

TRANSFORMADOR DE DISTRIBUIÇÃO INTELIGENTE

Josemar O. Quevedo¹, Julian C. Giacomini¹, Rafael C. Beltrame¹, Fabricio E. Cazakevicius¹,
Cassiano Rech¹, Luciano Schuch¹, Tiago B. Marchesan¹, Maurício de Campos²,
Paulo S. Sausen², Jonatas R. Kinas²

¹Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) - Santa Maria - RS - Brasil

²Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (Unijuí) - Ijuí - RS - Brasil
e-mail: josemar.quevedo@mail.ufsm.br

Resumo – A crescente demanda por eletricidade, os requisitos de melhoria da qualidade de energia por parte dos agentes reguladores e a inclusão da geração distribuída estão aumentando a complexidade dos sistemas de distribuição. Neste cenário, a regulação da tensão torna-se mais complexa, especialmente em longas linhas de distribuição. Neste trabalho, um transformador de distribuição inteligente é proposto, o qual emprega um comutador eletrônico de *taps* sob carga, associado a um sistema de comunicação bidirecional. Este conjunto permite a regulação automática da tensão, telemetria e o controle remoto pela companhia concessionária, possibilitando sua aplicação nas redes de distribuição atuais e nas redes inteligentes, sendo caracterizado por sua fácil expansão.

Palavras-Chave – Comutador Eletrônico de *Taps*, Redes Inteligentes, Transformador Inteligente.

SMART DISTRIBUTION TRANSFORMER

Abstract – The growing demand for electricity, the requirements for improvement of power quality by regulatory agencies and the inclusion of distributed generation are increasing the complexity of distribution systems. In this scenario, voltage regulation also becomes more complex, especially in long distribution lines. In this paper, a smart distribution transformer is proposed, which employs an electronic on-load tap changer with a bidirectional communication system. This system enables automatic voltage regulation, telemetry and remote control for power utilities, allowing its application in the actual distribution systems and smart grids, being characterized by its easy expansion.

Keywords – Electronic On-load Tap Changer (OLTC), Smart Grids (SG), Smart Transformer (ST).

I. INTRODUÇÃO

A regulação de tensão é um problema enfrentado pelas companhias concessionárias de energia elétrica e constitui-se em uma das questões mais importantes envolvendo a qualidade de energia em sistemas de distribuição de energia elétrica. O crescente aumento no consumo de energia, aliado

ao enrijecimento dos requisitos de qualidade por parte dos agentes reguladores do setor elétrico e a inclusão da geração distribuída (GD), têm aumentado consideravelmente a complexidade das redes de distribuição [1]. Neste contexto, a regulação da tensão das redes de distribuição também se torna mais complexa, especialmente em redes de distribuição rurais, as quais tipicamente enfrentam as condições menos confiáveis em termos de qualidade de energia [2].

Os comutadores de *tap* sob carga (OLTC – *On-Load Tap Changer*) são os dispositivos de regulação de tensão mais populares, sendo empregados em transformadores de média e elevada potências. A comutação dos *taps* em OLTCs é realizada através de chaves eletromecânicas, resultando em arco-elétrico e consequente carbonização dos contatos, além da degradação do óleo utilizado na isolamento e arrefecimento do transformador [3]. O alto custo destes dispositivos impede que os mesmos sejam usados em sistemas de distribuição. Para reduzir o custo, comutadores de *taps* à vazio (*No-Load Tap Changers*) são usados nos sistemas de distribuição. Entretanto, a comutação exclusivamente manual destes dispositivos impede que se obtenha regulação automática da tensão.

O desenvolvimento de comutadores eletrônicos de *taps* sob carga, baseados em eletrônica de potência, sensoriamento e sistemas de gerenciamento é uma solução em potencial para a melhoria nas redes elétricas [4]. Estes sistemas podem prover às companhias concessionárias dispositivos OLTC mais estáveis e eficientes, quando comparados aos atuais comutadores eletromecânicos.

Além da regulação de tensão, o emprego de comutadores eletrônicos de *taps* permite que se desenvolva um dispositivo inteligente, o qual pode agregar novas funcionalidades aos transformadores. Este dispositivo é usualmente chamado de transformador inteligente [5] e pode permitir o controle *online* da tensão secundária do transformador [6] a partir do ajuste dos *taps*, incluindo ainda importantes funções ao sistema de distribuição, como, por exemplo: controle do despacho das unidades de GD, evitando sobretensão no lado secundário [5]; implementação de um laço de comunicação entre o transformador e a concessionária de energia; possibilidade de avaliação *online* do carregamento do transformador [7]; monitoramento do comportamento da carga no ponto de acoplamento comum (PAC); entre outros.

Por outro lado, a implementação do conceito de transformador inteligente em sistemas de distribuição requer um sistema de comunicação adequado. Entretanto, os sistemas de distribuição existentes possuem condições de comunicação, sensoriamento e processamento limitadas ou inexistentes [8]. Atualmente, essas limitações são um dos principais problemas para o desenvolvimento das redes inteligentes.

Artigo submetido em 03/02/2014. Primeira revisão em 15/05/2014 e segunda revisão em 18/07/2014. Aceito para publicação em 07/08/2014 por recomendação do Editor Henrique A. C. Braga.

Neste contexto, o presente trabalho propõe um transformador de distribuição inteligente, que permite a regulação da tensão no PAC através de um comutador eletrônico de *taps* sob carga, aliado a um sistema de comunicação bidirecional com a companhia concessionária. Essas funcionalidades são complementadas pela característica de fácil expansão do sistema proposto, permitindo a criação de uma rede de transformadores inteligentes e consequentemente melhorando a qualidade de energia e o gerenciamento do sistema de distribuição.

O trabalho é organizado como segue: a Seção II descreve o comutador eletrônico de *taps* empregado e inclui alguns resultados experimentais deste sistema. A Seção III descreve o transformador inteligente proposto, apresentando sua topologia e funcionalidades. Finalmente, na Seção IV são apresentados resultados experimentais do sistema proposto.

II. COMUTADOR ELETRÔNICO DE TAPS

A utilização de comutadores de *taps* foi inicialmente encorajada pela generalização da tensão alternada nos sistemas de potência [3]. Estes dispositivos permitem a regulação da tensão através da mudança da relação de transformação dos transformadores. Chaves mecânicas são usualmente empregadas nos transformadores de distribuição, e a comutação é geralmente manual, o que requer uma equipe *in loco*.

O desenvolvimento de dispositivos semicondutores para elevados níveis de tensões e correntes possibilitou a substituição das chaves mecânicas por eletrônicas. Esta solução permite que os *taps* do transformador sejam comutados eletronicamente, tornando o processo de comutação mais rápido e livre de arco elétrico. Além disso, a aplicação de microprocessadores no controle destes dispositivos permite o desenvolvimento de estratégias de controle para a melhoria do processo de comutação, além de habilitar o dispositivo para a aplicação de controle remoto.

A. Características do Comutador Eletrônico de Taps

Na Figura 1 é apresentado um esquemático simplificado do comutador eletrônico de *taps*. O mesmo foi empregado em um transformador monofásico com retorno por terra (MRT) do tipo *tap* central aberto, cuja aplicação é exclusiva para redes de distribuição rurais. A potência nominal do transformador é de 5 kVA e as tensões são apresentadas na Tabela I. O secundário apresenta dois enrolamentos com metade da potência nominal cada, os quais foram conectados de forma a obter-se a tensão de 220 V na carga.

Ainda na Figura 1 pode-se perceber que as variáveis do lado primário (corrente e tensão) são medidas por um transformador de corrente (TC) e por um transformador de

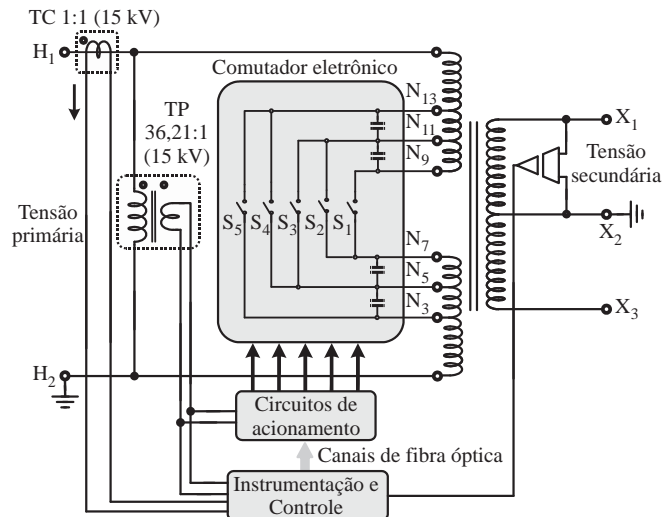


Fig. 1. Esquemático simplificado do comutador eletrônico de *taps*.

potencial (TP). O TP alimenta os sistemas de instrumentação, controle e acionamento das chaves semicondutoras, assegurando a operação do sistema independentemente da disponibilidade de tensão no secundário.

O processo de comutação deve assegurar que o lado primário do transformador não ficará aberto, evitando que as chaves suportem toda a tensão primária. Por essa razão, existe a necessidade de uma sobreposição, no acionamento, de duas chaves durante a comutação. Salienta-se que este processo deve ocorrer o mais rapidamente possível, de modo a limitar a corrente devido ao intervalo de sobreposição. Além disso, a comutação deve ser efetuada apenas no cruzamento por zero da corrente, evitando que ocorram sobretensões sobre as chaves devido à indutância de dispersão dos enrolamentos dos *taps*. Nesse sentido, o TC fornece a referência para que a comutação ocorra apenas no cruzamento por zero da corrente primária. Para assegurar alta imunidade a ruídos foram utilizados sensores isolados de tensão e corrente, amplificadores operacionais de instrumentação e na leitura da corrente foi implementado o filtro de Kalman [9].

A adoção de tiristores (como apresentado em [10]) para a aplicação proposta dificulta o desenvolvimento de circuitos de acionamento das chaves, uma vez que, em muitas aplicações, as correntes de *latch* e *hold* de dispositivos comerciais são maiores que a corrente nominal primária através das chaves. Por essa razão, foram utilizados *Insulated Gate Bipolar Transistors* (IGBTs) conectados em configuração emissor-comum e associados com diodos em antiparalelo sendo adotados como chaves bidirecionais [6]. Como as chaves semicondutoras são comutadas com um período de sobreposição, IGBTs de 3 kV são suficientes para suportar a tensão dos *taps*.

A tensão secundária é medida e comparada com a tensão de referência no sistema de controle, permitindo a regulação da tensão secundária dentro de valores aceitáveis, definidos pelos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) [11]. A conexão entre o sistema de controle e os circuitos de acionamento é feita por canais de fibra óptica. Além disso, os circuitos de acionamento (*gate-drivers*) foram desenvolvidos para apresentarem a mesma classe de isolamento do transformador (15 kV), a qual é obtida a partir da fonte de alimentação dos circuitos de acionamento. O circuito de controle é realizado por um *Digital*

TABELA I
Especificação das Tensões do Transformador

Característica de tensão		
Conexões dos <i>taps</i>	Tensão primária	Tensão secundária
$N_7 - N_9$	7967 V*	
$N_7 - N_{11}$	7621 V	
$N_5 - N_{11}$	7274 V	440/220 V
$N_5 - N_{13}$	6928 V	
$N_3 - N_{13}$	6581 V	

*Tensão nominal para a frequência da rede de 60 Hz.

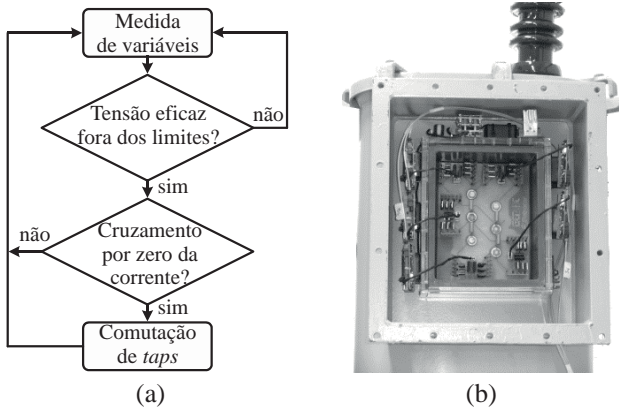


Fig. 2. Comutador eletrônico de *taps*. (a) Diagrama de controle simplificado. (b) Sistema implementado.

Signal Processor (DSP) modelo TMS320F28335 da Texas Instruments®. O diagrama simplificado do sistema de controle é apresentado na Figura 2.a. Já na Figura 2.b é apresentado o comutador eletrônico de *taps* desenvolvido.

O comutador eletrônico de *taps* possui um sistema de proteção projetado para operar sob condições de sobretensão no primário, possíveis *spikes* de tensão existentes no processo de comutação e contra descargas atmosféricas tanto no lado primário quanto secundário. Além disso, o sistema de proteção possui um relé normalmente fechado em paralelo com a chave S_1 , o qual evita que toda a tensão primária fique sobre as chaves eletrônicas durante o processo de energização do transformador e ainda protege as chaves contra curtos-circuitos que ocorram no lado secundário.

B. Resultados Experimentais do Comutador Eletrônico de Taps

O comutador eletrônico de *taps* foi implementado e testado sob condições nominais. Os ensaios foram conduzidos de modo a manter a tensão eficaz secundária dentro dos limites aceitáveis de 201 V e 229 V, determinados pelo PRODIST [11] para sistemas MRT.

Para a implementação do sistema, um transformador monofásico de distribuição de 5 kVA, 120/240/7967 V, foi utilizado para emular o alimentador, ou seja, para obter-se a tensão primária aplicada ao transformador com comutador eletrônico de *taps*. No lado de baixa tensão deste transformador foi conectada uma impedância de 0,3 p.u., emulando uma rede de distribuição longa, a qual resulta em uma queda da tensão primária no PAC de 16,3%.

O comutador eletrônico de *taps* apresenta operação adequada para quedas de tensão primária de até 17,4%, limitada pela faixa de atuação dos enrolamentos de *tap*. Os resultados apresentados na Figura 3 confirmam a regulação da tensão no PAC para os limites definidos. Na Figura 3.a são apresentados os semiciclos positivos e o valor eficaz da tensão primária, enquanto que a Figura 3.b apresenta a tensão secundária. Ressalta-se que o sistema é capaz de realizar as comutações entre *taps* a cada semiciclo da frequência da rede.

Na Figura 4 é apresentada a corrente através das chaves S_1 e S_2 , confirmando a comutação apenas na passagem por zero da corrente primária e a mitigação da corrente de curto-circuito, evitando possíveis *spikes* de tensão sobre as chaves

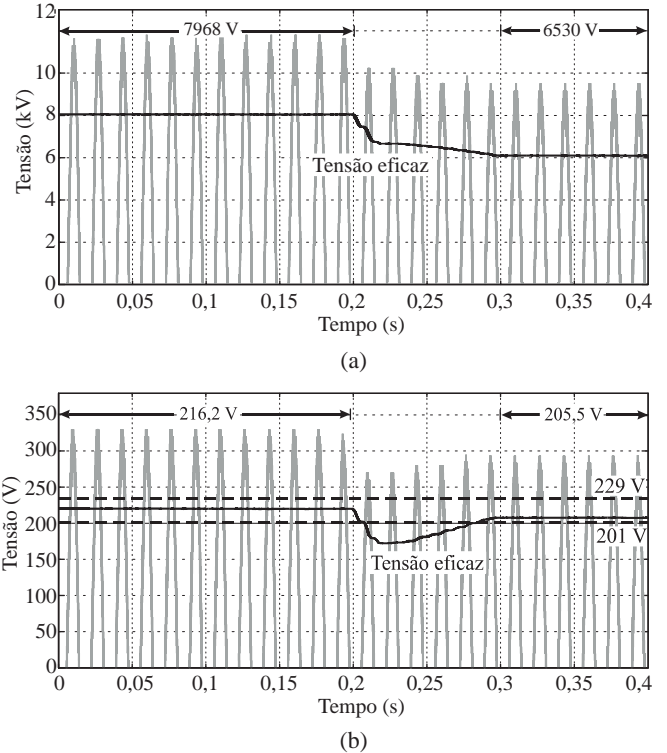


Fig. 3. Regulação de tensão do comutador eletrônico de *taps* para meios ciclos da rede. (a) Tensão primária. (b) Tensão secundária.

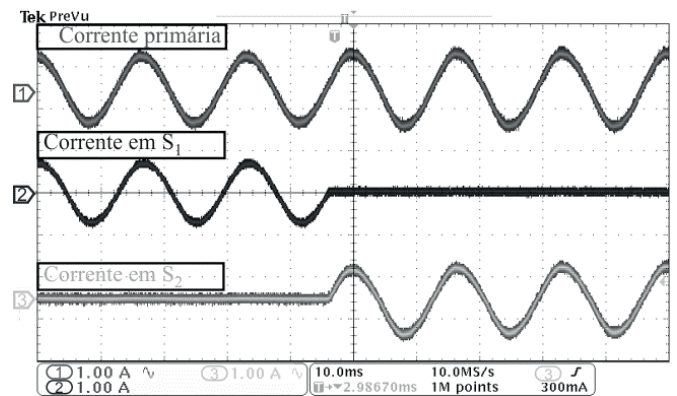


Fig. 4. Comutação no cruzamento por zero da corrente.

semicondutoras durante o processo de comutação. Extensivos ensaios têm sido realizados com sucesso, demonstrando a aplicabilidade do sistema proposto. Cabe destacar que o sistema pode ser aplicado em transformadores trifásicos com as devidas modificações.

III. TOPOLOGIA PARA TRANSFORMADOR INTELIGENTE APLICADO EM REDES INTELIGENTES

O aumento da demanda por eletricidade e a integração da geração distribuída aos sistemas de distribuição afetará significativamente a regulação da tensão. Além disso, problemas de qualidade de energia, como afundamentos (*sags*) e elevações da tensão (*swells*) serão menos aceitáveis.

A aplicação do conceito de transformador inteligente tem por objetivo minimizar ou mesmo eliminar os referidos problemas, proporcionando a regulação de tensão e criando um meio de comunicação bidirecional com a concessionária

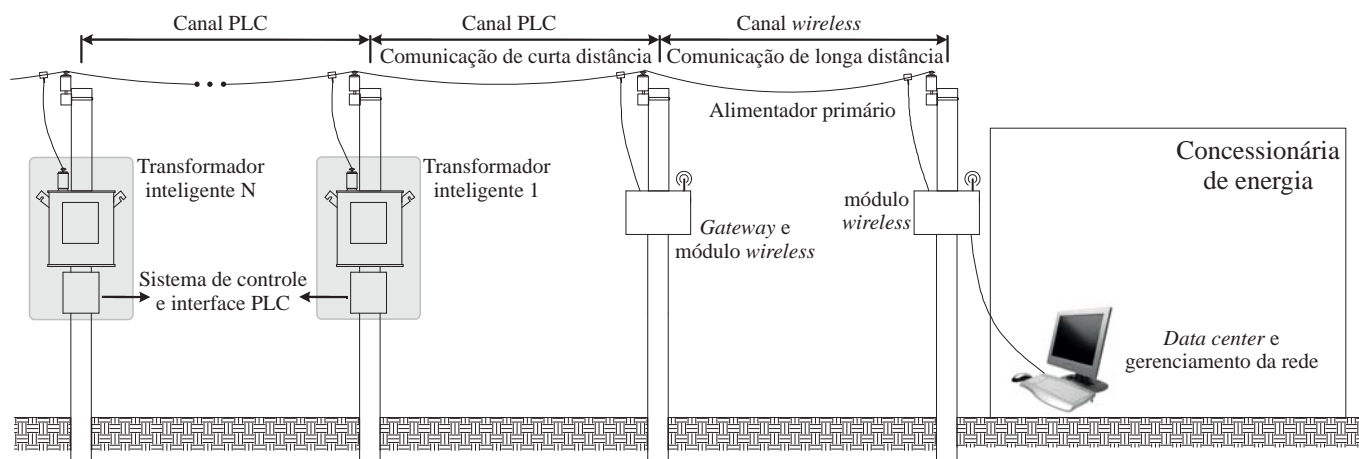


Fig. 5. Esquemático do sistema de comunicação do transformador inteligente.

de energia a partir do transformador. Além da regulação de tensão, o transformador inteligente pode melhorar o gerenciamento dos sistemas de distribuição, permitindo, por exemplo: atuação direta sobre os *taps* do transformador; monitoramento das variáveis e avaliação do carregamento do transformador; planejamento de expansões, manutenção e substituição de transformadores e cabeamento a partir das informações obtidas; entre outros.

Entretanto, a utilização de transformadores inteligentes requer um sistema de comunicação apto para suportar um conjunto de funções que os sistemas de distribuição atuais não oferecem. Neste sentido, o sistema de comunicação deve ser compatível com aplicações em redes inteligentes, sendo capaz de se comunicar com outros dispositivos ao longo da rede. Por exemplo, a integração com *smart metering* pode permitir a regulação da tensão no ponto mais crítico da rede secundária. Dependendo das características da rede, a regulação pode acontecer logo nos terminais de baixa tensão do transformador ou em qualquer seção da rede [5].

Essa característica faz da comunicação uma das partes mais importantes em uma rede inteligente, provendo controle avançado e monitoramento, melhorias na segurança, eficiência, confiabilidade, redundância, auto-correção de defeitos, interatividade, etc. [2], [12]-[14]. É essencial que o sistema de comunicação opere de forma bidirecional, habilidade requerida para a interação entre consumidor e concessionária, e também permita a melhoria do gerenciamento dos sistemas de distribuição [14]-[16].

É importante mencionar que são necessárias basicamente duas estruturas de comunicação em uma rede inteligente: a comunicação entre sensores e equipamentos elétricos (tais como medidores inteligentes), e comunicação entre os dispositivos e o *data center* [8]. A primeira estrutura pode ser realizada por *power line communications* (PLC), ou comunicação *wireless*, como: ZigBee, 6LoWPAN, e Z-wave. A comunicação com o *data center* pode ser realizada por tecnologias de celular ou internet [17].

Posto tudo isto, é proposta uma topologia de comunicação associada a um transformador com comutador eletrônico de *taps* que permita o desenvolvimento do conceito de transformador inteligente. A solução proposta é apresentada na Figura 5. Este sistema foi desenvolvido especificamente para aplicações em redes de distribuição rurais, onde normalmente

a regulação de tensão é crítica e pode existir indisponibilidade de sinais de telefonia celular e/ou conexão à internet. O sistema é composto por um transformador de distribuição equipado com um comutador eletrônico de *taps*, que permite a regulação da tensão secundária, e um sistema de comunicação, o qual se trata de uma composição híbrida de comunicação PLC na rede de média tensão e tecnologia *wireless*, baseada em telefonia móvel, internet ou radiofrequência.

O canal PLC é usado para estabelecer um caminho entre localidades distantes, onde o transformador está instalado, e o *gateway* que concentra os dados provenientes de outros transformadores inteligentes instalados na região. O *gateway* também adequa os dados para transmissão através de um canal *wireless*. A quantidade de dados transferidos e recebidos pelo transformador inteligente faz do PLC uma escolha adequada para esta aplicação, uma vez que não há necessidade de uma elevada taxa de transmissão de dados. Por outro lado, o canal *wireless* necessita de uma taxa de transmissão mais elevada, uma vez que concentra os dados de um conjunto de transformadores inteligentes, o que torna as tecnologias de celular e internet escolhas interessantes.

Na Figura 6 é apresentado o diagrama de blocos que representa a operação do transformador inteligente proposto. O conjunto de equipamentos Transformador → Instrumentação → Controle → Circuito de acionamento → Comutador eletrônico de *taps* → Transformador, representa o bloco responsável por regular a tensão secundária. Os Módulos Sensores Inteligentes (MSIs) são conversores de dados, os quais convertem variáveis e eventos do sistema de controle e os enviam para o Módulo mestre. A comunicação entre o Controle e os MSIs é realizada pela porta SCI-A presente no DSP, as demais comunicações a partir do módulo MSI são feitas por comunicação RS232. No Módulo mestre, os dados de todos os MSIs são agrupados e enviados ao bloco Interface PLC, o qual converte os dados para serem enviados através da rede de média tensão.

Os dados oriundos de um conjunto de transformadores são recebidos pelo bloco *gateway*, o qual concentra a informação e a envia para o Módulo de interface *wireless*. Deste bloco, os dados são enviados até a companhia concessionária, onde podem ser processados. A análise dos dados e o caminho bidirecional criado permite a atuação direta sobre os *taps* do transformador inteligente de forma a melhorar a

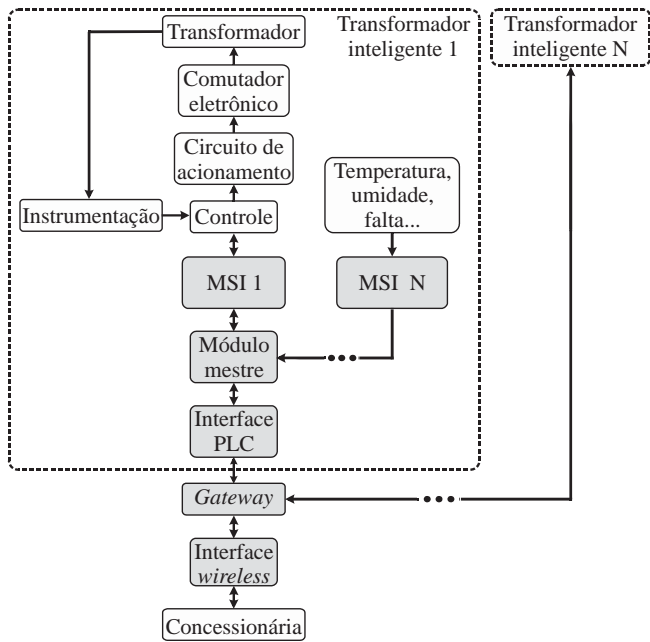


Fig. 6. Diagrama de blocos do transformador inteligente.

característica de tensão da rede secundária. Além disso, a avaliação dos dados recebidos possibilita a detecção de pontos críticos ao longo da rede, enquanto permite a análise de perdas e a definição de manutenções necessárias.

Um sistema de comunicação alternativo para o transformador inteligente é apresentado na Figura 7. O diagrama de blocos apresentado sugere a remoção da interface PLC, utilizando-se apenas de canais de comunicação *wireless*. Esta opção pode ser aplicável em regiões urbanas, onde sinais de telefonia celular e internet estão disponíveis.

A. Módulos Sensores Inteligentes (MSI)

Os MSIs [18] são responsáveis pela aquisição das variáveis do transformador, sendo equipados com quatro entradas de sensores, duas digitais e duas analógicas. As entradas analógicas são projetadas para operar com sinais na faixa de 0 a 5 V ou 4 a 20 mA, sendo compatíveis com a maioria dos sensores comerciais. Além de tensões e correntes, o MSI pode medir: temperatura (do transformador e ambiente), umidade, estado dos sistemas de proteção, entre outros. O aspecto físico do MSI é apresentado na Figura 8.a.

B. Gateway

O *gateway* é responsável por interconectar um conjunto de transformadores inteligentes e a interface *wireless*. A principal diferença entre o *gateway* e o MSI é a existência de comunicação serial RS232 com a interface PLC via rede MODBUS, além de não possuir entradas para os sensores. O aspecto físico do *gateway* é apresentado na Figura 8.b. Além disso, cabe ressaltar que o *gateway* apresenta a mesma arquitetura do Módulo mestre.

C. Protocolo de Comunicação

O processo de comunicação é controlado pelo *gateway*, Figura 6, e pelo Módulo mestre, Figura 7. Em ambos os casos, é feita a solicitação para um conjunto de transformadores instalados, onde cada transformador recebe

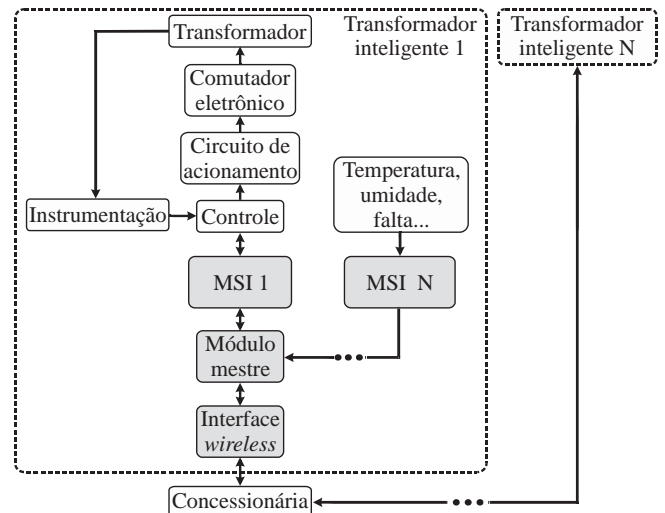


Fig. 7. Diagrama de blocos alternativo do transformador inteligente.

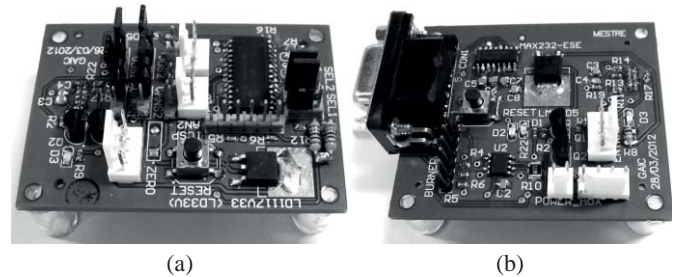


Fig. 8. Dispositivos de comunicação. (a) MSI. (b) Gateway.

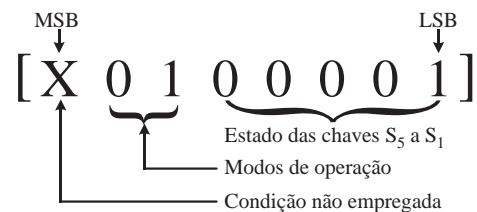


Fig. 9. Protocolo de comunicação.

um *byte* com as informações de operação vindas do sistema supervisorio da companhia concessionária. O *byte* recebido é representado na Figura 9, onde cada *bit* representa a seguinte informação: do *bit* 0 (LSB – *Least Significant Bit*) ao *bit* 4 são informados os estados das chaves S_1 a S_5 , o *bit* 5 define o modo de gerenciamento (manual), o *bit* 6 define o modo automático, e o *bit* 7 (MSB – *Most Significant Bit*) não é empregado.

Caso a solicitação do sistema supervisorio indique que o transformador deve operar no modo automático, o *byte* recebido terá os *bits* 0 a 5 em nível lógico baixo e o *bit* 6 em nível alto. Porém, quando o modo de gerenciamento é acionado, o *byte* terá o *bit* 5 e o *bit* que indica a chave a ser selecionada em nível alto, enquanto os demais *bits* estarão em nível baixo.

O recebimento do *byte* de solicitação pelo transformador faz com que o mesmo responda enviando o mesmo *byte*, entretanto, agora indicando sua condição de operação. Diferente do caso anterior, sempre é indicado o modo de operação e a chave acionada. Após o envio deste *byte* são enviadas as variáveis medidas: tensões primária e secundária eficazes, corrente primária eficaz, temperatura, umidade, etc.

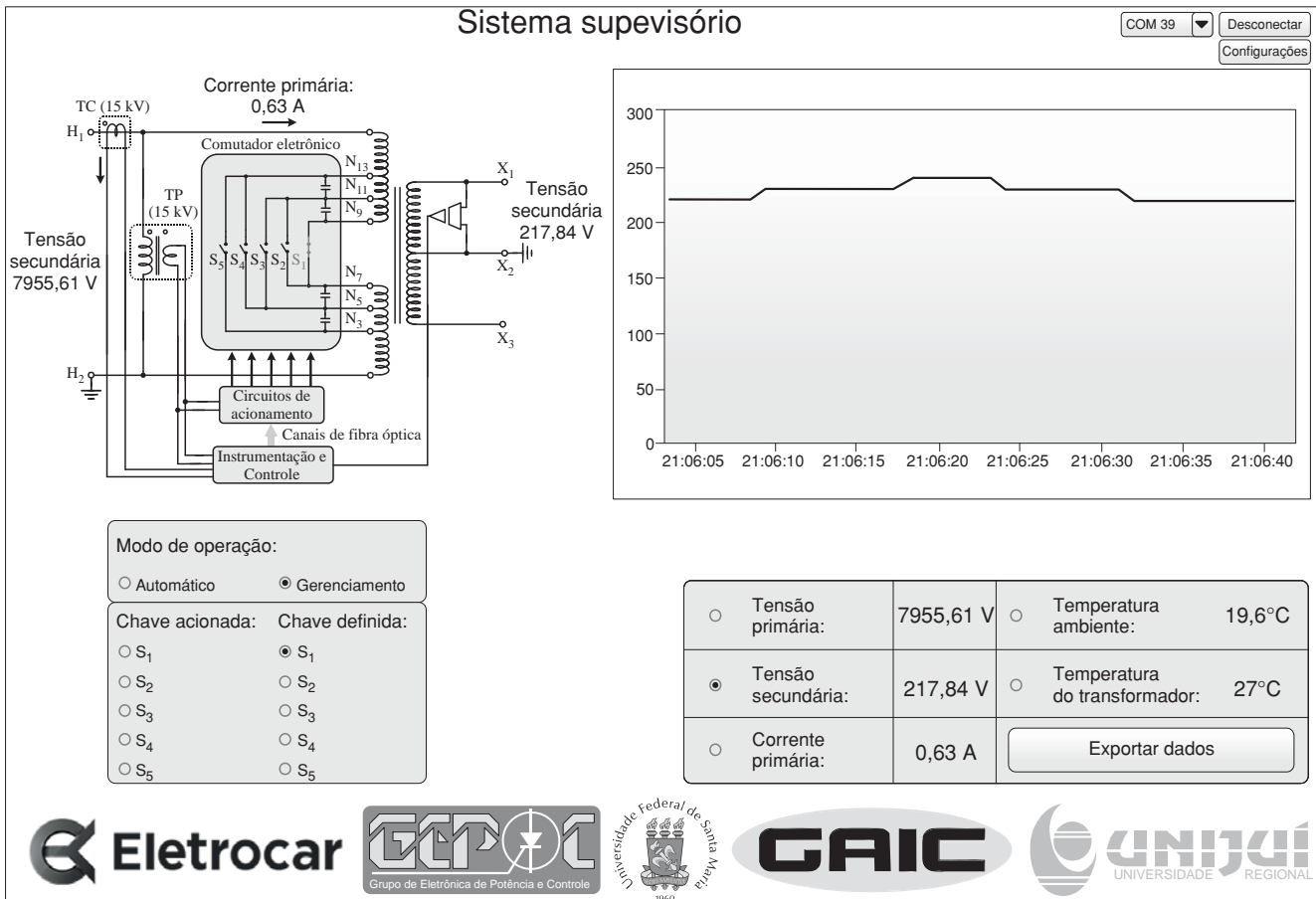


Fig. 10. Sistema supervisorio desenvolvido.

D. Interface Wireless

É responsável por realizar a comunicação entre o gateway e concessionária de energia. Pode ser implementada por diversas tecnologias, entre elas: radiofrequência, celular, internet, etc.

E. Interface PLC

O módulo PLC incorpora uma *Central Processing Unit* (CPU) e memória de aplicação de 4 kbytes, e 2 kbytes de RAM. A CPU executa rotinas do protocolo das interconexões na rede, PLC, *Interoperable Self Installation* (ISI) e os protocolos de comunicação, com a opção de conformidade com a norma CENELECTM 50065-1 [19]. O modem pode operar nas bandas A e C definidas nesta norma. A escolha entre estes protocolos define a taxa de transmissão de dados na rede. Selecionando a banda A, a comunicação se dá a 3,6 kbps.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A topologia de transformador inteligente foi implementada para a configuração apresentada na Figura 7. Empregou-se uma interface de comunicação *wireless* com dois rádios bidirecionais de 900 MHz, modelo IPWR[®] da Landis Gyr[®], os quais possibilitam a transmissão de dados a um raio de até 17 km. A transmissão de dados e o controle do transformador ocorreram de forma eficiente.

Na Figura 10 é apresentada a interface do sistema supervisorio desenvolvido para o recebimento dos dados e

controle do transformador. Conforme já comentado, dois modos de operação são possíveis: modo de regulação automática, que habilita a atuação automática do controle do comutador eletrônico de *taps*, mantendo a tensão secundária dentro dos limites estabelecidos pelo PRODIST; e modo de gerenciamento, o qual permite que a concessionária de energia estabeleça em qual *tap* o transformador deve operar, independente do nível de tensão secundária. Cabe ressaltar que o sistema supervisorio também opera em sistemas iOS[®], possibilitando maior mobilidade e controle do sistema. Na Figura 11 é apresentado o sistema supervisorio sendo executado em um iPad[®].

Como mostrado anteriormente na Figura 3, o modo de regulação automática da tensão possibilita controlar o nível de tensão no secundário do transformador pela atuação automática do comutador eletrônico de *taps*. Este modo de operação é interessante em casos de concentração de carga e pode auxiliar no controle de despacho de GD. Entretanto, dependendo da característica da rede de distribuição secundária, especialmente devido à impedância de linha e à distribuição dos consumidores ao longo da rede, pode ser mais interessante regular a tensão em diferentes pontos da rede. Isso pode ser conseguido pelo modo de gerenciamento do transformador inteligente, proporcionando à companhia concessionária o total controle sobre os *taps* do transformador.

Na Figura 12 é apresentada a comparação entre os dados recebidos pelo sistema supervisorio (Figura 12.a) com a tensão medida no secundário do transformador

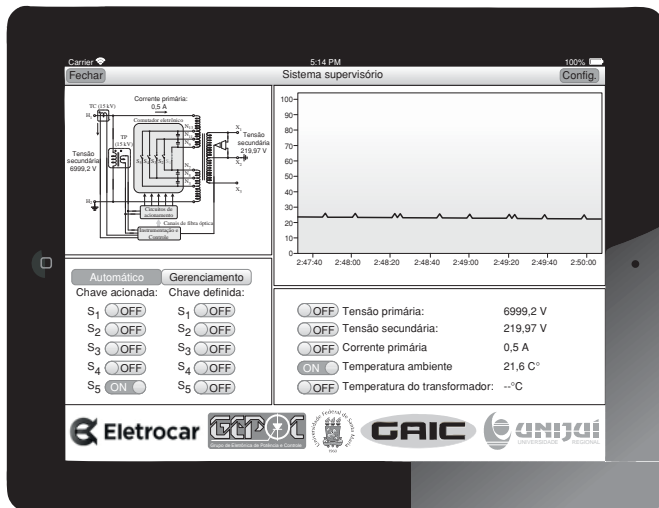


Fig. 11. Sistema supervisorio para dispositivos iOS®.

(Figura 12.b). Esta situação representa uma possível intervenção por parte da concessionária de energia de modo a manter a tensão eficaz do sistema em diferentes valores durante diferentes períodos do dia, elevando a tensão em períodos de grande consumo e reduzindo-a em períodos de baixo consumo.

V. CONCLUSÕES

O transformador inteligente proposto e implementado neste artigo emprega um comutador eletrônico de *taps* sob carga com dois sistemas de comunicação: (i) uma solução híbrida, a qual é composta por PLC e tecnologias *wireless*; e (ii) somente com comunicação *wireless*. O primeiro sistema é adequado para redes que alimentam comunidades rurais e esparsamente povoadas, onde as tecnologias de telefonia móvel e internet são pouco eficientes ou inexistentes. Nestes casos, as duas tecnologias, PLC e *wireless*, são complementares, combinando os benefícios do PLC (para aplicações usando os cabos de distribuição para comunicação em regiões remotas) e a grande capacidade de comunicação das tecnologias de celular e internet. O segundo sistema é proposto para aplicações em localidades urbanas, onde as tecnologias *wireless* são suficientes para a comunicação entre a concessionária e o transformador inteligente.

O sistema de comunicação com tecnologia *wireless* foi implementado com sucesso. Um sistema supervisorio foi desenvolvido, permitindo a operação de um transformador em ambos os modos, automático e de gerenciamento. Em qualquer dos modos é possível ainda a opção de *data logger*.

A principal característica do sistema proposto é a fácil expansão, permitindo o gerenciamento de um conjunto de transformadores inteligentes com o mesmo caminho de comunicação, o que facilita a formação de uma rede de transformadores. Estas características fazem do transformador inteligente uma promissora alternativa para aplicações em sistemas de distribuição, possibilitando a auto-regulação da tensão e o gerenciamento da rede, sendo aplicável nas redes de distribuição atuais, para GD e redes inteligentes.

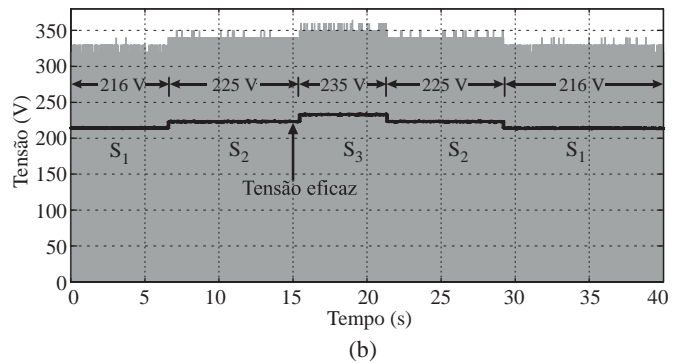
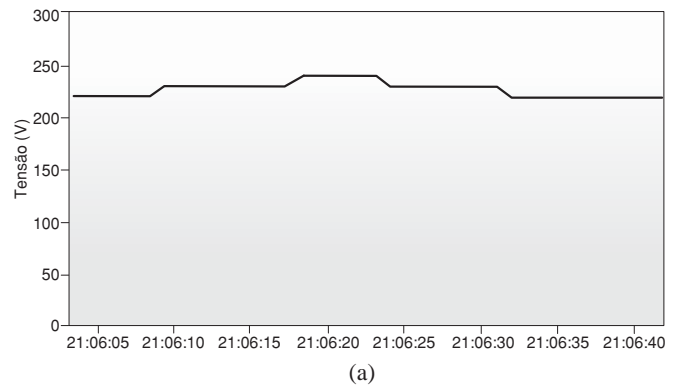


Fig 12. Comparação da tensão no sistema supervisorio e medida. (a) Tensão verificada no sistema supervisorio. (b) Tensão medida nos terminais secundários do transformador.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao “Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)”, “Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)”, “Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS)”, e “Centrais Elétricas de Carazinho S/A” pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] C. Gao, M. A. Redfern, “A Review of Voltage Control Techniques of Networks with Distributed Generations using On-Load Tap Changer Transformers,” in *Proc. of 45th International Utilities Power Engineering Conf.*, pp. 1–6, Set. 2010.
- [2] C. W. Gellings, M. Samotyj, B. Howe, “The Future’s Smart Delivery System: Meeting the demands for high security, quality, reliability, and availability,” *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 2, no. 5, pp. 40–48, Set./Out. 2004.
- [3] S. M. García, J.C.C. Rodríguez, J. A. Jardini, J. V. López, A. I. Segura, and P. M. M. Cid, “Feasibility of electronic tap-changing stabilizers for medium voltage lines – precedents and new configurations,” *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 24, no. 3, pp. 1490–1503, Jul. 2009.
- [4] S. M. Amin, B. F. Wollenberg, “Toward a smart grid: power delivery for the 21st century,” *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 3, no. 5, pp. 34–41, Set./Out. 2005.
- [5] P. Kadurek, J. F. G. Cobber, W. L. Kling, “Smart transformer for mitigation of voltage fluctuations in MV

- networks,” in *Proc. of 10th International Conf. on Environment and Electrical Engineering*, pp. 1-4, Maio 2011.
- [6] P. Bauer, S. W. H. de Haan, “Electronic tap changer for 500 kVA/10 kV distribution transformers: design, experimental results and impact on distribution networks,” in *Proc. of IEEE Ind. Appl.*, 1998, pp. 1530–1537.
- [7] D. McBee, M. G. Simões, “Reducing distribution transformer losses through the use of smart grid monitoring,” in *Proc. of North American Power Symposium*, pp. 1–6, 2009.
- [8] V. C. Güngör, D. Sahin, T. Kocak, S. Ergüt, C. Buccella, “Smart grid technologies: communication technologies and standards,” *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, vol. 7, no. 4, pp. 529–539, Nov. 2011.
- [9] R. E. Kalman, “A new approach to linear filtering and prediction problems,” *Jornal of Basic Engineering*, Series 82D: pp. 35-45, 1960.
- [10] D. Monroy-Berjillos, A. Gómez-Expósito, A. Bachiller-Soler, “A lab setup illustrating thyristor-assisted under-load tap changers,” *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 25, n. 3, pp. 1203-1210, 2010.
- [11] ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST):. Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica. Brasília: pp. 72, 2012.
- [12] J. O. Petinrin, M. Shaaban, “Smart power grid: technologies and applications,” in *Proc of IEEE International Conf. on Power Energy*, pp. 892–897, Dez. 2012.
- [13] C. H. Hauser, D. E. Bakken, A. Bose, “A failure to communicate: next-generation communication requirements, and architecture for the electric power grid,” *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 3, no. 2, pp. 47–55, Mar./Abr. 2005.
- [14] K. Moslehi, R. Kumar, “Smart grid – a reliability perspective,” in *Proc. of Innovative Smart Grid Technologies*, pp. 1–8, 2012.
- [15] W. Luan, D. Sharp, S. Lancashire, “Smart grid communication network capacity planning for power utilities,” in *Proc. of IEEE PES Transmission and Distribution Conf. and Exposition*, pp. 1–4, Abr. 2010.
- [16] E. T. Jauch, “Possible effects of smart grid functions on LTC transformers,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, no. 2, pp. 1013-1021, Mar./Abr. 2011.
- [17] D. M. Laverty, D. J. Morrow, “Telecommunications for smart grid: backhaul solutions for the distribution network,” in *Proc. of IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1–6, Jul. 2010.
- [18] F. Salvadori, M. Campos, P. Sausen, R. Figueiredo, C. Gehrke, C. Rech, M. A. Spohn, A. Oliveira. “Monitoring in industrial systems using wireless sensor networks with dynamic power management,” *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*. vol. 58, no. 9, pp. 3104–3111, Set. 2009.
- [19] CENELEC EN 50065-1: Signal on low-voltage electrical installations in the frequency range 3kHz to 148,5kHz.

DADOS BIOGRÁFICOS

Josemar de Oliveira Quevedo possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUI) e mestrado pela

Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), onde atualmente é doutorando em Engenharia Elétrica na área de Eletrônica de Potência voltada à regulação de tensão em sistemas de distribuição.

Julian Cezar Giacomini possui graduação em Engenharia Elétrica pela UNIJUI. Atualmente é aluno de mestrado em Engenharia Elétrica na UFSM, onde atua na área de Eletrônica de Potência aplicada a Sistemas Fotovoltaicos.

Rafael Concatto Beltrame recebeu título de Doutor em Engenharia Elétrica pela UFSM (2012). Atualmente é professor adjunto do Departamento de Processamento de Energia Elétrica (DPEE) da UFSM. Dentre as áreas de interesse estão a síntese e a análise de conversores estáticos, amplificadores de potência e geração distribuída de energia elétrica. É membro do IEEE e da Associação Brasileira de Eletrônica de Potência (SOBRAEP).

Fabricao Emmanuel Cazakevicius é aluno do Curso de Engenharia Elétrica na UFSM, desde 2009 faz parte do Grupo de Eletrônica de Potência e Controle (GEPOC), na mesma instituição, atuando no desenvolvimento de circuitos de *gate-driver*, fontes de alimentação e placas de circuito impresso.

Cassiano Rech recebeu o título de Doutor em Engenharia Elétrica pela UFSM (2005). Atualmente é professor adjunto do DPEE da UFSM. É Vice-Presidente da SOBRAEP e Editor da Revista Eletrônica de Potência. Suas principais áreas de interesse são: conversores multiníveis, modelagem e controle de conversores estáticos de potência, fontes alternativas de energia e geração distribuída.

Luciano Schuch recebeu o título de Doutor em Engenharia Elétrica pela UFSM (2007). Atualmente é diretor do Centro de Tecnologia (CT) e professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da UFSM. Atua no desenvolvimento de conversores de alto desempenho, sistemas fotovoltaicos, geração distribuída, integração de sistemas, técnicas de comutação suave e fontes ininterruptas de energia.

Tiago Bandeira Marchesan recebeu o título de Doutor em Engenharia Elétrica pela UFSM (2007). Atualmente é Professor Adjunto do Departamento de Eletromecânica e Sistemas de Potência (DESP) da UFSM. Atua nas áreas de Projeto e desenvolvimento de reatores eletrônicos para lâmpadas, fontes chaveadas, métodos de correção do fator de potência, controle de intensidade luminosa, e em inovações na área de transformadores de potência.

Maurício de Campos possui graduação em Engenharia Elétrica pela UNIJUI (1997), mestrado pela UFSM (2000) e é doutorando na mesma área pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Atualmente é professor assistente da UNIJUI. Atua principalmente nos seguintes temas: qualidade de energia, instrumentação, sistemas supervisórios, acionamentos de máquinas elétricas e educação em engenharia.

Paulo Sérgio Sausen possui Graduação (UNIJUI) e mestrado (UFPB) em Ciências da Computação e doutorado em Engenharia Elétrica pela UFCG (2008). Atualmente é professor Associado do Departamento de Ciências Exatas e Engenharia da UNIJUI. Possui experiência nas áreas de Ciência da Computação, Engenharia Elétrica e Matemática Aplicada.

Jonatas Rodrigo Kinas é graduando em Engenharia Elétrica pela UNIJUI, atualmente é bolsista de iniciação científica e integrante do Grupo de Automação Industrial e Controle (GAIC), pela mesma instituição.