



**XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica**  
**SENDI 2012 - 22 a 26 de outubro**  
**Rio de Janeiro - RJ - Brasil**

JUAN CARLOS CEBRIAN	Sinapsis Inovação em Energia s/s Ltda	juan.cebrian@sinapsisenergia.com
Daniela V. Kondo	Sinapsis Inovação em Energia s/s Ltda	daniela.kondo@sinapsisenergia.com
Ricardo Tufaniuk	AES Eletropaulo Metropolitana - Eletr. de São Paulo S.A.	ricardo.tufaniuk@aes.com
Marcelo Aparecido Pelegrini	Sinapsis Inovação em Energia s/s Ltda	marcelo.pelegrini@sinapsisenergia.com
Joao C. Guaraldo	Sinapsis Inovação em Energia s/s Ltda	joao.guaraldo@sinapsisenergia.com
Francisco da Costa Saraiva Filho	Universidade de São Paulo	saraiva@fei.edu.br
Silvio Xavier Duarte	Universidade de São Paulo	xavier@pea.usp.br
Tiago Poles de Souza	Universidade de São Paulo	tiagopoles@pea.usp.br

**Simulador Computacional de Obras Corretivas com Foco nas Reclamações de Níveis de Tensão Precária e Crítica em Redes Elétricas de Distribuição**

**Palavras-chave**

Estimação de Estados  
Ferramenta computacional  
Reclamação de Tensão  
Redes de Baixa Tensão  
Regulador de Tensão

**Resumo**

Neste artigo, apresenta-se um simulador computacional de obras corretivas na rede de distribuição de baixa tensão, para atender de forma mais eficiente a reclamações específicas de um consumidor ou grupo de consumidores com problemas de nível de tensão, conforme o Módulo 8 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica). O simulador foi baseado na plataforma de desenvolvimento SINAP T&D. Funcionalidades como importação de medições de tensões dos consumidores, análise de rede de baixa tensão com regulador de tensão, avaliação de índices da qualidade do nível de tensão antes de depois de uma obra candidata, existentes nesta ferramenta, permitem dar mais informações às equipes de atendimento nas concessionárias durante o diagnóstico, avaliação e decisão de alternativas de planejamento mais apropriadas. O sistema foi testado, utilizando casos de reclamações reais. Os resultados são apresentados e discutidos.

**1. Introdução**

Nos últimos anos, o interesse dos consumidores quanto aos problemas com a QEE (Qualidade da Energia

Elétrica) fornecida pelas concessionárias de distribuição é cada vez maior, em consequência do aumento do nível da sensibilidade dos equipamentos utilizados nas instalações dos consumidores [1][2]. Estes equipamentos eletroeletrônicos utilizados nas mais variadas atividades da sociedade moderna (por exemplo, o tratamento de dados, a comunicação e o controle do processo de produção) estão cada vez mais sensíveis às variações da QEE fornecida. Tais equipamentos tanto podem causar distúrbios eletromagnéticos como serem afetados por eles. Isso tem ocasionado diversos transtornos, além de enormes prejuízos nos setores industriais e comerciais devido a paradas de produção, o que mostra a grande importância do estudo atual para determinar ações corretivas mais apropriadas.

Por outro lado, a elaboração do PRODIST [3] (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica) fornece ferramentas que permitem aos usuários definir limites na QEE fornecida pelas empresas concessionárias de distribuição. Os consumidores que não acreditarem que o nível de tensão fornecida esteja dentro dos limites regulatórios têm o direito de formalizar uma reclamação à empresa concessionária, a qual tem o dever de resolver o problema do consumidor dentro de um prazo também regulamentado.

O PRODIST define três tipos de limites para definir os níveis de tensão. Organizados por nível de severidade eles são: Crítica, Precária e Adequada. Segundo os dados históricos da empresa AES-Eletropaulo[4], da quantidade total de reclamações recebidas, o número de reclamações dadas como procedentes (para casos de níveis de tensão) são abaixo de 35%. Dentro deste conjunto, a quantidade de reclamações procedentes críticas chega a aproximadamente 75%. Para atender esta demanda, uma série de projetos e obras devem ser elaboradas, visando à normalização do nível de tensão dos consumidores reclamantes.

Considerando estatísticas como essas, o presente trabalho apresenta um sistema que integra informações das empresas distribuidoras, com a finalidade de analisar e resolver grande quantidade dos problemas de nível de tensão, verificando as áreas de atendimentos mais requisitadas, bem como a severidade do deslocamento do nível de tensão (precária ou crítica) fora do nível normal de operação.

O sistema proposto (SICCO) simula as condições da tensão na rede no consumidor reclamante, antes e após a elaboração de uma obra corretiva. Com isso, é possível avaliar se a obra proposta poderá resolver o problema de nível de tensão no consumidor reclamante, sem comprometer o funcionamento operacional dos outros consumidores vizinhos.

## **A. Principais funcionalidades**

O SICCO foi desenvolvido no ambiente de simulação SINAP T&D. A seguir as suas principais funcionalidades:

- Importação dos dados de rede de baixa e/ou de media tensão e de medição em alguns consumidores;
- Execução de um estimador de estados desequilibrado;
- Utilização de modelos elétricos de diferentes reguladores de tensão (trifásico, bifásico e monofásico);
- Apresentação de Relatórios customizados.

## **2. Desenvolvimento**

Para o cálculo dos valores dos perfis de tensão em todas as barras que alimentam os consumidores, é necessário utilizar como base a informação proveniente das medições no consumidor reclamante e estimar o valor das tensões nas barras que não possuem medição.

Existem na literatura algoritmos de estimação de estado, a partir de medidores estrategicamente instalados

[6]; por outro lado, a correta utilização desses algoritmos implica duas principais dificuldades: a primeira é a necessidade de múltiplos pontos de medição; e a segunda, os equipamentos de medição devem possuir relógios corretamente e constantemente sincronizados.

Para esse trabalho, a limitante de só um ponto de medição (medição no consumidor reclamante) não produz informações suficientes para que algoritmos de estimação de estado consigam resultados atraentes. Porém, é possível aplicar uma formulação prática e simples que consiga uma aproximação aceitável. Os critérios utilizados no SICCO serão apresentados nos próximos itens.

### A. Ajuste de Tensão a partir de dados medidos

O método para realizar o ajuste de tensão considera primeiramente que os consumidores operem com a sua curva de demanda típica. Esta consideração inicial deve ser corrigida a partir das medições reais do consumidor reclamante. As equações (1) e (2) mostram a forma de refletir o comportamento da tensão medida no consumidor, na barra de suprimento.

$$fc_p = Vm_p^k - Vc_p^k \quad (1)$$

$$V_p^S = Vc_p^S + fc_p \quad (2)$$

Em que:

$p$ : índice do patamar da carga típica;

$fc_p$ : Fator de correção para o patamar  $p$ ;

$Vm_p^k$ : Tensão medida no consumidor reclamante  $k$  no patamar  $p$ ;

$Vc_p^k$ : Tensão calculada no consumidor reclamante  $k$  no patamar  $p$ ;

$V_p^S$ : Tensão ajustada na barra do suprimento no patamar  $p$ ;

$Vc_p^S$ : Tensão calculada na barra do suprimento no patamar  $p$ ;

### B. Fluxo de Potência

Após realizar o ajuste na barra do suprimento, é possível utilizar um fluxo de potência trifásico desequilibrado, que permita calcular as grandezas elétricas para a rede de distribuição onde o consumidor está instalado.

A partir das informações de tensão provenientes do fluxo de potência, é possível calcular os índices de DRP e DRC para cada consumidor existente na rede de distribuição de baixa tensão, seja reclamante ou não [5]. Estes índices podem ser calculados também durante a simulação de uma obra corretiva sob estudo, permitido assim a posterior comparação.

### C. Regulador de tensão como opção de planejamento corretivo

Além de obras corretivas como mudança de “taps” nos transformadores MT/BT e recondutoramento de trechos, o presente trabalho propõe a alternativa de instalação de reguladores de tensão monofásicos, bifásicos ou trifásicos[5], no consumidor reclamante ou em outros pontos da rede, de forma a ajustar o nível

de tensão do consumidor reclamante e de outros próximos que poderiam estar enfrentando o mesmo problema[6].

O modelo elétrico utilizado no SICCO para o regulador de tensão segue os mesmos conceitos de um autotransformador com critérios de controle de tensão. Ele verifica a tensão na entrada do regulador  $VRT_E^k$  e a partir dela ajusta um valor de “tap” 1:a (entrada:saída). A regra para ajuste de “tap” é a seguinte:

$$R = \begin{cases} V_{ar_E^k} < 0,8770 & \rightarrow R = 1,1750 \\ 0,8770 \leq V_{ar_E^k} < 0,9500 & \rightarrow R = 1,0841 \\ 0,9500 \leq V_{ar_E^k} < 1,0300 & \rightarrow R = 1,0000 \\ 1,0300 \leq V_{ar_E^k} < 1,1167 & \rightarrow R = 0,9230 \\ \text{Outros Casos} & \rightarrow R = 0,8510 \end{cases} \quad (3)$$

$$VRT_S^k = I/R \quad (4)$$

Em que:

$VRT_E^k$ : Tensão de entrada do regulador de tensão instalado na barra k;

$VRT_S^k$ : Tensão de saída do regulador de tensão instalado na barra k;

$R$ : Relação de transformação.

#### D. Fluxo de Dados

A transferência de dados entre os sistemas corporativos das concessionárias e o SICCO é feita através de arquivos TXT. Opcionalmente, os dados poderão ser transferidos através de arquivos ACCESS ou XML no formato adequado aos módulos de importação já disponíveis na plataforma de desenvolvimento SINAP T&D. O fluxo de dados do aplicativo é ilustrado na Figura 1 a seguir:

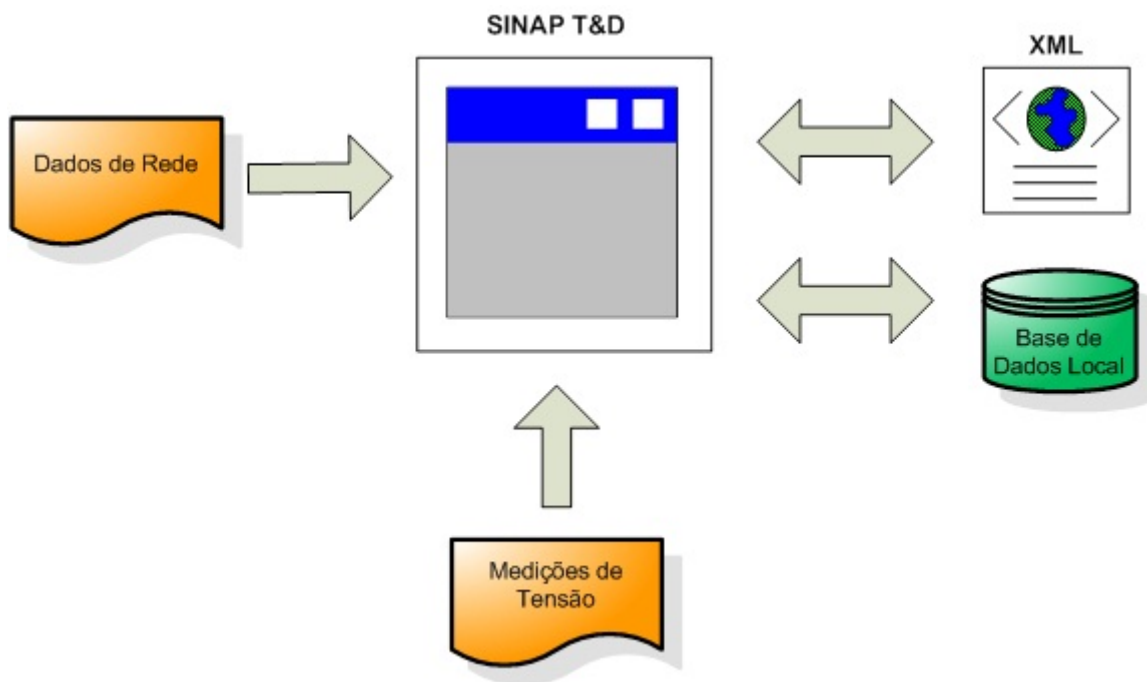


Figura 1 - Arquitetura do SICCO

## E. Algoritmo Computacional

A seguir, descrevem-se os passos necessários para realizar o estudo de regulação individual de tensão em consumidores instalados nas redes de distribuição que apresentam problemas de tensão, utilizando a plataforma de desenvolvimento SINAP T&D.

- 1.- Carregar os parâmetros elétricos da rede de distribuição que contém o consumidor reclamante;
- 2.- Carregar as curvas de carga típicas de todos os consumidores existentes na rede sobre análise;
- 3.- Executar o Módulo de Fluxo de Potência para cada patamar de carga;
- 4.- Perguntar: existe algum patamar em que o consumidor reclamante apresente problema de tensão? Caso Sim, ir para passo 5, caso contrário ir para o passo 7;
- 5.- Simular a instalação de um regulador de tensão no consumidor reclamante ou com problema de nível de tensão;
- 6.- Perguntar: existe algum outro consumidor com algum problema de nível de tensão? Caso Sim, ir para o passo 5, caso contrário ir para o passo 7;
- 7.- Mostrar relatório com os perfis de tensão para todos os consumidores em cada patamar de carga.

A Figura 2 mostra o diagrama de fluxo utilizado para a regulação individual de tensão.

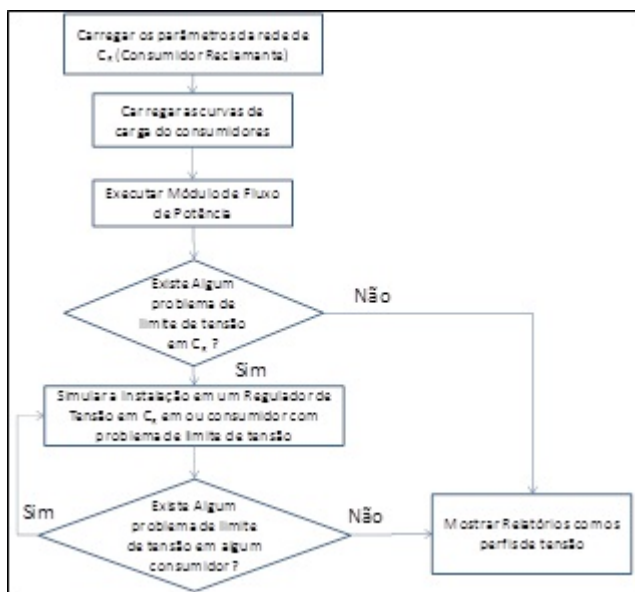


Figura 2. Fluxograma para o regulador individual de tensão.

## F. Resultados

O sistema computacional proposto permite calcular os índices de DRP e DRC para cada consumidor existente na rede de baixa tensão a partir das medições de tensão feitas no consumidor reclamante. Assim, também é possível simular a instalação de um regulador de tensão em diferentes pontos da rede, avaliando o efeito da instalação sem a necessidade de investimentos em obras desnecessárias.

Para realizar o cálculo que permita a obtenção dos valores dos perfis de tensão, foi necessário utilizar um fluxo de potência que permita calcular as grandezas elétricas para a rede de distribuição onde o consumidor está instalado. O modelo utilizado para a execução do fluxo de potência é um dos módulos existentes dentro do SINAP T&D. Após a execução do fluxo de potência, antes e depois da simulação da instalação do regulador de tensão, é possível calcular os índices de DRP e DRC para cada consumidor reclamante ou não existente na rede de distribuição de baixa tensão.

Das figuras 3 e 4 é possível observar a distribuição das faixas de tensão nas fases envolvidas, os perfis de tensão e os índices calculados para as faixas adequadas, precárias e críticas de tensão fornecidas ao consumidor. Podem também ser observadas as cores da rede, sendo que as barras e trechos vermelhos e amarelos representam, respectivamente, os casos de piores índices DRC e DRP, comparados entre as fases da rede.

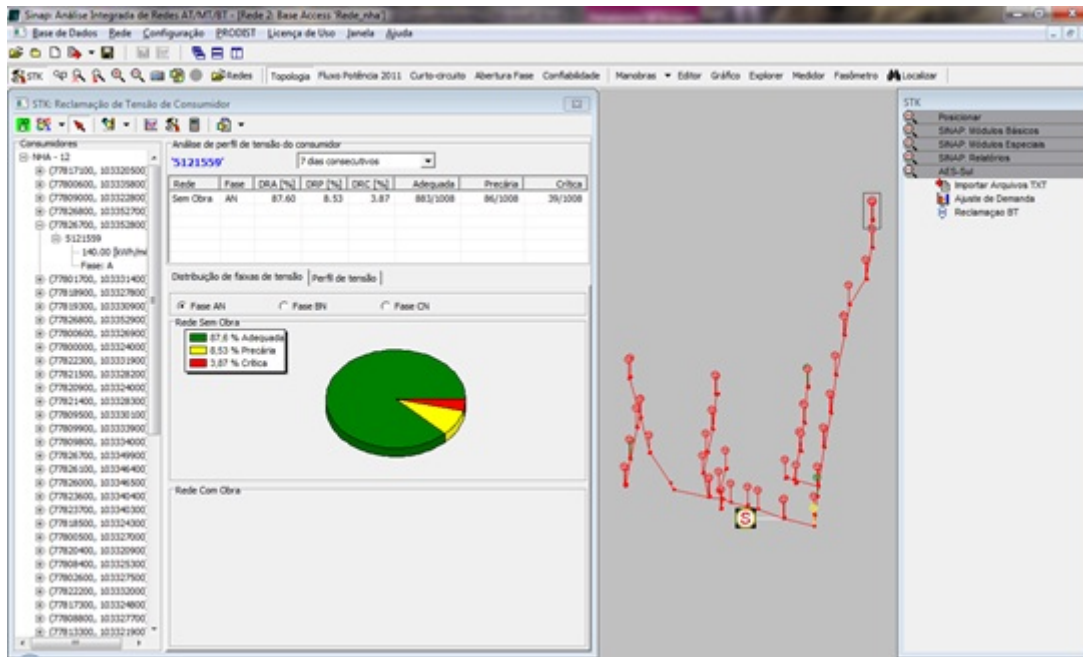


Figura 3 – Distribuição das faixas de tensão na fase AN

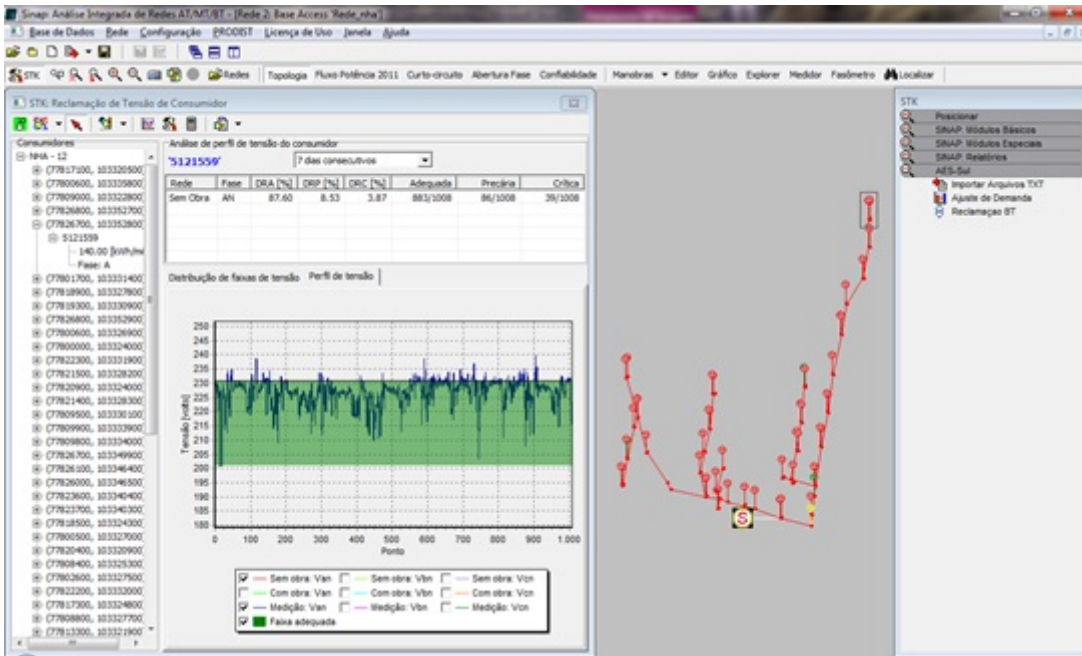


Figura 4 – Perfil de tensão das medições Van

Observa-se nas Figuras 5 e 6 a simulação da instalação de um regulador de tensão em uma das barras da rede. Após a sua instalação, é possível obter os novos valores de DRA, DRP, DRC para o mesmo consumidor reclamante (indicados como “sem obra” e “com obra” pelo software) e nova distribuição das faixas de tensão nas fases envolvidas, os perfis de tensão e os índices calculados para as faixas adequadas, precárias e críticas de tensão fornecidas ao consumidor.

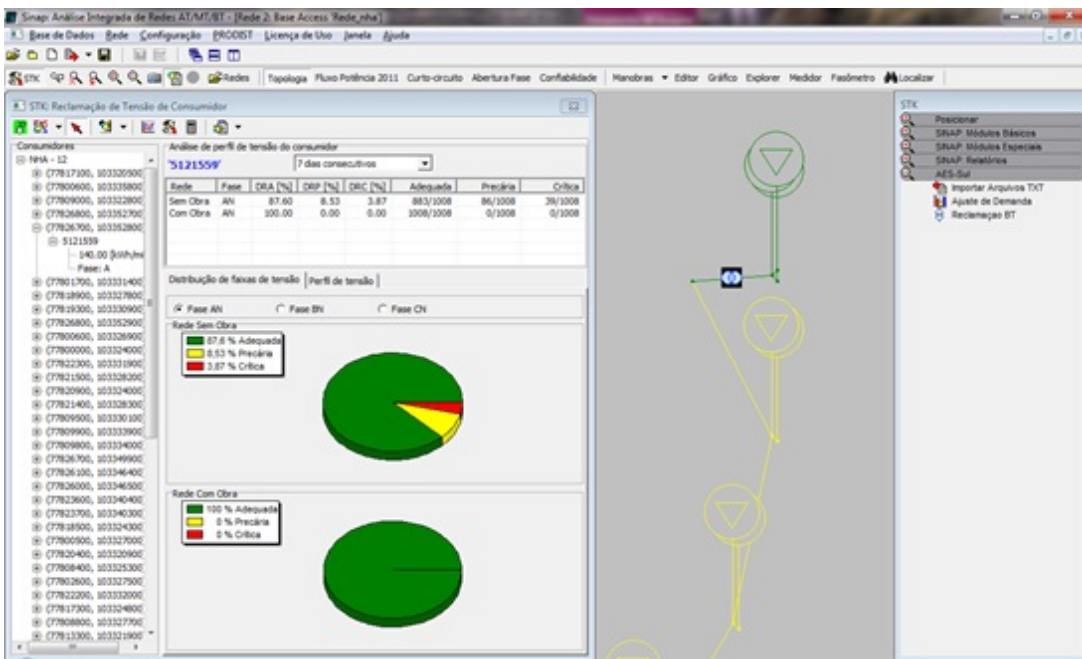


Figura 5 – Nova distribuição de faixas de tensão na fase AN

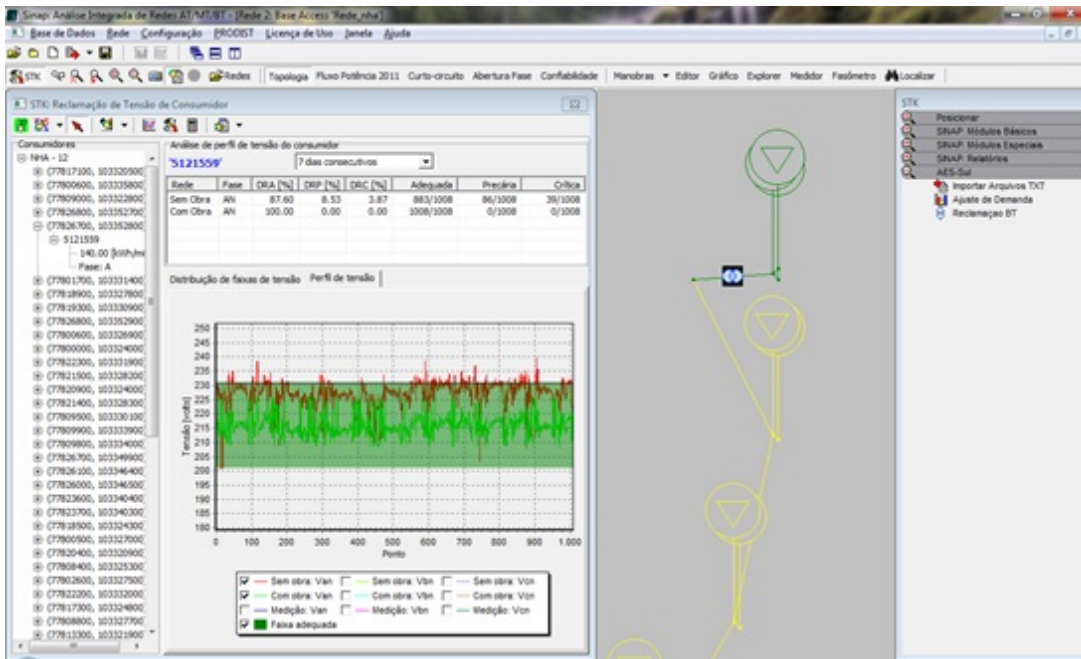


Figura 6 – Novo perfil de tensão, comparando antes e depois da obra, em  $V_{an}$

Comparando os resultados da Figura 7 antes e depois da instalação do regulador, é possível visualizar a melhoria dos índices de DRA, DRP, DRC para o consumidor reclamante.

Rede	Fase	DRA [%]	DRP [%]	DRC [%]	Adequada	Precária	Crítica
Sem Obra	AN	87.60	8.53	3.87	883/1008	86/1008	39/1008
Com Obra	AN	100.00	0.00	0.00	1008/1008	0/1008	0/1008

Figura 7. Valores de DRA, DRP e DRC antes de depois da instalação de um regulador de tensão no consumidor reclamante.

### 3. Conclusões

Conforme ficou evidenciado, a partir das informações referentes à quantidade de reclamações de tensão que são procedentes, ou seja, aquelas em que a tensão estava na faixa crítica, e em decorrência destas constatações, existe a necessidade de intervenções nas redes para corrigir esses problemas no tempo exigido pelo órgão regulador. Neste panorama, o SICCO apresentou resultados interessantes durante a simulação e diagnóstico de problemas, durante a análise da viabilidade de obras corretivas frente a consumidores reclamantes. Uma proposta defendida pelo SICCO é a instalação de reguladores de tensão de acordo com os perfis de tensão do consumidor reclamante e da sua respectiva rede. Esta avaliação preliminar permite a economia de tempo, evitando problemas antes da real instalação do equipamento na rede.

### 4. Referências bibliográficas

1. Bollen, M. H. and Gu, I.. “Signal Processing of Power Quality Disturbances”. Wiley-IEEE Press,

2006.

2. McGranaghan, M.: "Effect of voltage sags in processes Industrial application". Proceedings of Stockholm power tech international symposium on electric power engineering, Stockholm, Sweden, IEEE, 1995.
  3. ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. Módulo 8 – Qualidade da energia elétrica. Rev. Jan. 2011.
  4. J. Cebrian; M. A. Pelegrini; S. X. Duarte; F. F. Saraiva. "P&D - Protótipo de Regulador de Tensão para Utilização entre Reclamação do Cliente e Atuação na Rede – Levantamento e análise das técnicas utilizadas atualmente", Sinapsis, São Paulo, Relatório Técnico. NTS 03/2009, Abril 2009 (b).
  5. Saraiva, F. C. F. ; Duarte, S. X.; Cebrian, J. C. ; Pelegrini, M. A. ; Tufaniuk, R.. Portable Voltage Regulator for Low Voltage Networks. In: The 21st International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, 2011, Frankfurt. The 21st International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, 2011.
  6. Ke Li. "State estimation for power distribution system and measurement impacts", Power Systems, IEEE Transactions on Power Systems, vol 11, no. 2, pp. 911-916, May 1996.
-