

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO CONTROLE AUTOMÁTICO INTEGRADO DE TENSÃO E POTÊNCIA REATIVA EM SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

BÁRBARA R. ROSADO, TIAGO R. RICCIARDI, MASSAYUKI SUZUKI, MARCOS J. RIDER

*Departamento de Sistemas e Energia, Faculdade de Eng. Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas
Av. Albert Einstein, 400, Cidade Universitária 'Zeferino Vaz', 13083-852, Campinas, SP, Brasil
E-mails: {brosado, tiago, easuzuki, mjrider}@dsee.fee.unicamp.br*

Abstract—This paper presents a methodology for distribution substations volt/var control performance evaluation, with emphasis for non-conventional rule-based control philosophies that prioritizes the voltage regulation through the switching of capacitor banks installed in the transformer busbar that supplies the medium-voltage primary distribution feeders. The methodology is based on the generation of synthetic high-resolution load demand profiles and time-series power flow analysis for the simulation of the substation transformer tap and automatic capacitor banks switching. The presented methodology is then applied in a case study of a real distribution substation of a Brazilian utility and the results show that the proper parameterization of the automatic control can improve the substation voltage and power factor profiles while reducing the number of on-load tap changing regulators operation in up to 42%.

Keywords—Electric power distribution, substation, volt/var control, voltage regulation, capacitor banks, time-series power flow.

Resumo—Este artigo apresenta uma metodologia para avaliação de desempenho do controle de tensão e reativos em subestações de distribuição, com ênfase para filosofias não convencionais de controle que priorizam a regulação de tensão através do chaveamento de bancos capacitores instalados nos barramentos de saída para os alimentadores. Tal metodologia é baseada na sintetização de curvas de carregamento dos alimentadores em alta resolução e no cálculo de fluxo de carga série-temporal para simulação da atuação de taps de transformadores reguladores e da comutação dos bancos de capacitores automáticos. A metodologia foi utilizada em um estudo de caso de uma subestação real de uma concessionária brasileira e os resultados indicam que a parametrização adequada do controle automático pode melhorar o perfil de tensão e de fator de potência da subestação enquanto reduz o número de operações de comutação de tap de transformadores reguladores de tensão em até 42%.

Palavras-chave—Distribuição de energia elétrica, subestação, controle de tensão e reativos, regulação de tensão, bancos de capacitores, fluxo de carga série-temporal.

1 Introdução

O controle de tensão nas redes de distribuição de energia elétrica é uma das principais responsabilidades técnicas das concessionárias distribuidoras (Eletróbrás, 1985). Tensões de atendimento às cargas em regime permanente abaixo ou acima da faixa adequada podem resultar em operação imprópria ou ineficiente de equipamentos elétricos (*e.g.* lâmpadas podem propiciar iluminação incorreta em função de tensão de atendimento inadequada, motores elétricos podem operar com velocidade acima ou abaixo do requerido, etc). Podem resultar ainda em desligamento de cargas sensíveis como, por exemplo, equipamentos eletrônicos, hospitalares, de computação e de controle e automação de processos. Adicionalmente, sub-tensões podem provocar aquecimento e perda de torque em motores elétricos e sobretensões podem elevar perdas em vazio em transformadores e deteriorar a isolação de equipamentos elétricos em geral (Short, 2006).

O perfil de tensão nos sistemas de potência tem estreita relação com os fluxos de potência reativa pela rede. Para manutenção de um perfil de tensão adequado, é importante que a demanda reativa seja suprida o mais próximo possível do consumo, evitando-se que as redes de transmissão e distribuição sejam congestionadas com fluxos de potência não associados ao transporte de energia entre as fontes e as cargas. Desse modo, o gerenciamento do suporte de reativos (ou, de modo equivalente, do fator de potência) é um dos principais mecanismos de controle de tensão à disposição das concessionárias operadoras dos sistemas de energia elétrica.

A tensão de atendimento aos consumidores de energia elétrica no Brasil é regulada pelo Módulo 8 do

PRODIST (ANEEL, 2018). Para garantir atendimento confiável e de qualidade aos mais diversos tipos de consumidores, as distribuidoras de energia elétrica instalam e operam diversos equipamentos responsáveis por compensar as quedas de tensão decorrentes da circulação de corrente através das impedâncias dos circuitos de distribuição, mantendo a tensão de atendimento aos consumidores em uma faixa adequada. O barramento secundário (média tensão) das subestações de distribuição é o ponto mais estratégico das diferentes estratégias de controle de tensão nas redes de distribuição; em muitos casos, esse é o último ponto dos sistemas de energia elétrica onde a tensão é monitorada e/ou controlada.

Tipicamente, nas subestações de distribuição o transformador regulador de tensão é o único equipamento disponível para controle de tensão. As poucas subestações que possuem bancos de capacitores para suporte de reativos os têm normalmente instalados nas barras de alta tensão, para controle de tensão/reativos do sistema de transmissão. Em subestações com transformadores de elevada capacidade de transformação e com grandes bancos de capacitores, porém, o desempenho da regulação de tensão da subestação pode ser melhorado através de filosofias alternativas, como por exemplo, a utilização primeiramente de bancos capacitores para correção da tensão, seguidos de ajustes secundários com o tap dos transformadores reguladores (Passarini et al, 2008).

O objetivo deste artigo é apresentar uma metodologia que permita avaliar o desempenho do controle de tensão e reativos em subestações de distribuição de energia elétrica. Tal metodologia pode ser utilizada para ajuste e sintonia de parâmetros do sistema de controle volt/var de tais subestações. O restante do artigo

é organizado da seguinte forma. A seção 2 apresenta uma revisão teórica de conceitos, estratégias e equipamentos relacionados ao controle de tensão e reativos em subestações de distribuição de energia elétrica. A metodologia para avaliação de desempenho do controle de tensão e potência reativa na subestação é apresentada na seção 3. Um estudo de caso de aplicação da metodologia é então apresentado na seção 4 ao passo que as principais conclusões obtidas neste artigo são apresentadas na seção 5.

2 Controle de Tensão/Reativos em Subestações de Distribuição de Energia Elétrica

Esta seção apresenta uma breve revisão teórica sobre o controle de tensão/reativos em subestações de distribuição bem como discute as filosofias do controle integrado foco deste artigo.

2.1 Controle Convencional (Tradicional)

O controle de tensão em subestações de distribuição é feito, tradicionalmente, através de transformadores reguladores com comutação de tap sob carga (em inglês, *Load Tap-Changing (LTC) transformers*). Sua lógica de controle consiste em comparar a tensão secundária do transformador com um valor de referência; caso o valor monitorado exceda uma banda morta centrada na referência por período superior a um tempo de retardo de atuação, o comutador atua na relação de transformação para que a tensão no secundário retorne para a faixa de referência. Esse ajuste pode ser estático ou dinâmico, podendo haver também compensação de queda de tensão para que a regulação seja feita em um ponto remoto do sistema, técnica conhecida como LDC (em inglês, *Line Drop Compensation*) (Felber et al, 2010).

Quanto aos bancos de capacitores, tipicamente, não há instalações em subestações para controle de tensão/reativos do sistema de distribuição. Nestes locais, quando encontrados, são instalados em barras de alta tensão, visando o controle de tensão/reativos do sistema de transmissão à montante, podendo ser controlados remotamente pelo operador do sistema. Os bancos de capacitores tradicionalmente utilizados para controlar o fator de potência das instalações de distribuição são instalados ao longo de alimentadores em média tensão. Podem ser fixos ou ainda controlados; neste caso o mais comum é o controle por tempo ou por potência reativa passante (Short, 2006).

É importante ressaltar que nas filosofias de controle de tensão/reativos convencionais reguladores e capacitores operam de modo independente, com reguladores monitorando tensão e capacitores potência reativa. Não há nas lógicas de controle uma tomada de decisão conjunta ou integrada que coordene a operação de tais equipamentos.

2.2 Controle Integrado de Tensão e Reativos

O controle integrado de tensão e potência reativa discutido nesta subseção é utilizado em algumas subestações específicas de uma concessionária de distri-

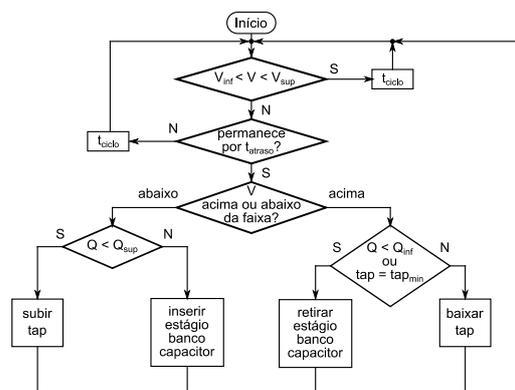


Figura 1. Fluxograma do controle integrado de tensão/reativos.

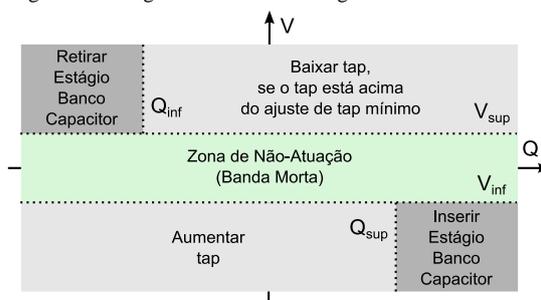


Figura 2. Diagrama esquemático de atuação do controle integrado de tensão/reativos no espaço QV .

buição. Neste arranjo, bancos de capacitores são instalados nas barras de média tensão da subestação (secundário do transformador) e o posicionamento do tap do transformador regulador de tensão e a quantidade de estágios dos bancos capacitores em operação é definida através de uma lógica de controle que, neste artigo, será denominada de COINTER (Controlado Integrado de Tensão e Reativos).

O fluxograma do COINTER é apresentado na Figura 1 e um diagrama esquemático de atuação é apresentado na Figura 2. Sua filosofia consiste em manter a tensão no barramento secundário da subestação (V) dentro de uma faixa de operação pré-definida (V_{inf} , V_{sup}) e ainda reduzir o fornecimento de reativos por parte do sistema de transmissão que alimenta a subestação, controlando os reativos da carga do transformador (Q) através do chaveamento de bancos de capacitores instalados na barra secundária da subestação. Dentro da lógica de operação do COINTER, a prioridade é sempre manter o máximo número de estágios dos bancos de capacitores ligados. Se a tensão monitorada permanecer abaixo de V_{inf} por um período superior à t_{atraso} , ao invés de subir uma posição do tap, o controle insere um estágio dos bancos de capacitores caso a potência reativa da carga do transformador esteja acima do valor Q_{sup} . No extremo oposto, se a tensão monitorada permanecer acima de V_{sup} prioriza-se a redução de tap; um estágio de bancos de capacitores só será retirado caso a potência reativa da carga do transformador esteja abaixo do valor Q_{inf} (capacitiva), ou seja, com uma carga capacitiva além do ajuste.

Uma das motivações para utilização deste esquema de controle integrado de tensão e reativos é a possibilidade de reduzir o número de operações de comutação de tap do transformador regulador de tensão,

bem como de manter um fator de potência bastante próximo do unitário nas linhas de transmissão que alimentam a subestação. Na próxima seção apresentaremos uma metodologia que será posteriormente aplicada em um estudo de caso para avaliação de desempenho do controle COINTER.

3 Metodologia para Avaliação de Desempenho do Controle de Tensão/Reativos em Subestações

Nesta seção é apresentada a metodologia de avaliação de desempenho do controle volt/var de subestações de distribuição. A metodologia é baseada em ferramentas clássicas de simulações (análise) computacionais de sistemas de energia elétrica.

3.1 Modelagem da Subestação

Para avaliação de desempenho do controle volt/var integrado é necessária a modelagem em regime permanente dos seguintes componentes da subestação de distribuição: equivalente do sistema de alta tensão, transformador de potência, bancos de capacitores conectados na barra de média tensão e carga equivalente dos alimentadores. O sistema supridor da subestação em alta tensão é modelado como uma fonte de tensão, com valores definidos a cada intervalo de tempo conforme uma série temporal. Para a modelagem dos transformadores de potência, os parâmetros mais importantes são as tensões nominais dos enrolamentos e das derivações do mecanismo de comutação de tap, o esquema de conexão dos enrolamentos trifásicos e a impedância equivalente entre o enrolamento primário e secundário do equipamento. Para a modelagem dos bancos de capacitores, as informações mais importantes são a tensão nominal, a quantidade de estágios, a potência reativa à tensão nominal e o esquema de conexão. Finalmente, para modelagem da carga dos alimentadores, são utilizadas curvas de carga sintéticas conforme será discutido na seção 3.2.

3.2 Sintetização de Curvas de Carga com Alta Resolução para Simulação do Sistema de Controle

O controle de tap dos reguladores de tensão das subestações atua em horizontes de, tipicamente, até 60 segundos (Short, 2006). Para simulações computacionais do sistema de controle de tensão e potência reativa faz-se necessário, portanto, perfis de carregamento do transformador com uma resolução compatível com esse intervalo de tempo.

As concessionárias mantêm registro histórico dos dados de operação da rede de distribuição, coletados a partir do sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), com valores máximo, médios e mínimos armazenados em intervalos de tempo de, tipicamente, 15 minutos. Esses dados são adequados para uma série de estudos de planejamento e operação dos sistemas de distribuição de energia elétrica, porém são inadequados para simulação pormenorizada do sistema de controle de tensão e reativos (COINTER). Desse modo, uma das etapas da metodologia de avaliação de desempenho do controle volt/var integrado consiste na sintetização de perfis de demanda dos alimentadores em uma escala de tempo compatível com

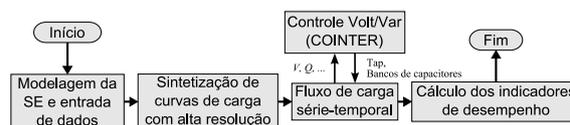


Figura 3. Fluxograma da metodologia de avaliação de desempenho do controle integrado de tensão/reativos.

a atuação dos dispositivos automáticos de regulação de tensão e reativos.

A série temporal de perfis de demanda em alta resolução é sintetizada através de um processo estocástico no qual a probabilidade de transição do valor de potência ativa/reactiva entre dois intervalos consecutivos é dada por uma distribuição normal de média μ e desvio padrão σ , ou seja, a derivada da série sintética é um processo gaussiano de média μ e desvio padrão σ (Doob, 1990). Essa série sintética tem seus valores máximos e mínimos ajustados de acordo com as medições do SCADA e o processo é repetido até que o valor médio se iguale ao da medição do SCADA, a menos de uma tolerância ϵ . O procedimento é então repetido para todos os intervalos de 15 minutos do período de interesse para a análise.

3.3 Cálculo de Fluxo de Carga Série-Temporal

Os estudos de cálculo de fluxo de carga em sistemas de distribuição eram, tradicionalmente, feitos em determinados patamares-chave de carregamento, como, por exemplo, patamares de carga mínima e máxima, inverno e verão, etc. O cálculo de fluxo de carga série-temporal é uma ferramenta de análise de redes com a qual se obtém soluções sequenciais de regime permanente do sistema de energia elétrica, permitindo assim avaliar e capturar os aspectos relacionados ao tempo no cálculo de fluxo de carga (Mather, 2012, Quiroz et al, 2013).

A ferramenta de cálculo de fluxo de carga série-temporal é utilizada na metodologia de avaliação do desempenho do controle volt/var integrado em subestações como plataforma para produzir as séries temporais de tensões e potência reativa utilizadas como entrada do controle e para simular o efeito das ações de controle sobre a operação do sistema de distribuição, conforme esquematizado no fluxograma apresentado na Figura 3. Em cada instante de tempo da série temporal o estado da rede é obtido através de um cálculo de fluxo de carga trifásico utilizando-se um método iterativo baseado na matriz admitância nodal (Dugan, 2011). As magnitudes e os ângulos das tensões são obtidos para todas as fases em todas as barras do sistema modelado e, a partir deste estado, os fluxos de potência ativa e reativa por fase em todos os ramos do sistema são calculados.

3.4 Indicadores de Desempenho do Controle Integrado de Tensão/Reativos

Com os resultados obtidos no cálculo de fluxo de carga série-temporal (séries temporais de tensões, correntes, fluxos de potências ativas e reativas, posição de comutadores de tap, etc) é possível quantificar os seguintes indicadores de desempenho: (1) frequência de comutações de tap do transformador regulador de

tensão; (2) frequência de operações dos bancos de capacitores; (3) distribuição dos valores de tensão do barramento secundário da subestação; (4) distribuição do fator de potência dos transformadores; e (5) perdas técnicas (energia) nos transformadores.

4 Estudo de Caso

Nesta seção é apresentado um estudo de caso de avaliação de desempenho do controle integrado de tensão/reactivos em uma subestação real de uma distribuidora de energia elétrica brasileira.

4.1 Descrição da Subestação

A subestação de distribuição de energia elétrica considerada neste estudo de caso consiste de um transformador trifásico 138/11,9 kV, com capacidade de transformação de 50 MVA, suprindo 10 alimentadores de distribuição primária de 11,9 kV. No enrolamento primário do transformador há um mecanismo de comutação de tap para regulação de tensão com 16 posições além da nominal, sendo 4 posições para redução e 12 posições para elevação da tensão no secundário. Cada posição corresponde à uma variação de 1,7 kV no primário. No barramento secundário do transformador há 2 bancos de capacitores com 4 estágios de 3,6 Mvar cada. Portanto, a capacidade de suporte de reativos instalada na subestação é de 28,8 Mvar. Um diagrama unifilar simplificado do arranjo da subestação acima descrita é apresentado na Figura 4.

4.2 Curvas de Carga Sintéticas dos Alimentadores

O controle integrado de tensão e potência reativa da subestação em questão atua em ciclos de 5 segundos. O histórico de valores máximos, médios e mínimos das curvas de carga dos alimentadores, todavia, está disponível em intervalos de 15 minutos. O procedimento discutido na seção 3.2 foi aplicado para sintetizar curvas de carga com resolução de 5 segundos a partir das curvas de máximos, médios e mínimos a cada intervalo de 15 minutos, para 1 mês de dados de carregamento da subestação (setembro de 2017).

Os valores de carga média, máxima e mínima para cada intervalo de 15 minutos foram obtidos do histórico de operação da concessionária, cujos dados foram originalmente obtidos da operação em tempo real através do SCADA. Para efeito de ilustração, na Figura 5 é apresentada a curva de carga sintética de um dos alimentadores da subestação para um período de um dia, juntamente com a faixa entre os patamares de valor mínimo e máximo registrados para cada intervalo do histórico de operação, com destaque para os dois intervalos entre as 15:00 e as 15:30.

4.3 Validação do Modelo de Simulação

A subestação descrita na subseção 4.1 juntamente com as curvas de carga sintéticas dos alimentadores apresentadas na 4.2 foram modeladas no OpenDSS, uma importante ferramenta de simulação (análise) computacional de sistemas de distribuição de energia elétrica (Dugan, 2011), e o controle integrado de tensão e reativos descrito na seção 2.2 foi implementado

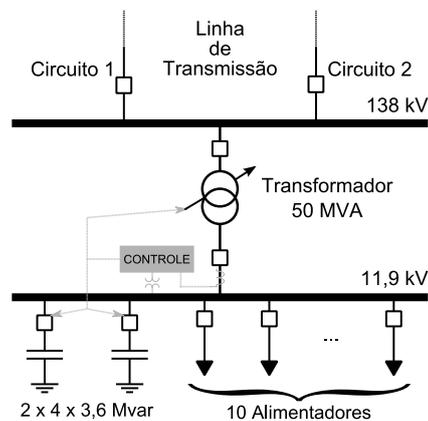


Figura 4. Diagrama unifilar simplificado do arranjo da subestação.

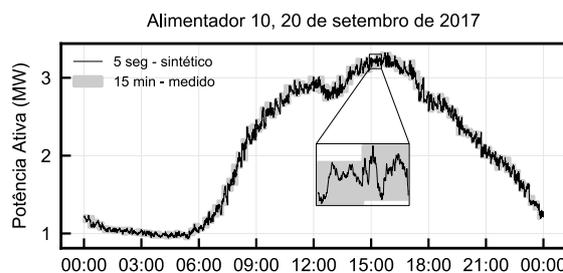


Figura 5. Curva de carga do alimentador 10 em 20/09/2017: patamares de 15 min (medido) e perfil de 5 seg (sintetizado).

em um *script* Python. Nesta seção os resultados de simulação do COINTER são comparados com os resultados reais de atuação do controle de tensão/reactivos da subestação, para um período selecionado, setembro de 2017.

A subestação em questão opera com o controle volt/var descrito na seção 2. Os valores dos parâmetros V_{inf} , V_{sup} , Q_{inf} , Q_{sup} , tap_{min} , t_{ciclo} e t_{atraso} do sistema de controle utilizados tanto na subestação real quanto nas simulações realizadas com o OpenDSS são 11,6 e 11,9 kV; -5 e +5 Mvar; 3; 5 e 60 s, respectivamente. Os resultados da simulação para um dia selecionado do mês de setembro de 2017 são apresentados na Figura 6. Verifica-se que as séries-temporais tanto da tensão no barramento secundário do transformador quanto da potência reativa da carga equivalente do transformador e a posição do tap do regulador de tensão obtidas com a simulação encontram-se satisfatoriamente dentro dos intervalos de valores máximo e mínimos de cada período de 15 minutos.

Executando-se o cálculo de fluxo de carga série-temporal para todo o período mensal investigado é possível obter a quantidade de comutações do regulador de tensão e de chaveamentos dos bancos de capacitores. Os resultados, agrupados pelas semanas do mês, de domingo à sábado, são apresentados na Tabela 1, juntamente com a quantidade de operações de cada equipamento de controle volt/var ocorrida na subestação real durante os mesmos períodos. Observa-se que a quantidade de atuações dos dispositivos de controle nas simulações é compatível com o observado na subestação real, sendo que foram obtidas 221 atuações de equipamentos de controle nas simulações contra 230 na subestação real. Os resultados apresentados na Figura 6 e na Tabela 1 validam o modelo de

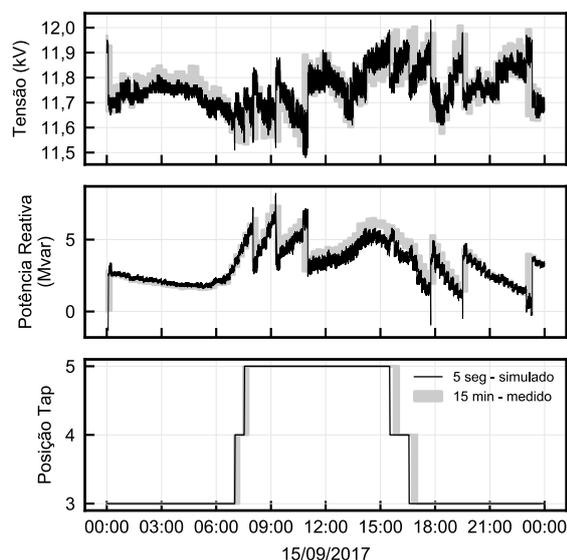


Figura 6. Perfis simulados vs. medidos para 15/09/2017: (a) tensão no secundário, (b) carga reativa e (c) posição de tap do regulador.

Tabela 1. Quantidade de atuações medidas e simuladas do COINTER para as semanas de setembro de 2017.

Período	Banco Capacitores		Comutador de Tap	
	Medido	Simulado	Medido	Simulado
01-02/09/2017	7	3	1	7
03-09/09/2017	25	13	14	38
10-16/09/2017	27	24	29	31
17-23/09/2017	27	26	28	29
24-30/09/2017	39	24	33	26

simulação da metodologia de avaliação de desempenho do controle volt/var da subestação.

4.4 Comparação entre Diferentes Filosofias e Ajustes do Controle de Tensão/Reativos

Uma vez validado o modelo de simulação do controle de tensão/reativos da subestação, para o mês de setembro de 2017, nesta seção é analisado e comparado o desempenho de diferentes configurações e ajustes de parâmetros. Os casos analisados são, a saber:

- **Caso 1** – controle de tensão convencional, ou seja, apenas a comutação de tap é utilizada para regulação de tensão. Os bancos de capacitores são fixos, com 1 estágio em operação, correspondente à compensação necessária para manter elevado fator de potência indutivo durante o menor patamar de carregamento do transformador (madrugada).
- **Caso 2** – controle de tensão/reativos utilizando apenas o chaveamento dos bancos de capacitores. A posição do tap do regulador é fixa em $tap_{min}=3$. Serão analisados dois subcasos: a) 8 estágios de 3,6 Mvar e b) 16 estágios de 1,8 Mvar.
- **Caso 3** – COINTER em sua configuração base, conforme descrito na Figura 1 e na Figura 2 e simulado na seção 4.3. Serão analisados dois subcasos: a) $Q_{sup}/Q_{inf} = +/- 5$ Mvar e b) $Q_{sup}/Q_{inf} = +/- 2$ Mvar.
- **Caso 4** – COINTER modificado, com faixas de fator de potência entre 0.98 capacitivo e 0.99 indutivo, ao invés de faixas de potência reativa, e $tap_{min}=2$.

Os resultados das simulações de cada caso anteriormente descrito para um dia selecionado do mês de setembro de 2017 são apresentados na Figura 7 e discutidos nas subseções a seguir.

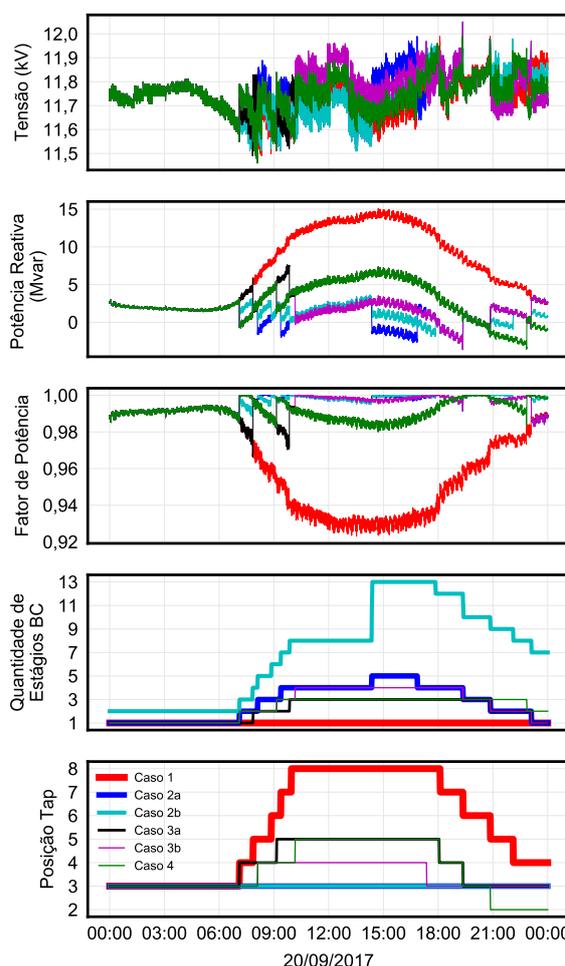


Figura 7. Resultado das simulações para 20/09/2017: (a) tensão no secundário, (b) potência reativa e (c) fator de potência da carga do transformador, (d) quantidade de estágios de bancos de capacitores em operação, (e) posição de tap do regulador.

4.4.1 **Caso 1:** ocorreram 9 comutações de tap do regulador de tensão e nenhum chaveamento de banco, visto que nesse caso os bancos de capacitores são fixos. O fator de potência da carga equivalente do transformador para o intervalo de maior carregamento do transformador (8:00 às 21:00) apresenta o pior resultado entre os casos investigados. A tensão se mantém dentro da faixa regulada em 94,6% do tempo.

4.4.2 **Caso 2:** ocorreram 8 (2a) e 17 (2b) chaveamentos de estágios dos bancos de capacitores, e nenhuma comutação de tap, visto que nesse caso a posição do tap do transformador regulador é fixa. O controle é capaz de manter um bom perfil de fator de potência da carga equivalente do transformador. A tensão se mantém dentro da faixa regulada em 92,6% (2a) e 91,0% (2b) do tempo.

4.4.3 **Caso 3:** ocorreram 4 chaveamentos de estágios dos bancos capacitores e 4 comutações de tap do regulador de tensão para o caso 3a (6 e 2, respectivamente, para o caso 3b). O controle é capaz de manter um bom perfil de fator de potência da carga equivalente do transformador. A tensão se mantém dentro da faixa regulada em 96,0% (3a) e 92,0% (3b) do tempo.

4.4.4 **Caso 4:** ocorreram 3 chaveamentos de estágios dos bancos capacitores e 5 comutações de tap do regulador de tensão. O controle é capaz de manter um bom perfil de fator de potência da carga equivalente

Tabela 2. Resumo do desempenho do controle de tensão/reativos da subestação para os diferentes casos investigados para set/2017.

Indicador de Desempenho	Caso					
	1	2a	2b	3a	3b	4
qtde de comutações tap regulador tensão	248	0	0	131	76	117
qtde de chaveamentos bancos de capacitores	0	199	547	90	136	104
valor médio da tensão secundária regulada (kV)	11,74	11,75	11,75	11,75	11,75	11,75
percentagem de tempo com $11,6 < V < 11,9$ kV	92,86	93,33	90,54	94,34	94,36	94,34
fator de potência médio do transformador	0,97	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
percentagem de tempo com $fp > 0,95$	80,13	98,12	99,32	93,63	98,76	99,82
perdas (energia) transformador: % do caso 1	100	92,10	92,13	93,67	92,16	92,32

do transformador. A tensão se mantém dentro da faixa regulada em 95,5% do tempo.

4.5 Sumário dos Resultados

Os casos investigados na seção 4.4 foram simulados para todo o mês de setembro de 2017 e os resultados dos indicadores de desempenho são sumarizados na Tabela 2. Do ponto de vista de controle de tensão, todos os casos apresentaram desempenho similar, visto que em todos a atuação dos equipamentos de controle é engatilhada quando a tensão sair da faixa de regulação. Do ponto de vista de controle de reativos/fator de potência, o caso 1 mostrou desempenho pior que os demais, e todos os outros casos analisados resultaram em desempenho melhor que o utilizado na subestação real (caso 3a). A configuração 1 resultou ainda em 90% a mais de atuações do regulador de tensão quando comparado com o caso 3a, enquanto os casos 2a e 2b resultam, naturalmente, em elevação no número de chaveamentos de estágios dos bancos de capacitores. Em relação ao ajuste utilizado na subestação (3a), os casos 3b e 4 apresentaram melhor desempenho de fator de potência e ainda reduziram o número de comutações de tap do transformador regulador, o que é de interesse da concessionária, pois reduz custos de operação deste que é um equipamento cuja manutenção demanda elevado esforço da distribuidora. Os resultados mostram também que manter um fator de potência elevado reduz as perdas ôhmicas no transformador em cerca de 7%.

5 Conclusão

Este artigo apresentou uma metodologia para avaliação de desempenho do controle de tensão e reativos em subestações de distribuição, uma importante responsabilidade técnica das distribuidoras de energia elétrica em função do impacto que tensões de atendimento inadequadas podem causar para os consumidores. Dentre as filosofias de controle de tensão e reativos, ênfase em particular foi dada a um esquema não convencional de controle integrado de tensão e reativos que utiliza, prioritariamente, chaveamento de bancos de capacitores instalados no secundário de subestações de distribuição, seguido por comutações de tap do transformador regulador.

A abordagem utilizada para sintetização de curvas de carga dos alimentadores em uma resolução

temporal apropriada para simulação do COINTER mostrou-se bastante adequada, como sugerem os resultados das simulações quando comparados com medições do histórico de operação da subestação investigada no estudo de caso para o qual a metodologia foi aplicada. Este estudo de caso demonstrou ainda que o desempenho do controle volt/var da subestação é melhor quando a filosofia do COINTER é aplicada e pode ser ainda melhor caso haja modificação nas faixas de reativo, como evidenciado pela redução de até 42% no número de comutações de tap do transformador regulador de tensão. O ajuste adequado dos sistemas de controle automático de tensão/reativos em redes de distribuição é fundamental, por exemplo, para viabilizar a integração de fontes distribuídas renováveis e intermitentes, como a geração solar fotovoltaica, e a utilização da metodologia apresentada neste contexto pode ser investigada em trabalhos futuros.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da FAPESP (processo 2017/20332-9), do FAEPEX/UNICAMP e da CPFL Energia.

Referências Bibliográficas

- Agência Nacional de Energia Elétrica (2018). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. ANEEL, Brasília, DF, Brasil.
- Doob, J. L. (1990). Stochastic Processes. Wiley, New York, NY, USA.
- Dugan, R. C. and McDermott, T. E. (2011). An open source platform for collaborating on smart grid research. 2011 IEEE/PES General Meeting, Detroit, MI, USA, pp. 1-7.
- Eletrobrás Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (1985). Controle de tensão de sistemas de distribuição – Volume 5 – Coleção Distribuição de Energia Elétrica. Campus, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Felber, L. A.; Arango, H., Bonatto, B. D.; and Gouvêa, M. R. (2010). Voltage Regulation in Electric Energy Distribution Substations. 2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA), Sao Paulo, SP, Brazil, pp. 846-852.
- Mather, B. A. (2012). Quasi-static time-series test feeder for PV integration analysis on distribution systems. 2012 IEEE/PES General Meeting, San Diego, CA, USA, pp. 1-8.
- Passarini, G.; Suzuki, M.; Ferreira, D. J.; Schrimmer, O. J.; Aleixo, A. N.; e Pignatti, A. A. (2008). Influência de Bancos de Capacitores na Subestação para Regular a Tensão de Distribuição e Reativo. XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica (SENDI), Olinda, PE, Brasil, pp. 1-12.
- Quiroz, J. E.; Reno, M. J.; and Broderick, R. J. (2013). Time Series Simulation of Voltage Regulation Device Control Modes. IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Tampa, FL, USA, pp. 1700-1705.
- Short, T. A. (2006). Electric Power Distribution Equipment and Systems. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.