

Regulador de Tensão Portátil para Redes de Distribuição de Baixa Tensão e Software Associado

Marcelo A. Pelegrini, Silvio X. Duarte, Juan C. Cebrian, Francisco C. Saraiva Filho, Nelson Kagan, João C. Guaraldo e Ricardo Tufaniuk

Resumo – Este trabalho apresenta um Regulador de Tensão Portátil (RTP) desenvolvido para Redes de Baixa Tensão, seu princípio de funcionamento e sua aplicação simulada em ambiente computacional. O dispositivo permite atender de forma mais eficiente reclamações de consumidores, conforme o PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica). A tensão de entrada é ajustada através da adição ou subtração de tensão mantendo a saída em um nível adequado. São feitas simulações para análise da rede e definição do local para a instalação do RTP. O Software desenvolvido e integrado a plataforma de desenvolvimento SINAP T&D, permite importar medições de tensão e visualizar os índices de perfil de tensão, antes e após a instalação de um RTP na rede. Para testes do equipamento e software desenvolvido foi utilizada uma rede real da AES-Eletropaulo, com medições de tensão de um consumidor reclamante. Resultados de ensaios e de aplicação real são apresentados e discutidos.

Palavras-chave – Baixa tensão, ferramenta computacional, reclamação de tensão, regulador de tensão, sistema de informação.

I. INTRODUÇÃO

O artigo tem como principal objetivo apresentar:

- 1) o desenvolvimento de um Regulador de Tensão Portátil para Redes de Baixa Tensão (RTPBT),
- 2) o desenvolvimento do software para simulação das condições da tensão na rede em consumidor reclamante, antes e após a instalação do regulador de tensão, além da visualização do melhor local para a instalação do regulador, a partir de dados de medições de tensão.
- 3) os resultados do desenvolvimento por meio de testes de laboratório e aplicação em caso real de utilização do regulador e software desenvolvidos.

As redes de distribuição de média tensão apresentam, geralmente, configurações radiais, sendo trifásicas no tronco e podendo apresentar ramais bifásicos e monofásicos. Tais

redes alimentam transformadores de distribuição, ligados a uma rede de baixa tensão. Das redes de baixa tensão, partem ramais de serviço até o ponto de entrega dos consumidores de baixa tensão. Este ponto de entrega em cada consumidor é o ponto que deve ser medido, em caso de reclamação por parte do cliente nas condições de fornecimento ou programa periódico de medições, feito pela concessionária de distribuição de energia elétrica, de acordo com as diretrizes dadas pelo órgão regulador para determinar os limites de tensão exigidos para garantir a qualidade do fornecimento quanto à conformidade de tensão.

De acordo com o PRODIST [1], é um direito do consumidor solicitar à concessionária a medição do nível da tensão de atendimento sempre que acreditar que este não está dentro dos limites legalmente estabelecidos, devendo esta lhe informar, no prazo de até 48 horas, o valor que será cobrado pelo serviço, na hipótese da constatação da improcedência da reclamação, bem como a data e hora em que será instalado o equipamento de medição para o acompanhamento da medição pelo solicitante.

O PRODIST também estabelece um programa periódico de medições, no qual é estabelecida uma amostra para apuração dos indicadores de conformidade de tensão. As medições devem ter duração de 168 horas, com intervalos de integração de 10 minutos, a partir de leituras com janelas fixas e consecutivas de 12 a 15 ciclos, totalizando 1008 registros. As medições devem ser feitas entre fases e entre fases e o neutro.

A doutrina do PRODIST sobre a conformidade de tensão baseia-se na comparação entre o prejuízo experimentado pelo cliente, devido a níveis incorretos, e o custo que pesa sobre o fornecedor para reverter esses níveis com obras de melhoria. A meta do PRODIST não é conseguir a tensão ideal, mas manter o afastamento do valor da tensão em relação a um valor de referência que mantenha o sistema físico em condições de adaptação do mercado. O principal desafio para implantar uma estratégia reguladora sobre conformidade de tensão é o fato de que o prejuízo do afastamento recai no cliente e, por consequência, não há estímulo para que a empresa invista na redução deste prejuízo [2].

O PRODIST tem resolvido o impasse através de valores indenizatórios na forma de ressarcimento nas faturas dos clientes, no caso de descumprimento por parte das concessionárias dos prazos limites estabelecidos pelo PRODIST, para regularização do fornecimento quando da não-conformidade.

Segundo os dados históricos da empresa AES-Eletropaulo, da quantidade total de reclamações recebidas, o

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL), realizado em Fortaleza/CE, no período de 17 a 19 de agosto de 2011.

J. C. Cebrian, M. A. Pelegrini, J. C. Guaraldo e F. C. Saraiva F^o trabalham na Sinapsis Inovação em Energia (e-mails: juan.cebrian@sinapsisenergia.com; marcelo.pelegrini@sinapsisenergia.com, joão.guaraldo@sinapsisenergia.com, fsaraivaf@gmail.com).

S. X. Duarte e N. Kagan trabalham na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (e-mails: hernanps@usp.br; xavier@pea.usp.br).

R. Tufaniuk trabalha na AES Eletropaulo (e-mail: ricardo.tufaniuk@aes.com).

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%, o que mostra a importância da aplicação de obras e projetos visando à normalização deste nível de tensão.

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.

A. Aspectos relacionados à regulação de tensão

Para entender o problema de regulação individual de tensão, a Figura 1(a) mostra uma rede de baixa tensão hipotética com três consumidores, cada um deles com as suas respectivas curvas de carga. Da mesma forma, na Figura 1(b), pode ser observado o perfil de tensão para consumidor reclamante em 24 patamares ao longo de um dia [3].

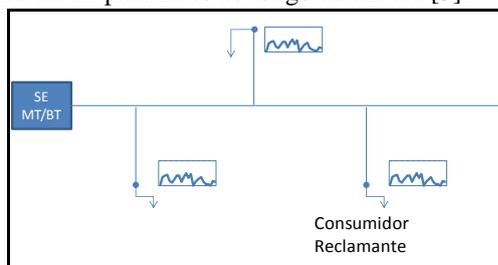


Figura 1(a). Rede de baixa tensão e um consumidor reclamante.

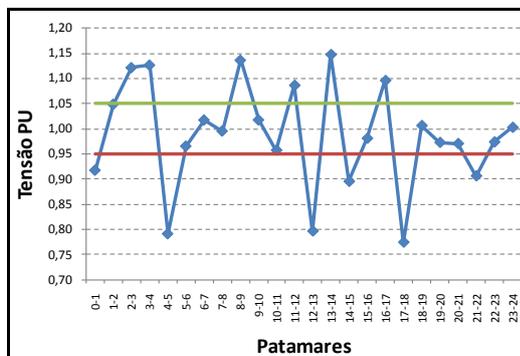


Figura 1(b). Perfil de tensão para o consumidor reclamante.

Da Figura 1(b), pode ser observado que existem alguns períodos ao longo do dia em que o nível de tensão sai dos limites, inferior (0,95) ou superior (1,05). Dada esta característica, este consumidor em particular apresentará problemas de níveis de tensão, o que levará à abertura de uma reclamação.

De acordo com o PRODIST, o relatório conclusivo da medição deverá ser apresentado, por escrito, ao consumidor solicitante em até 30 (trinta) dias a partir da formalização da reclamação. Em muitos dos casos este tempo é relativamente pouco para a realização de uma obra corretiva que atenda o estipulado pelo PRODIST [3]-[4].

Tendo isso em consideração, o objetivo de implantar uma metodologia para regulação individual de tensão é avaliar o

efeito da instalação de reguladores de tensão em diferentes pontos da rede. Com isso, será possível avaliar se a solução posposta corrige ou melhora o perfil de tensão no consumidor reclamante, isto de forma rápida e eficiente.

Na mesma rede da Figura 1(a), pode ser simulada a instalação de um regulador de tensão no consumidor reclamante como mostra a Figura 2.

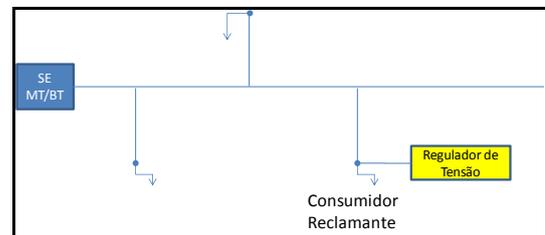


Figura 2. Consumidor reclamante com regulador de tensão.

Na Figura 3 pode ser observado o efeito da instalação de um regulador de tensão em relação ao consumidor reclamante e a os outros consumidores também instalados na rede de distribuição. Como foi comentado anteriormente, o objetivo é melhorar o perfil de tensão no consumidor reclamante sem prejudicar a os demais consumidores.

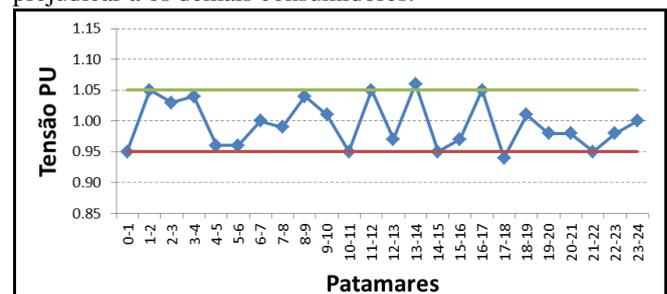


Figura 3. Efeito da instalação do regulador no consumidor reclamante.

B. Aspectos relacionados à legislação

Algumas definições estabelecidas pelo PRODIST e que serão relevantes para o desenvolvimento do presente projeto, são apresentadas a seguir.

1) *Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica (DRC)*: Indicador individual referente à duração relativa das leituras de tensão, nas faixas críticas, no período de observação definido. Expresso em percentual (%).

$$DRC = \frac{n_{lc}}{1008} \times 100[\%] \quad (1)$$

Em que:

n_{lc}: número de leituras situadas nas faixas críticas;

1.008: número de leituras válidas a cada 10 (dez) minutos, no período de observação.

2) *Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária (DRP)*: Indicador individual referente à duração relativa das leituras de tensão, nas faixas precárias, no período de observação definido. Expresso em percentual (%).

$$DRP = \frac{n_{lp}}{1008} \times 100[\%] \quad (2)$$

Em que:

nlp: número de leituras situadas nas faixas precárias;

1008: número de leituras válidas a cada 10 minutos, no período de observação.

2) *Duração Relativa da Transgressão Máxima de Tensão Crítica (DRCM)*: percentual máximo de tempo admissível para as leituras de tensão, nas faixas de tensão críticas, no período de observação definido.

3) *Duração Relativa da Transgressão Máxima de Tensão Precária (DRPM)*: percentual máximo de tempo admissível para as leituras de tensão, nas faixas de tensão precárias, no período de observação definido.

4) *Tensão de Atendimento (TA)*: valor eficaz de tensão no ponto de entrega ou de conexão, obtido por meio de medição, podendo ser classificada em "Adequada", "Precária" ou "Crítica", de acordo com a leitura efetuada.

5) *Tensão Contratada (TC)*: valor eficaz de tensão que deverá ser informado ao consumidor por escrito ou estabelecido em contrato.

6) *Tensão Nominal (TN)*: valor eficaz de tensão pelo qual o sistema é projetado.

7) *Tensão de Leitura (TL)*: valor eficaz de tensão, integralizado a cada 10 (dez) minutos, obtido de medição por meio de equipamentos apropriados. Os valores de tensão são expressos em Volts (V) ou quilovolts (kV).

E são estabelecidos também nessa resolução os limites "Adequados", "Precários" e "Críticos" para os níveis de tensão em regime permanente, os indicadores de qualidade, os critérios de medição e registro, prazos para regularização e de compensação ao consumidor, caso os limites para o atendimento adequado não sejam obedecidos. A correspondente tensão de atendimento é classificada conforme a Tabela I.

As concessionárias distribuidoras de energia elétrica apuram os indicadores DRP e DRC, que por sua vez não podem ser superiores à DRPM e DRCM, pois estarão fornecendo serviço inadequado.

Os índices relativos DRP e DRC são apurados pela coleta e pelo processamento dos dados informados periodicamente pelas empresas à ANEEL. Os dados são tratados e avaliados para a verificação do desempenho das empresas concessionárias. Com isso, é fundamental o monitoramento do serviço oferecido pelas concessionárias, pois elas têm que atender às exigências dessas resoluções para não sofrerem penalidades. Para atendê-las, é importante prover um adequado controle de tensão, do ponto de vista de eliminação de não conformidades.

II. METODOLOGIA UTILIZADA PARA A REGULAÇÃO INDIVIDUAL DE TENSÃO

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 da medição no consu-

midor reclamante e estimar o valor das tensões nas barras que não possuem medição.

Tabela I. Pontos de conexão em tensão nominal igual ou inferior a 1 kV.

Tensão Nominal (V)	Faixa de valores Adequados de TL em relação à TN (V)	Faixa de valores Precários de TL em relação à TN (V)	Faixa de valores Críticos (V)
220/127	$201 \leq TL \leq 231$	$189 \leq TL < 201$ ou $231 < TL \leq 233$	$TL < 189$ ou $TL > 233$
	$116 \leq TL \leq 133$	$109 \leq TL < 116$ ou $133 < TL \leq 140$	$TL < 109$ ou $TL > 140$
380/220	$348 \leq TL \leq 396$	$327 \leq TL < 348$ ou $396 < TL \leq 403$	$TL < 327$ ou $TL > 403$
	$201 \leq TL \leq 229$	$189 \leq TL < 201$ ou $229 < TL \leq 233$	$TL < 189$ ou $TL > 233$
254/127	$232 \leq TL \leq 264$	$220 \leq TL < 232$ ou $264 < TL \leq 269$	$TL < 220$ ou $TL > 269$
	$116 \leq TL \leq 132$	$109 \leq TL < 116$ ou $132 < TL \leq 140$	$TL < 109$ ou $TL > 140$
440/220	$402 \leq TL \leq 458$	$380 \leq TL < 402$ ou $458 < TL \leq 466$	$TL < 380$ ou $TL > 466$
	$201 \leq TL \leq 229$	$189 \leq TL < 201$ ou $229 < TL \leq 233$	$TL < 189$ ou $TL > 233$
208/120	$196 \leq TL \leq 229$	$189 \leq TL < 196$ ou $229 < TL \leq 233$	$TL < 189$ ou $TL > 233$
	$113 \leq TL \leq 132$	$109 \leq TL < 113$ ou $132 < TL \leq 135$	$TL < 109$ ou $TL > 135$
230/115	$216 \leq TL \leq 241$	$212 \leq TL < 216$ ou $241 < TL \leq 253$	$TL < 212$ ou $TL > 253$
	$108 \leq TL \leq 127$	$105 \leq TL < 108$ ou $127 < TL \leq 129$	$TL < 105$ ou $TL > 129$
240/120	$216 \leq TL \leq 254$	$212 \leq TL < 216$ ou $254 < TL \leq 260$	$TL < 212$ ou $TL > 260$
	$108 \leq TL \leq 127$	$106 \leq TL < 108$ ou $127 < TL \leq 130$	$TL < 106$ ou $TL > 130$
220/110	$201 \leq TL \leq 229$	$189 \leq TL < 201$ ou $229 < TL \leq 233$	$TL < 189$ ou $TL > 233$
	$101 \leq TL \leq 119$	$95 \leq TL < 101$ ou $115 < TL \leq 117$	$TL < 95$ ou $TL > 117$

Existem na literatura algoritmos de estimação de estado, a partir de medidores estrategicamente instalados; por outro lado a correta utilização destes algoritmos implica na necessidade de múltiplos pontos de medição com relógios corretamente e constantemente sincronizados.

No caso tratado neste 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, como pode ser visto nas equações (3) e (4).

A. Ajuste de Tensão a partir de dados medidos

O método para realizar o ajuste de tensão considera no início que os consumidores operam com a sua curva de demanda típica. Esta consideração inicial deve ser corrigida a par-

tir das medições reais do consumidor reclamante. As equações (3) e (4) mostram a forma de refletir o comportamento da tensão medida no consumidor, na barra de suprimento.

$$fc_p = Vm_p^k - Vc_p^k \quad (3)$$

$$V_p^S = Vc_p^S + fc \quad (4)$$

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 do regulador de tensão na rede BT sob estudo, permitido assim a posterior comparação.

C. Regulador individual de tensão

O modelo utilizado 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 $V_{RT_E}^k$ e a partir dela ajusta um valor de tap 1:a (entrada:saída). A regra para ajuste de tap é a seguinte:

$$R = \begin{cases} V_{RT_E}^k < 0,8770 & \rightarrow R = 1,1750 \\ 0,8770 \leq V_{RT_E}^k < 0,9500 & \rightarrow R = 1,0841 \\ 0,9500 \leq V_{RT_E}^k < 1,0300 & \rightarrow R = 1,0000 \\ 1,0300 \leq V_{RT_E}^k < 1,1167 & \rightarrow R = 0,9230 \\ \text{Outros Casos} & \rightarrow R = 0,8510 \end{cases} \quad (5)$$

$$R = 1/V_{RT_S}^k \quad (6)$$

Em que:

$V_{RT_E}^k$: Tensão de entrada do regulador de tensão instalado na barra k ;

$V_{RT_S}^k$: Tensão de saída do regulador de tensão instalado na barra k ;

R : Relação de transformação.

III. REGULADOR DE TENSÃO PORTÁTIL

O Regulador de Tensão Portátil para Redes de Baixa Tensão (RTPBT) que foi desenvolvido possui os seguintes valores nominais: potência de 30kVA, tensão de 115V+115V

(fase-neutro) em 60Hz. Uma característica importante do RTPBT é a sua portabilidade, pois desempenha a função de um equipamento provisório que alimenta os consumidores, sendo instalado num poste próximo aos mesmos até que uma solução definitiva para o problema de tensão seja fornecida pela concessionária.

D. Descrição de funcionamento básico

O Regulador de Tensão desenvolvido faz a função de ajustar a tensão de rede não regulada aplicada em sua entrada através da adição ou subtração de uma quantidade adequada de tensão que é inserida através de um secundário do transformador “Buck-Boost” usado para regular a tensão, fazendo com que em sua saída, na carga, a tensão permaneça dentro da faixa estabelecida pelo PRODIST [6].

A Figura 4 mostra o circuito básico do regulador de tensão desenvolvido, onde a tensão de rede na entrada (representada pelo gerador de tensão $V_{rede_n\tilde{a}o_regulada}$) é aplicada na entrada do regulador, que é composto pelo circuito de controle de potência mais um transformador “Buck-Boost” que entrega para a carga ligada na saída a tensão devidamente regulada.

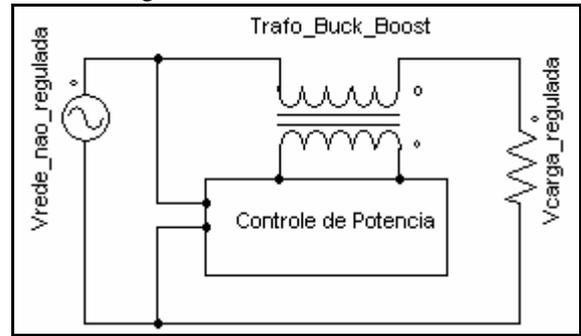


Figura 4. Circuito básico do regulador de tensão

O controle da potência permite três ações básicas na tensão de entrada:

- somar tensão à tensão de entrada, quando a tensão de entrada estiver abaixo do limite inferior estabelecido como mínimo adequado.
- subtrair tensão à tensão de entrada, quando a tensão de entrada estiver acima do limite superior estabelecido como máximo adequado.
- não somar nem subtrair tensão à tensão de entrada, quando a tensão de entrada estiver dentro da faixa estabelecida como adequada.

Além de controlar a polaridade da tensão no secundário do transformador “Buck-Boost”, o regulador controla a quantidade que é somada ou subtraída na tensão de entrada do regulador. No caso do RTPBT citado, o controle de potência permite cinco níveis diferentes de regulação de tensão de rede, quais sejam:

- tensão de rede muito baixa => soma “muito”,
- tensão de rede baixa => soma “pouco”,
- tensão de rede normal => não soma nem subtrai,
- tensão de rede alta => subtrai “pouco”,
- tensão de rede muito alta => subtrai “muito”.

E. Princípio de funcionamento do RTPBT

O transformador “Buck-Boost” do RTPBT serve para realizar a tarefa de somar e subtrair quantidades controladas de tensão conforme descrito anteriormente através de dois taps no primário sendo seu secundário dividido em dois enrolamentos, conforme esquema elétrico mostrado na Figura 5.

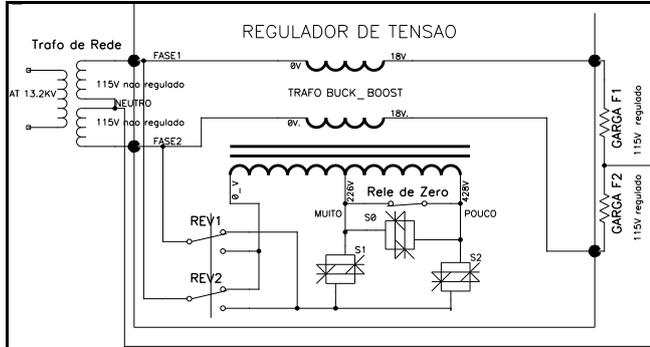


Figura 5. Esquema elétrico do RTPBT desenvolvido.

O transformador de rede, mostrado na Figura 5, não faz parte do regulador (linha tracejada) pertencendo este último à rede de distribuição da concessionária de energia. O regulador foi projetado para ser conectado ao secundário do transformador de distribuição de um sistema de fornecimento, cuja rede secundária é monofásica de (115V + 115V / 230V). Cada enrolamento secundário de 18V do transformador “Buck-Boost” regula individualmente cada fase de 115V (Fase-Neutro) do transformador de distribuição. A carga recebe a tensão regulada entre Fase 1 e neutro e Fase 2 e neutro, conforme a Figura 5. O neutro da rede de distribuição é conectado diretamente à saída, sem entrar no equipamento. As chaves S0, S1 e S2 são compostas por 2 SCRs em anti-paralelo (AC_Switch) e seu comando é feito através de uma placa de driver com transformadores de pulso nos respectivos “gates”. O contator reversor (VER) de polaridade serve para inverter a polaridade do primário do transformador “Buck-Boost” com objetivo de somar tensão num caso ou subtrair tensão em outro e assim ajustar a tensão de saída para ficar dentro da faixa exigida pelo PRODIST. O contato do relé de zero (NF) serve para garantir zero de tensão no secundário do regulador quando da partida do regulador (Chaves S0, S1 e S2 abertas) e também no caso de falha, ou quando o regulador está desligado. O relé de zero vai para uma posição segura não introduzindo (somando ou subtraindo) qualquer valor na tensão de rede.

A regulação de tensão é feita através do acionamento das chaves estáticas que operam de acordo com a máquina de estados mostrada na Figura 6 e sua respectiva tabela de estados (Tabela II).

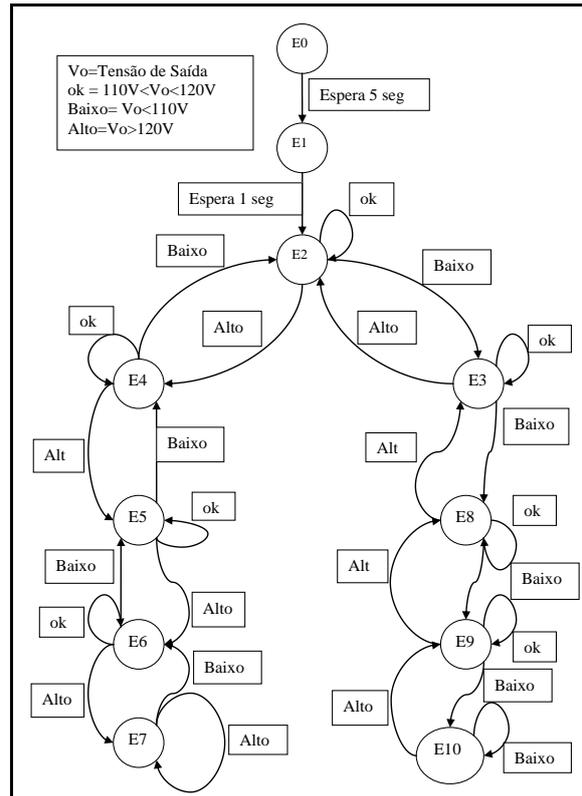


Figura 6. Máquina de estados do controle de tensão do RTPBT

Tabela II. Estados do controle de Tensão do RTPBT

Estado	Nome do estado	Descrição do estado	Estado das chaves
E0	Power_ON	Espera 5 seg após energização	00000000(*)
E1	Soma zero	Espera 1 segundo	00000001(*)
E2	Soma ou Subtrai	Se $110V < V_o < 120V$ Fica em E2 se não muda de estado	00010001(*)
E3	Soma zero	Se $110V < V_o < 120V$ Fica em E3 se não muda de estado	00110001(*)
E4	Soma pouco	Se $110V < V_o < 120V$ Fica em E4 se não muda de estado	00010001(*)
E5	Subtrai pouco	Se $110V < V_o < 120V$ Fica em E5 se não muda de estado	00010100(*)
E6	Subtrai muito	Se $110V < V_o < 120V$ Fica em E6 se não muda de estado	00011000(*)
E7	Sobretensão de saída	Alarme de Sobretensão	00011000(*)
E8	Soma pouco	Se $110V < V_o < 120V$ Fica em E8 se não muda de estado	00110100(*)
E9	Soma muito	Se $110V < V_o < 120V$ Fica em E9 se não muda de estado	00111000(*)
E10	Subtensão de saída	Alarme de Subtensão	00111000(*)

Nota (*): Byte Chaves = x, x, REV, RZ, S1, S2, x, S0, Quando = 1 ligado e quando = 0 desligado, onde: Bit7 = x Nada conectado; Bit6 = x Nada conectado; Bit5 = REV = contator de Reversão; Bit4 = RZ = Relé de zero; Bit3 = S1 = chave 1; Bit2 = S2 = chave 2; Bit1 = x = Nada conectado; Bit0 = S0 = Chave 0

A regulação da tensão de saída segue a sequência de estados pré-definida pela máquina de estados e a mudança dos taps é feita de tal forma a manter a tensão de saída na faixa entre 110V e 120V, valores estes de tensão de fase-neutro. A tensão a ser regulada é a tensão eficaz de saída em regime permanente e o intervalo de leitura desta tensão é de dez minutos, de acordo com os regulamentos. O tempo de atuação para mudança de taps das chaves estáticas foi estabelecido em 5 segundos, que foi considerado suficiente de modo a evitar chaveamentos sucessivos devido a mudanças repetitivas das tensões de carga.

As relações de transformação do transformador “Buck-Boost” foram definidas como descrito a seguir.

1) Primeiro estabelecem-se os limites de tensão de saída conforme exigido pelo PRODIST, no caso deste projeto: limite inferior 0,94 pu e limite superior 1,05 pu.

2) Calculam-se as relações de transformação em função da faixa de valores da tensão de entrada mantendo a faixa de valores da tensão de saída constante (Figura 4), como segue:

i. Para tensão de entrada $0,94 \text{ pu} < V_{\text{entrada}} < 1,05 \text{ pu}$, a relação de espiras é $k_1 = 1$. Aqui a tensão de saída é $V_{\text{saída}} = k_1 \times V_{\text{entrada}}$, operação sobre a reta com inclinação k_1 ,

ii. Operando sobre a reta de inclinação k_1 , quando a tensão de entrada $V_{\text{entrada}} < 0,94 \text{ pu}$, a tensão de saída deve ser levada para 1,05. Neste caso a relação de espiras entre saída e entrada é $k_a = 1,117$. Aqui a tensão de saída é $V_{\text{saída}} = k_a \times V_{\text{entrada}}$, operação sobre a reta com inclinação k_a ,

iii. Operando sobre a reta de inclinação k_a , o limite inferior de tensão de entrada que corresponde ao limite inferior da tensão de saída é $V_{\text{entrada_limite_inferior_ka}} = 0,94 / k_a$, portanto $V_{\text{entrada_limite_inferior_ka}} = 0,842$,

iv. Operando sobre a reta de inclinação k_a , quando a tensão de entrada $V_{\text{entrada}} < 0,842 \text{ pu}$, a tensão de saída deve ser levada para 1,05. Neste caso a relação de espiras entre saída e entrada é $k_b = 1,2477$. Aqui a tensão de saída é $V_{\text{saída}} = k_b \times V_{\text{entrada}}$, operação sobre a reta com inclinação k_b ,

v. Operando sobre a reta de inclinação k_b , o limite inferior de tensão de entrada que corresponde ao limite inferior da tensão de saída é $V_{\text{entrada_limite_inferior_kb}} = 0,94 / k_b$, portanto $V_{\text{entrada_limite_inferior_kb}} = 0,753$.

vi. Operando sobre a reta de inclinação k_1 , quando a tensão de entrada $V_{\text{entrada}} > 1,05 \text{ pu}$ a tensão de saída deve ser levada para 0,94 pu. Neste caso a relação de espiras entre saída e entrada é $k_c = 0,895$. Aqui a tensão de saída é $V_{\text{saída}} = k_c \times V_{\text{entrada}}$, operação sobre a reta com inclinação k_c .

vii. Operando sobre a reta de inclinação k_c , o limite superior de tensão de entrada que corresponde ao limite superior da tensão de saída é $V_{\text{entrada_limite_superior_kc}} = 1,05 / k_c$, portanto $V_{\text{entrada_limite_superior_kc}} = 1,173$,

viii. Operando sobre a reta de inclinação k_c , quando a tensão de entrada $V_{\text{entrada}} > 1,173 \text{ pu}$ a relação de espiras entre a tensão de saída deve ser levada para 0,94 pu. Neste caso a relação de espiras entre saída e entrada é $k_d = 0,802$. Aqui a tensão de saída é $V_{\text{saída}} = k_d \times V_{\text{entrada}}$, operação sobre a reta com inclinação k_d ,

ix. Operando sobre a reta de inclinação k_d , o limite superior de tensão de entrada que corresponde ao limite superior

da tensão de saída é $V_{\text{entrada_limite_superior_kd}} = 1,173 / k_d$, portanto $V_{\text{entrada_limite_superior_kd}} = 1,310$.

A Figura 7 apresenta a função de transferência entre a Tensão de Entrada e Saída do RTPBT que foi usada para calcular as tensões dos taps do transformador “Buck-Boost”, estabelecendo no eixo vertical (tensão de saída em pu) a faixa exigida pelo PRODIST, isto é, -6% e +5%. Pode ser visto também na Figura 4 a faixa da tensão de entrada de -25% à +30% na qual o RTPBT consegue regular a tensão de saída.

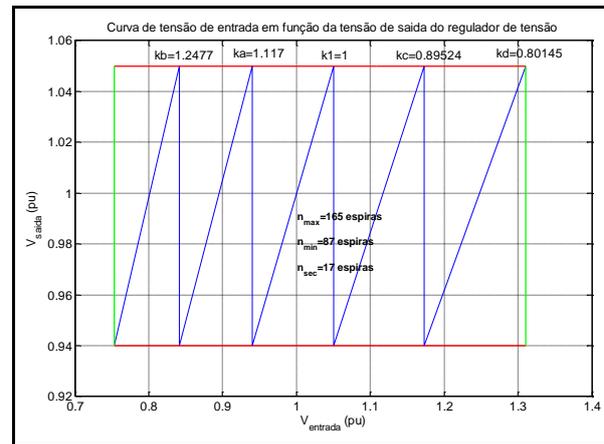


Figura 7. Função de transferência do RTPBT

IV. 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 8 mostra o diagrama de fluxo utilizado para a regulação individual de tensão.

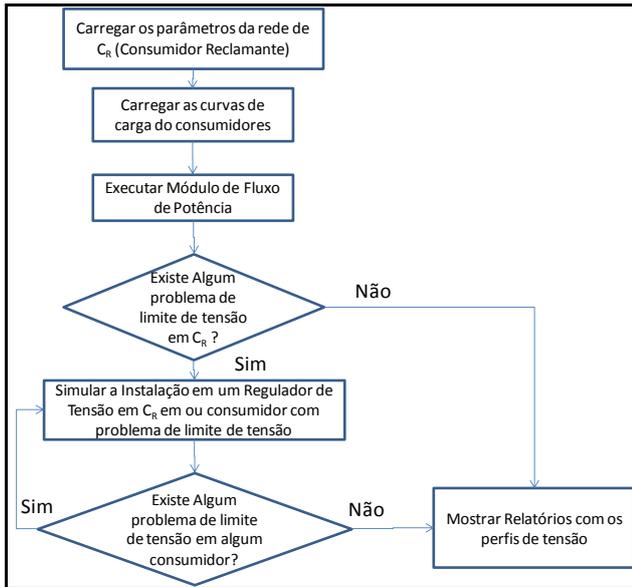


Figura 8. Fluxograma para o regulador individual de tensão.

V. RESULTADOS

A. Simulação

A plataforma de desenvolvimento SINAP T&D foi utilizada para a simulação da rede. Sua tela principal encontra-se na Figura 9(a). Foi utilizada uma rede de baixa tensão real pertencente à empresa AES-Eletrapaulo. Esta rede, da subestação de Monte Belo, contém 145 consumidores bifásicos (115/230 V) e está representada na Figura 9(b). Destaca-se o consumidor reclamante simulado C1.

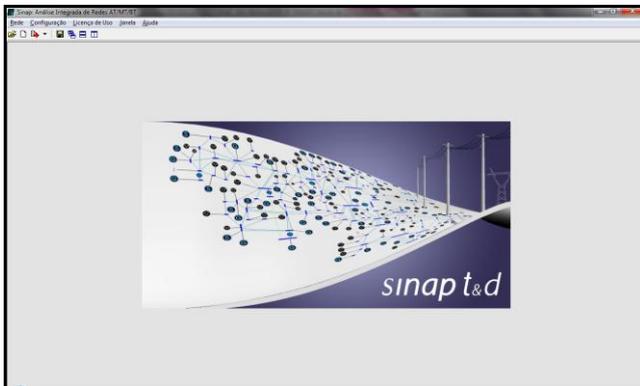


Figura 9(a). Tela principal do Sinap T&D.

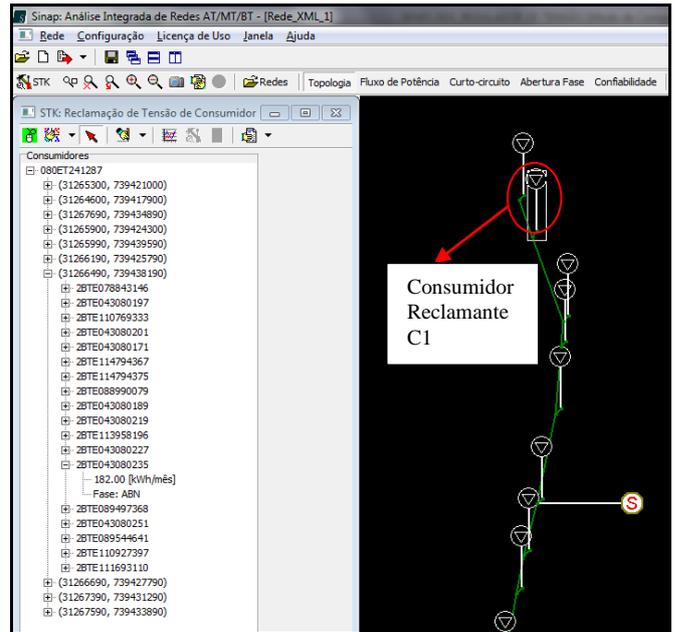


Figura 9(b). Rede secundária utilizada para a simulação e o consumidor reclamante.

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 [5].

A Figura 10 apresenta os índices de DRA, DRP, DRC e quantidade de pontos dentro da faixa adequada, precária e crítica para os 1008 pontos/intervalos de medição (indicados como “sem obra” pelo software), obtidos pelo sistema proposto para o consumidor reclamante C1.

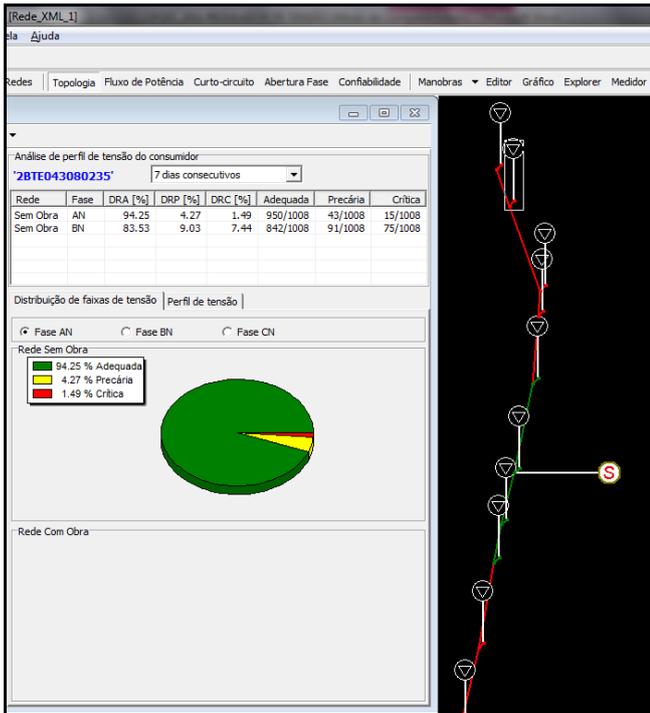


Figura 10. Índices DRA, DRP, DRC antes da instalação do regulador.

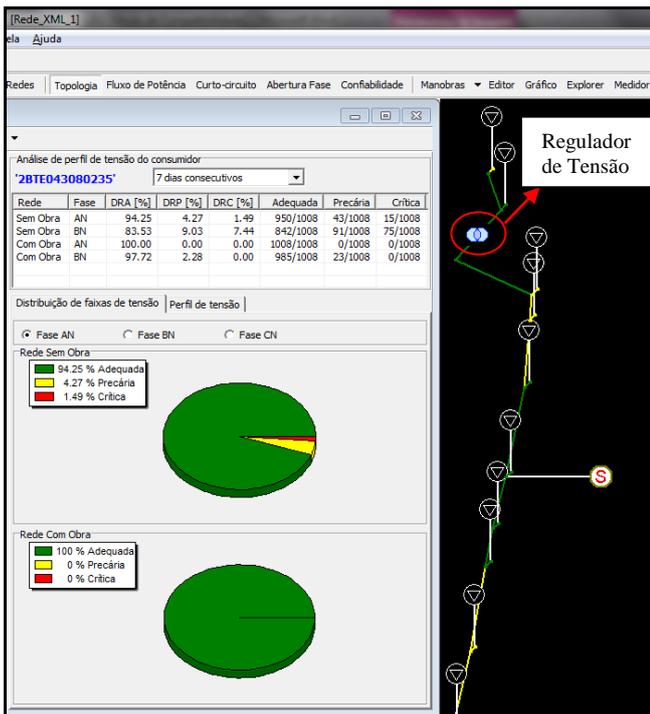


Figura 11. Índices DRA, DRP, DRC antes e depois da instalação do regulador.

Observa-se na Figura 11 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 C1 (indicados como “sem obra” e “com obra” pelo software).

Comparando os gráficos antes e depois da instalação do regulador, é possível visualizar a melhora dos índices de DRA, DRP, DRC para o consumidor reclamante. Esta funcionalidade permite dar um suporte ao operador na hora de diagnosticar a efetividade da instalação de um regulador de

tensão na barra simulada.

O perfil de tensão pode ser visto na Figura 12, antes e depois da obra de instalação do regulador, em uma das fases.

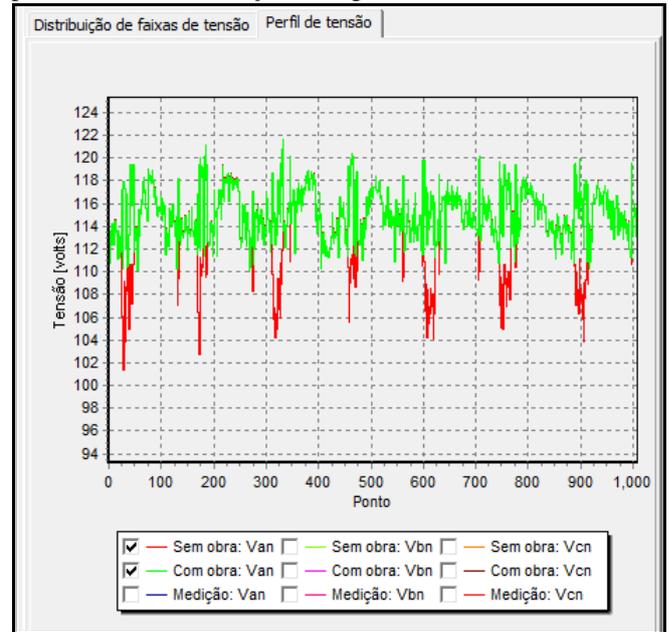


Figura 12. Perfil de tensão antes e depois da instalação do regulador.

B. Ensaio em laboratório

Os ensaios realizados em laboratório foram para verificar o desempenho do RTPBT em condições de regulação da tensão em carga plena. Com estes ensaios foi possível avaliar e verificar a atuação do RTPBT em condições de regime permanente de carga quando a tensão em sua entrada se encontrasse em valores na faixa de 180 V a 270 V e constatar se a tensão de saída permanecia dentro da faixa exigida pelo PRODIST. Além disso, obteve-se também a característica de saída, função de transferência entre a tensão de saída e a tensão de entrada do regulador em operação normal. Para os testes de regulação de tensão foram consideradas 3 condições de carga. Durante os ensaios, foram registradas as tensões e correntes na entrada e na saída do regulador. Os registros dos valores de tensão e corrente foram feitos em intervalos de 1 s. A tensão na entrada do regulador foi alterada por meio do ajuste da excitação de um gerador síncrono de 50 kVA acionado por motor movido a óleo diesel.

A Tabela III resume os resultados entre as tensões de saída e de entrada obtidas nos três testes referentes a cargas aproximadas para todos os testes.

Tabela III. Valores das tensões de entrada e de saída obtidos nos testes para a avaliação da regulação de tensão

Tensão (V) – Ensaio com Carga					
18 %		58 %		90 %	
Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída
189	223	186	218	188	219
203	222	200	234	209	227
220	220	220	220	214	214
246	224	229	226	231	226
264	240	216	235	252	228
270	220	257	234	273	219

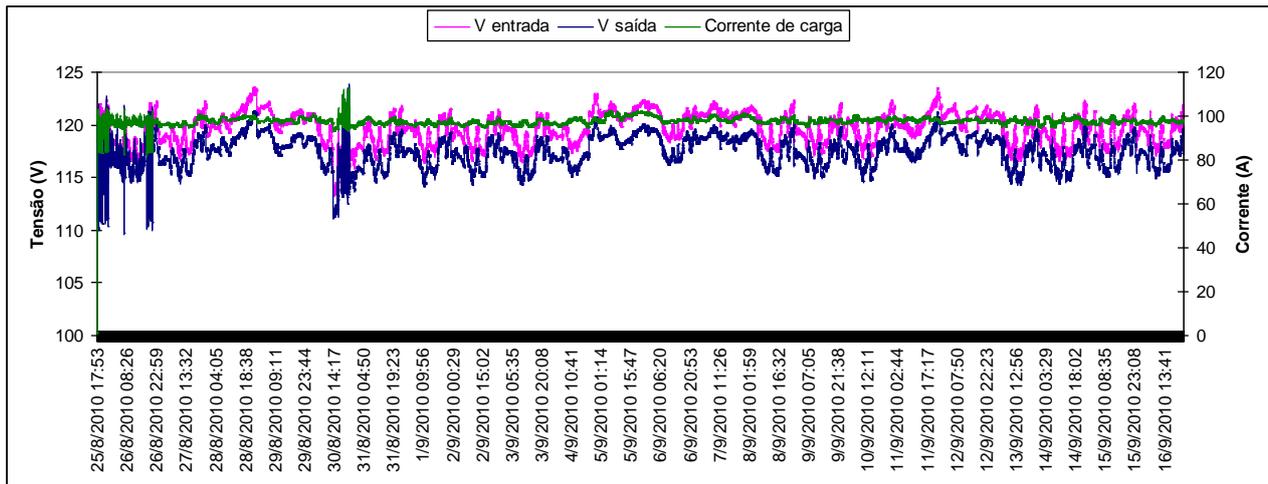


Figura 13. Gráfico dos valores da Tensão de entrada, da Tensão de saída e da Corrente de carga registrados durante o período em que o RTP ficou instalado no CT – Guarapiranga da AES Eletropaulo.

C. Teste em campo

Após os testes de laboratório, o RTPBT ficou instalado no Centro de Treinamento do Guarapiranga – CT Guarapiranga entre 25/08/2010 e 26/09/2010 com carga da ordem de 100A o tempo todo. Este teste serviu para avaliar o desempenho do equipamento em condição de carga ininterrupta, além de permitir avaliar as dificuldades para a instalação do equipamento em campo e treinar a equipe de eletricitistas quanto à forma de aplicação do mesmo em campo. Também, no período em que ficou instalado, o equipamento foi submetido a todas as condições reais de intempéries em que o equipamento deve ser utilizado. A Figura 13 mostra o gráfico dos registros dos valores da tensão de entrada, da tensão de saída e da corrente de carga registrados durante o período em que o RTPBT permaneceu instalado.

Além dos testes de laboratório e da instalação do RTPBT no CT Guarapiranga, a concessionária AES Eletropaulo utilizou o equipamento desenvolvido para atendimento de um caso real de reclamação de tensão. No local escolhido, a tensão da rede estava em alguns períodos do dia com níveis de tensão fora da faixa adequada, resultando em uma multa diária de R\$ 4.000,00, multa estabelecida por ordem judicial, caso a tensão não fosse regularizada em tempo determinado. A Figura 14 mostra o resultado das tensões na entrada e na saída (medida no consumidor reclamante) para este caso.

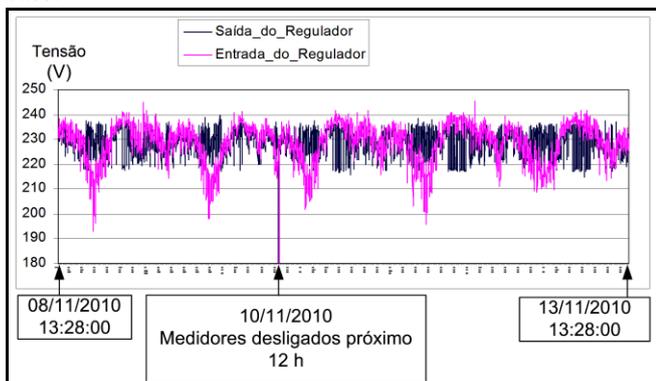


Figura 14. Resultados das medições de tensões de entrada e saída do RTPBT quando utilizado em caso real

VI. COMENTÁRIOS SOBRE OS RESULTADOS

Em relação aos testes realizados em laboratório, pode-se constatar, que para todos os ensaios realizados, independente da carga presente no RTPBT indicam que a faixa de tensão adequada na saída do regulador foi mantida dentro dos limites, entre 220 V e 240 V, como mostrados na Tabela III, para tensões na entrada variando numa faixa entre 188 V a 275 V, o que garantiu para o protótipo do regulador desenvolvido um desempenho satisfatório.

Considerando o período em que o RTPBT ficou instalado no centro de treinamento, não ocorreram chaveamentos dos taps do regulador, porque a tensão de alimentação do mesmo permaneceu dentro da faixa adequada, de modo que o RTPBT ficou a maior parte do tempo em tap zero, não somando e não subtraindo tensão à tensão de entrada. É importante ressaltar que este teste serviu para verificar se o RTPBT estava robusto suficiente para resistir ao tempo e ficar sujeito às intempéries naturais encontradas nas redes de distribuição de energia. Então, a partir deste teste constatou-se que o equipamento poderia ser colocado em campo, suportando as condições adversas de carga e intempéries a que um equipamento instalado ao tempo deve suportar normalmente. Além da questão relativa à robustez do ponto de vista de funcionamento elétrico, também foi possível verificar as necessidades e dificuldades em relação à instalação do RTPBT no poste da concessionária. Foram verificadas as formas de fixação do equipamento, a forma de se fazer o ponto de travamento mecânico da rede, as conexões necessárias, conectores, cabos etc..

Em relação ao uso do RTPBT para atendimento de um caso real de reclamação de tensão: no local onde o equipamento foi instalado, a tensão da rede chegou a valores próximos aos 90 V entre fase e neutro em alguns períodos do dia. Neste caso, os valores de tensões registrados estavam na faixa crítica, segundo o PRODIST. Conforme relatado no item IV, subitem c, por ação judicial, houve estabelecimento de multa diária de R\$ 4.000,00 (quatro mil reais), caso a concessionária não resolvesse o problema até uma data estabelecida. Em função do descrito, o RTPBT foi instalado em 21/10/2011 e assumiu a carga de 14 consumidores que ficavam ao final de

um alimentador de distribuição com problema de tensão, no qual o consumidor reclamante estava conectado. O equipamento ficou instalado por aproximadamente 30 dias até que as obras para a regularização definitiva da tensão da rede fossem realizadas. Para o caso em questão, as curvas de tensão na entrada e saída do consumidor estão mostradas na Figura 14. A partir da Figura 14 nota-se que ocorreu expressiva melhoria nos níveis das tensões, mantendo-as em níveis dentro da faixa adequada.

VII. ADEQUAÇÕES REALIZADAS NO RTPBT

O RTPBT possui proteção no circuito primário do transformador “Buck-boost”, por disjuntor que desliga o controle do RTPBT em caso de corrente curto-circuito e coloca o RTPBT na condição de falha segura (não soma nem subtrai tensão à tensão de entrada do regulador). Apesar desta proteção, o consumidor nunca é desligado pelo RTPBT, mas apenas o circuito de controle do mesmo.

Após o uso do RTPBT em campo e a ocorrência de desligamento do disjuntor de proteção, verificou-se a necessidade de implementação de um sistema de religamento automático. Devido a esta necessidade, foi feita implementação de um sistema de religamento automático no RTPBT, para o caso de atuação da proteção do circuito-primário do transformador “Buck-boost”. O circuito de religamento automático implementado religa o RTPBT por cinco vezes e, caso a falha persista, mantém indicação luminosa de atuação da proteção. Apesar de manter o RTPBT desligado, no caso de ocorrer cinco religamentos sem sucesso, o consumidor nunca é desligado pelo regulador. Este sistema de religamento dá ao equipamento maior autonomia de funcionamento, evitando que eventuais falhas retirem e mantenham o RTPBT fora de funcionamento e evita a necessidade de ida de um operador ao local de instalação do RTPBT para reinicializar sua operação. Caso ocorra na saída do regulador algum curto-circuito que se mantenha por mais que cinco tentativas de religamento do regulador, o regulador mantém o circuito de controle desligado e mostra esta condição por meio de uma luz indicadora que permanecerá piscando até que seja feito o “reset” do equipamento.

VIII. CONCLUSÕES

Conforme ficou evidenciado a partir das informações referentes à quantidade de reclamações de tensão que são precedentes, ou seja, aquelas em que a tensão estava na faixa crítica e em decorrência destas constatações, na maior parte dos casos havendo necessidade de intervenção nas redes para corrigir estes problemas em tempo exíguo. O projeto desenvolvido apresentou resultados muito satisfatórios e promissores. Isto se deve ao fato de que o RTPBT pode ser utilizado de forma rápida e eficiente corrigindo a tensão da rede imediatamente após sua instalação que é feita de forma relativamente simples e rápida solucionando os casos de tensão na faixa crítica.

Além do RTPBT desenvolvido, a incorporação no ambiente SINAP T&D da possibilidade de realizar simulações,

das redes de distribuição em diversos patamares de carga, permite diagnosticar problemas e simular a viabilidade de sua correção por meio da instalação do regulador individual de tensão, de acordo com os perfis de tensão do consumidor reclamante e da rede em que este se encontra. Esta avaliação preliminar permite a economia de tempo, evitando problemas antes da real instalação do equipamento na rede.

Os resultados dos testes realizados durante o desenvolvimento do protótipo do RTPBT permitiram obter uma série de informações que ajudaram a realizar o detalhamento de projeto e obter uma condição de operação satisfatória. Conforme ficou demonstrado nos resultados dos testes de operação do regulador em ambiente controlado de carga e variação de tensão, o protótipo do regulador apresentou comportamento plenamente satisfatório, tendo atingido os objetivos almejados.

Além dos resultados em testes de laboratório, os resultados obtidos com o RTPBT em instalação e atendimento a consumidores num caso real, mostraram que o protótipo desenvolvido atingiu os resultados esperados. Os testes e a aplicação do RTPBT em campo permitiram realizar adequações no “hardware” e “firmware”, melhorando ainda mais a sua robustez e autonomia de operação do RTPBT.

A partir dos resultados do projeto, foi realizado um pedido de patente da solução desenvolvida e iniciado um novo projeto, para industrialização do dispositivo.

IX. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] 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.
- [2] C. C. B. Oliveira; M. A. Pelegrini; M. M. Filho; L. N. Silva, H. R. Oliveira. “Sistema para gerenciamento de medições de tensão” in *SISMEDI, VI SBQEE – Seminário Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica*, Belém, Pará, Aug. 2005, pp. 667-674.
- [3] 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 do estado da arte”, Sinapsis, São Paulo, Relatório Técnico. NTS 01/2009, Abril 2009 (a).
- [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] J. Cebrian; M. A. Pelegrini. “P&D - Protótipo de Regulador de Tensão para Utilização entre Reclamação do Cliente e Atuação na Rede – Desenvolvimento de metodologias para regulação individual de tensão”, Sinapsis, São Paulo, Relatório Técnico. NTS 20/2009, Setembro 2009 (c).
- [6] F. C. Saraiva Filho. “Proposta de Recuperador Dinâmico para Afundamentos de Tensão”, Tese de Mestrado, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2002. [Online]. Disponível: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-10052003-225059/pt-br.php>