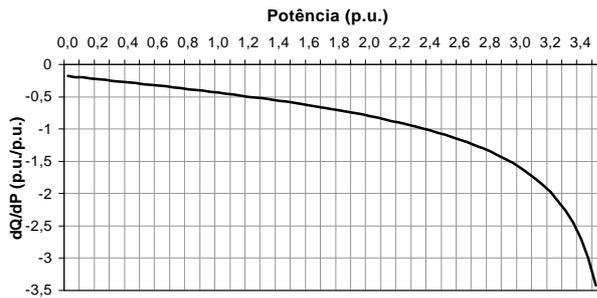


FIGURA 4 - Variação de  $\Delta Q / \Delta P$  com o carregamento do sistema

Como a potência de curto-circuito do sistema completo é muito próxima do sistema simples (500MVA) os parâmetros de sensibilidade obtidos para P=270MW, são muito semelhantes à aqueles indicados pelas curvas das Figuras 3 e 4, quais sejam :

$$\frac{\partial V}{\partial P} = -0,50 \text{ pu / pu}$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta P} = -1,3 \text{ pu / pu}$$

A Figura 5 mostra a evolução de  $\Delta Q / \Delta P$  para variação do carregamento do sistema em outra configuração. A Figura 6 apresenta esta característica

conjuntamente com a evolução da norma do vetor tangente. Como se sabe, a norma do vetor tangente é uma medida do esgotamento do sistema, estando relacionado a distância do ponto de instabilidade de tensão, sendo um dos métodos de análise da estabilidade de tensão (3).

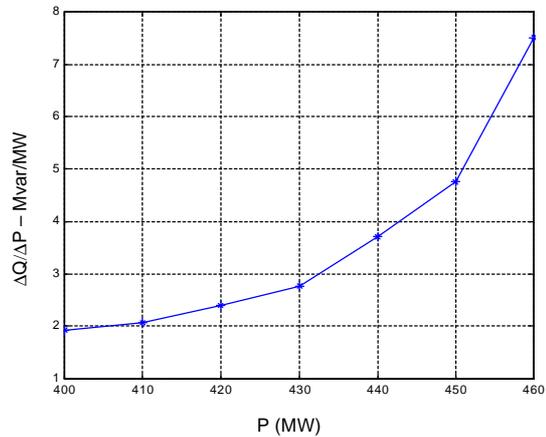


FIGURA 5 - Variação de  $\Delta Q / \Delta P$  com o carregamento do sistema, carga média.

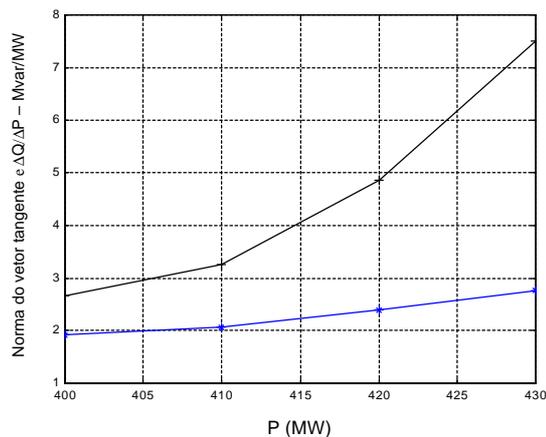


FIGURA 6 - Variação de  e da norma do vetor tangente com o carregamento do sistema.

Como se observa da Figura 6 a norma do vetor tangente apresenta um crescimento acentuado com um carregamento de 420MW, antes do parâmetro . De qualquer forma, estes parâmetros são indicadores expressivos da degradação do sistema de transmissão, o que torna as tensões significativamente sensíveis à variações de carga e manobras. Este é um importante aspecto a ser considerado na avaliação da QEE. Para casos de sistemas degradados a alternativa única é o reforço da transmissão, visto que equipamentos de injeção automática ou não de reativos nos centros de carga, embora possam assegurar tensão

nominal em regime permanente, não são efetivos para reduzir a sensibilidade.

### **5.0 – DEGRADAÇÃO DA QEE COM O CARREGAMENTO DO SISTEMA .CASO EXEMPLO.**

A Figura 5 mostra as áreas de vulnerabilidade associadas a um consumidor sensível de um sistema real de subtransmissão e distribuição, nas condições de carga pesada e leve, para as quais a potência de curto-circuito são praticamente as mesmas. As diferenças, que são atribuídas ao nível de carregamento do sistema, tendem a se tornar maiores a medida em que o sistema de transmissão vai ficando mais carregado até atingir o ponto de colapso de tensão. O aumento da área de vulnerabilidade do consumidor sensível, cujo processo foi considerado susceptível de interrupções quando a tensão de fornecimento fica abaixo de 0,80pu, passa a envolver crescentemente o sistema de distribuição onde a incidência de defeitos é consideravelmente maior do que na subtransmissão. Isto significa maior número de interrupções de processos do consumidor e portanto vista como uma degradação da QEE.

A Figura 7 também mostra a redução da área de vulnerabilidade decorrente do aumento da potência de

curto-circuito através do reforço de transmissão previsto para este sistema.

### **6.0 – RESTABELECIMENTO LENTO DA TENSÃO.**

Outro importante aspecto que contribui para a degradação da QEE em sistemas fracos é o fenômeno restabelecimento lento da tensão, que pode ocorrer quando um montante expressivo de carga de motores está presente, especialmente aqueles que acionam cargas mecânicas de compressores como os de ar condicionado. Sabe-se que a duração do defeito é um fator decisivo na ocorrência deste comportamento, visto que propicia o escorregamento e posterior parada dos inúmeros motores. Mesmo com a remoção do defeito, é necessário algum tempo para a aceleração novamente dos motores ou desligamento por proteções, muitas delas tipo térmica (termostato nos casos de ar condicionado de parede). A forma através da qual o carregamento do sistema contribui para o aparecimento do restabelecimento lento das tensões ainda não é bem conhecido. A CHESF têm registrado várias situações nos subsistemas das áreas metropolitana de Fortaleza e Natal, que apresentam elevados carregamentos da transmissão, tempo elevados de atuação das proteções no nível de 69kV e montante importante de cargas dinâmicas.

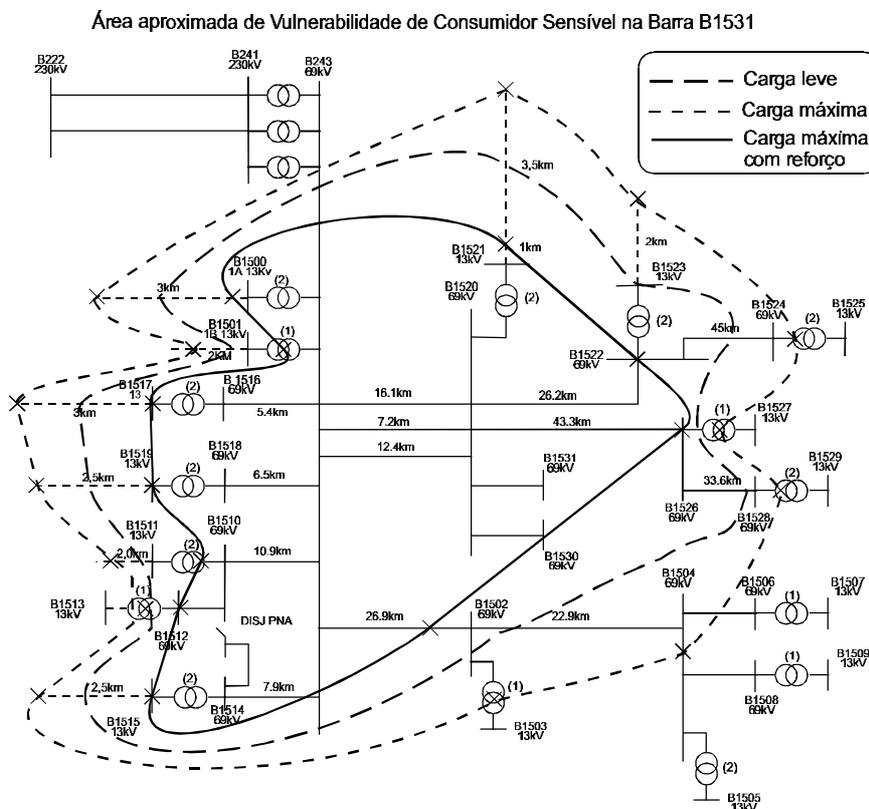


FIGURA 5 – Área de Vulnerabilidade de um sistema real.

A Figura 8 é mostra o comportamento da tensão do 230kV da SE Fortaleza obtido de um registrador de perturbação, durante curto-circuito bifásico à terra em linha de 69kV derivada desta SE. Observa-se a lenta recuperação da tensão após a eliminação da falta, seguido de um intervalo de sobretensões resultante de desligamento espontâneo de cargas como mencionado anteriormente.

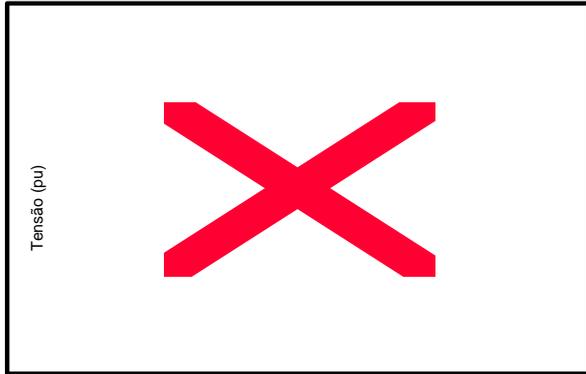


FIGURA 8. Tensão no 230kV da SE Fortaleza por ocasião de curto-circuito bifásico à terra em linha de transmissão de 69kV derivada da SE Fortaleza.

## 7.0 – CONCLUSÕES FINAIS

A operação de sistemas de transmissão com carregamentos muito elevados, especialmente aqueles de características predominantemente radiais, podem resultar em degradação da qualidade da energia elétrica fornecida a consumidores sensíveis. Esta degradação decorre da ampliação das áreas de vulnerabilidade associadas às carga sensíveis resultando em maior incidência de interrupções.

Os carregamentos dos sistemas de transmissão devem ser limitados de forma a preservar o padrão próprio de qualidade do ponto de fornecimento, expresso pelo nível de curto-circuito. Esta questão, de fundamental importância nos sistemas de característica radial, deve constituir uma responsabilidade das empresas de transmissão.

O parâmetro  pode ser empregado como índice expressivo da QEE quanto ao nível de carregamento da transmissão. O definição do valor deste parâmetro a ser considerado aceitável deve ser objeto de avaliação a ser fundamentada em experiência reais.

## 8.0 – REFERÊNCIAS

- (1) ANDRÉ D. DE A . F. FILHO : “Regulação de Tensão em Sistemas Radiais ”, Relatório Interno CHESF, 1972.
- (2) H. S. BRONZEADO, A. J. P. RAMOS, J.,C. DE OLIVEIRA, J.,P.,G. DE ABREU, A.,C. ARRUDA, C. A. L. BRANDÃO : “Uma Proposta de Termos e Definições Associados à Qualidade da Energia Elétrica”, II SBQEE, São Lourenço, novembro de 1997.
- (3) LUIZ FREDERICO B. VASCONCELOS, "Aplicação do Método do Vetor Tangente na Análise de Estabilidade de tensão do Sistema CHESF", Tese de Mestrado apresentada à Escola Federal de Engenharia de Itajubá,, Março de 1999.
- (4) ÁLVARO J. P. RAMOS, HERIVELTO S. BRONZEADO, MANFREDO V. B. C. LIMA: “A Qualidade da Energia Elétrica Sob Ponto de Vista da Responsabilidade Compartilhada : Uma Visão Condominial”, I Seminário Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica - I SBQEE, Uberlândia, junho de 1996.