



Aplicação de transformador autorregulável "smart-green" para ajuste de tensão em redes de distribuição secundárias

Tema: Qualidade de Energia

Autores: Pablo Senna Oliveira

Co-Autores: Francis Albert Fonseca Nascimento; William Alves de Souza; Henrique Parreira Couto - Cemig Distribuição; Breno Martins - MR do Brasil; Rodrigo Cruz; Vinicius de Oliveira Santos; Anthony Henrique Pinheiro Ferreira Dimas Yamanaka - Trael Transformadores Elétricos

Empresa: Cemig Distribuição S. A.

Resumo

O modelo clássico em que a concessionária é a única e exclusiva fornecedora de energia elétrica vem se alterando desde o advento das instalações iniciais de geração distribuída, principalmente a fotovoltaica, que se popularizou em telhados de residências, edificações comerciais e, nos últimos anos, em fazendas/usinas solares com geração de potências expressivas em pontos da rede de distribuição. Sem dúvida, esse novo cenário, considerando a maior disponibilidade de energia para a população, é extremamente positivo, levando energia a lugares às vezes mais remotos e impulsionando a economia. Porém, o sistema de distribuição, seus equipamentos e o planejamento das concessionárias precisam se adequar para receber bem esse novo protagonista, principalmente considerando o fluxo de energia e a intermitência dessa geração.

Dessa forma, a CEMIG, considerando o impacto da geração distribuída na qualidade de tensão da energia disponibilizada aos seus consumidores, desenvolveu, junto com as empresas MR do Brasil e Trael Transformador, o transformador autorregulável "smartgreen", cujo objetivo é, através de amostras da tensão da rede secundária, realizar comutação automática em carga nos terminais primários do transformador. O aspecto inovador é a utilização de um comutador com ampola a vácuo, e a abrangência aplica-se a todas as empresas de distribuição que possuem variação de tensão na sua rede e necessitam garantir energia de qualidade aos seus clientes e atender aos critérios do órgão regulador. O trabalho tem o objetivo de apresentar o desenvolvimento do "smartgreen", os resultados alcançados e os aprimoramentos do projeto.

1. Introdução

Minas Gerais é o estado com o maior parque de geração solar instalado no Brasil, usufruindo dos benefícios de energia abundante. No entanto, essa mesma energia impacta os parâmetros de qualidade da tensão distribuída aos mineiros devido ao sentido de fluxo e à intermitência, uma vez que sua produção está vinculada à irradiação solar. Dessa forma, podem ocorrer sobretensões ou subtensões, considerando a extensão do alimentador e o posicionamento das cargas.

A CEMIG planeja suas redes para atender aos valores de tensão determinados pela ANEEL. No entanto, mesmo quando o planejamento e o projeto de redes são realizados de maneira normativa, esses valores podem ser violados por efeitos da geração distribuída. Sendo assim, a concessionária pesquisou no merca-

do soluções que poderiam contribuir para essa situação, disponibilizando sempre aos seus consumidores a tensão regulamentada. Uma solução ainda não testada na Cemig era o transformador autorregulável, que realiza amostragem da tensão da rede secundária, analisando se está dentro dos padrões e, caso necessário, o controle envia um comando para comutação do primário, ajustando a tensão da rede secundária. A seguir, demonstraremos como foi essa pesquisa, fabricação, testes e instalação.

2. Desenvolvimento

Violação de tensão (DRP e DRC) tem sido um problema crescente na Cemig, que tem aumentado ano a ano. Até o surgimento da GD, as violações de tensão ocorriam no faixa inferior da faixa adequada. Atualmente, as maiores compensações pagas pela Cemig são motivadas por violação do limite superior da faixa adequada, mostrando uma mudança na dinâmica da rede de distribuição. Para testar os transformadores, a Cemig identificou pontos, que mesmo estando próximos à subestação, com os transformadores dimensionados corretamente, comprimento e bitola dos cabos em conformidade com as correntes e queda de tensão, apresentavam em alguns momentos tensões fora dos valores determinados pela ANEEL.

Para este trabalho, a Cemig identificou dois pontos com problemas de violação de tensão nos limites inferior e superior da faixa adequada e com pagamento de compensações.

Local de Instalação

Ponto 1: Município Uberaba – Transformador – Tensão nominal 13,8kV/220V

O transformador possuía 82 clientes sendo 15 usinas fotovoltaicas com potência instalada 64kVA. A demanda estimada era 69,2kVA. A figura 1 mostra uma vista do circuito. As bandeiras amarelas representam as usinas.



Figura 1: Vista do circuito

A Cemig pagava compensações para os clientes deste transformador. A figura 2 mostra um relatório de conformidade de tensão.

RELATÓRIO DE CONFORMIDADE DE TENSÃO EM REGIME PERMANENTE					
Identificação		Tabela de registros			
		Classe [p.u.]	Centro [V]	V _{av}	V _{av}
Nome da área	ARSA001 - #00	0,80	101,60	0	0
Equipamento	PowerNET P-300 G4 (standard 17641)	0,81	102,87	0	0
Período	22/12/2023 00:00:00 à 26/12/2023 13:50:00	0,82	104,14	0	0
Intervalo de registros(s)	600	0,83	105,41	0	0
Registros válidos	1008	0,84	106,68	0	0
Tensão de referência [V]	127,00	0,85	107,95	0	0
Limite de tensão adequada		0,86	109,22	0	0
Mínimo [V]	Máximo [V]	0,87	110,49	0	0
117,00	133,00	0,88	111,76	0	0
		0,89	113,03	0	3
Registros por faixa		0,90	114,30	0	19
Faixa Adequada Precária Crítica		0,91	115,57	1	20
V _{av} 1007 1 0 DRP 8,53 3,00		0,92	116,84	4	19
V _{av} 920 86 2 DRC 0,29 0,50		0,93	118,11	10	32
Compensação [%] 16,00		0,94	119,38	24	57
		0,95	120,65	54	80
Mínimos		0,96	121,92	82	137
Faixa Valor [V] Data Hora		0,97	123,19	111	155
V _{av} 115,75 26/12/2023 19:20:00		0,98	124,46	184	130
V _{av} 113,36 26/12/2023 20:20:00		0,99	125,73	175	74
Máximos		1,00	127,00	118	73
Faixa Valor [V] Data Hora		1,01	128,27	97	70
V _{av} 132,96 23/12/2023 12:10:00		1,02	129,54	66	40
V _{av} 135,97 25/12/2023 13:50:00		1,03	130,81	39	31
Glossário		1,04	132,08	32	29
DRP - índice de duração relativa da transgressão para tensão precária, em percentual		1,05	133,35	1	25
DRC - índice de duração relativa da transgressão para tensão crítica, em percentual		1,06	134,62	0	13
Compensação - índice de compensação por transgressão dos níveis de tensão adequados, não leva em conta o valor de encargo de uso do sistema de distribuição		1,07	135,89	0	1
Comentários		1,08	137,16	0	0
VT_87853_NOVT_135169157_P_1011118761_2024_01_02		1,09	138,43	0	0
		1,10	139,70	0	0
		1,11	140,97	0	0
		1,12	142,24	0	0
		1,13	143,51	0	0
		1,14	144,78	0	0
		1,15	146,05	0	0
		1,16	147,32	0	0
		1,17	148,59	0	0
		1,18	149,86	0	0
		1,19	151,13	0	0
		1,20	152,40	0	0

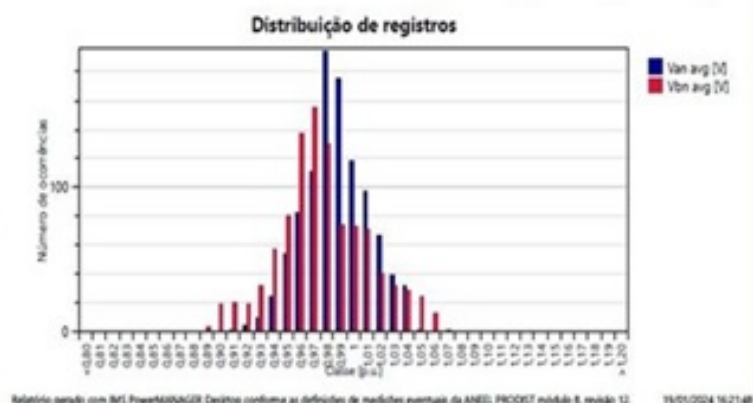


Figura 2: Relatório de Conformidade

Neste relatório, entre os 1008 registros válidos para cada fase, 87 estavam na faixa precária e 2 registros na faixa crítica. A tabela abaixo mostra os valores máximos e mínimos registrados no relatório.

Tabela 1: Valores Máximos e Mínimos

	Mínimos		Máximos	
	Valor	Hora	Valor	Hora
Fase A	115,75	19:20	132,96	12:10
Fase B	113,36	20:20	135,97	13:50

Nesta unidade consumidora, o valor mensal ressarcido era R\$38,13.

Ponto 2: Município Bocaiuva – Transformador – Tensão nominal 13,8kV/220V

O transformador possuía 2 clientes com 2 usinas fotovoltaicas com soma de potência instalada 72kVA. A demanda estimada era 46,5kVA. A figura 3 mostra uma vista do circuito.

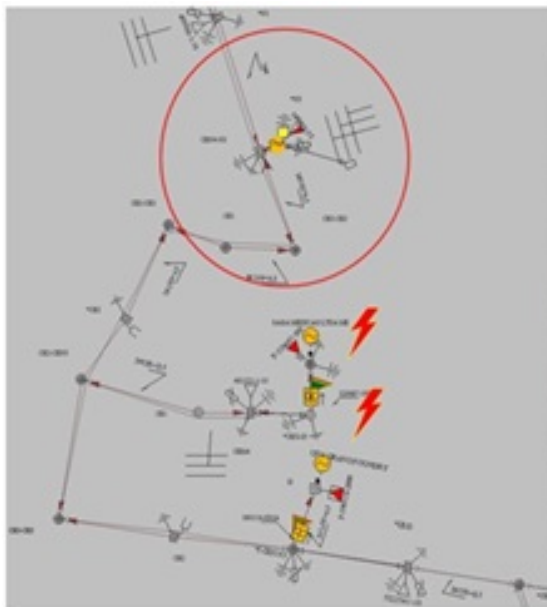


Figura 3: Vista do Circuito

A Cemig pagava compensações para os clientes deste transformador. A figura 2 mostra um relatório de conformidade de tensão.

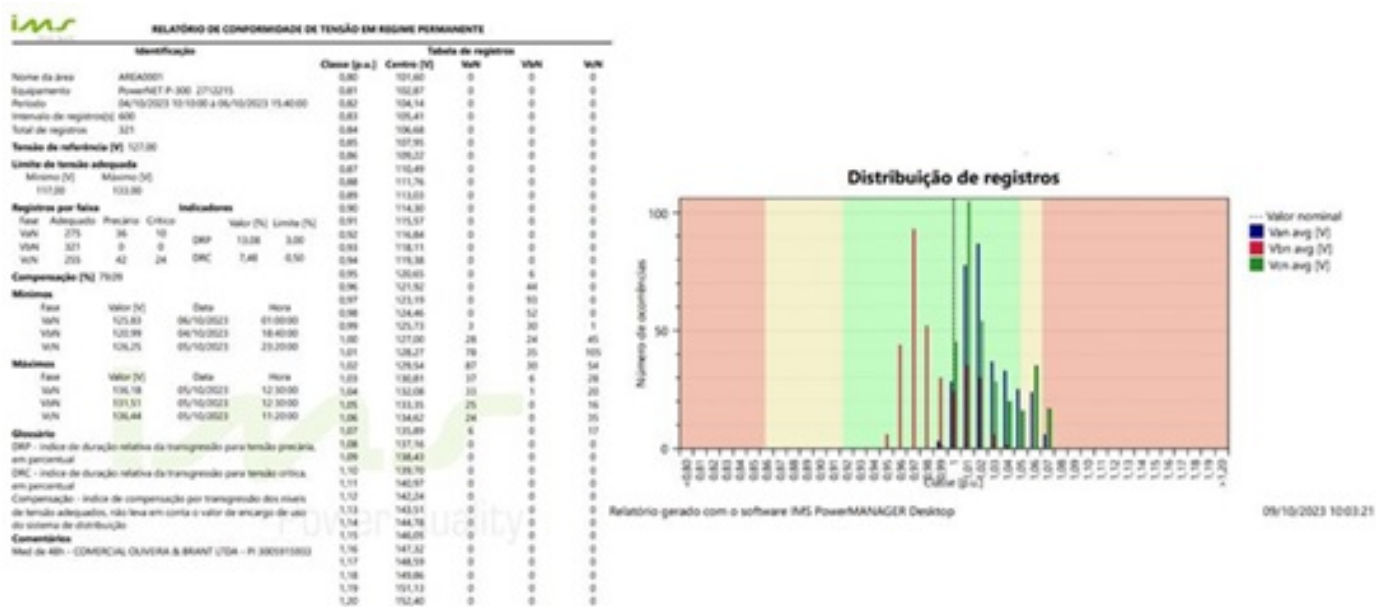


Figura 4: Relatório de Conformidade

Neste relatório, entre os 1008 registros válidos para cada fase, 194 estavam na faixa precária e 48 registros na faixa crítica. As violações aconteciam na fase A e C. A tabela abaixo mostra os valores máximos e mínimos registrados no relatório.

Tabela 2: Valores Máximos e Mínimos

	Mínimo		Máximo	
	Valor	Hora	Valor	Hora
Fase A	124,97	20:00	135,55	14:20
Fase B	119,59	20:40	130,75	12:50
Fase C	125,94	06:20	136,51	13:00

Somente com essas unidades consumidoras o pagamento mensal de compensação era R\$1.978,95.

COMUTADOR

O sistema de comutação utilizado no transformador SmartGreen é denominado Ecotap VPD. Este equipamento foi desenvolvido pela empresa alemã Machinery Fabric Reinhausen, conhecido no mercado como MR. O princípio de correção de níveis de tensão por meio de comutadores já é amplamente reconhecido. No entanto, o uso de comutadores em transformadores de distribuição não havia sido consolidado devido ao seu alto custo e à necessidade adicional de manutenção que eles causam.

O comutador é instalado no primário do transformador de distribuição e conta com nove passos. O comutador cria uma faixa de regulação de até 20%. É um equipamento que faz a transição rápida, usa ampolas a vácuo, possui robustez mecânica e não acrescenta perdas ao transformador.



Comutadores convencionais utilizam óleo para extinguir os arcos elétricos gerados durante o processo de comutação, o que provoca a queima do óleo, a geração de gases e o deterioramento do meio isolante. Em função disso, é necessário monitorar o óleo e realizar manutenções preventivas. O comutador Escota VPD extingue os arcos em ampolas a vácuo, o que elimina o desgaste do meio isolante e, conseqüentemente, a necessidade de monitoramento e manutenção ao longo da vida útil do transformador.

Outra tecnologia aplicada nesse comutador é o uso de um resistor de transição, aliado a uma comutação rápida. O processo de comutação é realizado em 0,42 segundos. O resistor de transição atua durante esse pequeno intervalo, garantindo que o impacto do uso do comutador não cause perdas adicionais ao sistema. A robustez mecânica do comutador é assegurada pelo atendimento ao ensaio IEC 60214-1:2014, cláusula 5.2.3, ensaio de comutação, onde o equipamento comutou com a corrente nominal mais de quinhentas mil vezes sem a necessidade de manutenção.

CONTROLE

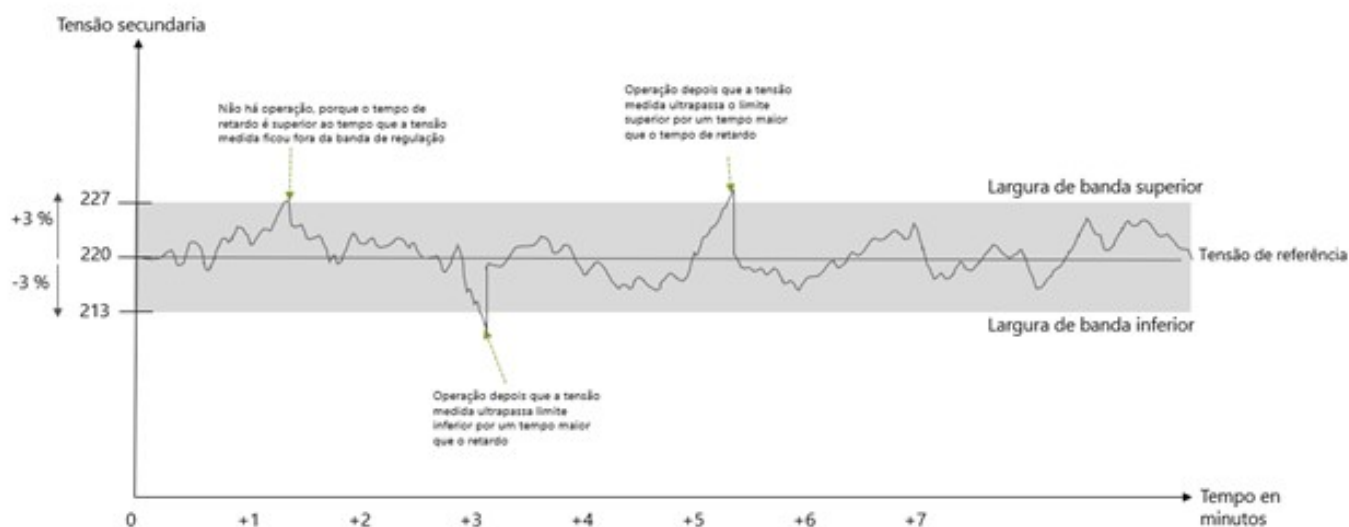
A unidade de controle do Ecotap VPD é responsável pelo monitoramento e acionamento do equipamento. O controle é instalado no secundário do transformador de distribuição e tem a função de medir, atuar e monitorar o sistema.



O controle utiliza a tensão do secundário do transformador como parâmetro a ser regulado. Sua principal função é manter a tensão medida no secundário do transformador dentro dos valores estabelecidos, conhecidos como set points.

A tensão de referência é o set point utilizado para essa regulação. Para evitar comutações excessivas, é necessário o uso de uma faixa de insensibilidade, chamada de insensibilidade B1, em torno dessa tensão de referência, além de uma temporização, denominada T1.

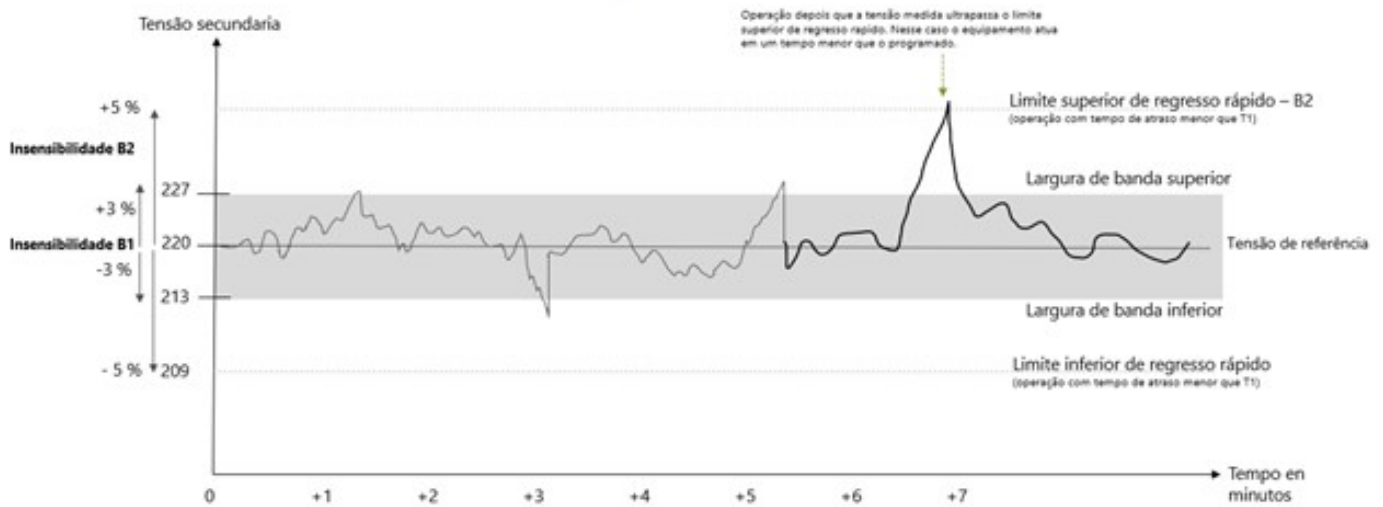
A insensibilidade B1 cria uma largura de banda superior e inferior. O objetivo do controle é manter a tensão do secundário do transformador SmartGreen sempre dentro dessa faixa. O gráfico abaixo ilustra como esses ajustes atuam para garantir a regulação da tensão, considerando uma tensão de referência de 220 volts e uma faixa de insensibilidade B1 de 6%.



Conforme ilustrado no gráfico, a unidade de controle monitora os níveis de tensão ao longo do funcionamento do equipamento. Sempre que a tensão medida ultrapassa a faixa de insensibilidade, um contador interno é acionado. Se o tempo de violação da tensão medida for maior do que o tempo configurado, o controle envia um sinal para elevar ou reduzir o tap do transformador. Caso o tempo de violação não ultrapasse o tempo parametrizado, o controle não realiza a comutação.

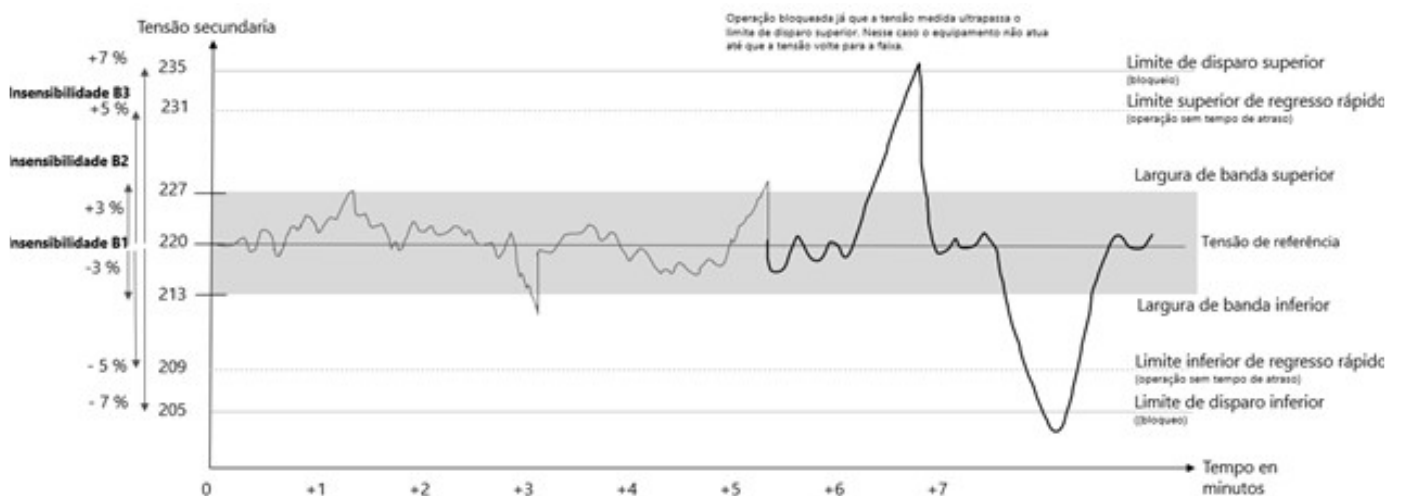
Existe também uma segunda faixa de regulação, que possui uma atuação mais rápida. Essa faixa é utilizada para evitar que eventos de sobretensão ou subtensão, que ultrapassassem a faixa de insensibilidade, afetem o

sistema por um longo período. A faixa é definida por um novo fator de insensibilidade, chamado B2. Sempre que ocorrer uma violação que não possa ser corrigida pela insensibilidade B1 e sua temporização, e a tensão continuar aumentando em relação à violação, essa faixa passa a atuar com um tempo de resposta de 10 segundos. O gráfico abaixo ilustra a atuação dessa faixa de insensibilidade B2.



Se a tensão medida atingir os limites da faixa de regresso rápido, definida pela insensibilidade B2, o equipamento atuará com uma temporização de 10 segundos para evitar uma violação prolongada de tensão. Essas duas faixas têm como objetivo manter a regulação da tensão de forma estável.

Além dessas faixas, há uma terceira faixa cujo objetivo não é a regulação, mas sim a proteção do equipamento. Caso a tensão ultrapasse as faixas B1 e B2, a atuação do comutador pode causar danos ao próprio comutador ou até mesmo ao transformador. Esses casos são considerados extremos, nos quais ocorre uma violação muito severa dos níveis de tensão. Para preservar o equipamento, o controle bloqueia a operação do comutador até que a tensão medida retorne à faixa segura. Essa faixa é definida pelo ajuste de insensibilidade B3, que estabelece os limites superior e inferior para o disparo de proteção. A atuação dessa terceira faixa de ajuste é apresentada no gráfico abaixo.



No gráfico acima, observa-se que a operação do equipamento é bloqueada quando a tensão ultrapassa a faixa de insensibilidade B3, no limite superior de regresso de disparo. A regulação será retomada assim

que a tensão retornar à faixa permitida. Esse bloqueio é realizado para evitar que o equipamento realize comutações em condições de tensão muito fora dos parâmetros de segurança.

O conjunto desses ajustes estabelece faixas de monitoramento constante. O equipamento atuará de acordo com os valores parametrizados e manterá a tensão dentro dos limites estabelecidos. Dessa forma, mesmo em casos de sobretensões causadas, por exemplo, por geração fotovoltaica ou variações de tensão no primário, o transformador SmartGreen garantirá sempre um nível de tensão adequado para os clientes.

PROJETO e FABRICAÇÃO:

O projeto e fabricação do transformador foi realizado pela Trael Transformadores com a MR apoiando no projeto e fabricação de como instalar o comutador. O transformador escolhido foi um transformador de 75kVA (Ø) com taps mostrados na tabela abaixo e tensão secundária 220V. As perdas consideradas foram o nível C da ABNT 5440 e utilização de óleo vegetal.

Tap 1	Tap 2	Tap 3	Tap 4	Tap 5	Tap 6	Tap 7	Tap 8	Tap 9
14400	14250	14100	13950	13800	13650	13500	13350	13200

A faixa de regulação do transformador foi definida para evitar grandes alterações elétricas e aumento em dimensões e peso. Também foi considerado as faixas determinada no PRODIST – Módulo 8.

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(202 \leq TL \leq 231) / (117 \leq TL \leq 133)$
Precária	$(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233) / (110 \leq TL < 117 \text{ ou } 133 < TL \leq 135)$
Crítica	$(TL < 191 \text{ ou } TL > 233) / (TL < 110 \text{ ou } TL > 135)$

Externamente o transformador SmartGreen difere de um transformador convencional pelo comutador instalado na tampa do transformador. O comutador é protegido por uma tampa de metal e para garantir uma distância de isolamento, definiu-se pela de buchas de 24,2kV neste transformador. A tabela a seguir mostra as dimensões do transformador.

	A (mm)	L (mm)	C (mm)	m (kg)
Convencional	1136	700	991	510
Smart Green	1337	840	1133	585

A seguir algumas fotos do transformador durante o processo de produção, montagem e ensaios.



RECEBIMENTO:

Para recebimento dos transformadores, o transformador foi submetido aos ensaios de rotina. Os ensaios de rotina foram realizados conforme ABNT NBR 5440. Também foram realizados:

- elevação de temperatura;
- nível de ruído;
- impulso atmosférico em todas as buchas AT;
- tensão induzida e fator de Potência e Capacitância;
- ensaios de óleo vegetal;
- funcionamento do comutador.

INSTALAÇÃO UBERABA E BOCAIUVA:

As instalações dos transformadores ocorreram em setembro de 2024 nos locais apresentados no item acima. Para efeitos de comparação é importante manter a ligação dos cabos. Não houve alterações nas estruturas dos postes e nas proteções de sobrecorrente.

As figuras a seguir mostram alguns momentos da instalação dos transformadores.



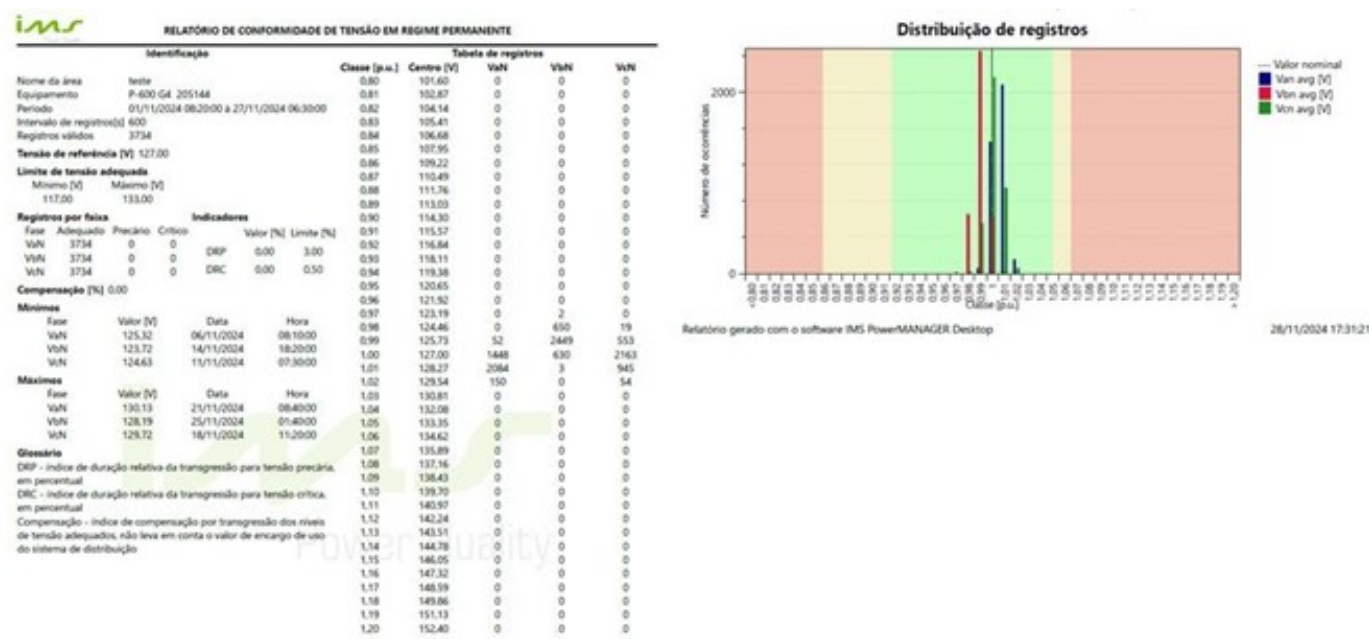
Os controles do comutador foram ajustados com os seguintes valores:

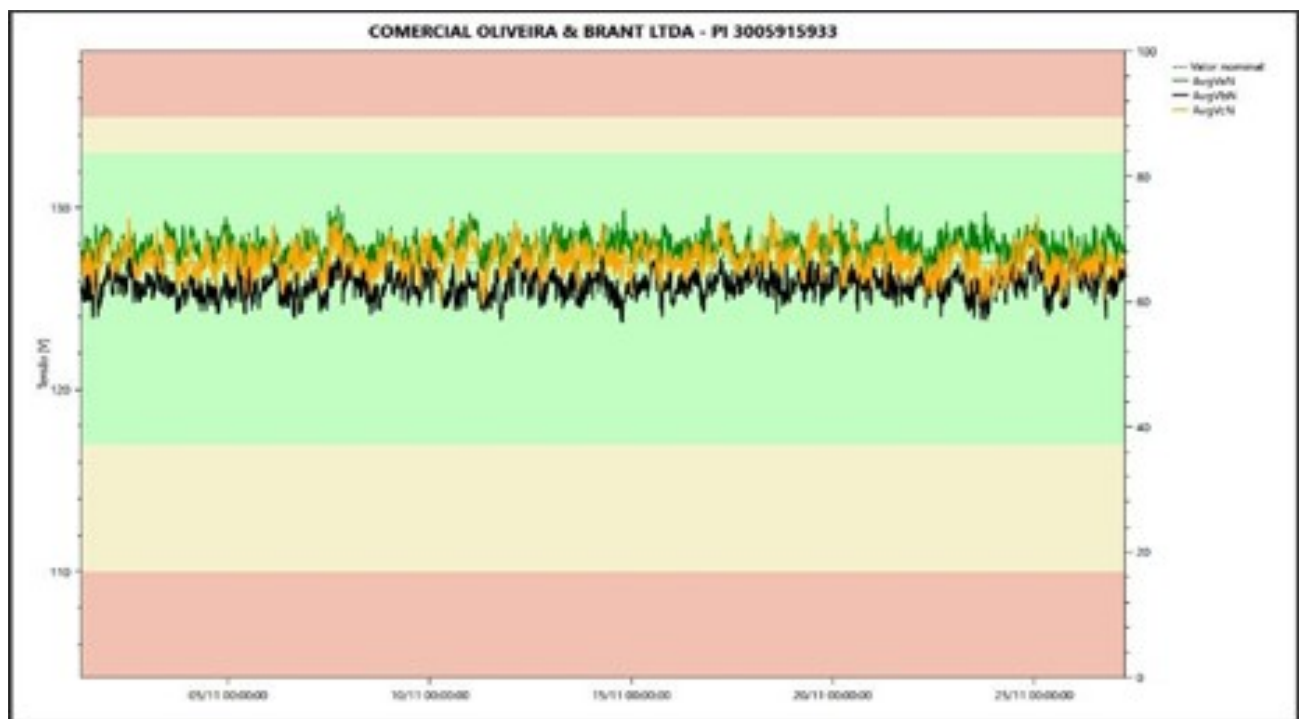
Local de instalação	Uberaba/MG	Bocaiúva/MG
Data de Instalação	17/09/2024	19/09/2024
Potência		75 kVA
Tensões		13,8 kV / 127 V
Faixa de regulação		1,08% por tap, simétrico, ±4,32%
Tipo de Óleo		Vegetal
	Tensão de referência	127 V
	Faixa de insensibilidade B1	1,5%
Ajustes	Delay T1	30 s
	Faixa de insensibilidade B2	4%
	Delay T2	3 s

RESULTADOS

Bocaiúva

Após a instalação do transformador, a equipe responsável pelas medições de tensão com finalidade de DRP e DRC instalou o medidor na unidade consumidora. As tensões medidas estavam dentro da faixa adequada estabelecida pelo PRODIST e a Cemig pode interromper o pagamento das compensações.





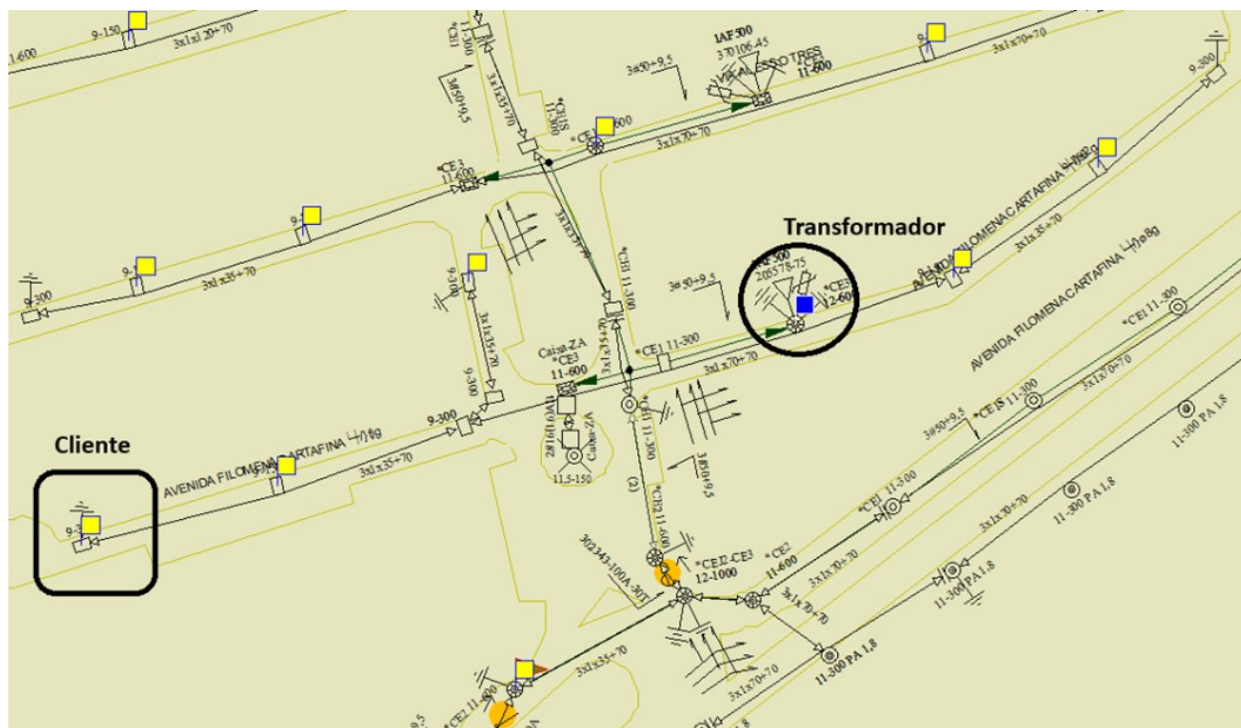
Uberaba

Na cidade de Uberaba, a equipe de campo instalou um medidor no transformador e um medidor na unidade reclamante com pagamento de compensação.

As medições no transformador mostraram que as tensões na bucha secundária do transformador em nenhum momento ultrapassaram os 130,6V. Na unidade consumidora unidade, a tensão máxima chegou a 135,7V (tensão na faixa crítica).

	Transformador						Unidade Consumidora			
	Fase A		Fase B		Fase C		Fase A		Fase B	
	VI (V)	Hora	VI	Hora	VI	Hora	VI	Hora	VI	Hora
Máx	130,54	11:00	130,40	12:10	129,82	12:10	135,73	11:20	132,56	11:30
Méd	128,04		127,45		127,50		126,59		126,90	
Min	124,41	18:10	123,91	18:10	124,25	18:50	115,67	18:50	118,65	22:10

Os dados mostram que na bucha do transformador em nenhum momento violou a faixa adequada. Na unidade consumidora, verificou-se variação de 20V. As elevações de tensão ocorrem no momento de funcionamento da usina e as quedas de tensão a noite. Relembrando que neste circuito de baixa tensão existem 15 micros. Por ser um cliente instalado no fim de um circuito de baixa tensão essas variações são mais extremas. A figura a seguir mostra um detalhamento do circuito com o transformador e o cliente em questão. O cliente está posicionado a 173m do transformador, sendo 80 metros cabo 3x1x70+70 e 93 metros de 3x1x35+70.



O relatório de conformidade de tensão emitido após a instalação do transformador mostra que 21 registros estão na faixa precário (limite 30 registros) e 2 registros na faixa crítica (limite 5 registros), portanto foi possível atender os parâmetros regulatórios, cessando o pagamento de compensação.

3. Conclusão

A aplicação dos transformadores com comutação de tap automática mostrou-se como mais uma solução técnica para regularização do pagamento de compensações. A instalação é simples sendo na maioria das vezes tratado como um projeto de substituição de transformador, não havendo troca de postes, alteração de estruturas etc.

No caso de Uberaba, o transformador manteve a tensão na faixa adequada na sua saída, entretanto não conseguiu adequar a tensão na faixa adequada em todo período de medição no cliente. Mesmo assim foi possível interromper o pagamento da compensação porque a quantidade de registros fora da faixa adequada estava dentro dos limites estabelecidos.

Por ser ainda um desenvolvimento, é necessário aprofundar os estudos e confirmar se a faixa de regulação dos transformadores definida pela Cemig e os ajustes (faixa de sensibilidade e delay) do controle estão adequados a todas as situações.

4. Referências bibliográficas

ABNT NBR - 5440 - Transformadores para redes aéreas de distribuição — Requisitos
Manual de instrução e instalação - Ecotap VPD