

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

MARIANA MACHADO

**INFLUÊNCIA DE PEQUENA CENTRAL HIDRELÉTRICA (PCH)
NA REGULAÇÃO DE TENSÃO DE UMA REDE ELÉTRICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2011

MARIANA MACHADO

**INFLUÊNCIA DE PEQUENA CENTRAL HIDRELÉTRICA (PCH) NA
REGULAÇÃO DE TENSÃO DE UMA REDE ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Elétrica da Coordenação de Engenharia Elétrica–COELT – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: M. Sc. César Augusto Portolann

PATO BRANCO

2011

Aos meus pais, William e Nilce, pelo apoio e incentivo ao longo de toda a minha vida.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço ao Professor M. Sc. César Augusto Portolann por ter aceito a orientação deste trabalho.

Gostaria também de deixar registrado a minha família, pelo apoio, compreensão e pela minha ausência durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Por fim, gostaria de agradecer a todas as pessoas que não foram nomeadas, mas que ajudaram direta ou indiretamente na realização deste projeto.

RESUMO

MACHADO, Mariana. Influência de Pequena Central Hidrelétrica (PCH) na regulação de tensão de uma rede elétrica. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) - Coordenação de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2011.

Este trabalho apresenta a análise do impacto de uma PCH (Pequena Central Hidrelétrica) na regulação de tensão em uma rede de distribuição radial. Inicialmente são expostos tanto o panorama da geração no país quanto da geração distribuída e os aproveitamentos hidráulicos existentes, com destaque para a PCH. Discorre sobre os fatores que afetam a regulação de tensão na linha de distribuição. Expõe dois métodos para o cálculo das tensões nas barras da rede. Apresenta o cálculo da regulação de tensão nas mesmas. Discute métodos para melhoria da regulação de tensão. Finalmente, traz como resultado um estudo sobre a necessidade de implementação de métodos complementares para a regulação de tensão e o impacto dos mesmos nos valores de tensão da rede estudada.

Palavras-chave: Pequena Central Hidrelétrica (PCH), Regulação de Tensão, Fluxo de Potência, Redes de Distribuição.

ABSTRACT

MACHADO, Mariana. Influence of Small Hydroelectric Power Plant in the voltage regulation of electric network. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) - Coordenação de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2011.

This paper presents an analysis of a PCH (Small Hydroelectric Power Plant, monogram in portuguese language) impact on distribution network voltage regulation. In the beginning is exposed generation view such as distributed generation and hydraulic utilization with note to PCH. It argues about factors that affect voltage regulation on distribution grids. It is exposed two methods for voltage calculus, and after that a calculus for voltage regulation on buses grid. It discuss procedures to improve voltage regulation. Finally, this paper presents a study about necessity of complementary methods for voltage regulation and its impact on voltage values of researched grid.

Keywords: Small Hydroelectric Power Plant (PCH), Voltage regulation, Power Flow, Distribution network.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação de uma Rede de Distribuição com Duas Barras.....	14
Figura 2 – Diagrama Fasorial para a Regulação de Tensão.....	15
Figura 3 – Representação de Rede a ser Estudada.....	24

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Regulação de Tensão nas Barras para Cargas com Impedância Constante, Sistema Atual.....	36
Gráfico 2 – Regulação de Tensão nas Barras para Cargas com Impedância Constante e Demanda Máxima.....	37
Gráfico 3 – Regulação de Tensão nas Barras para Cargas com Impedância Constante e Demanda Mínima.....	38
Gráfico 4 – Regulação de Tensão nas Barras para Cargas com Potência Constante, Sistema Atual.....	39
Gráfico 5 – Regulação de Tensão nas Barras para Cargas com Potência Constante e Demanda Máxima.....	40
Gráfico 6 – Regulação de Tensão nas Barras para Cargas com Potência Constante e Demanda Mínima.....	41
Gráfico 7 – Regulação de Tensão nas Barras para Cargas com Impedância Constante, Demanda Máxima e com Compensação de Reativos.....	43
Gráfico 8 - Regulação de Tensão nas Barras para Cargas com Potência Constante, Demanda Máxima e com Compensação de Reativos.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tensões nas Barras para Cargas com Potência Constante e Demanda Máxima.....	27
Tabela 2 – Tensões nas Barras para Cargas com Potência Constante e Demanda Mínima.....	28
Tabela 3 – Tensões nas Barras para Cargas com Impedância Constante e Demanda Máxima.....	28
Tabela 4 – Tensões nas Barras para Cargas com Impedância Constante e Demanda Mínima.....	29
Tabela 5 – Tensões nas Barras para Cargas com Corrente Constante e Demanda Máxima.....	30
Tabela 6 – Tensões nas Barras para Cargas com Corrente Constante e Demanda Mínima.....	30
Tabela 7 – Tensões nas Barras para Cargas com 60% de Potência Constante e 40% de Impedância Constante e Demanda Máxima.....	31
Tabela 8 – Tensões nas Barras para Cargas com 60% de Potência Constante e 40% de Impedância Constante e Demanda Mínima.....	31
Tabela 9 – Tensões nas Barras para cargas com 50% de Potência Constante, 35% de Impedância Constante e 15% de Corrente Constante e Demanda Máxima.....	32
Tabela 10 – Tensões nas Barras para Cargas com 50% de Potência Constante, 35% de Impedância Constante e 15% de Corrente Constante e Demanda Mínima.....	32

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

Aneel	Agência Nacional de Energia Elétrica.
PCH	Pequena Central Hidrelétrica.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 OBJETIVOS.....	11
1.1.1 Objetivo Geral.....	12
1.1.2 Objetivo Específico.....	12
1.2 DIVISÃO DO TRABALHO.....	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
2.1 REGULAÇÃO DE TENSÃO.....	13
2.2 REGULAÇÃO DE TENSÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO.....	13
2.3 MODELOS DE CARGA EM FUNÇÃO DA TENSÃO DE FORNECIMENTO.....	16
2.3.1 Cargas com potência ativa e reativa constantes.....	17
2.3.2 Cargas com impedância constante.....	18
2.3.3 Cargas com corrente constante.....	18
2.3.4 Cargas compostas dos modelos anteriores.....	19
2.4 MÉTODOS COMUMENTE EMPREGADOS PARA MINIMIZAR A REGULAÇÃO DE TENSÃO.....	20
2.4.1 Compensação de Reativos.....	21
2.4.2 Redução de Impedância da Linha.....	21
2.4.3 Alterações na Potência (Gerada e Demandada).....	22
3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA E SOLUÇÃO PROPOSTA.....	23
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	27
4.1 Resultados Obtidos para os Valores de Tensão.....	27
4.2 Resultados Obtidos para a Regulação de Tensão.....	34
4.3 Resultados Obtidos para a Compensação de Reativos.....	42
5 CONCLUSÕES.....	45
REFERÊNCIAS.....	47
ANEXO A – Faixas de classificação de tensões – Tensões de regime permanente..	49

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma extensão continental e um vasto potencial energético, nas suas mais variadas formas. Isto é relevante a medida em que todas as nações procuram novas fontes de energia, por motivos ambientais e/ou econômicos. Atualmente uma das formas de utilização dessas fontes de energia é através da geração distribuída, a qual é conhecida como a geração de energia com pequenos geradores (10 a 10.000kW), dispersa em um sistema de potência, geralmente com produção e consumo localizados. A geração distribuída pode ser definida como aquela que utiliza tanto recursos renováveis (eólica, fotovoltaica e biodigestor) quanto não renováveis (células de combustível). (FARRET e SIMÕES, 2006).

Entre as vantagens da geração distribuída podem-se citar: a implementação de novas unidades de geração conforme a demanda, menor tempo de implementação das unidades geradoras, disponibilização de energia em lugares remotos, suporte de tensão, maior confiabilidade na quantidade de suprimento de energia e melhoria do fator de potência por conta da liberação da rede para capacidade de atendimento. Contudo, existem algumas desvantagens, que podem, em sua maioria, serem amenizadas ou solucionadas. Dentre as desvantagens citam-se: o aumento na complexidade do planejamento e operação do sistema como um todo, a introdução de harmônicos, a possibilidade da ocorrência de instabilidade e a não-confiabilidade, a ocorrência de flutuações de tensão e de geração de potência ativa. (SALMAN, 1996. SANTOS; SANTOS, 2008. SPIER; LEMOS; ROSA, 2001. FARRET e SIMÕES, 2006).

Dentre os tipos de geração convencionais, o mais empregado em nosso país é a hidráulica. Atualmente os grandes potenciais hidrelétricos na região norte do país estão em evidência. Contudo, existem diversos problemas na utilização desses potenciais, sendo um deles a localização dos mesmos, em lugares como a Amazônia, onde existe um grande impacto ambiental com danos à flora e fauna locais, que são – muitas vezes – únicas, impossibilitando seu uso. Outro problema a ser citado é a transmissão da energia a partir desses lugares. Como os grandes centros consumidores encontram-se nas regiões sul/sudeste, seria necessária a

construção de longas linhas de transmissão, ocasionando perdas de potência e de tensão ao longo da linha. Além disso, o custo da construção de linhas com grande extensão é dispendioso. Por fim, o período de tempo empregado para a construção de uma usina de grandes proporções é bastante longo.

A utilização de fontes com menor potencial nas regiões sul/sudeste é uma solução em curto prazo para o problema de geração de energia, pois se a expansão econômica mantiver o ritmo atual e não forem feitos novos investimentos no setor, a consequência lógica será o racionamento ou mesmo de falta de energia elétrica para os consumidores.

Atualmente com a tecnologia disponível o principal emprego das fontes com menor potencial é a construção de PCH (Pequena Central Hidrelétrica). Pela Resolução nº 652, de 9 de dezembro de 2003, da Aneel (Agência Nacional de Energia Elétrica), “Será considerado com características de PCH o aproveitamento hidrelétrico com potência superior a 1.000 kW e igual ou inferior a 30.000 kW, destinado a produção independente, autoprodução ou produção independente autônoma, com área do reservatório inferior a 3,0 km²”. Dentre as vantagens de uma PCH podem-se citar: menor impacto ambiental e período relativamente curto para sua construção. A instalação de uma PCH pode ser útil tanto para fornecer energia localmente, ajudando na oferta de energia, bem como para alocar energia em lugares que estejam precisando com maior urgência, quanto na regulação de tensão de uma linha. Por intermédio de uma PCH, injeta-se potência na rede, em pontos mais próximos das cargas, evitando-se que parte da energia consumida pelas cargas venha da subestação. Além disso, existe a diminuição da corrente transportada da subestação até as cargas, provocando menores perdas de potência e uma queda menor de tensão. Nas situações em que a demanda das cargas é pequena, pode-se diminuir a geração ou mesmo desacoplar o gerador da PCH da rede, de forma que a tensão final não suba para níveis acima do recomendado.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo do trabalho proposto é a análise do impacto provocado pela conexão de uma PCH em uma rede de distribuição radial com relação a regulação de tensão nas barras do sistema.

1.1.2 Objetivo Específico

Verificação dos valores de regulação de tensão nas barras de acordo com as normas estabelecidas pelo órgão competente (Aneel).

1.2 DIVISÃO DO TRABALHO

Esse trabalho está dividido em quatro partes. Inicialmente, será apresentada a fundamentação teórica relacionada com a análise do problema. Na segunda parte será exposto o sistema a ser estudado e a metodologia a ser utilizada na análise do sistema com a PCH. Posteriormente serão apresentados os resultados encontrados e a discussão acerca dos mesmos. Por fim, serão apresentadas as conclusões.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 REGULAÇÃO DE TENSÃO

Define-se regulação de tensão como a variação na tensão, por exemplo, de um dispositivo ou alimentador de uma rede de distribuição de energia elétrica, desde a vazio até a plena carga. É expressa como uma porcentagem da tensão terminal nominal, dada pela equação (1):

$$R(\%) = \left(\frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \right) \times 100 \quad (1)$$

onde:

$R(\%)$ = regulação de tensão

V_{FL} = tensão terminal (nominal) a plena carga (*full-load*)

V_{NL} = tensão terminal sem carga (*no-load*)

Na existência de uma pequena variação, diz-se que o sistema analisado possui uma boa regulação de tensão. No caso oposto, quando existe variação acentuada, o sistema possui uma má regulação. (KOSOW, 2005).

2.2 REGULAÇÃO DE TENSÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Nesta seção, considerou-se a rede de distribuição ilustrada na Figura 1, na qual encontram-se duas barras, sendo que na barra 2 existe uma carga elétrica conectada à mesma.

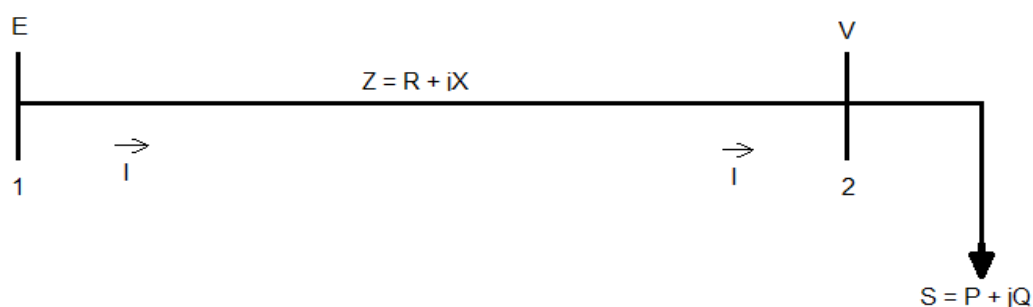


Figura 1 – Representação de uma Rede de Distribuição com Duas Barras.

Fonte: (PORTOLANN; CAMPAGNOLO, 2007), modificado pela autora.

Para a análise dessa rede, levou-se em consideração a não existência de controle específico para a tensão, em qualquer ponto do circuito. Assim sendo, a tensão sobre a carga varia em função da corrente de carga I . Além disso, se a rede estiver em um sistema de geração distribuída, a tensão também irá variar conforme a injeção de potência ativa pelas diferentes fontes de tensão.

Utilizando-se o Teorema de Thévenin no circuito da Figura 1, encontra-se a relação apresentada pela equação (2) para a regulação de tensão na rede:

$$\Delta V = E - V = ZI \quad (2)$$

onde E é a tensão da subestação, V é a tensão sobre a carga e $Z = R + jX$, a impedância da rede.

A potência aparente absorvida pela carga é dada pela equação (3):

$$S = VI^* \quad (3)$$

onde S é a potência aparente drenada pela carga, V é a tensão na carga e I^* é o complexo conjugado da corrente de carga.

A admitância de carga, suprida pela tensão da barra 1 é definida como $Y = G + jB$. Então, pode-se escrever a corrente da carga como:

$$I = VY \quad (4)$$

Substituindo-se (4) em (3), obtêm-se a equação (5), que representa a potência aparente em função da tensão e dos parâmetros de impedância da carga:

$$S = |V|^2 G - j|V|^2 B \quad (5)$$

Sabendo-se de que a potência aparente pode ser expressa por:

$$S = P + jQ \quad (6)$$

Igualando-se as equações (3) e (6), encontra-se uma expressão para a corrente I :

$$I = \frac{P - jQ}{V^*} \quad (7)$$

A expressão que descreve a regulação de tensão na linha, em função da impedância e das potências ativas e reativas é encontrada substituindo-se (7) em (2):

$$\Delta V = (R + jX) \left(\frac{P - jQ}{V^*} \right)$$

$$\Delta V = \frac{(RP + XQ)}{V^*} + j \frac{(XP - RQ)}{V^*} \quad (8)$$

Adotando-se os valores de $V = |V| \angle 0^\circ$, $V^* = |V| \angle 0^\circ = |V|$ e substituindo-os em (8) obtêm-se:

$$\Delta V = \Delta V_R + j \Delta V_X \quad (9)$$

Observando as equações (2), (5) e (9), conclui-se que a tensão varia em duas componentes. Uma delas está em fase com a tensão V e a outra defasada de 90° em relação a V . A componente dada por (ΔV_R) expressa a relação entre a tensão na distância entre as duas barras e o fluxo de potência entre as barras. Já a outra componente, representada pela parcela (ΔV_X) está relacionada ao ângulo de potência, para a transmissão (PORTOLANN; CAMPAGNOLO, 2007). A Figura 2 ilustra um diagrama fasorial ilustrando a regulação de tensão em uma rede, análoga a mostrada na Figura 1:

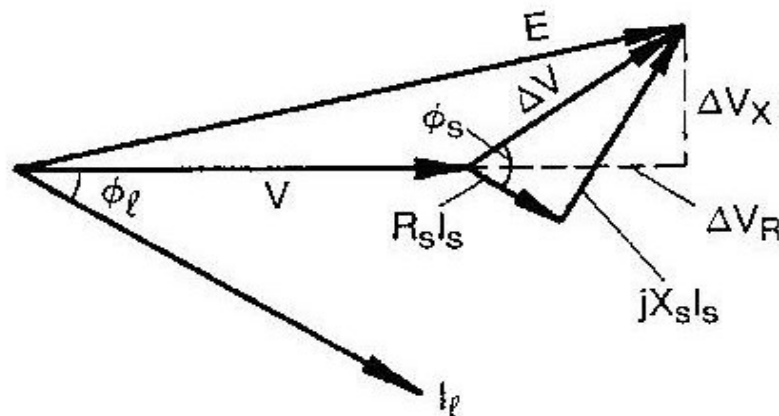


Figura 2 – Diagrama Fasorial para a Regulação de Tensão.

Fonte: (MILLER, 1982).

A tensão sobre a carga, representada pelo fasor V , é menor do que a tensão de alimentação, representada pelo fasor E . Isso ocorre devido à queda de tensão na

linha de distribuição, sendo representada pelo fasor ΔV . A variação de tensão possui uma componente ativa, dada por $R_s I_s$, e uma componente reativa, dada por $X_s I_s$. As componentes poderão mudar de módulo, direção e sentido, acompanhando o fator de potência da carga.

Nos sistemas elétricos de potência em geral, inclusive em redes de distribuição, procura-se reduzir ao máximo o valor de ΔV , para assim aumentar a qualidade e confiabilidade de tensão do sistema e diminuir as perdas ao longo da rede.

Uma regulação de tensão inapropriada pode provocar problemas para os usuários finais. Em casos de subtensões por períodos prolongados, pode ocorrer o sobreaquecimento de motores de indução, pois a corrente drenada pelos motores aumenta, e por consequência há um aumento da temperatura dos mesmos. Além disso, o torque de partida do motor é reduzido. Podem ocorrer atuações indevidas de dispositivos, tais como relés de subtensão. Na situação de sobretensões, podem ocorrer danos ou colapsos em equipamentos, como por exemplo, nas lâmpadas incandescentes e outras cargas que têm sua vida útil diminuída quando utilizada em tensões acima das nominais. Outro efeito indesejado é observado em transformadores, onde com o aumento da tensão também aumentam as correntes de magnetização. Qualquer variação permanente de tensão, seja uma subtensão ou uma sobretensão, provoca uma operação imprópria ou menos eficiente de equipamentos. Lâmpadas podem prover uma iluminação incorreta ou uma máquina funcionar de maneira mais rápida ou mais lenta. (SHORT, 2006)

2.3 MODELOS DE CARGA EM FUNÇÃO DA TENSÃO DE FORNECIMENTO

Em um sistema de distribuição existem diversos tipos de cargas, sendo que a forma construtiva e o seu funcionamento definem o comportamento destas frente à variações de tensão. Geralmente, são especificadas pelo seu consumo de potência complexa. A tensão especificada para uma carga será sempre a tensão no barramento de baixa tensão na subestação de distribuição. (KERSTING, 2002)

Os fluxos de carga ajudam no planejamento da expansão da rede e no rastreamento e diagnóstico de problemas de tensão. Através de uma modelagem detalhada e feita de modo correto, obtêm-se um melhor perfil de tensão do sistema.

Na análise de uma rede de distribuição, existem alguns modelos de cargas que podem ser utilizados durante o processo de cálculo: potência ativa e reativa constantes (PQ constante), corrente constante, impedância constante ou qualquer combinação das anteriores.

Normalmente, pode-se modelar a maioria dos circuitos como uma combinação de 40 a 60% de cargas com potência constante ou 40 a 60% de cargas com impedância constante. Uma boa aproximação para muitos circuitos é através da modelagem das cargas como corrente constante. Quando o foco é a queda de tensão em um sistema, a modelagem das cargas como potência constante é considerada conservadora. (SHORT, 2006).

Nos subitens a seguir serão descritas resumidamente as características de cada modelo de carga, considerando ligação estrela e o equivalente monofásico de uma ligação trifásica equilibrada. (KAGAN, BARIONI DE OLIVEIRA e ROBBA, 2005).

2.3.1 Cargas com potência ativa e reativa constantes

Para estas cargas, as potências ativa e reativa não mudam com o valor da tensão de fornecimento, sendo que a tensão está sempre em seu valor nominal ou de referência. A potência absorvida por uma carga desse modelo é: $S = S_N / \theta$. A corrente absorvida por este modelo de carga, quando alimentada com uma tensão, $V = V_N / \varphi$ é dada por (10):

$$I_p = \left(\frac{S}{V} \right)^* = \left(\frac{S}{V} \right) / \varphi - \theta \quad (10)$$

onde a corrente absorvida é inversamente proporcional a tensão aplicada.

Neste modelo, a tensão de fase irá mudar durante cada iteração até convergência ser alcançada. Um exemplo de carga de potência constante é o motor

de indução. (KAGAN, BARIONI DE OLIVEIRA e ROBBA, 2005. KERSTING, 2002)

2.3.2 Cargas com impedância constante

Neste modelo de carga, a impedância não se altera conforme a variação da tensão de alimentação. O valor de impedância é obtido a partir da potência da carga e da tensão nominal ou de referência. Considere uma potência $S=S_N/\theta$ e uma tensão $V=V_N/\phi$ a impedância é obtida por meio de (11):

$$Z = \left(\frac{V^2}{S} \right) = R + jX \quad (11)$$

onde:

$$R = \left(\frac{V^2}{S} \right) \cos \theta \quad X = \left(\frac{V^2}{S} \right) \sin \theta$$

Então, a corrente é calculada através de (12):

$$I_z = \frac{V}{Z} \quad (12)$$

A potência absorvida por uma carga modelada com impedância constante para uma tensão qualquer $V_F=V_F/\phi$ é:

$$S_F = V_F I = V_F \left(\frac{(V_F)^2}{Z} \right) = \left(\frac{V_F}{V} \right)^2 S \quad (13)$$

Através da análise de (13) conclui-se que a potência absorvida pela carga varia quadraticamente com a tensão. Como exemplos de cargas com impedância constante citam-se: capacitores e equipamentos resistivos (chuveiros). (KAGAN, BARIONI DE OLIVEIRA e ROBBA, 2005. KERSTING, 2002)

2.3.3 Cargas com corrente constante

São cargas que não possuem variação na quantidade de corrente consumida, ou seja, analisando em termos de fasores, sempre é drenado o mesmo

módulo de corrente. Contudo, conforme o ângulo de fase da tensão se modifica durante o processo de cálculo, o ângulo da corrente também varia, para manter o fator de potência da carga constante.

Os valores de tensão e de corrente são calculados a partir da tensão de referência, ou seja, a tensão nominal de alimentação da carga. Utiliza-se (10) para encontrar o valor do módulo da corrente a ser mantida constante.

Para qualquer valor de tensão $V_F = V_F / \varphi$ a corrente é dada por:

$$I_F = I_C / \varphi - \theta \quad (14)$$

e a potência absorvida será dada por:

$$S_F = V_F I_F^* = V_F / \varphi I_C / -(\varphi - \theta) = V_F I_C / \varphi \quad (15)$$

$$S_F = \left(\frac{|V_F|}{|V|} \right) S \quad (16)$$

Após a análise de (15), conclui-se que a potência absorvida pela carga possui uma variação de forma linear em relação a tensão. Os fornos a arco e diferentes tipos de lâmpadas (de descarga, vapor de sódio, fluorescentes, vapor de mercúrio) são exemplos de cargas que demandam corrente constante. (KAGAN, BARIONI DE OLIVEIRA e ROBBA, 2005. KERSTING, 2002)

2.3.4 Cargas compostas dos modelos anteriores

Quando necessário, uma carga pode ser modelada como uma composição dos modelos descritos anteriormente. Assume-se um determinado percentual de cada modelo e por meio de um coeficiente, calcula-se a corrente de cada modelo. Finalmente, somam-se cada corrente para encontrar a corrente total.

Para exemplificar o cálculo de uma carga modelada como composição dos modelos anteriores, considera-se uma carga com uma porcentagem K_P de potência constante, K_I de corrente constante e K_Z de impedância constante. Inicialmente, calcula-se a parte da corrente correspondente à potência constante:

$$I_P = \left(\frac{S}{V} \right)^* K_P \quad (17)$$

onde K_P é a porcentagem da carga relacionada com potência constante.

De forma análoga, calculam-se as partes da corrente correspondentes ao modelo de impedância constante e corrente constante, respectivamente:

$$I_z = \left(\frac{V}{Z}\right) K_z \quad (18)$$

$$I_l = \left(\frac{S}{V}\right)^* K_l \quad (19)$$

onde K_z é a porcentagem da carga relacionada com impedância constante e K_l é a porcentagem da carga relacionada com corrente constante.

A corrente total é a soma das três componentes:

$$I = I_p + I_z + I_l \quad (20)$$

(KAGAN, BARIONI DE OLIVEIRA e ROBBA, 2005. KERSTING, 2002)

2.4 MÉTODOS COMUMENTE EMPREGADOS PARA MINIMIZAR A REGULAÇÃO DE TENSÃO

Um sistema elétrico de potência em corrente alternada é considerado ideal quando a frequência e a tensão não sofrem alterações no seus respectivos valores, sem a existência de harmônicos em todos os pontos de fornecimento de energia e quando o fator de potência é unitário. Atualmente o uso de diversos dispositivos não-lineares pelos consumidores é cada vez maior. A variação de demanda destas cargas provoca uma variação de tensão no sistema, pela injeção de potência reativa. Essa variação pode ser positiva ou não para o sistema de distribuição. (MILLER, 1982.)

Os fluxos de carga são uma ferramenta para tentar diferentes opções de cenários com o objetivo de melhorar o perfil de tensão da rede, procurando uma ação otimizada. (SHORT, 2006)

Para resolver os problemas na regulação de tensão, faz-se necessária a implementação de dispositivos e técnicas para controlar a demanda e o consumo de potência – tanto ativa quanto reativa – para que se possua uma boa regulação de tensão. A seguir são apresentados de forma resumida alguns métodos de regulação de tensão.

2.4.1 Compensação de Reativos

Consiste em disponibilizar a potência reativa que a carga precisa localmente fazendo com que esta potência deixe de circular ao longo da linha, em uma situação em que normalmente está “ocupando” espaço onde poderia circular potência ativa da fonte para as cargas. Geralmente coloca-se um compensador em paralelo com a carga. Este dispositivo é projetado para que forneça uma potência reativa igual a demandada pela carga. (MILLER, 1982).

A compensação de reativos pode ser feita através de chaveamento de banco de capacitores, banco de capacitores estáticos, banco de indutores ou compensadores de Var, tanto estáticos quanto variáveis. (SCOTT; ATKINSON; MORRELL, 2002).

2.4.2 Redução de Impedância da Linha

A queda de tensão em condutores elétricos é a principal causa da regulação de tensão. Quanto maior a impedância, maior a variação de tensão entre um trecho e outro da rede. Assim, reduzindo-se a impedância, a regulação conseqüentemente é reduzida.

Caso seja possível, uma das maneiras de reduzir a impedância da linha consistiria na aproximação física das cargas ao gerador ou a subestação. Ou seja, no encurtamento da linha entre carga e fonte. A troca dos cabos existentes por cabos com seção transversal maior é uma maneira alternativa de obter-se o mesmo resultado. Porém ambos os métodos tem um custo elevado, pois envolvem a compra de novos materiais e carga horária de trabalho para a substituição dos cabos, principalmente se forem cabos subterrâneos. (SCOTT; ATKINSON; MORRELL, 2002).

2.4.3 Alterações na Potência (Gerada e Demandada)

Nesta filosofia de controle, uma quantidade “extra” de demanda é providenciada, por exemplo através de banco de capacitores, para o caso de sobretensões (quando os valores de tensão estão acima dos níveis aceitáveis), e de modo equivalente, um montante “extra” de potência ativa é gerado para situações de subtensão (quando os valores de tensão estão abaixo dos níveis aceitáveis).

Um exemplo de aumento intencional de demanda ativa como medida para combater sobretensões em regime permanente, é proposta por (SCOTT; ATKINSON; MORRELL, 2002). Este método consiste em ligar e desligar (automaticamente) cargas pré-estabelecidas, conforme os níveis de tensão estejam acima ou abaixo dos valores requeridos, respectivamente. Os dispositivos de armazenamento térmico se enquadram como exemplo de carga para controle de tensão.

Para amenizar quedas acentuadas de tensão originadas, por exemplo, pela entrada em serviço de grandes motores, ou pela perda de geradores distribuídos, (MORREN; HAAN; FERREIRA, 2005), defendem o uso de potência ativa armazenada nas massas girantes das turbinas/geradores, e nos chamados “flywell” ou volantes, conectados intencionalmente no eixo do gerador, ou ainda pela colocação em funcionamento de baterias ou células de combustível.

Outro método, proposto por (Portolann e Campagnolo, 2007), consiste em tomar uma parte da carga de baixa prioridade, para ser reduzida de modo coerente durante períodos de subtensão, estabelecendo os montantes necessários de redução de carga, para situações de regime permanente e transitório, considerando casos onde o alívio é somente de carga ativa e, também com fator de potência constante.

É nessa linha de soluções para a regulação de tensão em redes de distribuição, que as pequenas centrais hidrelétricas podem ser enquadradas. Com o fornecimento de potência a nível local, boa parte da potência ativa demandada deixa de fluir pela rede, e conseqüentemente, as quedas de tensão passam a ser menores.

3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA E SOLUÇÃO PROPOSTA

Com o objetivo de analisar-se o impacto da conexão de uma PCH em uma rede de distribuição, inicialmente considerou-se um aproveitamento hidrelétrico existente em uma região rural. Nesse local uma empresa gostaria de construir uma usina. Parte da energia não utilizada pela empresa pretende ser vendida para a concessionária. Por sua vez, a concessionária pretende estudar o impacto que a injeção de potência da PCH provocará nas cargas e no sistema de distribuição já existentes.

Com o término da análise, a concessionária saberá em quais pontos do sistema a tensão está fora dos limites considerados adequados pela Aneel e pode adotar os procedimentos cabíveis para melhoria da regulação de tensão.

O sistema utilizado nesse trabalho é genérico e baseado nas características gerais dos projetos implementados e/ou planejados para a região sudoeste do Paraná, tanto na sua configuração, quanto nos valores das cargas. Cabe ressaltar que a PCH não tem como função o controle de tensão no sistema, o que será analisado é a sua influência na tensão em geral do sistema, através da sua conexão pura e simples na rede.

A rede de distribuição a ser analisada é uma dentre muitas da concessionária, possuindo as seguintes características: é curta, possui uma tensão de referência de 13,8kV (1 p.u.), cinco cargas industriais conectadas e uma regulação de tensão específica.

Para redes de distribuição com tensão superior a 1kV e inferior a 69kV, a faixa de tensão deve ser entre 93% e 105% da tensão de referência. (Aneel, 2010). Logo, os valores para a faixa de tensão desejada estão entre 12,83kV (0,93p.u.) e 14,49kV (1,05p.u.). Os limites de variação de tensão, para cada faixa de tensão de rede, de acordo com a Aneel são apresentados no Anexo 1.

Para um melhor controle dos níveis de tensão, o operador da rede de distribuição deve constantemente monitorar os níveis de tensão em cada barra do sistema, para verificar variações de tensão que sejam prejudiciais tanto ao sistema de geração quanto aos consumidores. Uma forma de analisar o comportamento do

sistema ao longo do tempo é realizar simulações para diferentes cenários de carga. Cada concessionária possui um critério próprio para definir quais são as piores situações que podem ser enfrentadas durante o funcionamento do sistema.

A Figura 3 apresenta a representação da rede de distribuição a ser analisada ao longo deste trabalho:

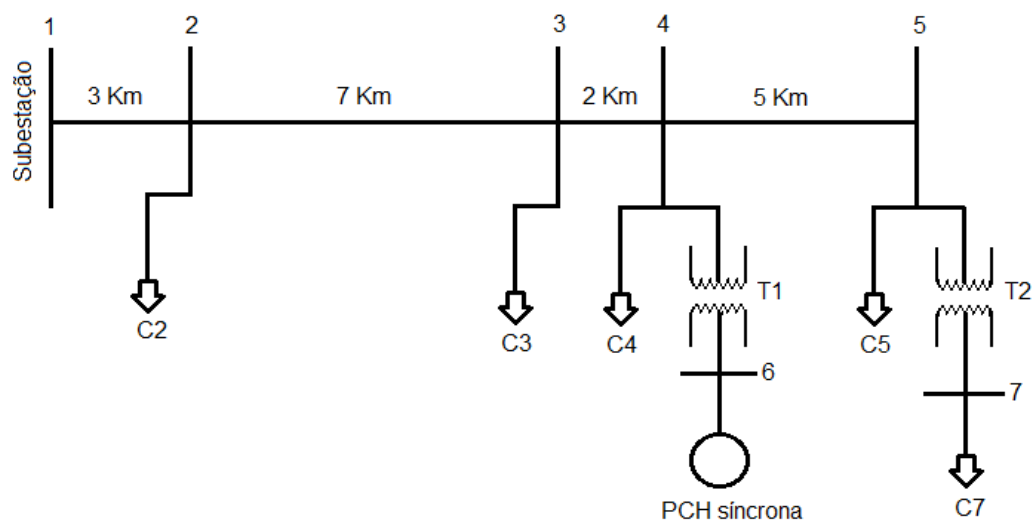


Figura 3 – Representação de Rede a ser Estudada.

Fonte: Autoria Própria.

onde:

Bases utilizadas: 1MVA; 13,8kV;

Rede Elétrica: $Z_{rede} = 0,290 + j0,504$ (Ω/km)

Transformador T_1 : 1MVA; 13,8/0,66kV; $Z_{T1} = 0,0025 + j0,01$ p.u.

Transformador T_2 : 500kVA; 13,8/0,66kV; $Z_{T2} = 0,003 + j0,01$ p.u.

Cargas (em p.u. MVA): barra 2: $0,500 + j0,300$

barra 3: $1,328 + j0,750$

barra 4: $0,700 + j0,250$

barra 5: $0,250 + j0,167$

barra 7: $0,147 + j0,091$

PCH (máquina síncrona): 1MVA; 660V; $\cos(\theta) = 0,80$

Neste sistema as cargas são consideradas equilibradas, visto que as cargas industriais trifásicas são predominantes. Para a realização das etapas de cálculo,

adotarão-se como base quatro cenários para análise da regulação de tensão, que são equivalentes aos utilizados por FREITAS et al., 2006.

Sem geração distribuída (PCH) e demanda máxima: onde a PCH encontra-se desligada do sistema de distribuição e a demanda dos consumidores alcança seu momento de pico.

Sem geração distribuída (PCH) e demanda mínima: onde a PCH encontra-se desligada do sistema de distribuição e a demanda dos consumidores é um terço da nominal.

Geração máxima distribuída (PCH) e demanda máxima: onde a PCH encontra-se ligada ao sistema de distribuição e está produzindo energia elétrica na sua capacidade máxima e a demanda dos consumidores alcança seu momento de pico.

Geração máxima distribuída (PCH) e demanda mínima: onde a PCH encontra-se ligada ao sistema de distribuição e está produzindo energia elétrica na sua capacidade máxima enquanto que a demanda dos consumidores é um terço da nominal.

Os métodos descritos anteriormente serão simulados para cada uma das seguintes cargas: potência constante, impedância constante e corrente constante, 60% de potência constante e 40% impedância constante e 50% de potência constante, 35% de impedância constante e 15% corrente constante.

Além das análises através dos modelos de carga, será feita a avaliação quanto ao local da conexão da PCH na rede, para verificar se existe influência nos valores de tensão nas barras conforme a localização da usina. Será analisado o efeito da PCH caso fosse conectada nas barras 1 e 3, além da barra 6 (como apresentada na Figura 3), utilizando-se dos cenários citados.

As ferramentas propostas para o cálculo da regulação de tensão do modelo são:

Gauss-Seidel: considera-se um sistema linear $Ax=b$, de ordem n , determinam-se várias sequências de k aproximações sucessivas da forma $(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})^t$, onde $k = 1, 2, 3, \dots$. Essas aproximações são feitas a partir de valores iniciais $(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})^t$ por intermédio de um processo iterativo definido pelo seguinte sistema de equações:

$$\begin{aligned}
\{x_1^{(k+1)} &= -a_{12}^* x_2^{(k)} - a_{13}^* x_3^{(k)} - \dots - a_{1n}^* x_n^{(k)} + b_1^* \\
\{x_2^{(k+1)} &= -a_{21}^* x_1^{(k)} - a_{23}^* x_3^{(k)} - \dots - a_{2n}^* x_n^{(k)} + b_2^* \\
\{x_3^{(k+1)} &= -a_{31}^* x_1^{(k)} - a_{32}^* x_2^{(k)} - \dots - a_{3n}^* x_n^{(k)} + b_3^* \\
\{ \dots &= \dots \\
\{x_n^{(k+1)} &= -a_{n1}^* x_1^{(k)} - a_{n2}^* x_2^{(k)} - \dots - a_{n,n-1}^* x_{n-1}^{(k)} + b_n^*
\end{aligned}$$

Os valores mais recentes das componentes são utilizados para o cálculo de uma componente qualquer $x^{(k+1)}$. (FRANCO, 2006).

Para o cálculo em redes de distribuição, faz-se a adaptação do sistema de equações para outro sistema, envolvendo o fluxo de potência e suas variáveis, por exemplo, tensão, potência ativa, potência reativa e admitância.

A equação geral para um sistema de N barras, evidenciando-se a tensão em qualquer barra i é dada por (21):

$$V_i^{(k)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{V_i^{(k-1)*}} - \sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} V_j^{(k)} - \sum_{j=i+1}^N Y_{ij} V_j^{(k-1)} \right] \quad (21)$$

O sobrescrito k representa o número da interação na qual a tensão está sendo calculada e (k-1) indica o número da interação precedente. (GRAINGER e STEVENSON JR., 1994).

Método das somas das correntes: divide-se a rede em trechos, de acordo com a disposição das barras. Após a determinação dos valores das cargas e dos parâmetros de rede, iniciam-se de valores iniciais estimados de tensão para o cálculo das correntes nas respectivas divisões. Iniciando-se de uma barra fonte, escolhida previamente, atualizam-se as tensão quantas interações forem necessárias para que a margem de erro seja atingida. (SHIRMOHAMMADI et al., 1988).

Os cálculos serão feitos através de aplicativo para cálculo numérico, sendo a margem de erro no processo de $\pm 10^{-8}$. Após o término dos cálculos, uma comparação entre cada situação será feita, para determinar quais barras têm as maiores discrepâncias entre os valores de tensão. Após a avaliação geral, se os valores de tensão nas barras estiverem ainda fora dos padrões da Aneel, será estudada a possibilidade de aplicação de outros métodos de controle de tensão na rede, como apresentado na seção 2.4.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente, foi desenvolvida uma rotina de cálculo com o objetivo de calcular o valor das tensões em cada barra, para todas os cenários de carga descritos no item 3. A tensão na barra 1, a barra de referência (subestação) foi fixada em $1/0^\circ$ p.u. De posse desses dados, calcularam-se as regulações de tensão para cada barra e construíram-se gráficos.

4.1 Resultados Obtidos para os Valores de Tensão

As tabelas desse item apresentam os valores encontrados de tensões para três situações diferentes: sem PCH, PCH conectada na barra 6 e PCH conectada na barra 3. Durante os cálculos, foi observado que quando a PCH é conectada na barra 1, os valores das tensões nas outras barras são iguais aos encontrados quando não se considera a PCH, motivo pelo qual não serão exibidos os valores de tensão e nem os valores de regulação para esse cenário.

As Tabelas 1 e 2 apresentam os valores de tensão para cargas com potência constante.

Tabela 1 – Tensões nas Barras para Cargas com Potência Constante e Demanda Máxima
(continua)

Barra	Sem PCH		PCH na barra 6		PCH na barra 3	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)
1	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
2	0,9714	-0,9398	0,9814	-0,7209	0,9814	-0,7225
3	0,9167	-2,9602	0,9496	-2,1321	0,9497	-2,1376
4	0,9101	-3,2548	0,9491	-2,2485	0,9433	-2,4119
5	0,9030	-3,4833	0,9423	-2,4585	0,9364	-2,6245

Tabela 1 – Tensões nas Barras para Cargas com Potência Constante e Demanda Máxima**(conclusão)**

Barra	Sem PCH		PCH na barra 6		PCH na barra 3	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)
6	0,9101	-3,2548	0,9574	-1,8387	0,9433	-2,4119
7	0,9000	-3,6521	0,9394	-2,6134	0,9335	-2,7814

Fonte: Autoria própria.**Tabela 2 – Tensões nas Barras para Cargas com Potência Constante e Demanda Mínima**

Barra	Sem PCH		PCH na barra 6		PCH na barra 3	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)
1	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
2	0,9911	-0,3071	0,9997	-0,0990	0,9998	-0,1005
3	0,9742	-0,9282	1,0027	-0,2149	1,0030	-0,2197
4	0,9721	-1,0147	1,0062	-0,1566	1,0010	-0,3013
5	0,9699	-1,0811	1,0041	-0,2186	0,9989	-0,3639
6	0,9721	-1,0147	1,0141	0,2084	1,0010	-0,3013
7	0,9690	-1,1298	1,0032	-0,2696	0,9980	-0,4098

Fonte: Autoria Própria.

As Tabelas 3 e 4 apresentam as tensões encontradas para cargas com impedância constante.

Tabela 3 – Tensões nas Barras para Cargas com Impedância Constante e Demanda Máxima**(continua)**

Barra	Sem PCH		PCH na barra 6		PCH na barra 3	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)
1	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
2	0,9754	-0,8164	0,9831	-0,6597	0,9831	-0,6602
3	0,9294	-2,5174	0,9548	-1,9257	0,9547	-1,9276

**Tabela 3 – Tensões nas Barras para Cargas com Impedância Constante e Demanda Máxima
(conclusão)**

Barra	Sem PCH		PCH na barra 6		PCH na barra 3	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)
4	0,9238	-2,7605	0,9544	-2,0273	0,9491	-2,1708
5	0,9179	-2,9467	0,9483	-2,2135	0,9430	-2,3570
6	0,9238	-2,7605	0,9621	-1,6519	0,9491	-2,1708
7	0,9155	-3,0835	0,9458	-2,3503	0,9405	-2,4938

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 4 – Tensões nas Barras para Cargas com Impedância Constante e Demanda Mínima

Barra	Sem PCH		PCH na barra 6		PCH na barra 3	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)
1	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
2	0,9915	-0,2931	0,9999	-0,0951	0,9998	-0,1001
3	0,9755	-0,8815	1,0033	-0,2018	1,0031	-0,2185
4	0,9736	-0,9632	1,0070	-0,1403	1,0011	-0,3001
5	0,9715	-1,0256	1,0048	-0,2028	0,9990	-0,3626
6	0,9736	-0,9632	1,0151	0,2351	1,0011	-0,3001
7	0,9706	-1,0713	1,0039	-0,2484	0,9981	-0,4083

Fonte: Autoria Própria.

Os resultados encontrados para cargas com corrente constante estão nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 – Tensões nas Barras para Cargas com Corrente Constante e Demanda Máxima

Barra	Sem PCH		PCH na barra 6		PCH na barra 3	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)
1	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
2	0,9737	-0,8707	0,9823	-0,6879	0,9823	-0,6889
3	0,9239	-2,7106	0,9524	-2,0205	0,9524	-2,0239
4	0,9179	-2,9759	0,9520	-2,1288	0,9464	-2,2813
5	0,9113	-3,1877	0,9455	-2,3330	0,9399	-2,4867
6	0,9179	-2,9759	0,9600	-1,7376	0,9464	-2,2813
7	0,9086	-3,3382	0,9428	-2,4781	0,9372	-2,6326

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 6 – Tensões nas Barras para Cargas com Corrente Constante e Demanda Mínima

Barra	Sem PCH		PCH na barra 6		PCH na barra 3	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)
1	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
2	0,9913	-0,2998	0,9998	-0,0971	0,9998	-0,1003
3	0,9749	-0,9039	1,0030	-0,2084	1,0031	-0,2191
4	0,9729	-0,9879	1,0066	-0,1486	1,0011	-0,3007
5	0,9707	-1,0546	1,0044	-0,2131	0,9989	-0,3655
6	0,9729	-0,9879	1,0145	0,2214	1,0011	-0,3007
7	0,9698	-1,1017	1,0035	-0,2586	0,9980	-0,4113

Fonte: Autoria Própria.

As Tabelas 7 e 8 apresentam os valores obtidos para a situação onde a carga é composta por 60% de potência constante e 40% de impedância constante.

Tabela 7 – Tensões nas Barras para Cargas com 60% de Potência Constante e 40% de Impedância Constante e Demanda Máxima

Barra	Sem PCH		PCH na barra 6		PCH na barra 3	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)
1	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
2	0,9732	-0,8856	0,9821	-0,6949	0,9821	-0,6960
3	0,9223	-2,7644	0,9518	-2,0441	0,9518	-2,0480
4	0,9162	-3,0361	0,9514	-2,1541	0,9458	-2,3090
5	0,9096	-3,2457	0,9449	-2,3539	0,9392	-2,5102
6	0,9162	-3,0361	0,9594	-1,7591	0,9458	-2,3090
7	0,9068	-3,4001	0,9421	-2,5011	0,9365	-2,6585

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 8 – Tensões nas Barras para Cargas com 60% de Potência Constante e 40% de Impedância Constante e Demanda Mínima

Barra	Sem PCH		PCH na barra 6		PCH na barra 3	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)
1	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
2	0,9913	-0,3013	0,9998	-0,0975	0,9998	-0,1003
3	0,9747	-0,9090	1,0029	-0,2097	1,0031	-0,2192
4	0,9727	-0,9935	1,0065	-0,1502	1,0011	-0,3008
5	0,9706	-1,0582	1,0044	-0,2123	0,9989	-0,3634
6	0,9727	-0,9935	1,0144	0,2188	1,0011	-0,3008
7	0,9697	-1,1056	1,0035	-0,2578	0,9980	-0,4092

Fonte: Autoria Própria.

As Tabelas 9 e 10 mostram as tensões em cada barra para a situação onde a carga é composta por 50% potência, 35% impedância e 15% corrente constante.

Tabela 9 – Tensões nas Barras para cargas com 50% de Potência Constante, 35% de Impedância Constante e 15% de Corrente Constante e Demanda Máxima

Barra	Sem PCH		PCH na barra 6		PCH na barra 3	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)
1	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
2	0,9733	-0,8821	0,9822	-0,6932	0,9822	-0,6943
3	0,9227	-2,7517	0,9520	-2,0384	0,9520	-2,0422
4	0,9166	-3,0219	0,9515	-2,1481	0,9459	-2,3024
5	0,9100	-3,2302	0,9450	-2,3472	0,9394	-2,5029
6	0,9166	-3,0219	0,9596	-1,754	0,9459	-2,3024
7	0,9073	-3,3837	0,9423	-2,4938	0,9367	-2,6506

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 10 – Tensões nas Barras para Cargas com 50% de Potência Constante, 35% de Impedância Constante e 15% de Corrente Constante e Demanda Mínima

Barra	Sem PCH		PCH na barra 6		PCH na barra 3	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)
1	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
2	0,9913	-0,3010	0,9998	-0,0974	0,9998	-0,1003
3	0,9748	-0,9077	1,0003	-0,2094	1,0031	-0,2192
4	0,9728	-0,9921	1,0065	-0,1498	1,0011	-0,3008
5	0,9706	-1,0568	1,0044	-0,2119	0,9989	-0,3633
6	0,9728	-0,9921	1,0145	0,2195	1,0011	-0,3008
7	0,9697	-1,1041	1,0035	-0,2574	0,9980	-0,4091

Fonte: Autoria Própria.

Em geral, para as situações sem PCH e onde a demanda das cargas é máxima, os valores de tensão possuem uma queda considerável a partir da barra 2. Por exemplo, para cargas com 50% de potência constante, 35% de impedância constante e 15% de corrente constante observou-se uma redução de 5,2% entre as barras 2 e 3. A maior queda é observada para cargas com potência constante, onde a redução de tensão é de 5,63%. Isso ocorre porque a barra 2 encontra-se próxima a subestação e demanda uma potência menor do que as outras barras. Na barra 3

está conectada a carga de maior consumo do sistema, enquanto que as outras barras estão afastadas da subestação, o que contribui para uma tensão menor nas mesmas. Da barra 3 em diante os valores se encontram abaixo da faixa recomendada que é de 0,93p.u. Para quase todos os cenários de carga, a tensão na barra 7 manteve-se menor que 0,91p.u., destacando como a menor tensão do sistema a tensão na barra 7, para cargas com potência constante, de 0,9p.u.

Por sua vez, para demanda da carga mínima, apesar de também ser relevante a queda dos valores a partir da barra 2, todos os valores de tensão encontram-se dentro da faixa adequada estipulada pela ANEEL.

Na análise com a PCH, houve uma melhora do perfil de tensão do sistema como um todo, tanto para demanda máxima quanto para demanda mínima. Observa-se que com a PCH conectada na barra 6, as barras no final da linha obtiveram um aumento maior de tensão do que com a PCH conectada na barra 3. Por exemplo, a menor tensão que era de 0,9p.u. teve um acréscimo de 0,0335 para a conexão na barra 3 e um acréscimo de 0,0394 para a conexão na barra 6, um aumento de 3,70% e 4,38% respectivamente. Uma outra questão a ser analisada é a variação de tensão na barra 3. O valor da tensão praticamente não varia conforme a localização da PCH, sendo a única mudança no referente ao ângulo, com um valor menor de reativos para a PCH na barra 3 em detrimento aos valores encontrados na barra 6. Como exemplo, para demanda máxima de cargas com 50% de potência, 35% de impedância e 15% de corrente constante, o ângulo na barra 3 é de 2,0384 para a PCH na barra 3 e 2,0422 para a PCH na barra 6, uma diferença de somente 0,0038p.u.

Com a PCH na barra 6, a potência gerada foi distribuída entre as cargas ao redor (barras 4, 5 e 7), requerendo uma menor demanda de corrente da barra 1 (subestação). Enquanto que, com a barra conectada na barra 3, a potência gerada acaba suprindo parcialmente a demanda da barra 3, porém a potência demandada pelas outras barras continua sendo oriunda da barra 1, ou seja, a PCH acaba auxiliando mais em pontos específicos no sistema do que no sistema todo.

Outra modificação no sistema provocada pela PCH foi a diminuição dos reativos, identificado através da queda do ângulo das tensões. Neste caso, a PCH acaba atuando como um banco de capacitores fixos, aumentando a tensão e através

da injeção de potência, aumentando o fator de potência do sistema. A situação descrita pode ser verificada para todos os cenários de carga, principalmente para os de demanda mínima. Na barra 5, para impedância constante, existe uma redução de 80% no ângulo da tensão na comparação entre sem PCH e PCH na barra 6. Para esta mesma barra, considerando a PCH na barra 3, a redução é de 65%. Levando em consideração a situação de demanda máxima, para a mesma barra e a mesma carga, para a PCH na barra 6 a redução é de 25%, enquanto que para a PCH na barra 3 é de 20%.

4.2 Resultados Obtidos para a Regulação de Tensão

Para o cálculo da regulação de tensão utilizou-se (1), considerando-se três situações, tanto para a PCH na barra 6 quanto para a PCH na barra 3. Na primeira, analisou-se a regulação de tensão em relação à situação onde a PCH não está conectada para a situação onde a PCH está presente, tanto para demanda máxima quanto para demanda mínima, onde em (1) V_{NL} é a situação onde a PCH não é conectada e V_{FL} a situação onde a PCH é conectada. Por sua vez, a segunda situação caracterizou-se pela análise da regulação de tensão das barras do sistema em relação à subestação, para demanda máxima e demanda mínima. Nessa situação, V_{NL} é o valor de tensão na barra 1 e V_{FL} é o valor de tensão nas outras barras. Por fim, a terceira situação constituiu-se da análise da regulação de tensão entre as situações de demanda máxima e demanda mínima, onde V_{NL} é a tensão na barra para demanda mínima e V_{FL} é a tensão na barra para demanda máxima. Por sua vez, também foi calculada a regulação de tensão no sistema já existente, para a segunda e a terceira situações.

A apresentação dos resultados é feita por meio de gráficos. Os gráficos 1 e 4, apresentam os resultados para o sistema já existente. Nos gráficos 2 e 5 estão as regulações da terceira situação e as relacionadas à demanda máxima da primeira e da segunda situação. Já nos gráficos 3 e 6 são mostradas as regulações relacionadas com a demanda mínima da primeira e segunda situações. Segue a

legenda para os gráficos:

- A = Entre sem PCH e Demanda Máxima, PCH na Barra 6
- B = Entre sem PCH e Demanda Máxima, PCH na Barra 3
- C = Entre Demanda Máxima e Demanda Mínima, PCH na Barra 6
- D = Entre Demanda Máxima e Demanda Mínima, PCH na Barra 3
- E = Entre a Subestação e as Outras Barras, PCH na barra 6
- F = Entre a Subestação e as Outras Barras, PCH na barra 3
- G = Entre sem PCH e Demanda Mínima, PCH na Barra 6
- H = Entre sem PCH e Demanda Mínima, PCH na Barra 3
- I = Entre a Subestação e as Outras Barras, PCH na barra 6
- J = Entre a Subestação e as Outras Barras, PCH na barra 3

Após os cálculos, verificou-se que a regulação de tensão possuiu um padrão para todos os tipos de carga e para todos os cenários simulados. Por esse motivo, são analisados apenas os resultados encontrados para impedância constante e potência constante, pois estes são os mais pertinentes.

Primeiramente analisou-se a variação de tensão que ocorre para cargas de impedância constante, como explicado no item 2.3.2. O Gráfico 1 apresenta os resultados para essa carga no sistema já existente.

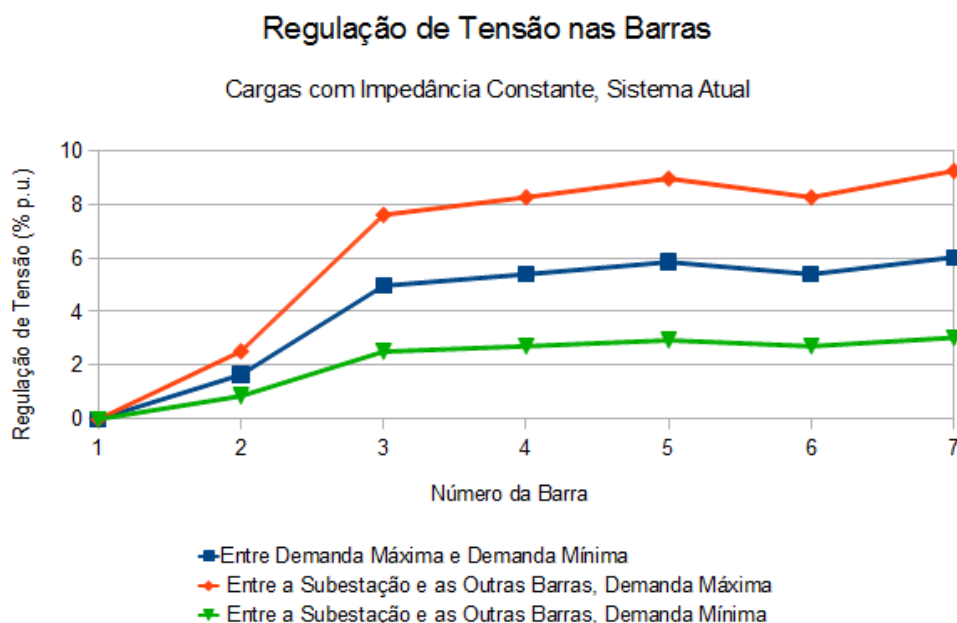


Gráfico 1 – Regulação de Tensão nas Barras para Cargas com Impedância Constante, Sistema Atual
Fonte: Autoria Própria.

Os valores de regulação para o sistema atual possuem um valor elevado, principalmente para demanda máxima, entre a subestação e as outras barras. No final da rede, as cargas estão sob uma tensão 8,94% (barra 5) e 9,23% (barra 7) menores do que o observado na subestação. Esses valores de regulação estão acima dos recomendados pela ANEEL.

Na comparação entre a demanda máxima e a demanda mínima do sistema, os valores encontrados também possuem valores expressivos, apesar de estarem na faixa adequada. Considerando-se novamente as barras 5 e 7, a regulação de tensão é de 5,84% e 6,02%, respectivamente.

Essa variação não é recomendada, pois as cargas que estão conectadas no sistema podem sofrer danos, especialmente durante as situações de demanda máxima.

O Gráfico 2 ilustra os resultados para cargas com impedância constante e demanda máxima.

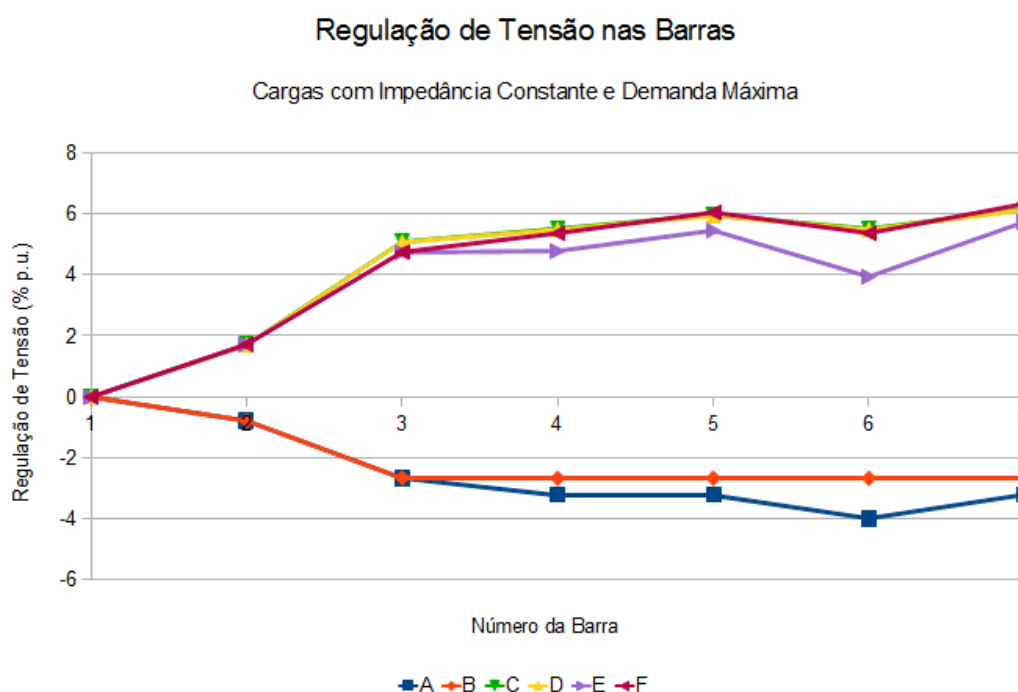


Gráfico 2 – Regulação de Tensão nas Barras para Cargas com Impedância Constante e Demanda Máxima
Fonte: Autoria Própria.

Como pode ser observado, as maiores regulações de tensão são encontradas na barra 7, principalmente para as situações C, D e E. Para a situação C, a regulação é de 6,14%, para a situação D é de 6,12% e para a situação F de 6,32%. A regulação de tensão para a situação B manteve-se praticamente constante, na faixa entre 2,65% e 2,66%. Na barra 2 a regulação de tensão é menor do que a encontrada nas outras barras. Nas situações C a F, a regulação está na faixa entre 1,70% e 1,72%, podendo ser considerada constante. Isso acontece basicamente pela fato da barra 2 encontrar-se próxima a subestação e possuir uma carga que demanda pouca potência, resultando em uma corrente drenada menor e por consequência, a queda de tensão no condutor da rede também é menor.

Por sua vez, os resultados encontrados para demanda mínima estão no Gráfico 3:

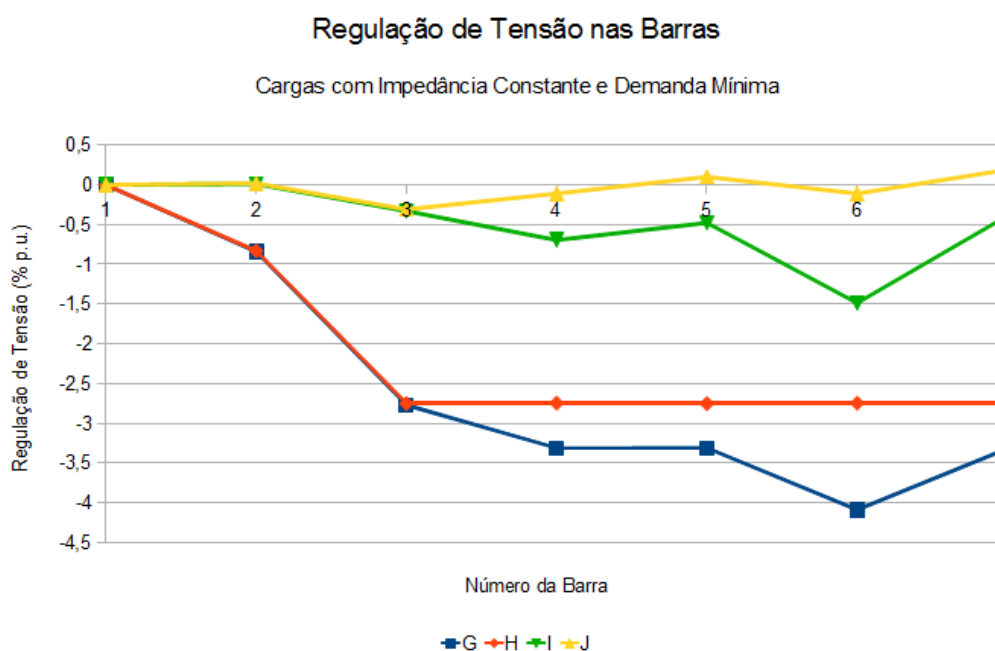


Gráfico 3 – Regulação de Tensão nas Barras para Cargas com Impedância Constante e Demanda Mínima
Fonte: Autoria Própria.

Para as situações envolvendo demanda mínima observa-se que os valores de regulação são menores em relação aos encontrados para demanda máxima. Nos cenários onde a PCH encontra-se na barra 3, observa-se uma regulação de tensão praticamente constante para a situação H após a barra 3 e uma variação muito pequena na situação J, na faixa entre -0,3% e 0,19%. Por sua vez, em G e I, observa-se uma regulação de tensão em torno de -4,08% e -1,48%, respectivamente. Isto acontece pois para a situação em que a PCH está na barra 3, a barra 6 fica no mesmo potencial da barra 4, já quando a PCH está na barra 6, ocorre um aumento na tensão, pois neste ponto existe a injeção de potência por parte da PCH.

Agora, analisa-se o caso com maior regulação de tensão: cargas com potência contante (explicado no item 2.3.1). O Gráfico 4 ilustra o comportamento da rede para esse tipo de carga no sistema atual.

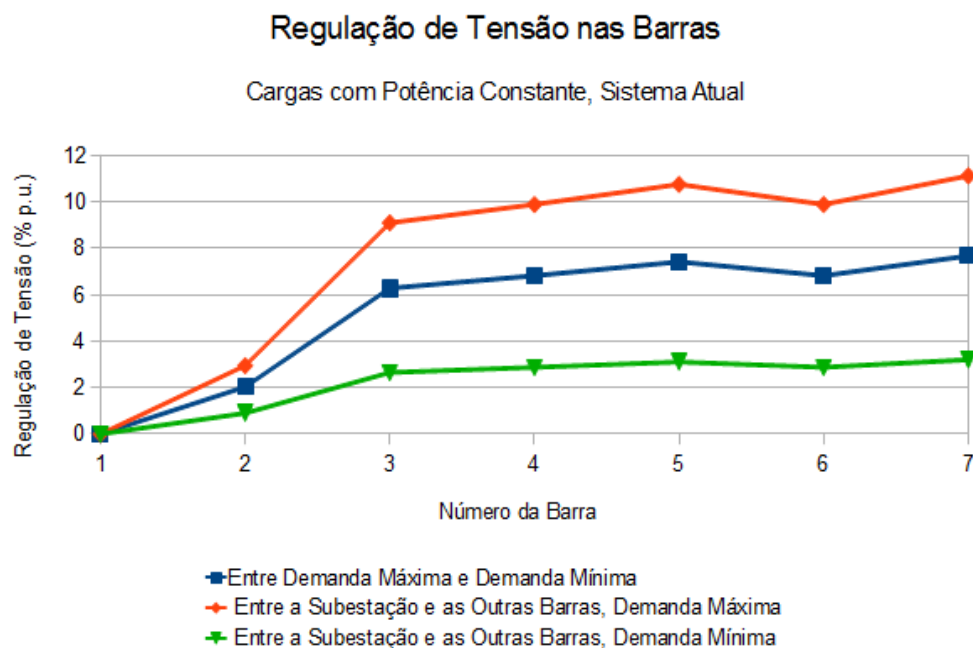


Gráfico 4 – Regulação de Tensão nas Barras para Cargas com Potência Constante, Sistema Atual
Fonte: Autoria Própria.

Nessa situação foram encontrados os maiores valores de regulação de tensão para o sistema e o que atinge mais a rede, visto que, as cargas são predominantemente industriais e esse tipo de carga geralmente consome um valor de potência constante. A pior regulação foi vista na situação entre a subestação e as outras barras para demanda máxima. Após a barra com maior carga (barra 3), a regulação de tensão possui valores de 9,88% (barras 4 e 6), 10,74% (barra 5) e 11,11% (barra 7), bem acima dos valores estipulados para faixa adequada de tensão pela ANEEL.

Nos gráficos 5 e 6, estão os valores de regulação de tensão para as simulações onde leva-se em conta a conexão da PCH à rede de distribuição.

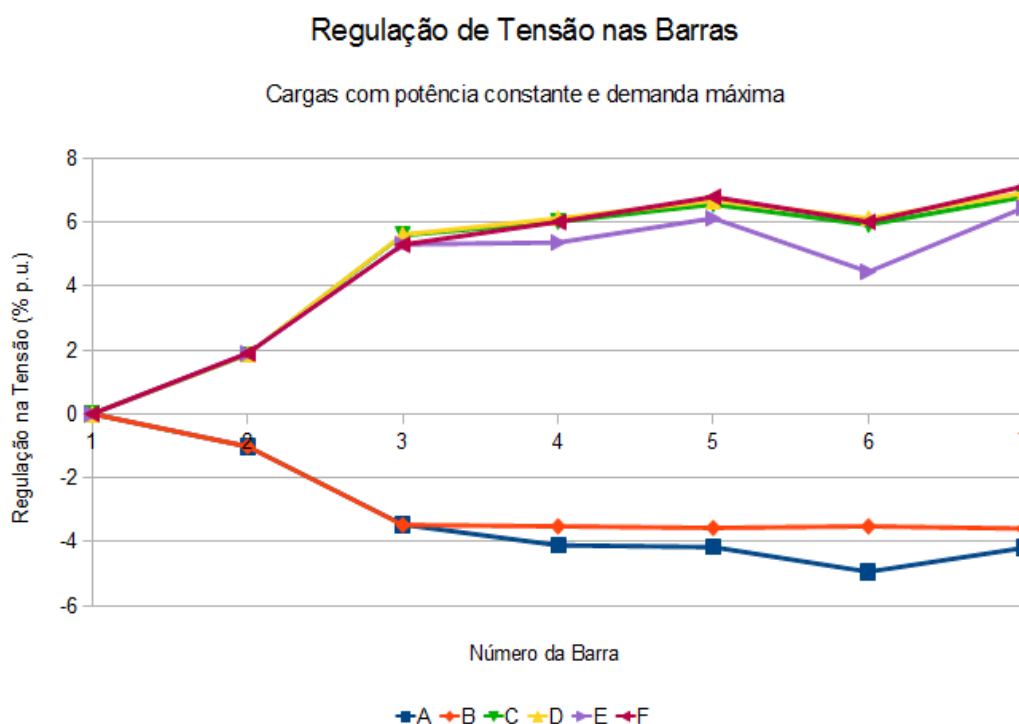


Gráfico 5 – Regulação de Tensão nas Barras para Cargas com Potência Constante e Demanda Máxima
Fonte: Autoria Própria.

Comparando-se o Gráfico 5 com o Gráfico 2, percebe-se que o comportamento do sistema é muito parecido. Para o gráfico 5 o que variam são os valores de regulação. Por exemplo, para a barra 7 e situação F, onde existe a maior regulação, o valor é de 7,12%. Esse valor é 12,6% maior que o observado para a mesma situação, considerando-se carga com impedância constante. Novamente, a regulação se mantém praticamente constante para as barras após a barra 3, para situação B. Neste ponto, percebe-se uma melhora nos valores em comparação com o Gráfico 4. Para o cenário entre a subestação e as outras cargas, com demanda máxima, no cenário atual a regulação é de 11,11% enquanto que na situação do Gráfico 5, esse valor é de 7,12%, uma redução de 35,9%. Outro exemplo é entre demanda máxima e demanda mínima, na barra 7. No gráfico 4, o valor de regulação de tensão é de 7,67%. Já para a situação D, no gráfico 5, esse valor vai para 6,91%, ou seja uma redução de 9,9%. Apesar da melhora, os valores de regulação no fim da rede estão próximos do limiar considerado adequado.

O Gráfico 6 apresenta a regulação de tensão no sistema para carga com potência constante e demanda mínima:

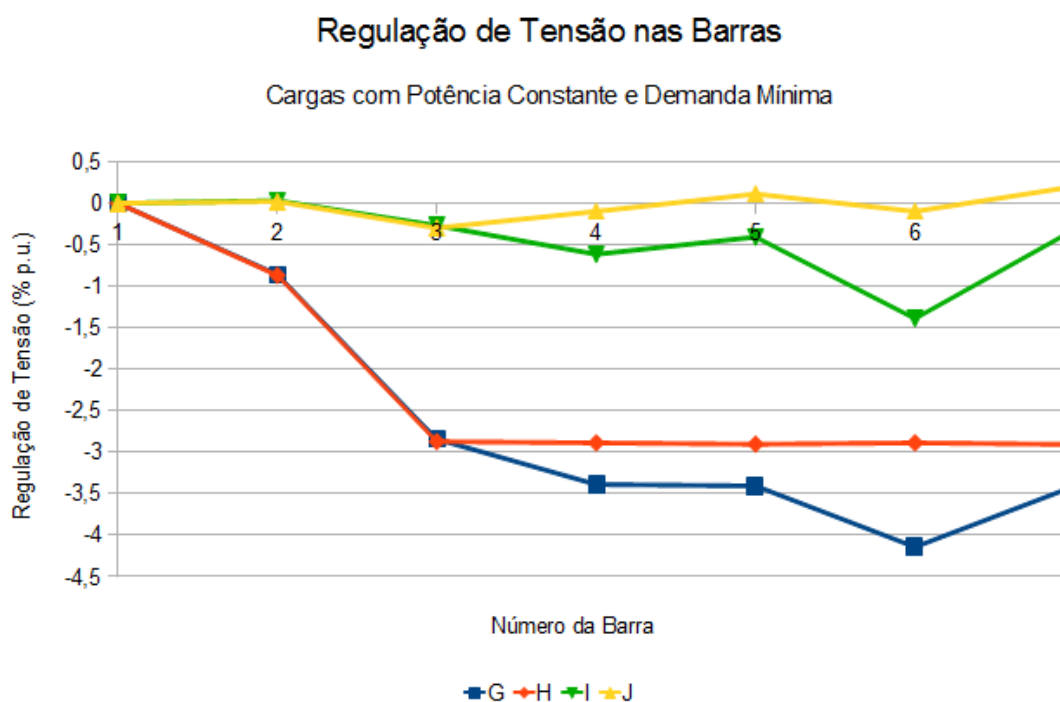


Gráfico 6 – Regulação de Tensão nas Barras para Cargas com Potência Constante e Demanda Mínima
Fonte: Autoria Própria.

O sistema comportou-se de modo análogo ao observado no Gráfico 3. O maior valor de regulação foi encontrado para a situação G, onde a regulação de tensão é de -4,14%.

Como observado, os maiores valores de regulação de tensão foram encontrados para cargas com potência constante e os menores para as de impedância constante. A Equação (3) mostra que a potência aparente de uma carga depende da tensão aplicada e do conjugado complexo da corrente na carga. Para uma carga com potência constante, qualquer variação na corrente tem que ser compensada por uma variação inversa na tensão. Como a corrente aumentava conforme as iterações eram feitas, a tensão teve que diminuir de forma a manter a potência drenada pela carga constante. Para a carga com impedância constante, se o valor da corrente aumenta, esse aumento é compensado tanto pela tensão quanto pela potência, resultando em uma variação de tensão menor (a tensão varia com a raiz quadrada da potência).

Através dos resultados encontrados para essa seção, percebeu-se que existiu uma melhoria na regulação de tensão, em comparação com os valores do sistema atual. Contudo, alguns valores de regulação ainda estão acima dos níveis

aceitáveis, principalmente ao final da rede.

4.3 Resultados Obtidos para a Compensação de Reativos

Anteriormente na seção 4.2, durante a análise do sistema já existente com a implementação da PCH, concluiu-se que a maior parte dos valores das tensões nas barras, para as simulações realizadas, estão dentro da faixa considerada adequada pela ANEEL. Durante o planejamento da expansão de uma rede de distribuição, deve-se sempre considerar a demanda futura do sistema. No caso estudado, um aumento da demanda pode fazer com que os valores de tensão, mesmo com a PCH, caiam para valores abaixo da faixa adequada, podendo trazer prejuízos tanto à concessionária quanto aos consumidores finais.

Procurando evitar o problema de afundamento de tensão, é proposta a compensação de reativos através de um banco de capacitores fixos, na barra 3. A capacidade total do banco é de 0,30MVA. Essa barra foi escolhida por possuir a carga que demanda maior potência ($1,328 + j0,750$ p.u.).

Os cenários onde existiam os maiores valores de regulação foram analisados em detalhes nessa seção. Novamente são analisados os casos de cargas com impedância constante e potência constante, porém, somente para demanda máxima. Primeiramente, no Gráfico 7 estão os dados relacionados com cargas de impedância constante e demanda máxima.

Regulação de Tensão nas Barras

Cargas com Impedância Constante, Demanda Máxima e com Compensação de Reativos

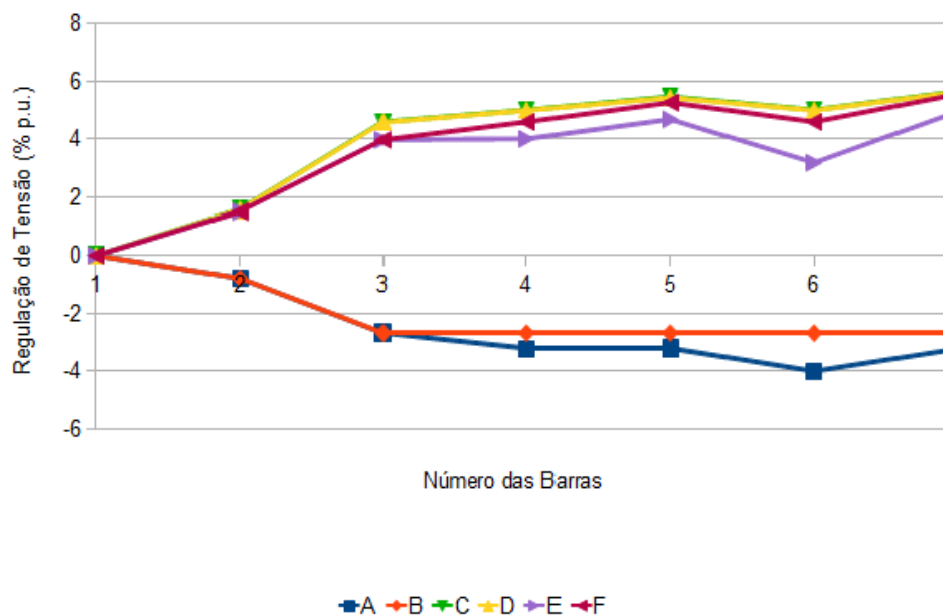


Gráfico 7 – Regulação de Tensão nas Barras para Cargas com Impedância Constante, Demanda Máxima e com Compensação de Reativos
 Fonte: Autoria Própria

Observa-se uma melhora na regulação de tensão, especialmente para as barras ao final da rede. Por exemplo, para a barra 7 e situação C, a regulação que era de 6,14% agora é de 5,63%, uma queda de 8,3%. Outro exemplo que pode ser citado é o valor de regulação na barra 6 e situação E, que era de 5,73% e é agora de 4,98%, uma redução de 13,09%. Com um suprimento de reativos localizado para a carga na barra 3, menos corrente é demandada da barra 1, proporcionando menos perdas na rede. Para as situações A e B, a compensação de reativos provocou um leve aumento na regulação. Isso pode ser verificado através dos valores encontrados, para a barra 6 e situação A, a regulação foi de -3,98% para -4,00%, um aumento de 0,5%.

Comparando-se os valores do Gráfico 7 com os do Gráfico 1, verifica-se uma queda significativa da regulação de tensão. Por exemplo, para a barra 5, considerando a situação E, o valor da regulação que era de 8,94% no sistema atual, passou para 5,45% para a situação somente com a PCH e finalmente, com PCH e compensação de reativos diminuiu para 4,67%. Uma redução total de 47,76% na

regulação de tensão. Na barra 7, a regulação inicial era de 9,23%, passou para 5,73% e por fim, 4,94%. Como resultado obteve-se uma redução total de 46,48%.

Uma situação análoga é verificada para os cenários do Gráfico 8:

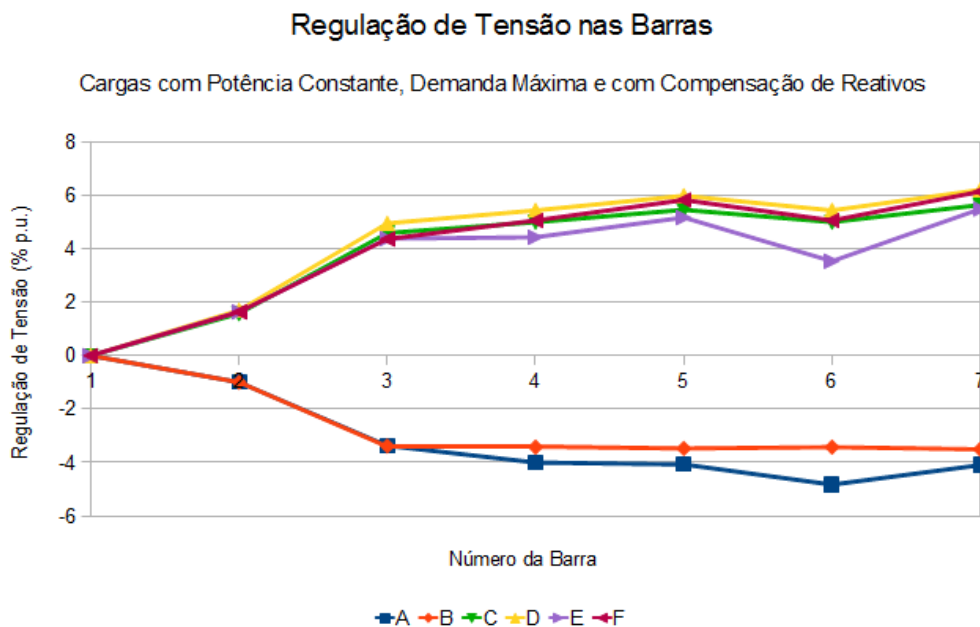


Gráfico 8 - Regulação de Tensão nas Barras para Cargas com Potência Constante, Demanda Máxima e com Compensação de Reativos
 Fonte: Autoria Própria.

Aqui observa-se uma diminuição geral da regulação de tensão, para todos os cenários estudados. No fim da rede, para a barra 7, a regulação de tensão era de 11,11%, para a situação F com PCH caiu para 7,12%, para a mesma situação, só que com compensação de reativos a regulação de tensão reduziu novamente, para 6,13%. No total, existiu uma redução de 44,82%.

Para as situações A e B também existiu redução, mas em escala muito menor. Por exemplo, na barra 6 para a situação A houve uma queda de 2,43%, um valor muito menor se comparado ao encontrado para a barra 7 e situação F.

A compensação de reativos ajudou o sistema a melhorar tanto a sua regulação de tensão quanto os níveis de tensão, agora todos dentro das faixas consideradas adequadas pela ANEEL. Com o sistema em operação nesse cenário, com PCH e compensação de reativos, as oscilações de tensão são minimizadas, evitando assim danos e mau funcionamento tanto dos equipamentos da rede quanto das cargas.

5 CONCLUSÕES

O objetivo principal desse estudo foi a avaliação do impacto de uma PCH nos níveis de tensão de um alimentador elétrico, visto que, no Brasil, o uso de geração distribuída está se intensificando, inclusive com a conexão no sistema de energia elétrica. Essa é uma forma de utilizar as fontes de energia, geralmente renováveis, que não possuam um grande potencial elétrico, mas podem ser aproveitados localmente, ajudando a alocar potência em cargas preferenciais.

Como foi visto ao longo desse trabalho, o estudo preliminar da rede de distribuição é importante para que sejam conhecidos os problemas, tanto os existentes quanto os que possam existir em virtude da adição ou remoção de equipamentos, geração e cargas. Conhecidos os problemas, pode-se pensar em possíveis soluções para um melhor funcionamento da rede como um todo, beneficiando tanto a concessionária quanto os consumidores.

A análise do sistema mostrou ao longo das seções 4.1 e 4.2 que a conexão da PCH melhorou o perfil de tensão do sistema como um todo, fazendo com que as tensões mais problemáticas, que são as encontradas no fim da rede, fossem elevadas. Isso é positivo, pois com tensões maiores, necessita-se de menos corrente e menos potência é perdida na rede. Além disso, os equipamentos funcionam melhor, pois existe uma estabilidade nos valores de tensão. Essa elevação ajudou também na diminuição da regulação de tensão. Todavia, os valores de regulação estavam relativamente elevados em comparação com os estipulados pela ANEEL, para a faixa de tensão do sistema.

Uma forma sugerida de melhorar a regulação de tensão foi por meio da instalação de um banco de capacitores fixos na barra 3, onde mais corrente é drenada. Após a análise do sistema com a PCH e com a compensação de reativos, verificou-se um aumento da regulação de tensão, que em muitos cenários se enquadrava em uma margem considerada satisfatória (entre 3,5%). Neste caso, todos os valores de tensão e de regulação estão na faixa adequada da ANEEL.

Apesar de o sistema se comportar da mesma forma quanto à regulação para todos os tipos de carga, existe uma maior regulação de tensão para as cargas com

potência constante e uma menor regulação para as cargas com impedância constante. O comportamento das cargas com corrente constante e mistas são praticamente iguais para todos os cenários, tanto nos valores de tensão quanto nos valores de regulação, possuindo valores intermediários se comparados aos de potência e impedância constante.

A melhor configuração de rede encontrada durante o estudo foi a compensação de reativos juntamente com a PCH na barra 6, pois a PCH está no centro das cargas, fornecendo potência no fim da rede, justamente onde estão as cargas que possuem menor tensão aplicada em seus terminais. Com a PCH, menos corrente é solicitada da subestação, diminuindo as perdas nos condutores da rede. A compensação de reativos suprindo a potência reativa da carga 3, que é a carga com mais demanda de potência, também ajuda a solicitar menos potência da rede. Apesar de que quando a PCH foi conectada a barra 3, ela também ajudou a melhorar a tensão e a regulação de tensão, mas em menor escala. A razão é que tanto a compensação de reativos quanto a PCH acabam injetando potência na mesma barra, enquanto que as barras ao final da rede continuam drenando corrente da subestação, embora seja em menor quantidade.

Cabe ressaltar que a configuração de rede com compensação de reativos juntamente com a PCH na barra 6 é a melhor levando-se em conta apenas o critério de nível de tensão e de regulação de tensão. Outros estudos devem ser realizados para analisar questões como harmônicos, transitórios de carga, influência da partida do motor da PCH, influência da entrada das cargas na rede, variação da geração da PCH, dentre outros fatores. Somente depois da análise de todos estes elementos importantes para o bom funcionamento da rede, consegue-se o melhor cenário de operação para a rede estudada.

REFERÊNCIAS

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional: qualidade da energia elétrica.** Brasília, 2010.

ANEEL. Resolução nº 652 de 9 de dezembro de 2003. Estabelece os critérios para o enquadramento de aproveitamento hidrelétrico na condição de Pequena Central Hidrelétrica (PCH). Brasília, DF, 10 dez 2003. Disponível em: <www.aneel.gov.br/cedoc/res2003652.pdf>. Acesso em: 05 mai 2011.

FARRET, Felix A.; SIMÕES, M. G. **Integration of Alternative Sources of Energy.** Hoboken: Wiley Interscience, 2006. p.333-339.

FRANCO, Neide B. **Cálculo Numérico.** 1. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2006. 175-176 p.

FREITAS, Waldir et al. Comparative Analysis Between Synchronous and Induction Machines for Distributed Generation Applications. **IEEE Transactions on Power Systems**, 21, February 2006. 301-311.

GRAINGER, John J.; STEVENSON JR., William D. **Power System Analysis.** 1. ed. [S.I.]: McGraw-Hill, 1994.

KAGAN, Nelson; BARIONI DE OLIVEIRA, Carlos C.; ROBBA, Ernesto J. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica.** 1. ed. São Paulo: Blucher, 2005.

KERSTING, William H. **Distribution System Modeling and Analysis.** 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2002.

KOSOW, Irving L. **Máquinas Elétricas e Transformadores.** 15. ed. São Paulo: Globo, 2005.

MILLER, Timothy J. E. **Reactive Power Control in Electric Systems.** 1. ed. New York: John Wiley & Sons, 1982.

MORREN, Johan; HAAN, Sjoerd W. H. de; FERREIRA, J. A.. Contribution of DG units

to voltage control: active and reactive power limitations. In: **Power Tech, 2005 IEEE Russia**, 2005, St. Petersburg. Disponível em: <ieeexplore.ieee.org/iel5/4488177/4524335/04524528.pdf>. Acesso em 05 abr. 2011.

PORTOLANN, Cesar. A.; CAMPAGNOLO J. M. Um Estudo sobre a Contribuição de Alívios de Carga na Regulação de Tensão em Redes Fracas. In: **VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (CBQEE)**, Santos, Ago. 2007.

SALMAN, S. K..The impact of embedded generation on voltage regulation and losses of distribution networks. In: **IEE COLLOQUIUM: The impact of embedded generation on distribution networks**, 1996, Coventry , UK. Disponível em: <ieeexplore.ieee.org/iel3/4698/13117/00600675.pdf?arnumber=600675>. Acesso em 19 mai. 2011.

SANTOS, Fernando A. C. M. D.; SANTOS, Fernando M. S. M. D. Geração Distribuída Versus Centralizada. **Millenium**, Viseu, nov. 2008. Disponível em: <<http://www.ipv.pt/millenium/Millenium35/11.pdf>>. Acesso em: 19 mai. 2011.

SCOTT, Nigel C.; ATKINSON, David J.; MORRELL, James E. Use of Load Control to Regulate Voltage on Distribution Networks With Embedded Generation. **IEEE Transactions on Power Systems**, 17, May 2002. 510-515.

SHIRMOHAMMADI, D. et al. A Compensation-based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, 3, May 1988. 753-762.

SHORT, Thomas A. **Electric Power Distribution Equipment and Systems**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2006.

SPIER, Erico. B., ROSA, Mauro. A., LEMOS, Flávio. A. B. Influência de Produtores Independentes de Energia Elétrica no Controle de Tensão de Alimentadores. In: **IV SBQEE - SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE A QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA**, Porto Alegre. Agosto 2001.

ANEXO A – Faixas de classificação de tensões – Tensões de regime permanente

Tabela 1 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 230kV

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,95TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,93TR \leq TL \leq 0,95TR$ ou $1,05TR \leq TL \leq 1,07TR$
Crítica	$TL < 0,93TR$ ou $TL > 1,07TR$

Tabela 2 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 69kV e inferior a 230kV

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,95TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,90TR \leq TL \leq 0,95TR$ ou $1,05TR \leq TL \leq 1,07TR$
Crítica	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,07TR$

Tabela 3 – Pontos de conexão em Tensão Nominal superior a 1kV e inferior a 69kV

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,90TR \leq TL \leq 0,93TR$
Crítica	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,05TR$

Tabela 4 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1kV (220V/127V)

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(201 \leq TL \leq 231) / (116 \leq TL \leq 133)$
Precária	$(189 \leq TL \leq 201$ ou $231 \leq TL \leq 233) /$ $(109 \leq TL \leq 116$ ou $133 \leq TL \leq 140)$
Crítica	$(TL < 189$ ou $TL > 233) / (TL < 109$ ou $TL > 140)$

Tabela 5 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1kV (380V/220V)

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(348 \leq TL \leq 396) / (201 \leq TL \leq 231)$
Precária	$(327 \leq TL \leq 348 \text{ ou } 396 \leq TL \leq 403) / (189 \leq TL \leq 201 \text{ ou } 231 \leq TL \leq 233)$
Crítica	$(TL < 327 \text{ ou } TL > 403) / (TL < 189 \text{ ou } TL > 233)$

Tabela 6 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1kV (254V/127V)

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(232 \leq TL \leq 264) / (116 \leq TL \leq 132)$
Precária	$(220 \leq TL \leq 232 \text{ ou } 264 \leq TL \leq 269) / (109 \leq TL \leq 116 \text{ ou } 132 \leq TL \leq 140)$
Crítica	$(TL < 220 \text{ ou } TL > 269) / (TL < 109 \text{ ou } TL > 140)$

Tabela 7 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1kV (440V/220V)

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(402 \leq TL \leq 458) / (201 \leq TL \leq 229)$
Precária	$(380 \leq TL \leq 402 \text{ ou } 458 \leq TL \leq 466) / (189 \leq TL \leq 201 \text{ ou } 229 \leq TL \leq 233)$
Crítica	$(TL < 380 \text{ ou } TL > 466) / (TL < 189 \text{ ou } TL > 233)$

Tabela 8 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1kV (208V/120V)

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(196 \leq TL \leq 229) / (113 \leq TL \leq 132)$
Precária	$(189 \leq TL \leq 196 \text{ ou } 229 \leq TL \leq 233) / (109 \leq TL \leq 113 \text{ ou } 132 \leq TL \leq 135)$
Crítica	$(TL < 189 \text{ ou } TL > 233) / (TL < 109 \text{ ou } TL > 135)$

Tabela 9 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1kV (230V/115V)

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(216 \leq TL \leq 241) / (108 TR \leq TL \leq 127)$
Precária	$(212 \leq TL \leq 216 \text{ ou } 241 \leq TL \leq 253) / (105 \leq TL \leq 108 \text{ ou } 127 \leq TL \leq 129)$
Crítica	$(TL < 212 \text{ ou } TL > 253) / (TL < 105 \text{ ou } TL > 129)$

Tabela 10 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1kV (240V/120V)

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$(216 \leq TL \leq 254) / (108 \leq TL \leq 127)$
Precária	$(212 \leq TL \leq 216 \text{ ou } 254 \leq TL \leq 260) / (106 \leq TL \leq 108 \text{ ou } 127 \leq TL \leq 130)$
Crítica	$(TL < 212 \text{ ou } TL > 260) / (TL < 106 \text{ ou } TL > 130)$

Tabela 11 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1kV (220V/110V)

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$(201 \leq TL \leq 229) / (101 \leq TL \leq 115)$
Precária	$(189 \leq TL \leq 201 \text{ ou } 229 \leq TL \leq 233) / (95 \leq TL \leq 101 \text{ ou } 115 \leq TL \leq 117)$
Crítica	$(TL < 189 \text{ ou } TL > 233) / (TL < 95 \text{ ou } TL > 117)$

Fonte: ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional: qualidade da energia elétrica.** Brasília, 2010.