

Estudo de Caso de Qualidade de Energia para Verificação de Tensão de Atendimento, Envolvendo Acessante de Geração e Reguladores de Tensão

Rodrigo Augusto Hudenski
Copel Distribuição S.A.
rodrigo.hudenski@copel.com

Matheus Teodoro da Silva Filho
Copel Distribuição S.A.
matheus@copel.com

Resumo — Um consumidor industrial possui uma Usina Térmica. Utiliza energia para atender seu processo produtivo e deseja despachar o excedente através da rede de distribuição da Copel. Foi realizado um projeto piloto, onde se permitiu à Indústria conectar-se no ponto mais próximo da rede da Copel. O objetivo deste piloto é verificar se a Indústria pode conviver com os demais consumidores existentes nas proximidades, sem provocar-lhes oscilações de tensão ou sobretensões. Durante a realização do piloto, a Indústria reclamou de problemas quanto a tensões baixas que impediam a conexão, no momento em que desejava despachar. Após ação, foi realizada medição de qualidade de energia. O presente artigo apresenta o problema, mostra providências tomadas e faz recomendações para conexões futuras deste tipo.

Palavras-chaves — Geração Distribuída, Banco Regulador de Tensão, Sobretensões, Conexão no ponto mais próximo da rede.

I. INTRODUÇÃO

A legislação da ANEEL permite que uma unidade consumidora opere como autoprodutor. Neste caso, a unidade consumidora possui alguma usina, que gera energia a ser consumida em seu processo produtivo interno. Eventualmente, a unidade consumidora gera excedentes e deseja despachá-los através da rede de distribuição. Quando isto acontece, é necessário verificar que tipo de impacto essa geração irá causar no sistema de distribuição, pois existem outros consumidores ligados nas proximidades.

A unidade consumidora em questão será doravante denominada **Indústria**. Está conectada ao sistema de distribuição em média tensão em 34,5kV, conforme ilustra a Fig. 1.

A Indústria é atendida pelo Religador de Carga **RC** enquanto consumir demanda e pelo Religador de Geração **RG** enquanto despachar demanda. É importante notar que **RC** está na barra regulada da subestação de Média Tensão, portanto, sob a ação do banco de reguladores de tensão **RT**, **RG** não o está.

As linhas Subestação Fonte/Subestação de Média Tensão e Subestação de Média Tensão/Indústria contêm ramais e derivações atendendo consumidores. A Indústria possui contrato de demanda de 1,65MW e contratou despacho de excedentes de 1,4 MW. A geração, pela Indústria, foi permitida como piloto, uma vez que simulações prévias indicavam que produziria sobretensão ao gerar ou deveria

demandar alto montante de reativos para controlar a tensão, desotimizando o sistema.

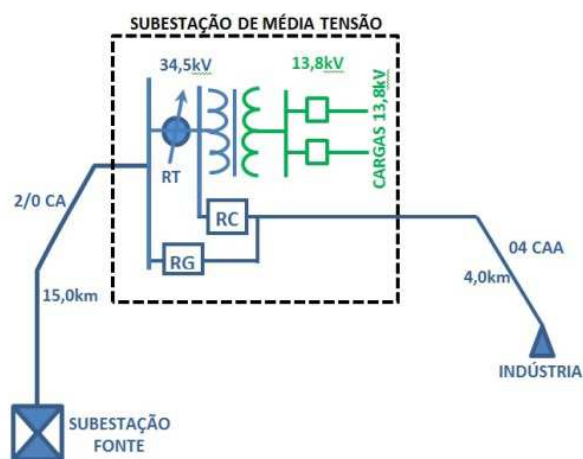


Figura 1 – Diagrama de conexão da Indústria

Durante a realização do piloto, a Indústria fez diversas reclamações à Copel. Quando desejava injetar seus excedentes, ocorria tensão baixa no ponto de conexão, o que causa o desligamento de sua usina.

Observa-se que, na subestação de média tensão, existe um equipamento utilizado para controlar o nível da tensão aos alimentadores em 13,8 kV e também ao alimentador 34,5 kV que contém a Indústria: banco de reguladores de tensão, designado por **RT** na Fig.1.

Os reguladores de tensão operam com 16 taps. No sistema de média tensão em 34,5kV da Copel, são ligados em estrela aterrada, formando bancos com três unidades monofásicas. Devido às características de funcionamento do sistema, as cargas podem desequilibrar-se, potencializando diferenças de tensão, quando não existe controle da posição dos taps dos reguladores de tensão. Isto pode causar danos a equipamentos de consumidores, bem como atuação indevida de equipamentos de proteção presentes no alimentador. Para evitar que um regulador de tensão monofásico opere sem depender do funcionamento dos demais reguladores instalados no banco, é utilizado um controle eletrônico especial, chamado de “sincronizador de reguladores monofásicos de tensão”, através do qual todos os reguladores do banco operarão sempre com o mesmo tap [5].

II. DESENVOLVIMENTO

A. Ação tomada

Havia problemas de operação com o banco de reguladores de tensão da subestação de média tensão, quando este era submetido a inversão de fluxo pela Indústria.

Adicionalmente, quando a Indústria desejava despachar energia, ligava para o Centro de Operação da Copel: o religador que atendia a Indústria com carga (**RC**) era então desligado, fechando-se o religador da geração (**RG**). Ao voltar a consumir, o religador de geração **RG** era desligado, fechando o de carga **RC** conforme Fig. 1. Isto causava diversos problemas operacionais, pois a Indústria não tinha horário certo para despachar. Um engano de manobra podia danificar o banco de reguladores de tensão **RT**. Ao ser atendida pelo religador **RG**, a Indústria era eventualmente atendida com tensão mais baixa, daí o porquê de suas reclamações.

O banco de reguladores de tensão da subestação de média tensão foi substituído por outro, de concepção moderna. Além de sincronizar os taps, os novos reguladores são capazes de operar com inversão e fluxo e têm um modo de operação especial denominado co-geração (trifásico). Então, somente o religador de carga **RC** foi usado. A Fig. 2 mostra a configuração do sistema de distribuição local, após a ação tomada.

Paralelamente, foram instalados dois medidores de qualidade de energia, um na Indústria e outro na subestação de média tensão, à saída do banco de reguladores de tensão. As medições de qualidade de energia foram realizadas com qualímetros Dranetz Power Guia, por um período de 41 dias.

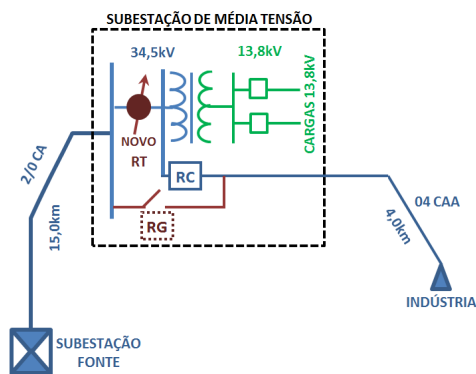


Figura 2 – Diagrama do sistema após a ação tomada

A Fig. 3 apresenta o diagrama de conexão utilizado, face à ligação do sistema 34,5kV da Copel em estrela [3].

A instalação dos medidores de qualidade de energia se justificou pelos seguintes motivos:

- Necessidade de conhecer detalhes dos impactos da geração no sistema, com valores de tensões e correntes para operação com fluxo de potência no sentido direto e no inverso e ocorrência de eventuais sobretensões.
- Embora de concepção moderna, o controlador do banco de reguladores de tensão havia falhado em armazenar o registro de tensões em ensaio anterior. Além disto, sua programação só permite o registro de valores instantâneos a cada intervalo de tempo a programar, entre 5 e 15 minutos.

- Maior confiabilidade e qualidade na investigação dos parâmetros desejados.

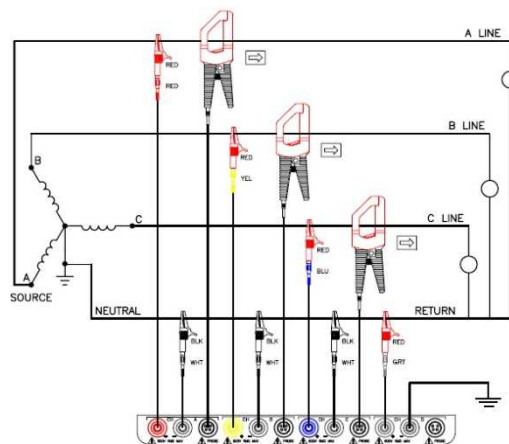


Figura 3 – Diagrama de ligação do Qualímetro

B. Tensões de contrato e de operação no sistema de média tensão da Copel

No sistema de Média Tensão da Copel, as **tensões de contrato** com os consumidores são 13,2kV para o sistema de distribuição em 13,8kV e 33,0kV para o sistema de 34,5kV.

Na **operação do sistema**, são adotados os valores nominais destes sistemas, quais sejam, 13,8kV e 34,5kV.

Então, a tensão para um consumidor qualquer, ligado no sistema de média tensão, será adequada se atender à condição $0,93TR \leq TL \leq 1,05 TR$, onde:

TR: tensão de referência;

TL: tensão de leitura.

Para o sistema de distribuição em 34,5kV, tem-se:

- $30,69kV \leq TL \leq 34,65kV$ entre fases, $TR = 33,0kV$;
- $17,72kV \leq TL \leq 20,00kV$ entre fase e neutro, $TR = 19,05kV$

Para exemplificar, quando um consumidor estiver sendo atendido com uma tensão de 19,92kV entre fase e neutro, a tensão é 1,00 p.u. para a operação do sistema, mas 1,046 p.u. em relação à tensão de contrato. Por esta razão, a Copel adota como critério que a tensão máxima permitida, pela operação, é 19,92kV (fase-neutro).

C. Resultados

Os valores de tensão avaliados e apresentados aqui são referidos à **tensão de contrato**. Em função desta referência, haverá **sobretensão** quando o valor medido superar 1,05 p.u.

Após a ação tomada, conforme figura 2, não houve mais pedidos de atuação da Indústria ao Centro de Operação da Copel, para utilizar o religador de geração **RG**. A Indústria passou a operar apenas sob ação da barra de tensão regulada da subestação de média tensão, tanto para carga, quanto geração. Isto reduziu problemas operacionais existentes ali. O controlador do banco de reguladores de tensão tem, neste caso, dois ajustes:

- Um para operação no sentido direto (fonte-carga);
- Outro, para operação no sentido inverso, que neste caso, não seria bi-direcional, mas sim, **co-geração trifásico**.

Os medidores investigaram a qualidade da energia e a operação do banco de reguladores de tensão no modo co-geração trifásico. O controlador do banco altera o ajuste de um sentido de fluxo para outro, quando a corrente passante superar 4% do valor nominal. Sendo 200 A a corrente nominal, a mudança no modo do ajuste ocorrerá quando a corrente superar 8 A, o que corresponde a 480kW.

Constatou-se que, durante o período de medição, ocorreu injeção de potência, porém esta não ultrapassou 480kW no sentido inverso, no banco de reguladores de tensão. É que, na subestação de média tensão, mesmo no horário de menor carregamento, a diferença entre a geração e a carga não superou 480kW.

Simulações de fluxo de potência indicaram, para operação da Indústria como gerador, as seguintes condições mais críticas:

- tensão mínima de 92,1% (17547V) na barra não regulada da subestação de média tensão, quando utiliza o religador RG;
- sobretensão na Indústria, com 1,053% (20078V), ao operar com fator de potência unitário;
- se a Indústria receber 1,5Mvar de reativos da rede, a sobretensão será reduzida para 1,051% (20018V).

Como existem consumidores ligados nas proximidades, esta sobretensão é indesejável, pois pode causar danos aos equipamentos destes consumidores.

C.1- Sobretensões e Reativos

A Fig. 4 mostra os dados registrados, com relação a sobretensões e reativos. Para facilitar a análise, o gráfico da fig. 4 foi dividido em três regiões de operação, a saber: regiões A, B e C. Verifica-se que, na região A, existe leve tendência de diminuição da sobretensão, pois a Indústria absorve reativos do sistema. Já na região B, há uma tendência de elevação das sobretensões, pois a Indústria está fornecendo reativos ao sistema. Neste contexto, as sobretensões aumentam, tanto em número de pontos, quanto em amplitude - há mais pontos em que a tensão ultrapassa 1,05 p.u. Ao longo do período de medição, foram registrados alguns picos de sobretensões da ordem de 1,09 p.u. Para a região C, a Indústria não despacha energia e opera com carga de aproximadamente 1 MW, com 250kvar absorvidos do sistema. A tensão diminui para 1,02 p.u médios.

Em resumo:

- na região A, a Indústria operou como gerador, atingindo tensões próximas de 1,05 p.u., e eventualmente superiores;
- na região B, a Indústria operou como gerador, porém verificam-se sobretensões em praticamente em todo o período, ou seja, tensões superiores a 1,05 p.u.;
- na região C, a Indústria operou como carga e ocorreu abaixamento da tensão, com tensões na faixa de 1,02 p.u.

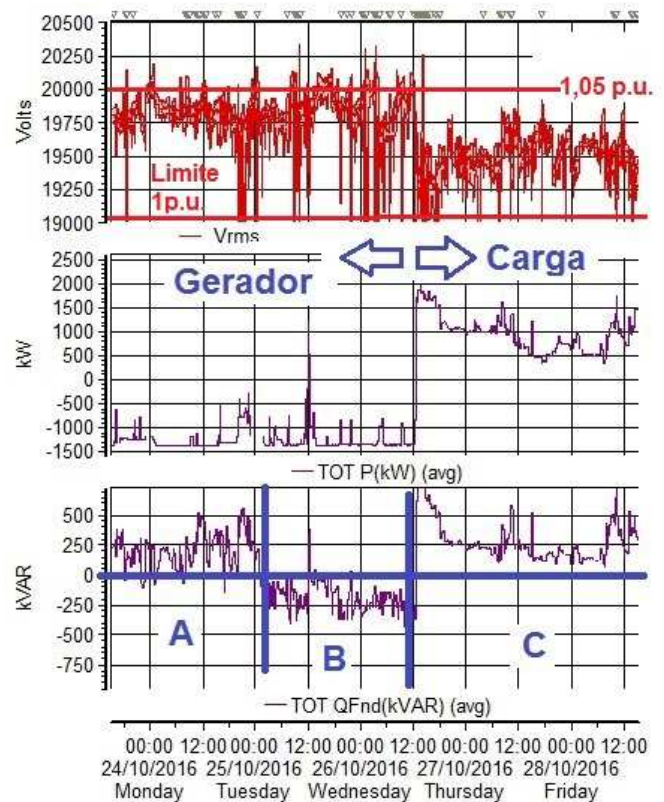


Figura 4 – Gráfico da Tensão, Potência e Reactivo na Indústria

Os dados a seguir são obtidos a partir do medidor instalado na entrada de energia da Indústria.

C.2 Fator de Potência

Conforme [2], e [4] tanto para consumidor, quanto para acessante, o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 indutivo ou capacitivo e 1,00.

A Fig. 5 apresenta o comportamento do fator de potência para operação como carga e como geração.

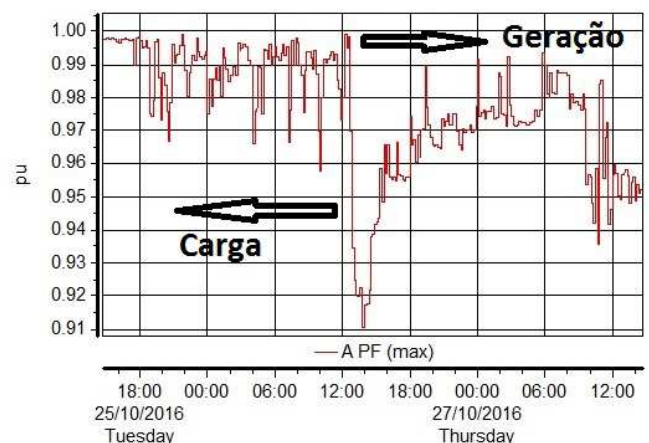


Figura 05 – Fator de Potência

Verifica-se que, durante a operação como carga, os fatores de potência oscilaram entre 0,95 e 1 indutivo. Já na mudança de sentido do fluxo de energia, houve uma queda brusca para 0,91 indutivo, que se seguiu a uma elevação. De forma geral, há maior variação do fator de potência durante a operação como gerador, ora absorvendo, ora fornecendo reativos ao sistema. Em alguns períodos, absorve reativo do sistema e em

outros fornece reativos ao sistema. Esta dinâmica é regida de forma a tentar evitar a sobretensão / subtensão no ponto de conexão.

C.3 Distorção Harmônica

As distorções harmônicas são fenômenos associados a deformações de ondas de tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental. A referência [4] estabelece limites para as distorções harmônicas totais, quais sejam, para tensões entre 1 kV a 69 kV, este valor é de 8% em relação à tensão fundamental. A Fig. 6 apresenta o gráfico da distorção harmônica total para operação como carga e gerador. A distorção harmônica é função direta da contribuição de cargas não lineares instaladas pelos consumidores, que podem ter o seu efeito amplificado por equipamentos do sistema de distribuição, como por exemplo,

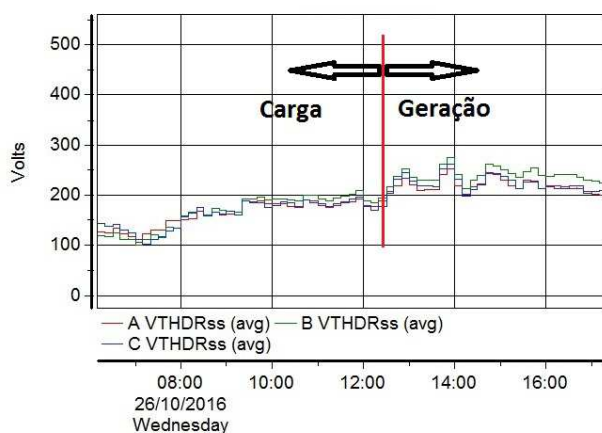


Figura 6 – Distorção Harmônica Total

capacitores. As cargas não lineares produzem correntes com elevado nível de distorção, que alteram a forma de onda da tensão. Verifica-se que, durante o período de medição, tanto como carga quanto geração, os valores integralizados de distorção harmônica de tensão permaneceram da ordem de 300 volts, o que corresponde 1,6%. Atendem, portanto, a regulamentação vigente.

C.3 Desequilíbrio de Tensão

O desequilíbrio de tensão é o fenômeno caracterizado por qualquer diferença verificada nas amplitudes entre as três tensões de fase de um determinado sistema trifásico, e/ou na defasagem elétrica de 120° entre as tensões de fase do mesmo sistema. Para a rede em análise, o indicador de desequilíbrio de tensão FD95% não deve superar 2%, conforme [1].

Na Fig. 7, observa-se que os valores de desequilíbrio de tensão atendem à regulamentação, pois durante todo o período de medição, permaneceram abaixo de 2%.

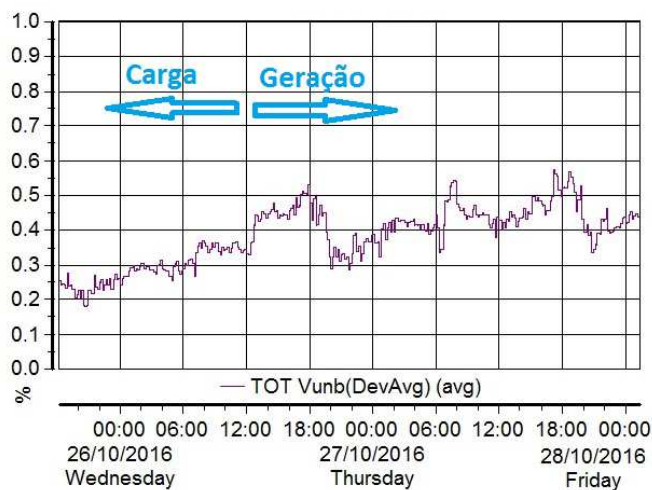


Figura 7 – Desequilíbrio de Tensão

C.4 Flutuação de Tensão

A flutuação de tensão é um fenômeno caracterizado pela variação aleatória, repetitiva ou esporádica, do valor eficaz ou de pico da tensão instantânea. Conforme [1], os limites a serem utilizados para avaliação do desempenho do sistema de distribuição, para tensão nominal entre 1kV e 69kV, conhecido como Severidade de Flutuação de Tensão de Curta duração - Pst95%, deve ser de até 1,5 p.u. Os resultados obtidos são apresentados na Fig. 8: os valores registrados de Pst95% estão dentro do critério estabelecido pela ANEEL em regime permanente de tensão. Os poucos casos de superação registrados são momentâneos e decorrem de eventos característicos do sistema aéreo, tais como curtos-circuitos.

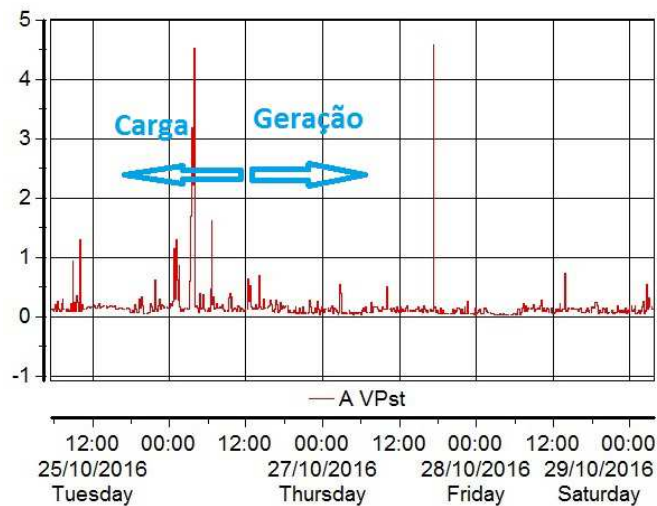


Figura 8 – Flutuação de Tensão

C.5 Variação de Frequência

De acordo com [1], o sistema de distribuição e as instalações de gerações conectadas ao mesmo devem operar, em condições normais de regime permanente, dentro dos limites de frequência situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz. Verifica-se, através da Fig.9, que os valores de frequência atendem à regulamentação.

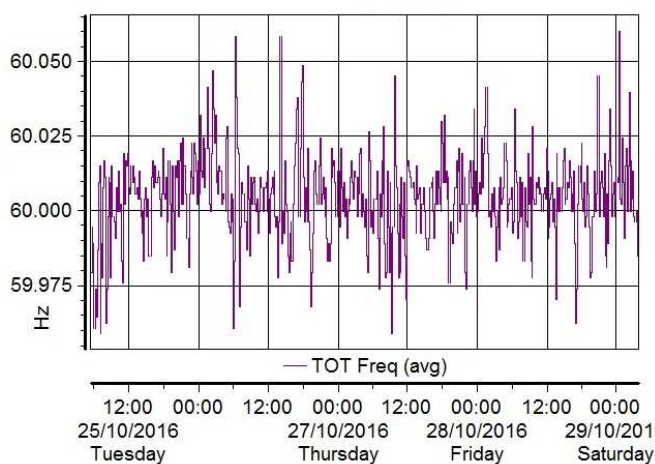


Figura 9 - Frequência

C.6 Variação de Tensão de Curta Duração

Variações de tensão de curta duração (VTCD) são desvios significativos na amplitude do valor eficaz de tensão durante um intervalo de tempo inferior a três minutos. À época do ensaio, final de 2016, a revisão 7 do Módulo de qualidade de energia, [1], estabelecia que: A severidade de VTCD, medida entre fase e neutro de determinado barramento é caracterizada pela quantidade de vezes que cada combinação dos parâmetros de duração e amplitude ocorrem em determinado período de tempo ao longo do qual o barramento tenha sido monitorado. Para melhor análise deste fenômeno, utilizou-se a curva ITIC, gerada pelo medidor [3], a qual é apresentada na Fig. 10.

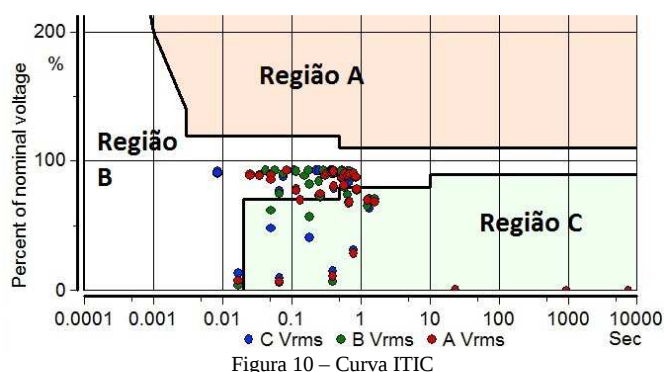


Figura 10 – Curva ITIC

Esta curva apresenta três regiões: Região A, sujeita a danos por elevação de tensão. Região B, região de tolerância de tensão. Região C, sujeita a afundamentos de tensão. Verifica-se registros de VTCD na região C: tais eventos são comumente causados por curtos-circuitos nas redes adjacentes de transmissão ou distribuição. Quando isto ocorre, a corrente de curto circuito, que flui em direção ao ponto de falha, provoca uma queda de tensão nas barras das subestações, afetando os alimentadores que estão ligados nesta barra. Os afundamentos momentâneos de tensão estão e sempre estiveram presentes, pois são uma característica dos sistemas aéreos de distribuição. De acordo com o item 7.6.1 do Prodist [1], “Não são atribuídos padrões de desempenho a estes fenômenos” (VTCD).

Com a revisão 8 do Módulo de qualidade de energia [2], vigente a partir de 01/01/2017, foi estabelecido o índice Fator de Impacto. Entretanto, é estabelecido apenas um valor

referencial para o índice Fator de Impacto, de acordo com [2].

D. Análise dos resultados

A ação tomada foi capaz de diminuir os problemas operacionais que demandavam do Centro de Operação da Copel estar sempre à disposição para acionar os religadores automáticos, conforme a Indústria quisesse consumir ou despachar demanda.

Com relação ao uso dos reguladores de tensão, constatou-se, entretanto, que a função co-geração trifásico do equipamento não chegou a ser acionada. Devido ao balanço entre geração da Indústria e carga da subestação de média tensão, o resultado sempre foi inferior ao mínimo exigido para que o equipamento comutasse para os ajustes no modo de fluxo inverso, que neste caso, seria co-geração trifásico.

No modo co-geração trifásico, embora com inversão de fluxo, os reguladores de tensão devem controlar a tensão do lado da carga, como mostra a Fig. 11.

Portanto, o banco de reguladores de tensão trabalhou o tempo todo com os ajustes para o sentido normal de fluxo.

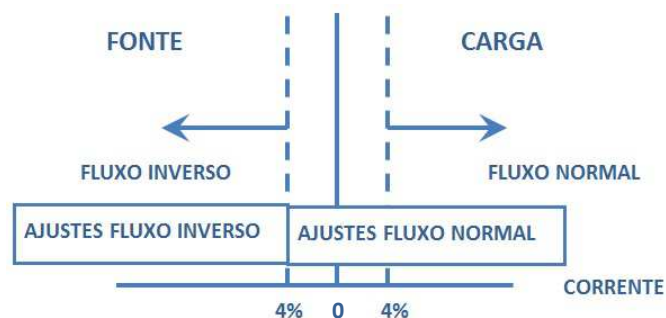


Figura 11 - Modo co-geração trifásico

A tensão fornecida à Indústria se tornou melhor para consumir demanda e partir suas máquinas geradoras, pois passou a ser atendida a todo momento pela barra com tensão regulada da subestação de média tensão. Na operação como gerador, foram constatados pontos com sobretensão.

A figura 12 mostra o comportamento da tensão na Indústria, que varia conforme opera como gerador, absorvendo ou gerando reativos, assim como consumidor de demanda. Destaca-se um pico de tensão de 20.750V ou 1,09 p.u., quando operou como gerador.

A figura 13 mostra o perfil de tensão no barramento regulado da subestação de média tensão. Ali, a tensão deve ser mantida dentro da faixa de ajuste do controlador dos reguladores de tensão: 19.353 a 19.823V. Devido a variações da carga e do sistema, a tensão eventualmente sai desta faixa. Então, após 30 segundos, os reguladores comutam taps até restabelecer o nível de tensão para dentro da faixa.

A operação da Indústria nos variados modos da figura 12 não influenciou o padrão de tensão na barra da subestação de média tensão.

Não houve desconformidade quanto aos demais parâmetros avaliados: tensão em regime permanente; flutuação de tensão; variação da frequência; desequilíbrios de tensão, distorção harmônica total e Variação de Tensão de Curta Duração.

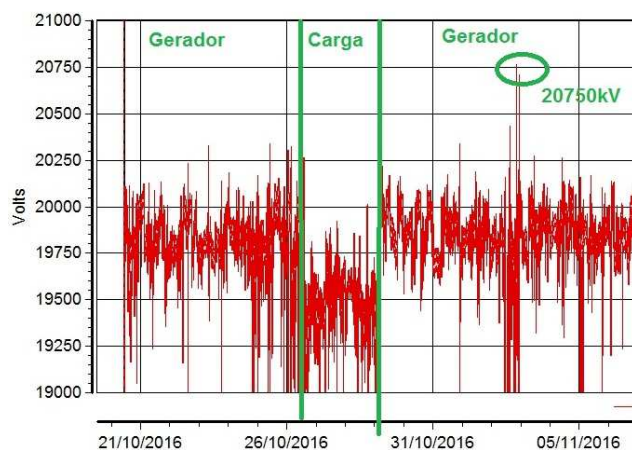


Figura 12 – Amplitude de tensão fase-neutro no período de 21/10/2016 – 05/11/2016, medição na entrada de energia da Indústria

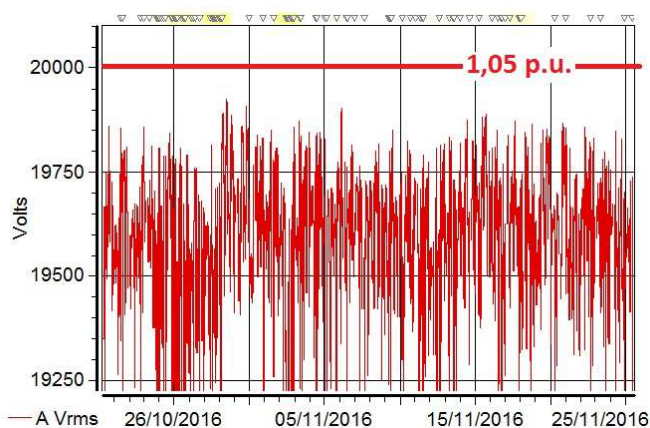


Figura 13 – Amplitude de tensão fase-neutro no período de 22/10/2016 – 05/11/2016, medição no barramento regulado da subestação de média tensão

III. CONCLUSÃO

A substituição do equipamento de regulação por outro de concepção moderna permitiu maior flexibilidade na subestação de média tensão e otimizar o trabalho do Centro de Operação da Copel.

O banco de reguladores de tensão melhorou a tensão de atendimento à Indústria, porém atende também outros consumidores da Copel. É necessário fazer as seguintes ressalvas:

- Tensão instantânea no momento do início do despacho pela Indústria: a Copel garantiu a tensão dentro da faixa estabelecida pelo Prodlist, no ponto de conexão. Se, devido à Indústria, a tensão tiver que ser reajustada, os reguladores são concebidos para atuar somente após um tempo de retardo, ajustando então a tensão conforme parametrizado por seu controle eletrônico.
- corrente mínima para mudança do modo de operação conforme sentido do fluxo: o controle eletrônico tem um limiar para a corrente, que requer uma potência passante mínima de 480kW para mudar o modo de operação.
- modo co-geração trifásico: não pode ser avaliado, pois a corrente de limiar, imposta pelo equipamento, não foi alcançada.

Verificou-se, durante a operação da Indústria como gerador, a elevação do padrão de tensão no ponto de conexão. A variação dos reativos das máquinas da Indústria pode levar a sobretensões. Com efeito, ocorreram sobretensões de até 1,09 p.u. no ponto de conexão.

As variações de tensão na Indústria não foram reproduzidas no barramento da subestação de média tensão. É que o nível de curto-circuito neste barramento é consideravelmente alto, garantindo que a subestação defina a tensão na barra.

Verificou-se que os dados de medição estão aderentes com as simulações, validando os modelos utilizados.

Os resultados obtidos dos dois equipamentos de medição de qualidade de energia se mostraram harmoniosos. Portanto, à exceção dos níveis de tensão, não houve necessidade de realizar comparações entre os parâmetros registrados.

Recomenda-se:

- da parte dos acessantes que, na etapa inicial de seus empreendimentos, realizem estudos visando ao efetivo controle das eventuais sobretensões; podem ser atenuadas mediante variação dos reativos de suas máquinas, desde que respeitados os limites legais para a variação do fator de potência; o uso de condutores de maior bitola para as linhas que devem construir também tem se mostrado eficiente para reduzir sobretensões.
- ao fabricante do equipamento regulador de tensão, que analise a possibilidade de seu controle trabalhar com uma corrente de limiar menor (por exemplo, 2% da corrente nominal), para detecção de inversão de fluxo e utilização do ajuste correspondente ao sentido do fluxo.
- como sugestão para trabalhos futuros, a avaliação em alimentador onde a geração do acessante é maior que a carga, de modo que acione a função co-geração trifásico, porém como piloto, até possibilitar a conclusão de que o equipamento opera satisfatoriamente; o equipamento não é exclusivo para atender o acessante de geração, mas também vários outros consumidores que estão ligados no alimentador.

IV. REFERÊNCIAS

- [1] Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica”, Revisão 7 Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/modulo-8>>. Acesso em: 20/02/2017.
- [2] Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica”, Revisão 8 Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/modulo-8>>. Acesso em: 20/02/2017.
- [3] Dranetz, “Power Visa User’s Guide,” New Jersey, 2005.
- [4] Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, “Procedimentos de Rede – Submódulo 3.6, Requisitos Técnicos Mínimos para a Conexão às Instalações de Transmissão”, Revisão 2016.12 Disponível em: <http://apps05.ons.org.br/procedimentorede/procedimento_rede/procedimento_rede.aspx>. Acesso em: 20/02/2017.
- [5] Tapeleto, “Sincronizador de Reguladores de Tensão Monofásicos RUA01”. Tap Eletro Sistemas Ltda. Manual de Instruções”, Abril/2012.