

REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO E CONTROLE DE PARALELISMO DE TRANSFORMADORES

Emerson A. Junges – sr_junges@hotmail.com

Universidade Positivo

R. Professor Pedro Viriato Parigot de Souza, 5300
81280-330 – Curitiba – PR

Mauro A. Matuchewski – maam@arteche.com.br

Universidade Positivo

R. Professor Pedro Viriato Parigot de Souza, 5300
81280-330 – Curitiba – PR

Julio Shigeaki Omori – julio.omori@up.edu.br

Universidade Positivo – Curso de Engenharia Elétrica

R. Professor Pedro Viriato Parigot de Souza, 5300
81280-330 – Curitiba – PR

Leonardo Gomes Tavares – leonardo.tavares@up.edu.br

Universidade Positivo – Curso de Engenharia Elétrica

R. Professor Pedro Viriato Parigot de Souza, 5300
81280-330 – Curitiba – PR

Ana Cristina Fermino Deschamps – ana.fermino@up.edu.br

Universidade Positivo – Curso de Engenharia Elétrica

R. Professor Pedro Viriato Parigot de Souza, 5300
81280-330 – Curitiba – PR

Solivan Arantes Valente – solivan@up.edu.br

Universidade Positivo – Curso de Engenharia Elétrica

R. Professor Pedro Viriato Parigot de Souza, 5300
81280-330 – Curitiba – PR

Resumo: A regulação de tensão elétrica do sistema elétrico de potência é uma operação de extrema importância para contornar os efeitos oriundos de oscilações e perturbações no sistema, para garantir o fornecimento de energia elétrica com qualidade e manter a estabilidade do sistema, sendo um processo que requer ações imediatas, rápidas, eficientes e de forma autônoma. Os sistemas de controle e regulação disponíveis atualmente, geralmente oferecem, ou um equipamento robusto que oferece funções de regulação, supervisão de paralelismo e interfaces de comunicação concentrados em um único dispositivo (o que acarreta em equipamentos de dimensões maiores, e de maior custo), ou soluções envolvendo equipamentos distintos, um para cada uma das funções mencionadas. Este trabalho apresenta, com foco didático, um projeto viável, compacto e de baixo custo, desenvolvido com vistas a ser uma alternativa para a solução do problema de regulação automática de tensão de barramento e supervisão de paralelismo, para transformadores de potência com comutadores de taps sob carga, que inclui a função de comunicação via rede industrial. O

sistema desenvolvido atende as exigências mínimas do usuário em suas aplicações mais comuns.

Palavras-chave: *Regulação, controle, transformador, comutador, paralelismo.*

1 INTRODUÇÃO

O sistema desenvolvido e descrito neste trabalho tem foco na automatização dos processos de regulação da tensão pela comutação de taps, e do controle de paralelismo de transformadores de potência. O protótipo desenvolvido utiliza microcontroladores, e é capaz de monitorar a tensão e a posição de tap; além disso, com base em ajustes de parâmetros determinados pelo usuário, é capaz de enviar comandos aos mecanismos comutadores de taps dos transformadores, a fim de promover a adequada regulação da tensão a ser entregue ao consumo.

Além do sistema de controle em si, também foram desenvolvidos protótipos dos comutadores de taps de transformadores de potência.

2 REVISÃO BÁSICA DA OPERAÇÃO DE REGULAÇÃO

Diante da alta relevância da manutenção da qualidade da energia fornecida ao consumidor de energia elétrica, e também da estabilidade do sistema elétrico, a regulação de tensão é uma operação imprescindível para contornar os efeitos oriundos de oscilações do sistema. Tratando-se de um processo que requer ações rápidas e eficientes, e que seja independente da ação humana para o monitoramento e operação de controle, o processo deve ser automatizado.

O sistema de controle desenvolvido é uma alternativa viável, compacta e de baixo custo, que inclui as funções de regulação de tensão, supervisão de paralelismo de transformadores de potência e comunicação em um único dispositivo (para cada transformador), oferecendo uma solução simplificada, mas que atende as exigências mínimas do usuário em suas aplicações. Para as fases de testes e validação foram desenvolvidos protótipos dos comutadores de taps, que também têm o propósito de mostrar didaticamente a operação do sistema.

2.1 Controle e Regulação de Tensão

Em muitos transformadores trifásicos de potência, o controle de tensão é realizado pela comutação sob carga de taps; como ilustração, um modelo de comutador é mostrado na Figura 1. A comutação de taps tem a finalidade de adequar a tensão de secundário conforme a variação da carga conectada à saída do transformador, aumentando ou diminuindo o nível de tensão conforme necessário. Os comutadores de derivação sob carga são mecanismos eletromecânicos complexos que fazem parte do transformador. Esse mecanismo tem a finalidade de adicionar ou reduzir o número de espiras que compõe o enrolamento em regulação, alterando assim o nível de tensão e o fluxo de potência do transformador. Todo esse controle e regulação é realizado de forma automatizada e com o transformador em plena carga (BECHARA, 2010).

Figura 1 – Comutador de tap sob carga (MR, modelo VACUTAP VR)



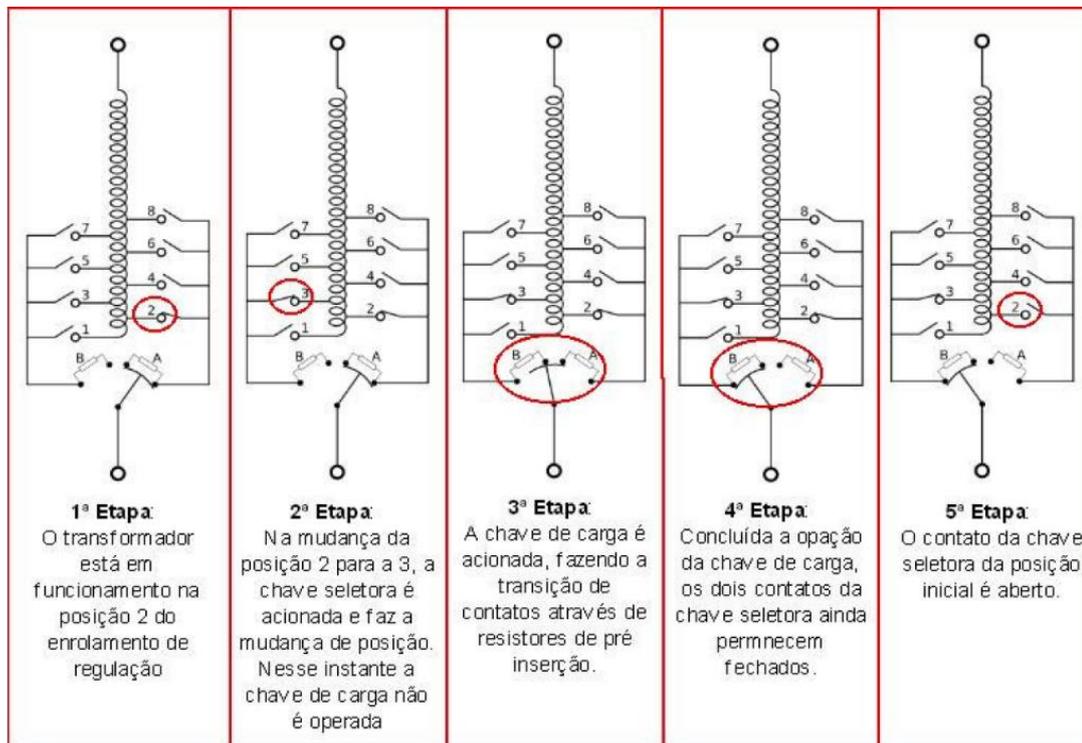
Fonte: MR, 2018.

O comutador é constituído basicamente de:

- um sistema de acionamento motorizado, responsável pela troca de posição do comutador;
- uma chave de carga, dotada de resistores e contatos móveis, que opera imersa em óleo próprio em um cilindro estanque; e
- uma chave seletora: composta por contatos fixos e móveis.

O funcionamento do comutador é ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Comutador de derivação sob carga: funcionamento.

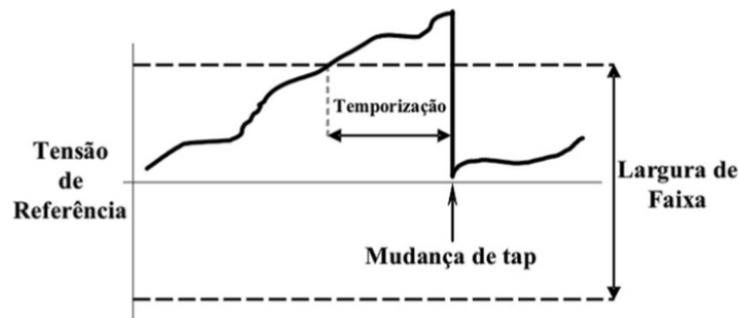


Fonte: BECHARA, 2010

2.2 Relé Regulador de Tensão (Relé 90)

Segundo Buratti (2016), a regulação de tensão em barramentos de média tensão das subestações é realizada por relés de controles eletrônicos ou digitais, normalmente chamados de relé 90; o número vem da tabela do Instituto Nacional Americano de Padrões (ANSI), na qual o código 90 designa dispositivo de regulação ou relé automático de tensão (AVR). Nas subestações, esse equipamento é utilizado para o controle de transformadores de potência dotados de chave comutadora de tap sob carga. A função do AVR é realizar a mudança do tap do transformador quando a tensão de operação medida ultrapassar as margens da tensão de referência, respeitando um tempo de retardo, afim de evitar comutações desnecessárias durante surtos de curta duração, tanto no aumento do tap quanto na diminuição, conforme a necessidade. A linha de tempo da operação de comutação é ilustrada na Figura 3.

Figura 3 - Princípio de funcionamento do relé de controle de tensão (relé 90)



Fonte: BURATTI, 2016.

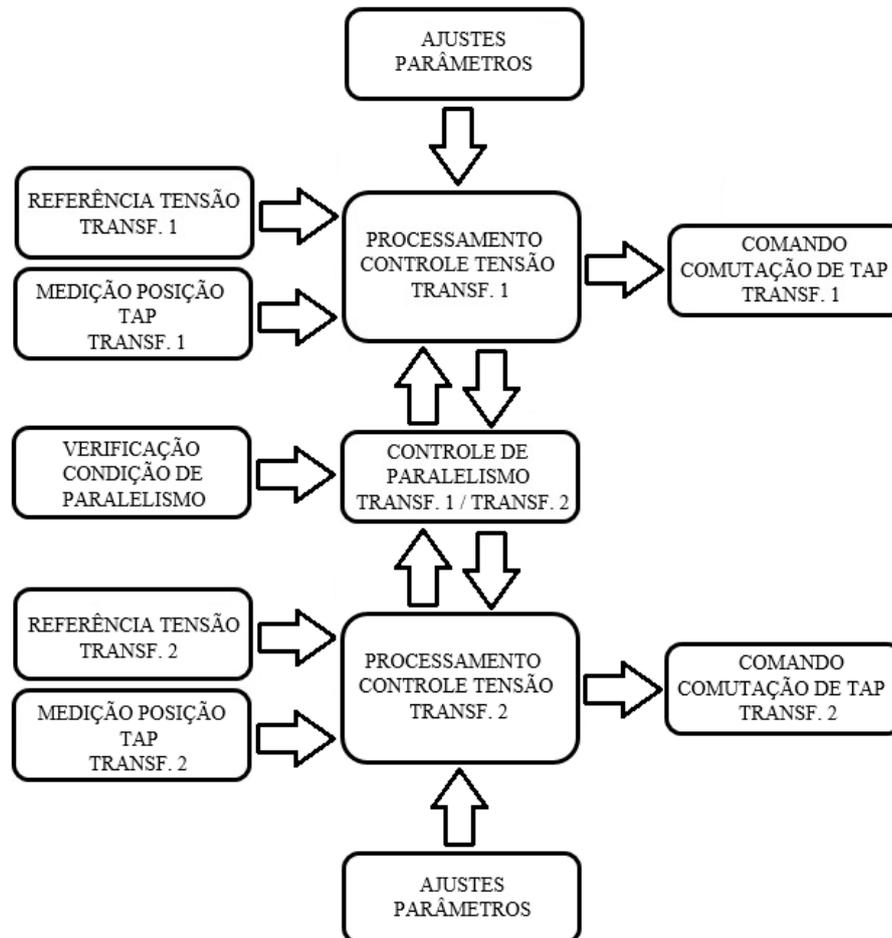
3 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

O sistema foi concebido para realizar o controle e monitoramento de tensão de dois transformadores. O protótipo foi implementado com base na plataforma de desenvolvimento Arduino, utilizando para cada controlador uma placa Arduino Mega, com o microcontrolador Atmega 2560, que constitui o módulo principal de sistema. O *firmware* foi desenvolvido em linguagem C no ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) do fornecedor do microcontrolador.

3.1 Visão Geral do Sistema

O sistema possui dois subsistemas. Cada um deles monitora a tensão de referência da barra do secundário e a posição de tap do respectivo transformador, usando entradas analógicas. A tensão é comparada com os parâmetros ajustados e, caso necessário, ocorre a regulação da tensão com a comutação de taps do transformador. Em caso de operação em paralelo, um dos módulos controladores assume o controle da tensão – na condição de operação em *modo mestre*, ficando o segundo como *escravo* – executando a comutação de tap em ambos os transformadores. Para isso, a posição de tap dos dois transformadores deve ser a mesma; se não for, o controle de paralelismo desabilita essa condição de operação, e cada transformador passa a ser controlado individualmente. O diagrama em blocos é mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Diagrama em blocos do sistema



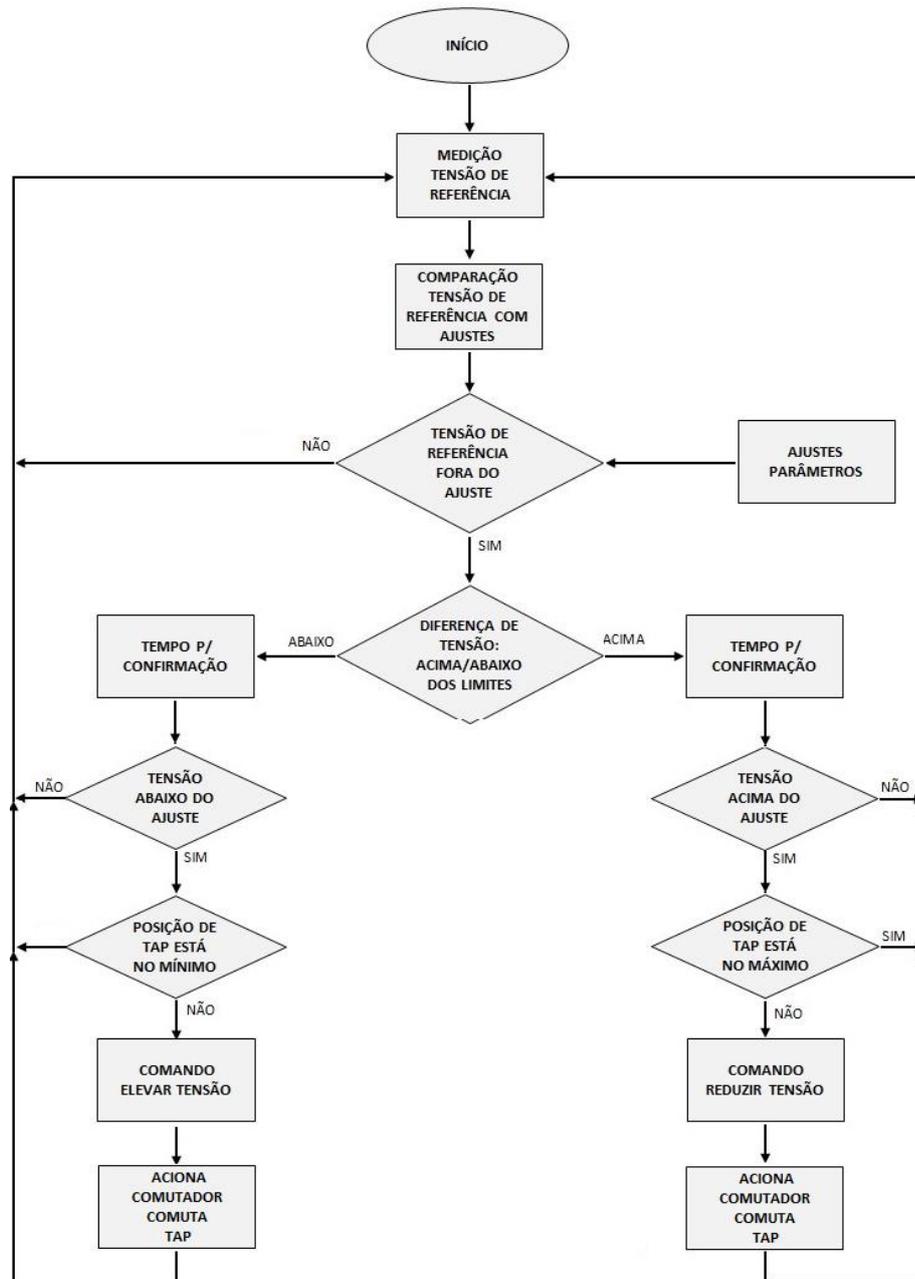
Fonte: Os autores (2018).

3.2 Módulo Central de Processamento

Por meio da comparação entre os valores da tensão nominal ajustada e da tensão de referência medida, o sistema verifica a necessidade de efetuar a regulação da tensão. O sistema leva em consideração, previamente, o parâmetro de desvio percentual da tensão de referência em relação à nominal, e o tempo de permanência da tensão fora dos limites estabelecidos (atraso de tempo de tolerância), a fim de evitar ações de comutação de taps sucessivas frente a oscilações momentâneas da rede elétrica.

Tendo constatado um desvio da tensão de referência para cima ou para baixo dos limites estabelecidos, em um tempo superior ao ajustado para acomodar uma oscilação do sistema, confirma-se a necessidade de um ajuste de tensão, e o comando de comutação de tap é acionado. Após uma comutação de tap, o sistema continua a monitorar a tensão de referência e, caso a mesma ainda não esteja dentro dos limites estabelecidos pelos parâmetros, uma nova ação de comutação pode ser necessária. As comutações seguem sucessivamente até que o sistema se estabilize e a tensão do transformador permaneça dentro do esperado. O fluxograma representado na Figura 5 descreve a sequência de operação do sistema de controle, considerando o monitoramento da tensão de referência, a comparação com os parâmetros ajustados e a determinação das condições necessárias às ações de regulação.

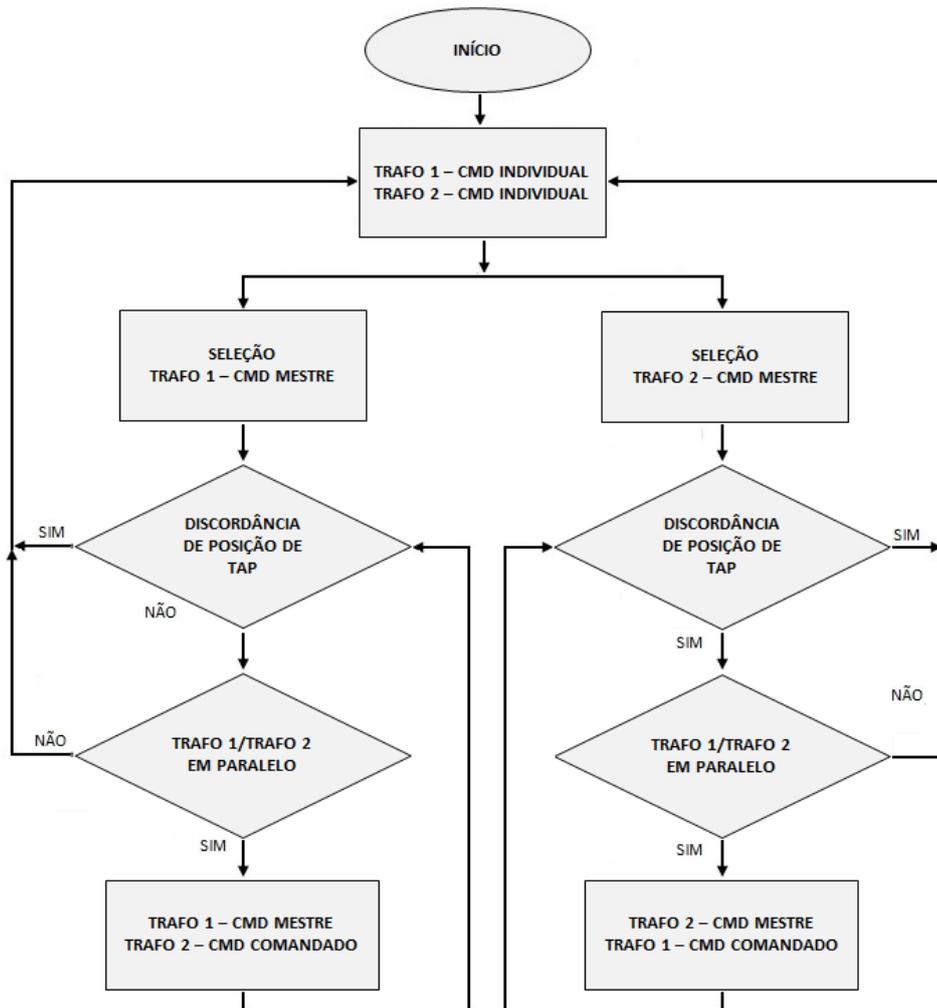
Figura 5 - Fluxograma operacional do sistema de monitoramento e controle de tensão



Fonte: Os autores (2018).

Na condição de operação dos transformadores em paralelo, a tensão de referência para ambos os subsistemas é a mesma. Desta forma, não havendo a necessidade de dois controles independentes, é prevista a condição de se eleger um dos subsistemas para controlar a regulação de tensão de ambos os transformadores. O fluxograma apresentado na Figura 6 mostra a lógica de operação do sistema de controle de paralelismo, considerando uma condição inicial na qual cada subsistema opera com controle individual.

Figura 6 - Fluxograma do sistema de controle de paralelismo

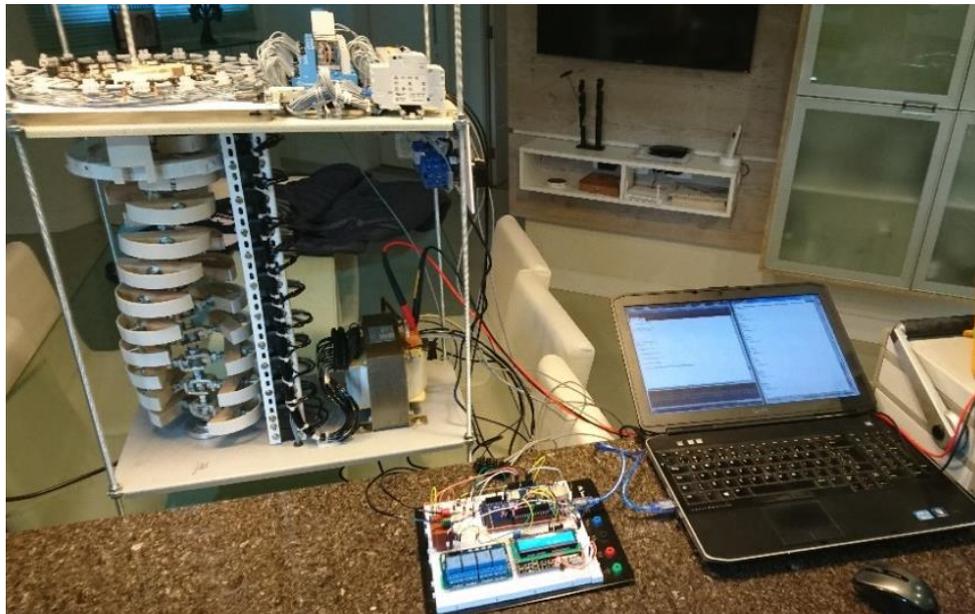


Fonte: Os autores (2018).

4 IMPLEMENTAÇÃO

O *firmware* desenvolvido para os testes faz a leitura de tensão e, no caso de haver uma variação superior a 2% em relação ao nível nominal (66,4 V referenciando o valor de 138 kV nos testes), o comutador de taps é acionado. O protótipo de comutador de taps é mostrado na Figura 7. O sistema de controle é composto por uma placa de microcontrolador Arduino Mega 2650, um mostrador (*display*), placa com quatro relés, placa de interface *Ethernet*, um transformador redutor de tensão (47:1), além de resistores e capacitores, para acomodação do sinal CA (leitura de tensão) ao nível de 5 V_{CC} de operação do microcontrolador (entrada analógica para o conversor analógico-digital).

Figura 7 - Protótipo de comutador de taps – foco didático na demonstração da operação do sistema de controle desenvolvido



Fonte: Os autores (2018).

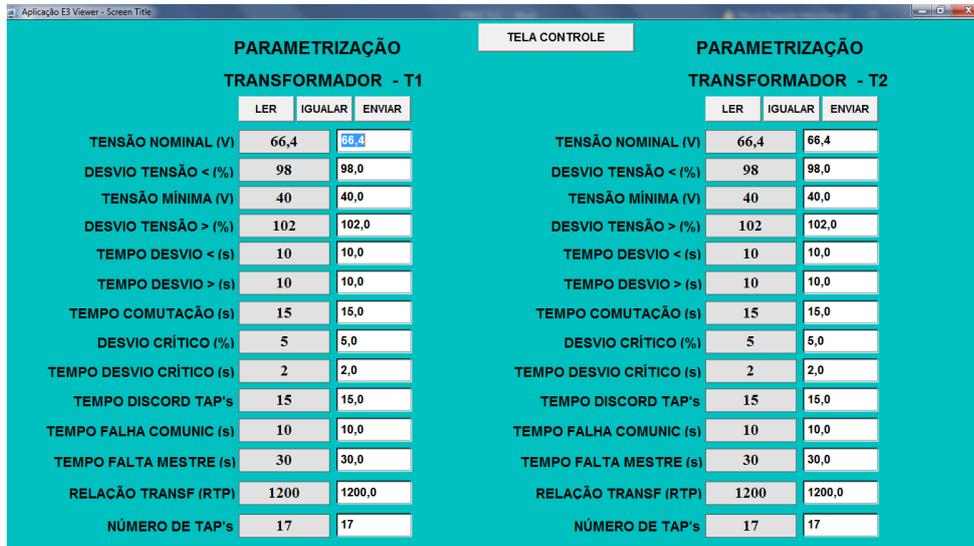
A parametrização e a operação dos dispositivos são feitas por meio de um *software* supervisorio desenvolvido pelos autores; as telas são mostradas nas Figuras 8 e 9. Assim como o protótipo do comutador, as telas do supervisorio foram desenhadas para mostrar de modo didático a configuração e o histórico (*log*) de operação.

Figura 8 - Tela de monitoramento e operação do supervisorio



Fonte: Os autores (2018).

Figura 9 - Tela de parametrização de relés do supervisório



PARAMETRIZAÇÃO				TELA CONTROLE		PARAMETRIZAÇÃO			
TRANSFORMADOR - T1						TRANSFORMADOR - T2			
	LER	IGUALAR	ENVIAR			LER	IGUALAR	ENVIAR	
TENSÃO NOMINAL (V)	66,4	66,4		TENSÃO NOMINAL (V)		66,4	66,4		
DESVIO TENSÃO < (%)	98	98,0		DESVIO TENSÃO < (%)		98	98,0		
TENSÃO MÍNIMA (V)	40	40,0		TENSÃO MÍNIMA (V)		40	40,0		
DESVIO TENSÃO > (%)	102	102,0		DESVIO TENSÃO > (%)		102	102,0		
TEMPO DESVIO < (s)	10	10,0		TEMPO DESVIO < (s)		10	10,0		
TEMPO DESVIO > (s)	10	10,0		TEMPO DESVIO > (s)		10	10,0		
TEMPO COMUTACÃO (s)	15	15,0		TEMPO COMUTACÃO (s)		15	15,0		
DESVIO CRÍTICO (%)	5	5,0		DESVIO CRÍTICO (%)		5	5,0		
TEMPO DESVIO CRÍTICO (s)	2	2,0		TEMPO DESVIO CRÍTICO (s)		2	2,0		
TEMPO DISCORD TAP's	15	15,0		TEMPO DISCORD TAP's		15	15,0		
TEMPO FALHA COMUNIC (s)	10	10,0		TEMPO FALHA COMUNIC (s)		10	10,0		
TEMPO FALTA MESTRE (s)	30	30,0		TEMPO FALTA MESTRE (s)		30	30,0		
RELAÇÃO TRANSF (RTP)	1200	1200,0		RELAÇÃO TRANSF (RTP)		1200	1200,0		
NÚMERO DE TAP's	17	17		NÚMERO DE TAP's		17	17		

Fonte: Os autores (2018).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema desenvolvido é uma alternativa simples, para aplicações em que se necessite trabalhar com dois transformadores, de mesmas características elétricas, em paralelo. O equipamento pode ser empregado, por exemplo, em plantas industriais em fase de ampliação para aumento de produção, nas quais não se deseja alterar toda a instalação elétrica. O sistema também pode ser usado em distribuidoras de energia, quando se deseja equilibrar a carga em dois circuitos distintos ou aumentar a confiabilidade e a disponibilidade de dois circuitos distintos, sendo alimentados por um par de transformadores em paralelo; no caso de falha em um transformador, o segundo mantém os dois circuitos.

Com vistas a realizar os testes de funcionamento e a tornar didática a configuração e operação do sistema, foram construídos os protótipos de comutadores de taps e o *software* supervisório. O conjunto tornou didática a visualização de um processo complexo do controle de tensão e paralelismo e pode ser utilizado em disciplinas de graduação, como Máquinas Elétricas e Automação Industrial voltada às plantas elétricas.

REFERÊNCIAS

ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. **Fundamentos de circuitos elétricos**. 5ª. ed. Porto Alegre: AMGH, v. Volume único, 2013.

TANENBAUM, A. S. **Redes de computadores**. 4ª. ed. Rio de Janeiro: CAMPUS ELSEVIER, 2003.

TORO, V. D. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos S.A., 1999.

UMANS, S. D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7ª. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda., v. Volume único, 2014.

ANSI. **American National Standards Institute**. American National Standards Institute, 2017. Disponível em: < <https://www.ansi.org> >. Acesso em: 7 mai. 2018.

ARDUINO. Arduino company, 2017. Disponível em: < <http://www.arduino.org> >. Acesso em: 7 mai. 2018.

BECHARA, R. **Análise de falhas de transformadores de potência**. USP, 2010. Dissertação de Mestrado. Disponível em: < www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde/Dissertacao_Ricardo_Bechara.pdf >. Acesso em: 7 mai. 2018.

BURATTI, R. P. **Reguladores de tensão em redes elétricas com alta penetração de cargas não lineares**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2016. Disponível em: < https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/144468/buratti_rp_me_ilha.pdf?sequence=3 >. Acesso em: 7 mai. 2018.

MR. **Maschinenfabrik Reinhausen**, 2018. Disponível em: < https://www.reinhausen.com/en/desktopdefault.aspx/tabid-1976/2891_read-8131/ >. Acesso em: 7 mai. 2018.

AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR AND PARALLELISM CONTROL OF TRANSFORMERS

Abstract: *The electrical voltage regulation of the electric power system is an operation of extreme importance to work around oscillations and disturbances in the system, in order to assure the supply of electrical energy with quality, and to keep the system stable, being a process that requires quickly and effective independent actions. Control and regulation systems available nowadays either offer large equipment including the regulation function, parallelism supervision and communication interfaces embedded in a single device (resulting in a large and more expensive equipment), or solutions involving multiple devices, one for each of the functions mentioned. This article presents, under a didactic approach, a viable, compact and low-cost system, developed as an alternative to solve the problem of automatic voltage regulation and parallelism supervision for power control transformers with changer tap switchgear under voltage, and which encompasses the communication function via an industrial standard. The developed system meets the minimum requirements of the user in the most typical applications.*

Key-words: *Voltage regulation, control, transformer, tap switch, parallelism.*