



## XIX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2010 – 22 a 26 de novembro

São Paulo - SP - Brasil

### **Aplicação do Potencial das Redes Inteligentes (Smart Grid) no aumento da Eficiência Operacional de Reguladores de Tensão e Zonas de TAP em Sistemas de Distribuição.**

<b>Paulo Ricardo da Silva Pereira</b>	<b>Luciane Neves Canha</b>	<b>Alzenira da Rosa Abaide</b>
<b>CEEE-D / PPGEE-UFSM</b>	<b>UFSM</b>	<b>UFSM</b>
<a href="mailto:paulo.ricardo@ceee.com.br">paulo.ricardo@ceee.com.br</a>	<a href="mailto:lncanha@ct.ufsm.br">lncanha@ct.ufsm.br</a>	<a href="mailto:alzenira@ct.ufsm.br">alzenira@ct.ufsm.br</a>

	<b>Renê Reinaldo Emmel Júnior</b>	
	<b>CEEE-D</b>	
	<a href="mailto:reneej@ceee.com.br">reneej@ceee.com.br</a>	

#### **Palavras-chave**

Smart Grid  
Qualidade  
Controle de Tensão  
Regulador de Tensão  
PRODIST

#### **RESUMO**

O crescente desenvolvimento de equipamentos inteligentes e tecnologias de supervisão, controle e comunicação em tempo real têm contribuído enormemente para a introdução do conceito de redes inteligentes (smart grids) nos sistemas de distribuição. Esta situação exige que os estudos realizados sejam incrementados de forma a aproveitar o potencial disponibilizado pelos equipamentos inteligentes.

Neste aspecto, a evolução prevista para a rede primária, visando reduzir a queda de tensão e aumentar a robustez do sistema, apresenta também efeitos sobre a rede secundária e, portanto, exige ações simultâneas para aproveitar totalmente os benefícios dos estudos realizados. Aliado a estes fatores há que se levarem em conta as grandes discrepâncias encontradas nos sistemas de distribuição tais como alimentadores longos, cargas sazonais ou concentradas no final das redes, dentre outras. Graças às novas tecnologias de redes inteligentes torna-se possível avaliar e planejar melhorias com maior assertividade e segurança para os sistemas de distribuição.

Neste trabalho os autores pretendem apresentar uma metodologia avançada, que utiliza o potencial das redes inteligentes direcionada ao aumento da eficiência do controle de tensão nos sistemas de distribuição. Pretende-se, com isto, atingir uma melhor qualidade dos serviços prestados e consequentemente maior satisfação dos clientes.

## 1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de distribuição de energia brasileiros caracterizam-se por grandes extensões de rede, cargas heterogêneas distribuídas de maneira não uniforme, fatores estes que resultam em elevada queda de tensão e grandes variações entre os patamares de carga leve e pesada. Devido a estas características e as exigências regulatórias, nos últimos anos o controle dos níveis de tensão tem sido objeto de estudo em todos os níveis de operação.

Dentre as técnicas utilizadas atualmente pelas distribuidoras de energia para controle dos níveis de tensão nos sistemas de distribuição encontram-se: o controle de tensão na barra da SE, utilização de reguladores de tensão, aplicação de bancos de capacitores, alteração dos TAP's dos transformadores de distribuição e dispositivos FACTS aplicados em redes de distribuição.

Além da aplicação de recursos para a alocação ótima de reguladores de tensão e outros equipamentos destinados à melhoria da qualidade do fornecimento, são também desenvolvidas ferramentas para aumentar a eficiência dos ajustes destes equipamentos.

Dada a evolução dos equipamentos, utilização de sistemas de supervisão, telecomando e monitoramento torna-se possível a integração dos diversos meios de controle aliados a uma gama de outros dispositivos fornecendo informações sobre as condições do sistema de distribuição.

Neste contexto este trabalho apresenta uma metodologia avançada, que utiliza o potencial das redes inteligentes focada no controle de tensão dos sistemas de distribuição. O artigo propõe o desenvolvimento de um controle mais eficiente que possibilita ampliar e tornar mais adequado o gerenciamento em tempo real do controle de tensão nas redes de distribuição.

## 2. PROCESSO DE ANÁLISE

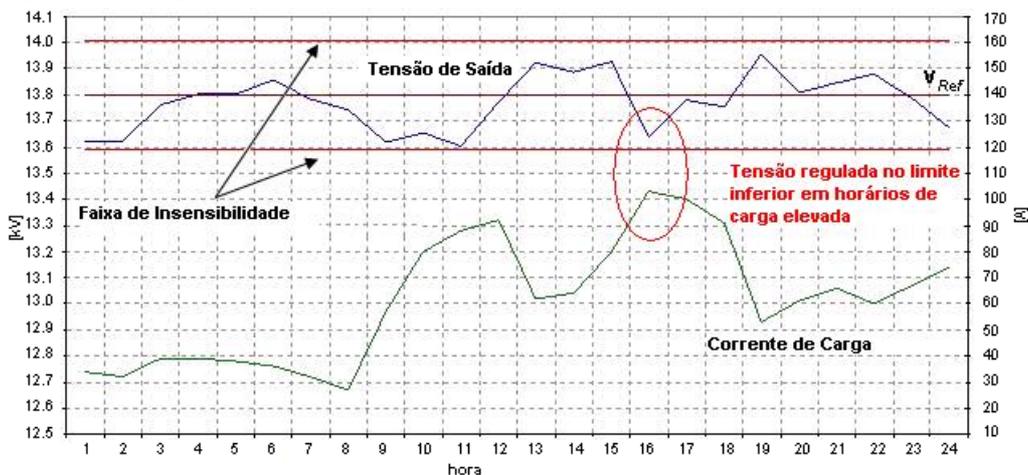
Nesta seção serão apresentadas as considerações necessárias para a avaliação dos níveis de tensão ao longo dos alimentadores de distribuição. Serão descritos os elementos relevantes relacionados aos reguladores de tensão, a metodologia proposta para definição de zonas de TAP, assim como os resultados obtidos após a aplicação.

### *2.1 Regulador de Tensão*

Os reguladores de tensão tradicionais são meios de controle de tensão utilizados por praticamente todas as empresas distribuidoras de energia. Em muitas situações são ajustados de maneira simplificada, considerando apenas três parâmetros: a tensão de referência, a insensibilidade e a temporização. Tal abordagem pode ser considerada satisfatória para alimentadores onde a variação da carga não é muito acentuada. No entanto, ao aplicar o regulador em um ponto com grande variação entre os patamares de carga leve e pesada, esta forma simplificada de definição dos ajustes não apresenta resultados satisfatórios, como pode ser visto na Figura 1, uma vez que nos horários de carga pesada a tensão de saída ( $V_{Out}$ ) situa-se muito próxima do limite inferior da faixa de regulação, ao passo que em horários de carga leve a tensão tende a permanecer próxima da faixa superior o que pode causar sobre tensão a alguns consumidores.

Para alimentadores com estas características de variação de carga torna-se desejável que a tensão seja mais elevada nos horários de maior carga, a fim de compensar a queda de tensão. A maioria dos reguladores tradicionais, bem como os novos reguladores de múltiplos ajustes, possui recursos para atender a esta necessidade através da utilização do compensador de queda na linha, ou LDC (Line Drop Compensator).

**Figura 1 – Comparativo entre tensão regulada e corrente de carga com ajuste convencional**



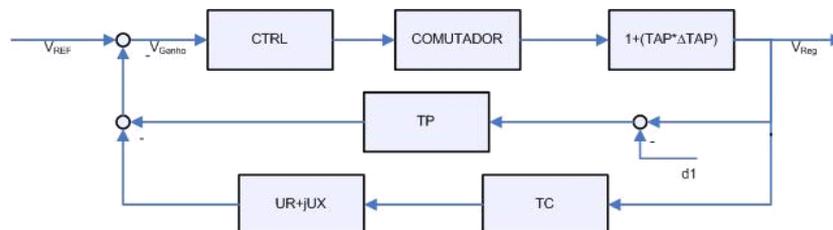
Com os recursos de LDC habilitados, além de utilizar-se a medida de tensão, é considerada também a corrente de carga, tornando a tensão de saída uma função que depende diretamente da tensão e corrente medida, conforme diagrama da Figura 2. Assim, a utilização da LDC pode ser definida como um ajuste variável da tensão de referência. Deste modo, conhecendo a variação da corrente de carga e o fator de potência, a nova referência do regulador ( $V_{Comp}$ ) poderá ser estimada utilizando (1).

$$V_{Comp} = V_{Ref} + \frac{I_L(U_R) \cdot \cos \theta}{I_C} + \frac{I_L(U_X) \cdot \sin \theta}{I_C} \quad (1)$$

Onde:

- $V_{Comp}$  - Tensão de referência considerando variação da corrente de carga;
- $V_{Ref}$  - Tensão de referência ajustada no controle;
- $I_L$  - Corrente de carga;
- $I_C$  - Corrente nominal primária do regulador;
- $U_R$  - Compensação resistiva;
- $U_X$  - Compensação reativa;
- $\theta$  - ângulo de defasagem entre tensão e corrente.

**Figura 2 – Diagrama funcional simplificado do regulador de tensão**

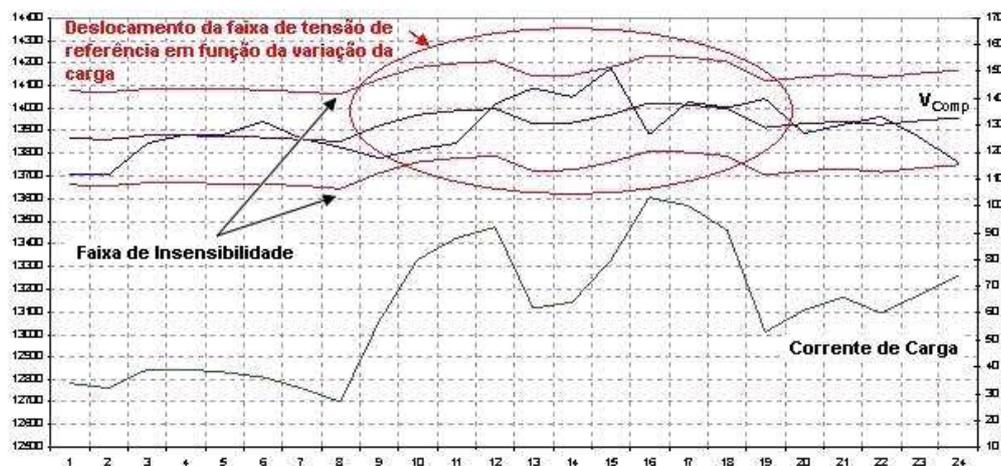


Para a avaliação da tensão esperada para o regulador deve-se considerar que a tensão  $V_{Comp}$  calculada encontra-se no centro da faixa definida a partir de (2), que considera a tensão de ajuste e a Insensibilidade definida.

$$\Delta V_{comp} = V_{comp} \pm Ins(\%) \quad (2)$$

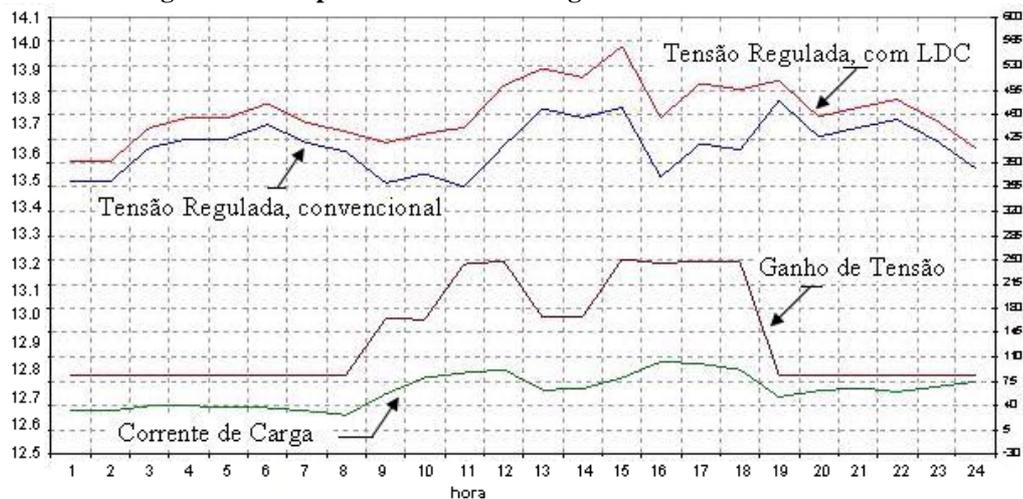
Utilizando-se desta definição, a Figura 3 apresenta a faixa de regulação para a mesma situação da Figura 1, porém considerando a influência da carga e os parâmetros de compensação.

**Figura 3 – Comparativo entre tensão regulada e corrente de carga com utilização de LDC**



Com esta abordagem, mantendo a mesma faixa de insensibilidade, pode-se observar um deslocamento da tensão de referência, devido à elevação da corrente de carga. Comparando os valores de  $V_{Out}$  para os dois casos observa-se um ganho de tensão em toda a faixa, obtido pela utilização do LDC, apresentado na Figura 4.

**Figura 4 – Comparativo entre abordagem convencional e LDC.**



Além dos valores de tensão primária, a definição dos ajustes dos reguladores deve levar em conta seu reflexo na tensão secundária, considerando os TAP's utilizados nos transformadores de distribuição. A fim de garantir o fornecimento adequado aos consumidores atendidos em tensão secundária são definidas zonas de TAP através das quais será indicado o TAP adequado para cada transformador, conforme Figura 5.

Deste modo podem-se definir os ajustes dos reguladores de tensão seguindo duas configurações possíveis:

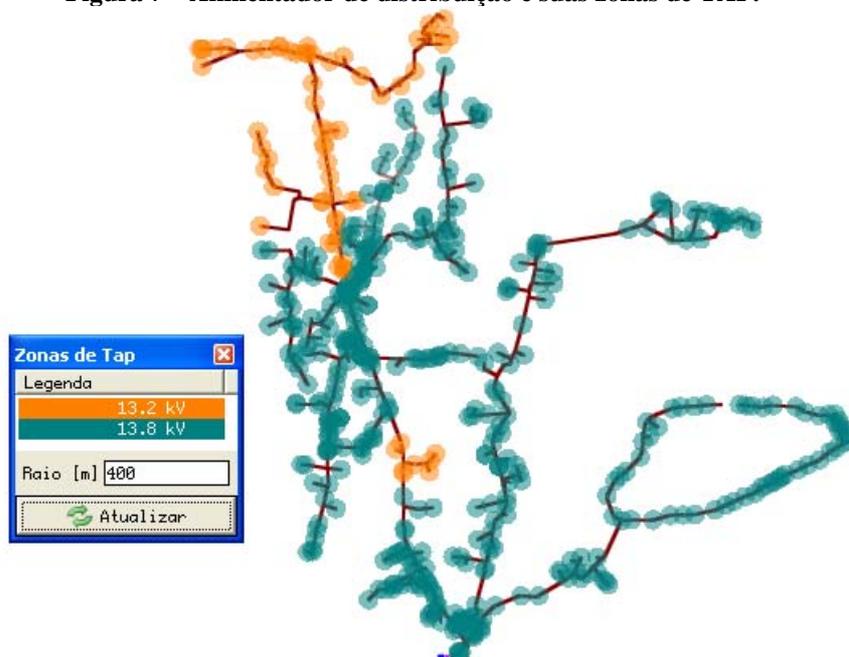
- Maximizar a tensão alterando as zonas de TAP
- Maximizar a tensão mantendo a zonas de TAP

A segunda situação é preferida em muitos casos por razões operacionais devido à menor necessidade de intervenção nos transformadores, uma vez que a tensão primária será ajustada para a atual configuração do sistema. Optando-se por manter a atual configuração de TAP's a aplicação do LDC



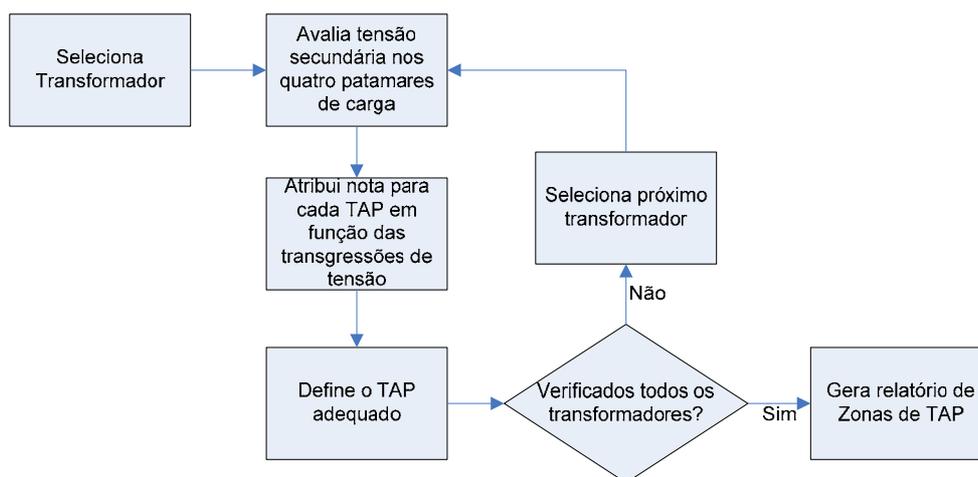
Para a definição do TAP adequado é utilizado uma rotina computacional que verifica, com base no fluxo de potência do alimentador, a tensão primária aplicada em cada transformador para os diferentes patamares de carga (carga leve e pesada ou a consideração das 24 horas do dia).

**Figura 7 – Alimentador de distribuição e suas zonas de TAP.**



De posse destes valores de tensão primária é simulada a tensão no secundário do transformador, para cada TAP, comparando com os limites estabelecidos pelo módulo 8 do PRODIST [1]. Após a simulação será definido o TAP que apresentar os melhores níveis de tensão secundária, de acordo com as ações propostas no fluxograma da Figura 8.

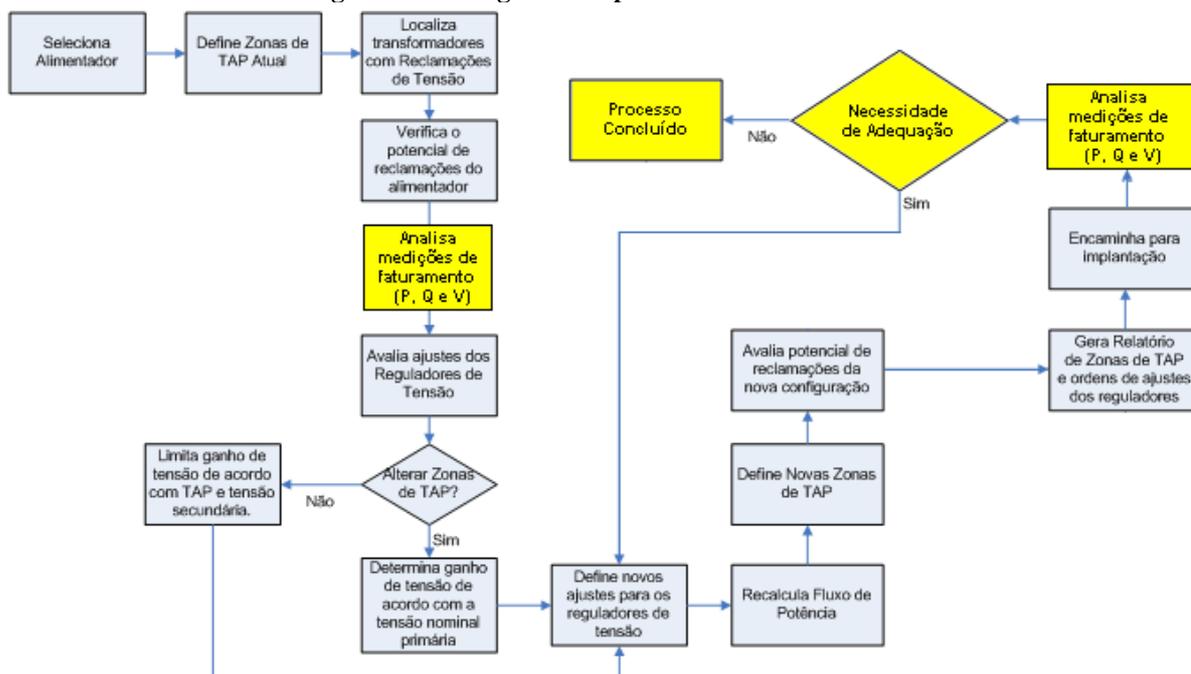
**Figura 8 – Fluxograma para definição das zonas de TAP.**



### 2.3 Método de Análise e Implementação Prática

Seja para incluir um novo regulador de tensão ou para alterar os ajustes de um regulador já existente, a análise desenvolvida e apresentada a seguir parte da configuração atual do alimentador. Através de simulações será definida a configuração mais indicada para cada situação, conforme fluxograma da Figura 9.

**Figura 9 – Fluxograma do processo de Análise.**



Após a realização das simulações, é apresentada a nova configuração do alimentador, contendo as novas zonas de TAP e indicando os novos ajustes dos reguladores de tensão. Após a realização da avaliação do alimentador e a análise da situação atual, utilizando simulações de fluxo de potência e medições de faturamento, são definidos os níveis de tensão desejados a partir da especificação da zona de TAP indicada para cada regulador de tensão. Após esta definição, uma rotina computacional apresenta os parâmetros de tensão de referência e LDC para cada regulador.

Após a definição destes parâmetros faz-se necessário encaminhar uma equipe para a execução em campo da configuração do equipamento e uma vez colocado em operação é realizado o acompanhamento da eficácia dos ajustes propostos.

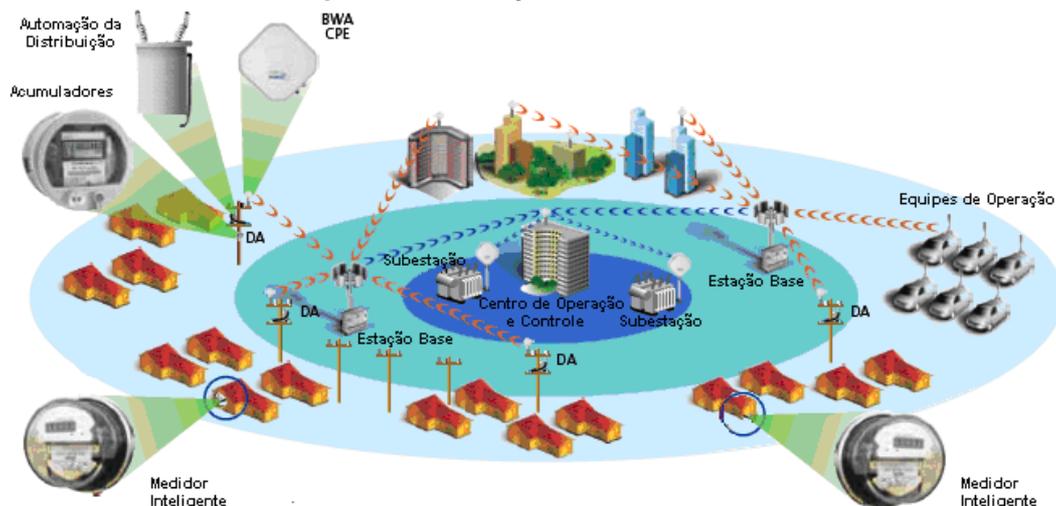
Para validação do estudo são instalados equipamentos de medição de grandezas em MT ou em BT, juntamente com medições de faturamento, permitindo a avaliação da faixa de tensão de saída do equipamento e a propagação de seus efeitos em outros pontos do alimentador.

A aplicação da metodologia apresenta resultados satisfatórios sob o ponto de vista de melhoria das condições de operação do sistema elétrico, fornecendo mais qualidade à energia fornecida aos consumidores, no entanto este processo demanda tempo de execução e custos com deslocamento de equipes.

### 3. SMART GRID E A AUTOMAÇÃO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

O desenvolvimento de medidores inteligentes e as novas tecnologias utilizadas para automação da distribuição apresentam-se como uma solução altamente promissora para os sistemas de distribuição. Uma nova gama de possibilidades surge a partir da aplicação de equipamentos e sistemas inteligentes tanto em termos de qualidade e confiabilidade do serviço prestado por parte das empresas de distribuição como em termos de conhecimento das redes de distribuição. A Figura 10 apresenta uma visão geral do SMART GRID.

**Figura 10 – Ilustração do SMART GRID.**



O sistema supervisor permite aos operadores o monitoramento de grandezas elétricas em tempo real, a realização de manobras e intervenções na rede de maneira mais rápida, uma maior agilidade na localização de defeitos e direcionamento de equipes.

No entanto esta é apenas uma parcela dos recursos disponibilizados pelo SMART GRID. A integração dos sistemas de supervisão com os algoritmos desenvolvidos para otimização de manobras, controle de tensão e redução de perdas pode direcionar ações ainda mais eficientes baseadas nas reais condições do sistema resultando em:

- Segurança e confiabilidade do fornecimento;
- Qualidade da energia fornecida;
- Benefícios econômicos e sociais;

#### **4. INTEGRAÇÃO ENTRE O CONTROLE DE TENSÃO E SMART GRID**

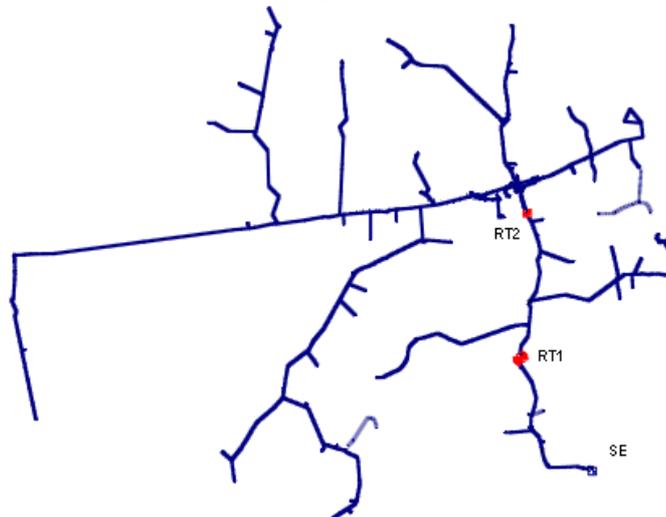
Com a associação entre SMART GRIDS e o controle de tensão torna-se possível o fechamento da malha de controle de tensão nos sistemas de distribuição. Através das grandezas registradas pelos medidores inteligentes a pelos demais dispositivos automatizados será realizada a realimentação dos reguladores de distribuição avaliando em tempo real os níveis de tensão fornecidos, o número de comutações e a temporização utilizada, sem a necessidade de deslocamento de equipes para a instalação de registradores. Deste modo torna-se possível operar com um controle adaptativo, alterando os parâmetros do regulador quando necessário. A Figura 11, apresenta de forma simplificada o diagrama do controle de tensão de um sistema de distribuição considerando a presença da automação da distribuição.

Com a utilização desta arquitetura, torna-se também possível integrar os diversos meios de controle existentes nos alimentadores, permitindo a aplicação de outras técnicas como controle hierárquico e a otimização da operação dos reguladores, monitorando o número de comutações e alterando convenientemente a faixa de insensibilidade e o tipo de temporização de acordo com a necessidade. Por exemplo, o alimentador da Figura 12 possui além do controle na barra da subestação, dois outros reguladores em série ao longo da rede de distribuição.

**Figura 11 – Controle de Tensão e o SMART GRID.**

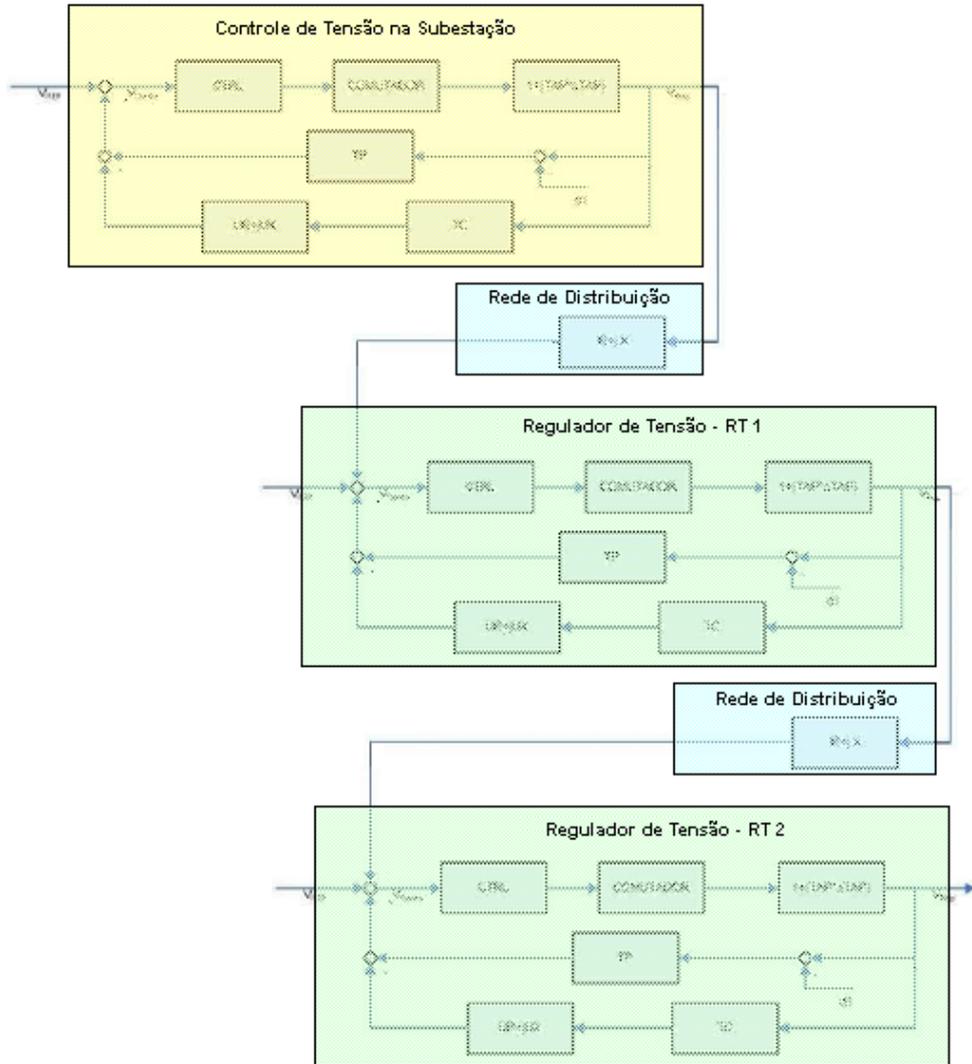


**Figura 12 – Alimentador de Distribuição com controle de tensão em cascata**



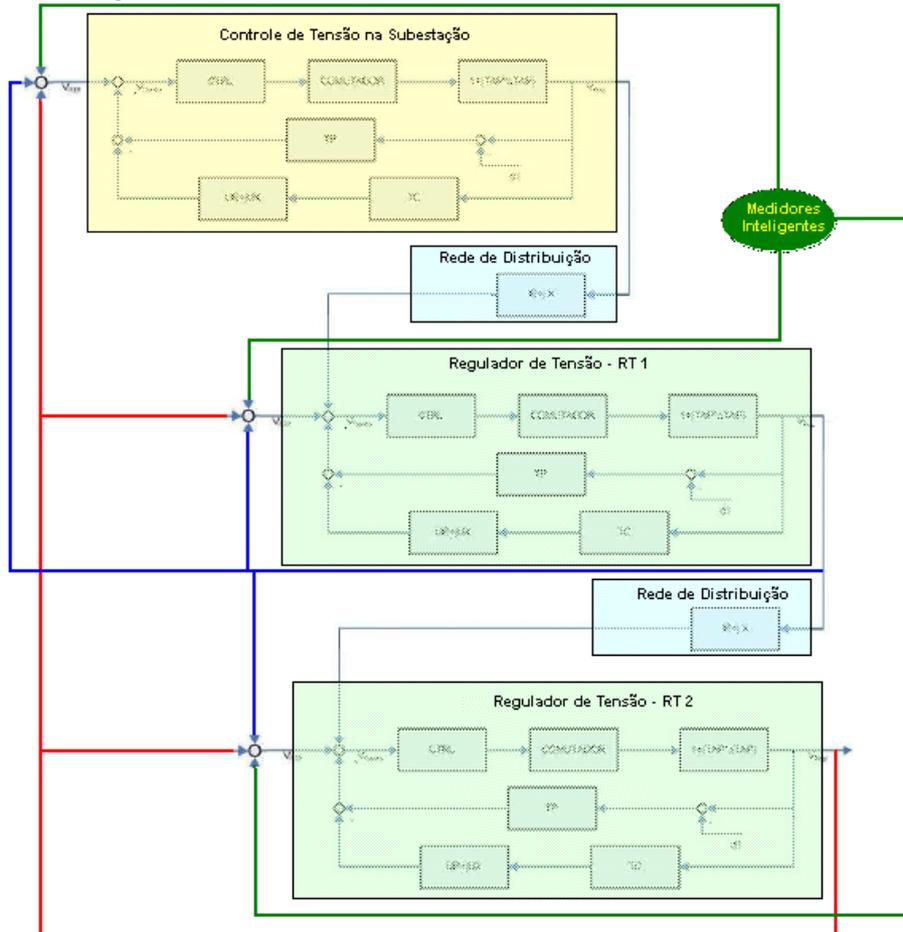
Para este caso a malha de controle pode ser apresentada como o diagrama da Figura 13. Considerando a utilização das medições distribuídas ao longo do AL e da automação dos reguladores de tensão, pode-se descrever o sistema como o diagrama da Figura 14, uma vez que existe a interação de todos os componentes. A programação adequada do sistema supervisor permite monitorar os níveis de tensão de saída de cada um dos reguladores, comparando-os com as faixas otimizadas de tensão desejadas para cada um associando ao número de comutações esperados para o período, dilatando ou estreitando a faixa de insensibilidade ou utilizando temporização inversa reduzindo o tempo de resposta de modo a garantir a faixa mais adequada de tensão de fornecimento aos consumidores, além de atender aos limites estabelecidos pelo órgão regulador.

**Figura 13 – Controle de tensão em cascata sem SMART GRID**

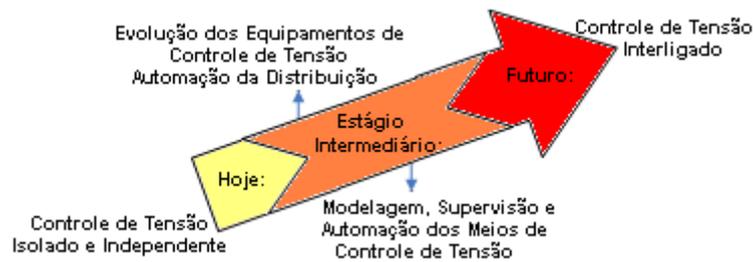


Técnicas e Algoritmos de otimização de ajustes de reguladores de tensão aliadas a rotinas de previsão de demanda podem ser implementados no sistema supervisor a fim de tornar possível a avaliar o melhor ajuste de tensão para cada dia a partir da análise dos valores previstos. Além disso, o monitoramento dos reguladores de tensão permite a acompanhamento do número de comutações indicando a provável data de retirada de operação para manutenção de acordo com o comportamento do perfil de carga e tensão do sistema, juntamente com a consideração das iterações entre os diversos componentes. É possível, assim, criar um controle interligado de tensão, conforme Figura 15.

**Figura 14 – Controle de tensão em cascata com SMART GRID**



**Figura 15 – Evolução do Controle de Tensão**



## 5. CONCLUSÕES

A utilização dos recursos disponíveis nos reguladores tradicionais, aliadas a um planejamento integrado de definição de zonas de TAP, define claramente qual será o papel do regulador de tensão e qual o resultado esperado, além de garantir um melhor aproveitamento do ativo proporcionando melhoria na qualidade da energia fornecida, com economia. No entanto, podem ser obtidos resultados ainda mais eficazes com o uso das redes inteligentes.

Os sistemas de distribuição de energia encontram-se em evolução e a otimização da operação dos equipamentos tem papel fundamental na utilização racional dos recursos disponíveis.

A metodologia apresentada permite a otimização dos níveis de tensão dentro da área de atuação do regulador e a integração dos meios de controle em nível de sistema, proporcionando condições para o desenvolvimento econômico das regiões atendidas, juntamente com a redução do número de reclamações de tensão e fornecimento de energia dentro dos limites adequados.

A integração entre as técnicas de otimização dos equipamentos, ferramentas de simulação e estimação de estados e a automação da distribuição representam o futuro da distribuição da energia elétrica

apresentando um sistema elétrico mais robusto e confiável, o fornecimento de energia com mais qualidade e a utilização ótima dos equipamentos.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS E/OU BIBLIOGRAFIA

ALVARION, “Optimizing Smart Power Grids with WiMAX™ and Broadband Wireless Connectivity Solutions”.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, “PRODIST– Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional”, 2010.

BARAN , M. E. & HSU, M. Y., "Volt/Var Control at Distribution Substations", IEEE Transactions on Power Systems, Vol 14, No. 1, Fevereiro de 1999.

CARNEIRO, J. R. V., "Gestão de Reclamações de Nível de Tensão em Regime Permanente", XVII SENDI, Belo Horizonte, MG, Agosto de 2006.

SOARES, R. G. & SOARES, S. S., "Aplicativo Para Gestão das Medições de Nível de Tensão de Fornecimento de Elétrica, Amostrais e/ou Solicitadas Estabelecidas pela Resolução ANEEL 505 de 26 de Novembro de 2001", XVII SENDI, Belo Horizonte, MG, Agosto de 2006.

CARRARO, E. & MARQUES R. F. & BENEDIK C. R. & ALVES M. E. G., "Experiência com Relé Regulador de Tensão com Ajustes Múltiplos Programáveis", XVII SENDI, Belo Horizonte, MG, Agosto de 2006.

COOPER POWER SYSTEMS, "Voltage Regulating Aparatus – Determination of Regulator Compensator Settings", USA, October 2003.

COOPER POWER SYSTEMS, "How Step-Voltage Regulator Operate", USA, February 1993.

EUROPEAN COMMISSION DIRECTORATE-GENERAL FOR RESEARCH INFORMATION AND COMMUNICATION UNIT, “European Technology Platform SmartGrids”, Luxembourg, 2006.

GUIMARÃES , R. O. & OLIVEIRA, C. C. & MÉFFE, A. & ALVES, M. A. D., "Avaliação dos Riscos de Violações de Conformidade de Tensão em Sistemas de Distribuição, Utilizando Métodos Probabilísticos e Técnicas de Inteligência Artificial", XVII CBQEE, Rio de Janeiro, RJ, Agosto de 2007.

ITB, "Regulador de Tensão Monofásico – Manual de Instruções MI-001", Agosto 2006.

KERSTING, W. H., "Distribution System Modeling and Analysis", CRC PRESS, 2002.

PEREIRA, P.R.S.; “Métodos para Otimização dos Ajustes dos Reguladores de Tensão e Zonas de Tap em Sistemas de Distribuição”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2009.

PEREIRA, P.R.S.; CANHA, L. N., “Otimização dos Ajustes de Reguladores de Tensão em Redes com Acentuada Variação de Carga”, VIII INDUSCON, Poços de Caldas, MG, Agosto de 2008.

PEREIRA, P.R.S.; LIMA, D. O.; BOHN, T.; SILVEIRA, L. C.; ABAIDE, A. R.; CANHA, L. N. “Otimização dos ajustes de reguladores de tensão aplicados em redes de distribuição com acentuada variação de carga, visando atender a legislação e a satisfação dos clientes”, XVIII SENDI, Recife, PE, Outubro de 2008.

PINEDA, F. R. “Telvent Smart Grid Solution”, São Paulo, Brazil, 2009, Nov.

SIEMENS, "Painel de Controle do Regulador de Tensão MJ-X<sup>L</sup>™", Maio 2003.

TOSHIBA, "Instruções Para Operação dos Relés Reguladores TB-R800A", 2002.

TOSHIBA, "O que Interessa Saber Sobre os Reguladores de Tensão Monofásicos de 32 Degraus", [S.L.], [S.D].