



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
Donorvan Rodrigo Fagundes	Aes Sul Distribuidora Gaúcha de Energia	donorvan.fagundes@aes.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
Marcelo Aparecido Pelegrini	Sinapsis Inovação em Energia s/s Ltda	marcelo.pelegrini@sinapsisenergia.com
Ricardo Tufaniuk	AES Eletropaulo Metropolitana - Eletr. de São Paulo S.A.	ricardo.tufaniuk@aes.com
Tiago Poles de Souza	Universidade de São Paulo	tiagopoles@pea.usp.br
Daniela V. Kondo	Sinapsis Inovação em Energia s/s Ltda	daniela.kondo@sinapsisenergia.com
Nelson Kagan	Universidade de São Paulo	nelsonk@pea.usp.br

Equipamento Portátil de Regulação de Tensão Automático Aplicado a Redes de Baixa Tensão

Palavras-chave

Baixa tensão
Eletrônica de Potência
Reclamação de Tensão
Redes Inteligentes
Regulador de tensão

Resumo

Este trabalho apresenta um equipamento portátil monofásico e um trifásico que permitem a regulação automática da tensão fornecida aos consumidores existentes em redes de baixa tensão. O dispositivo permite atender de forma mais eficiente a reclamações específicas de consumidores, conforme o PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica). A tensão de entrada é ajustada através da adição ou subtração de uma quantidade determinada de tensão para manter, na sua saída, um valor que seja considerado adequado. O equipamento foi testado em laboratório e levado para ser aplicado em condições reais. Os resultados e os seus benefícios são apresentados e discutidos.

1. Introdução

Atualmente, o PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica), norma desenvolvida pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) [1], reafirma como um direito do consumidor solicitar à empresa concessionária de energia a medição do nível da tensão de atendimento, sempre que acreditar que

este não está dentro dos limites legalmente estabelecidos. O PRODIST também define 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 mantê-la dentro de uma faixa mínima e máxima em relação a um valor de referência. O principal desafio da ANEEL para implantar uma estratégia reguladora é o fato de que os prejuízos associados a níveis precários de tensão recaem no cliente e, por consequência, não há estímulo para que a empresa concessionária invista na redução deste prejuízo[2]. Considerando esta realidade, o PRODIST impõe valores indenizatórios na forma de ressarcimento nas faturas dos clientes, no caso de descumprimento por parte das concessionárias dos prazos limites estabelecidos pelo PRODIST.

O PRODIST define limites para níveis de tensão em regime permanente: "Adequado", "Precário" e "Crítico". Esses limites são utilizados para definir prazos e a compensação ao consumidor, caso os limites para o atendimento adequado não sejam obedecidos. Segundo o PRODIST, para realizar as correções necessárias, as empresas concessionárias têm um prazo de 30 dias, após a constatação do problema de tensão no consumidor reclamante, para realizar uma obra corretiva. Evidentemente, em função da complexidade da obra corretiva, este prazo é insuficiente, o que provoca o pagamento de valores indenizatórios.

Considerando o problema de limite de tensão dos consumidores e o prazo insuficiente para realizar obras corretivas, este trabalho propõe a utilização de equipamentos de regulação de tensão automáticos para resolver ambos os problemas. Estes equipamentos foram desenvolvidos usando como base o protótipo apresentado em [3]-[7], porém algumas alterações foram inseridas, visando aumentar as suas funcionalidades.

2. Desenvolvimento

Os equipamentos desenvolvidos são dois Reguladores de Tensão Portáteis de Baixa Tensão (RTPBT) projetados para operar em redes de baixa tensão. O primeiro, trifásico de 30 kVA – 220/380 V e o segundo, monofásico a 2 fios de 10 kVA – 220 V. A principal característica desses equipamentos é a portabilidade, dado que eles foram projetados para serem soluções eficazes e rápidas, porém provisórias para corrigir o nível de tensão de um consumidor reclamante. Os RTPBTs podem ser instalados num poste próximo ao consumidor até que uma solução definitiva para o problema de tensão seja fornecida pela concessionária. A Fig. 1 mostra a parte interna e a Fig. 2 a vista externa do RTPBT monofásico desenvolvido.



Fig. 1. Foto do regulador de tensão monofásico (interna).



Fig. 2. Foto do regulador de tensão monofásico (externa).

A. Funcionamento básico

O RTPBT monofásico desenvolvido ajusta a tensão de rede não regulada na “entrada”, por meio da adição ou subtração de uma quantidade adequada de tensão. Esta operação é realizada por meio do secundário de um transformador “Buck-Boost” instalado no regulador. Com isso, a carga conectada na “saída” do RTPBT recebe um valor de tensão dentro da faixa estabelecida pelo PRODIST[1]. No caso do RTPBT trifásico, esta operação é feita por fase, ou seja, é utilizado um transformador “Buck-Boost” por fase.

O controle da potência permite três ações básicas na tensão de entrada[7]:

- 1) Somar tensão na entrada, quando estiver abaixo do limite inferior estabelecido como mínimo adequado;
- 2) Subtrair tensão na entrada, quando estiver acima do limite superior estabelecido como máximo adequado;
- 3) Não somar nem subtrair tensão na entrada, quando 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 seis níveis diferentes de regulação de tensão de rede:

- 1) Tensão de rede muito baixa => soma “muito”,
- 2) Tensão de rede meio baixa => soma “médio”,
- 3) Tensão de rede pouco baixa => soma “pouco”,
- 4) Tensão de rede normal => não soma nem subtrai,
- 5) Tensão de rede pouco alta => subtrai “pouco”,

6) Tensão de rede meio alta => subtrai “médio”.

B. Funcionamento do "Buck-Boost"

O transformador “Buck-Boost” do RTPBT serve para realizar a tarefa de somar e subtrair quantidades controladas de tensão, conforme descrito anteriormente, utilizando três “taps” no primário. Os esquemas das placas de potência e controle dos RTPBTs monofásico e trifásico podem ser vistos na Fig. 3 e Fig. 4 respectivamente.

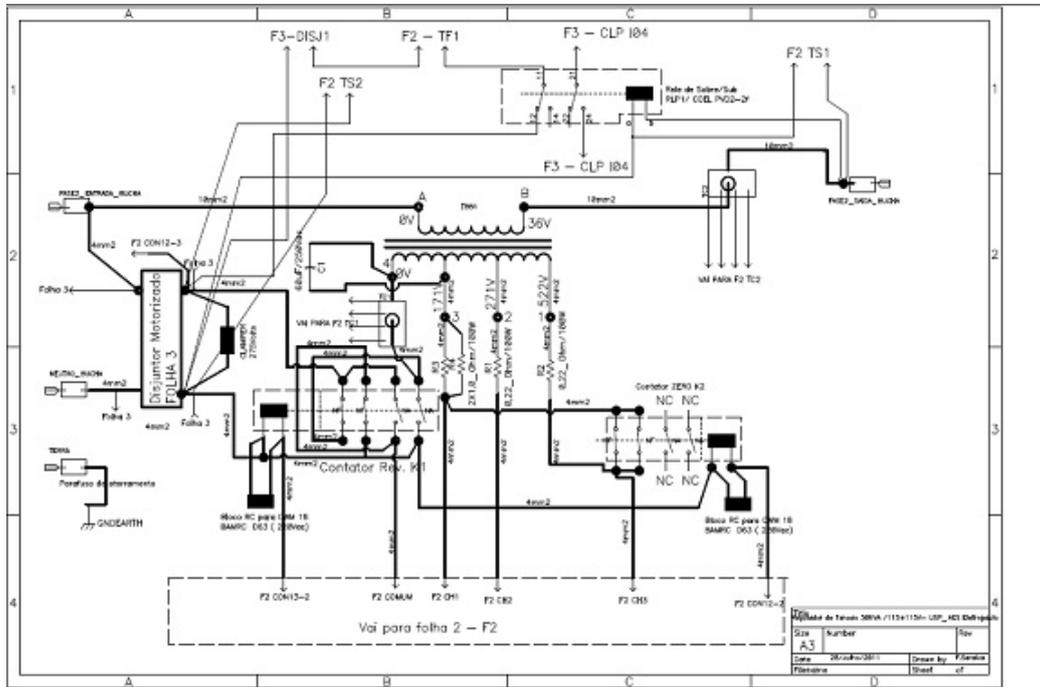


Fig 3 – Esquemas das placas de potência e controle do Regulador de Tensão Monofásico

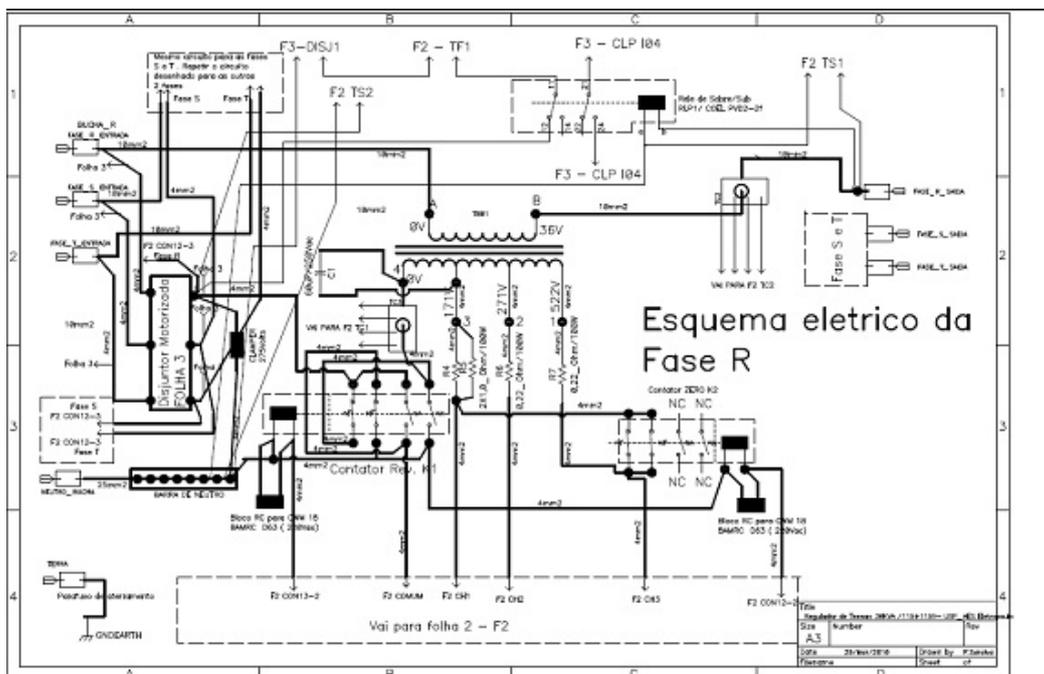


Fig 4 – Esquemas das placas de potência e controle do Regulador de Tensão Trifásico (circuito para uma fase)

O regulador foi projetado para ser conectado ao secundário do transformador de distribuição de um sistema de fornecimento, cuja rede secundária pode ser trifásica ou monofásica. Cada enrolamento secundário de 36V do transformador “Buck-Boost” regula individualmente cada fase do transformador de distribuição. A carga recebe a tensão regulada entre Fase e neutro. As chaves S0, S1, S2 e S3 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 (REV) de polaridade serve para inverter a polaridade do primário do transformador “Buck-Boost” com objetivo de somar ou subtrair tensão de forma a 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, S2 e S3 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 descrita na tabela de estados (Tabela I).

Tabela I. Estados do controle de Tensão do RTPBT

<i>Estado</i>	<i>Nome do estado</i>	<i>Descrição do estado</i>
E0	Power_ON	Espera 5 seg após energização
E1	Soma zero	Espera 1 segundo
E2	Soma ou Subtrai	Se $226V < V_o < 246V$ Fica em E2 se não muda de estado
E3	Zero	Se $226V < V_o < 246V$ Fica em E3 se não muda de estado
E4	Soma pouco	Se $226V < V_o < 246V$ Fica em E4 se não muda de estado
E5	Subtrai pouco	Se $226V < V_o < 246V$ Fica em E5 se não muda de estado
E6	Soma médio	Se $226V < V_o < 246V$ Fica em E6 se não muda de estado
E7	Subtrai médio	Se $226V < V_o < 246V$ Fica em E7 se não muda de estado
E8	Subtrai muito	Se $226V < V_o < 246V$ Fica em E8 se não muda de estado
E9	Sobretensão de saída	(Alarme de Sobretensão) Se $V_o > 246V$ Fica em E9 se não muda de estado
E10	Subtensão de saída	(Alarme de Sobretensão) Se $V_o > 246V$ Fica em E10 se não muda de estado

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 adequada. A tensão a ser

regulada é a tensão eficaz de saída em regime permanente e o intervalo de leitura desta tensão é de 10 minutos, de acordo com o PRODIST. O tempo de atuação para mudança de “taps” das chaves estáticas foi estabelecido em 4 segundos, que foi considerado suficiente de modo a evitar chaveamentos sucessivos devido a mudanças repetitivas das tensões de carga.

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

1) Primeiro estabelecem-se os limites de tensão de saída conforme exigido pelo PRODIST para a rede de distribuição na qual o regulador será instalado.

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 (Fig. 5), como segue:

i. Para tensão de entrada $0,96 \text{ pu} < V_{\text{entrada}} < 1,05 \text{ pu}$, 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 $V_{\text{entrada}} < 0,96 \text{ pu}$, a tensão de saída deve ser levada para 1,02. Neste caso a relação de espiras entre saída e entrada é $k_a = 1,063$. 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 $V_{\text{entrada_limite_inferior_ka}} = 0,96 / k_a$, portanto $V_{\text{entrada_limite_inferior_ka}} = 0,903$;

iv. Operando sobre a reta de inclinação k_a , quando a tensão de entrada $V_{\text{entrada}} < 0,903 \text{ pu}$, a tensão de saída deve ser levada para 1,02. Neste caso a relação de espiras entre saída e entrada é $k_b = 1,129$. 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 $V_{\text{entrada_limite_inferior_kb}} = 0,96 / k_b$, portanto $V_{\text{entrada_limite_inferior_kb}} = 0,850$;

vi. Operando sobre a reta de inclinação k_b , quando a tensão de entrada $V_{\text{entrada}} < 0,850 \text{ pu}$, a tensão de saída deve ser levada para 1,02. Neste caso a relação de espiras entre saída e entrada é $k_c = 1,200$. 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 inferior de tensão de entrada que corresponde ao limite inferior da tensão de saída é $V_{\text{entrada_limite_inferior_kc}} = 0,96 / k_c$, portanto $V_{\text{entrada_limite_inferior_kc}} = 0,800$;

viii. 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 0,99 pu. Neste caso a relação de espiras entre saída e entrada é $k_d = 0,943$. 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 $V_{\text{entrada_limite_superior_kd}} = 1,05 / k_d$, portanto $V_{\text{entrada_limite_superior_kd}} = 1,113$;

x. Operando sobre a reta de inclinação k_d , quando a tensão de entrada $V_{\text{entrada}} > 1,113 \text{ pu}$ a relação de espiras entre a tensão de saída deve ser levada para 0,99pu. Neste caso a relação de espiras entre saída e entrada é $k_e = 0,889$. Aqui a tensão de saída é $V_{\text{saída}} = k_e \times V_{\text{entrada}}$, operação sobre a reta com inclinação k_e ;

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

superior da tensão de saída é $V_{entrada_limite_superior_ke} = 1,05/ke$, portanto $V_{entrada_limite_superior_kd} = 1,181$.

A Fig. 5 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 que atenda à faixa exigida pelo PRODIST, isto é, -5% e +5%.

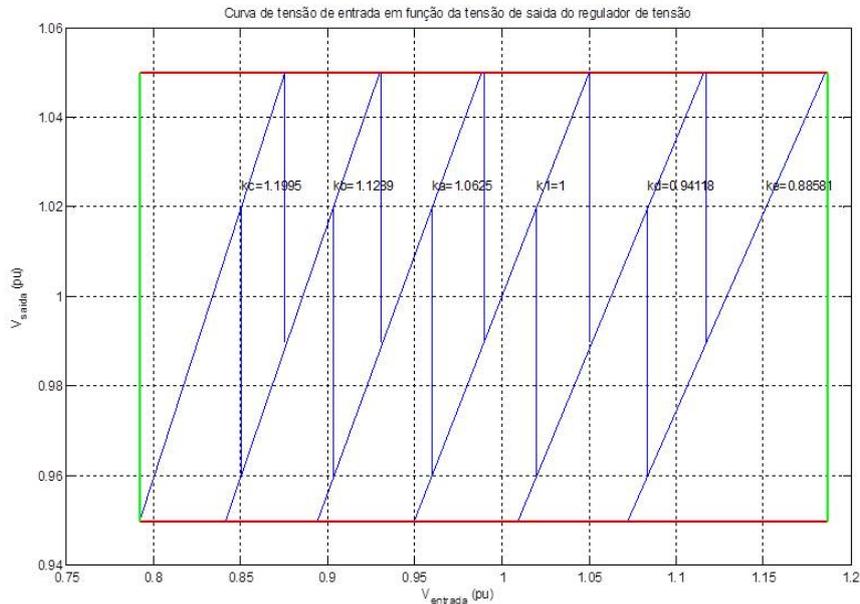


Fig. 5. Função de transferência dos RTPBTs

C. Alterações do Protótipo

Em relação ao protótipo desenvolvido anteriormente [7], algumas modificações foram feitas, visando tornar o equipamento mais robusto e, também, trazer novas funcionalidades aos reguladores:

- Fixação do display na própria placa de controle. Esta mudança evita a captação de ruído EMI/RFI pelo Flat Cable que fazia a conexão da placa de controle ao display no protótipo, que em alguns casos produz o travamento do microprocessador;
- Mudança do layout interno, buscando melhorar a acessibilidade aos componentes internos;
- Reprojetado do transformador "Buck-Boost" para evitar problemas de corrente alta de "inrush" no último “tap”.

D. Opção de comunicação e transmissão de dados

Os reguladores de tensão atuais possuem saídas de dados de medições que permitirão a monitoração via modem GPRS das medições e condição de operação do regulador, enviando estas informações ao servidor da AES Eletropaulo/AES Sul. O microcontrolador utilizado na placa de controle é o Freescale MC9S08AW60, que tem 2 SCIs e 60KB de Flash, que tem disponível 50KB para armazenar dados.

Os dados de medição saíram da placa de controle do Regulador para o modem (instalado dentro da caixa do Regulador) via porta serial RS232 DB9 fêmea. O modem possui um chip que se conecta à internet via GPRS (como se fosse um modem 3G). Os dados da AES-Eletropaulo são enviados para um servidor próprio da concessionária que já recebe dados de outros equipamentos em campo.

E. Ensaio em laboratório

Os ensaios realizados em laboratório foram fundamentais para verificar o desempenho dos reguladores, em diferentes condições de carga.

Os ensaios consistiram em variar as tensões de entrada dos reguladores para condições de carga em vazio, com carga linear ajustável de 0 a 30 kVA e com carga não-linear de 10 kVA. 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 1s.

Com estes ensaios, foi possível avaliar e verificar a atuação dos RTPBTs em condições de regime permanente de carga e constatar se a tensão de saída permanecia dentro da faixa exigida pelo PRODIST. Além disso, obteve-se também a característica de saída, ou seja, a função de transferência entre a tensão de saída e a tensão de entrada do regulador em operação normal.

A Tabela II resume os resultados entre as tensões de entrada e de saída nos três testes referentes às condições de carga em vazio e carga plena. Além disso, a Fig.6 apresenta os registros de um ensaio sobre o regulador trifásico com desequilíbrio em uma das fases de entrada e a sua saída regulada, reduzindo o efeito do desequilíbrio de tensão.

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

Tensão (V) - Regulação por fase			
Em Vazio		Plena Carga	
Entrada	Saída	Entrada	Saída
190	228,5	195	230,2
200	240,6	200	235,6
201	226,7	203,2	226,6
215	242,8	220	245,6
220,6	235,2	223,9	235,5
230	245,3	230,6	242,7
233,5	233,1	236,7	233,4
244	243,4	245	242,5
249,6	232,4	253	233,4
265	246,6	265	244,8
265,5	230,5	270	233,3
280	242,9	285	246,4

3. Conclusões

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 nas faixas precária e crítica.

Os resultados dos testes realizados com os RTPBTs mostraram que, para diferentes condições de carga, os RTPBTs apresentaram um comportamento plenamente satisfatório. Além disso, mesmo para uma condição de tensão desequilibrada na entrada do RTPBT trifásico, este manteve suas tensões de saída reguladas dentro da faixa projetada, minimizando inclusive o desequilíbrio de tensão em sua saída.

Até a submissão deste artigo, os RTPBTs testados foram encaminhados para testes em campo e em casos reais, monitorados pelas concessionárias, mas ainda não houve tempo suficiente para a inclusão de resultados de testes de campo neste artigo.

4. Referências bibliográficas

1. *PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional*. Módulo 8 – Qualidade da energia elétrica. Rev.3, ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, Sep. 2011.
2. C. C. B. Oliveira, M. A. Pelegrini, M. M. Filho, L. N. Silva e 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 e 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, Tech. Rep. NTS 01/2009, Abril 2009 (a).
 4. J. Cebrian, M. A. Pelegrini, S. X. Duarte e 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, Tech. Rep. NTS 03/2009, Abril 2009 (b).
 5. J. Cebrian e 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, Tech. Rep. NTS 20/2009, Setembro 2009 (c).
 6. F. C. Saraiva Filho. “Proposta de Recuperador Dinâmico para Afundamentos de Tensão”, Master thesis, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2002. [Online]. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-10052003-225059/pt-br.php>.
 7. F. C. F. Saraiva, S. X. Duarte, J. C. Cebrian, M. A. Pelegrini and R. Tufaniuk. “Portable Voltage Regulator for Low Voltage Networks”. In: The 21st International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Frankfurt, 2011.
-