

# Ferramenta para controle otimizado de tensão e reativos no contexto da automação avançada da distribuição

Thiago S. Medeiros\*. Raphael T. Sakai\*. José A. C. Júnior\*. Marcio R. da Cruz\*. Carlos F. M. Almeida\*. Nelson Kagan\*  
José A. S. Brito\*\*. Gustavo T. A. da Silva\*\*

\*Centro de Estudos em Regulação e Qualidade de Energia, Universidade de São Paulo  
São Paulo, Brasil (e-mails: [thiago.saude@usp.br](mailto:thiago.saude@usp.br), [raphaeltoshio.energ@gmail.com](mailto:raphaeltoshio.energ@gmail.com), [joseairtonajr@outlook.com](mailto:joseairtonajr@outlook.com),  
[marciocruz@gmail.com](mailto:marciocruz@gmail.com), [cfmalmeida@usp.br](mailto:cfmalmeida@usp.br), [nelsonk@pea.usp.br](mailto:nelsonk@pea.usp.br)).

\*\*Neoenergia

(e-mail: [jbrito@neoenergia.com](mailto:jbrito@neoenergia.com), [gtravassos@neoenergia.com](mailto:gtravassos@neoenergia.com)).

---

**Resumo:** O controle de tensão e reativos, ou controle Volt-Var, é uma funcionalidade importante na operação das redes elétricas, tendo influência na qualidade do produto e nas perdas técnicas na rede. Esse artigo apresenta uma ferramenta para realização do controle otimizado de tensão e reativos no contexto da automação avançada da distribuição. A ferramenta foi desenvolvida no âmbito de projeto de P&D e foi integrada aos sistemas legados da concessionária através de um barramento de interoperabilidade, também desenvolvido ao longo do projeto. Além da metodologia adotada, são apresentados os resultados da aplicação da funcionalidade em uma área piloto, onde foi verificada a integração da ferramenta com o barramento de interoperabilidade e seu desempenho em relação aos objetivos desse tipo de controle, tais como melhoria no nível de tensão e redução das perdas técnicas na rede.

**Abstract:** Voltage and reactive power control, or Volt-Var control, is an important functionality in the operation of electric distribution systems, having influence on power quality and technical losses in the network. This paper presents a tool for performing optimized voltage and reactive power control in the context of advanced distribution automation. The tool was developed as part of an R&D project and was integrated with the utility's legacy systems through an interoperability bus, also developed throughout the project. In addition to the adopted methodology, the results of the functionality application in a pilot area are presented, where it was verified the integration of the tool with the interoperability bus and its performance in relation to the objectives of this type of control, such as improvement in voltage level and reduction of technical losses in the network.

*Palavras-chaves:* Automação avançada da distribuição; Controle Volt-Var; Distribuição de energia elétrica; Otimização por colônia de formigas; Qualidade do produto;

*Index terms:* Advanced distribution automation; Ant colony optimization; Energy distribution; Power quality; Voltage and reactive power control;

---

## 1. INTRODUÇÃO

O controle Volt-Var (CVV) é uma importante funcionalidade na operação dos sistemas de distribuição de energia elétrica. Refere-se ao controle de equipamentos instalados na subestação de distribuição, como os On Load Tap Changers (OLTCs), assim como equipamentos instalados na rede primária de distribuição, como reguladores de tensão (RTs) e bancos de capacitores (BCs), de modo a manter a tensão dentro dos limites aceitáveis em todos os pontos da rede para qualquer condição de carga. Portanto, essa funcionalidade contribui de forma fundamental para a qualidade do produto em relação a variações de tensão de longa duração. Além

disso, visa reduzir as perdas técnicas, através do gerenciamento da potência reativa na rede.

No contexto das redes elétricas inteligentes, sistemas de distribuição com elevado grau de automação visando o aumento da eficiência e da confiabilidade do sistema, os objetivos do CVV podem ser expandidos. Além dos objetivos primários já citados, outras características passam a ser desejáveis para a funcionalidade, tais como: execução do CVV em casos de reconfiguração de rede e na presença de recursos energéticos distribuídos, otimização do CVV visando o controle coordenado dos equipamentos e flexibilidade na escolha dos objetivos operacionais desejados (Uluski, 2010).

Uma das abordagens possíveis para que esta funcionalidade contemple todos esses objetivos é a realização do CVV de maneira centralizada, no nível do sistema DMS (Distribution Management System). Essa abordagem é baseada em um modelo detalhado e dinâmico da rede de distribuição, obtido com o auxílio de informações provenientes de outros sistemas da concessionária, como GIS (Geographic Information System), MDM (Meter Data Management) e SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), e utiliza cálculos complexos de rede, como estimação de estados e fluxo de potência.

Um dos desafios para adotar essa abordagem, nesse caso com uma visão global do sistema, é o tempo computacional necessário para realizar a otimização do CVV devido à extensão do espaço de busca do problema. Esse desafio vem sendo tratado com a utilização de meta-heurísticas (Rahimi, 2012).

Poucos estudos apresentam uma solução completa para realização do controle otimizado de tensão e reativos no contexto das redes elétricas inteligentes, sendo a maioria deles realizados em ambientes offline (Singh, 2016). Em (Manbachi, 2015) o problema de otimização do CVV é tratado com algoritmo genético. A funcionalidade é executada em uma plataforma de simulação, sendo integrada através do protocolo DNP3 a um hardware, responsável por simular a infraestrutura de medição avançada (AMI) e os IEDs (Intelligent Electronic Devices) dos equipamentos de controle. Em (Dabic, 2010) é apresentada a experiência da empresa canadense BC Hydro em relação ao controle otimizado de tensão e reativos. A funcionalidade de CVV é implementada em um servidor exclusivo e integrada aos sistemas GIS e SCADA, de modo a ser executada em três subestações separadamente.

O presente artigo apresenta a metodologia adotada no desenvolvimento da ferramenta de controle otimizado de tensão e reativos. Por conta do desempenho do algoritmo na resolução do problema de otimização do CVV (Medeiros, 2016), foi escolhida a otimização por colônia de formigas para resolução do problema. Além disso, é apresentado um estudo de caso de aplicação da funcionalidade, cujo os resultados mostram o desempenho da ferramenta em relação aos objetivos do CVV e sua integração com os sistemas legados da concessionária.

O desenvolvimento realizado está inserido em um conjunto de funcionalidades de automação avançada da distribuição desenvolvidas no âmbito de projeto de P&D ANEEL para a empresa Neoenergia.

## 2. DESENVOLVIMENTO

Nessa seção serão apresentadas a metodologia adotada no desenvolvimento da ferramenta de controle otimizado de tensão e reativos e a plataforma de simulação de redes elétricas utilizada como base para a ferramenta desenvolvida. Além disso, serão apresentados os resultados obtidos após a aplicação da funcionalidade em uma área piloto da concessionária.

### 2.1. METODOLOGIA

A ferramenta de controle otimizado de tensão em reativos desenvolvida se baseia na abordagem centralizada de controle Volt-Var. Por contar com um elevado grau de informações da rede elétrica, este tipo de abordagem permite a otimização global do CVV, fazendo com que o controle dos equipamentos seja feito de forma coordenada. Além disso, por basear-se em um modelo detalhado e dinâmico do sistema de distribuição, alterações na topologia são levadas em consideração, fazendo com que a funcionalidade se adapte a casos de reconfiguração da rede.

O diagrama da Fig. 1 ilustra a interação entre os sistemas legados e os módulos utilizados na realização do CVV. Dados do sistema GIS são utilizados pelo módulo de importação de redes (MIR) para obtenção de um modelo georreferenciado da rede de distribuição.

Medições provenientes dos sistemas SCADA e MDM e dos dispositivos inteligentes desenvolvidos ao longo do projeto, como sensores e transformadores, em conjunto com dados do sistema OMS (Outage Management System), são utilizados pelo módulo de estimação de estados (MEE) para atualizar tanto a topologia quanto as cargas do modelo, resultando em um modelo detalhado do sistema de distribuição.

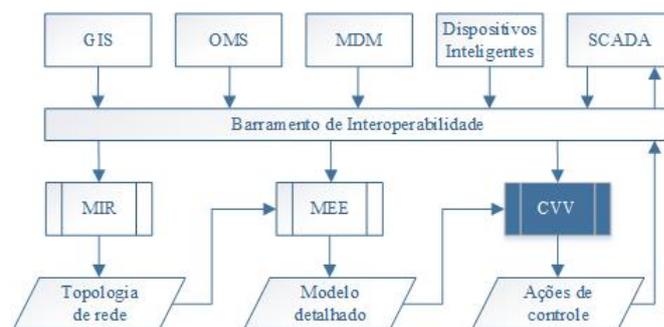


Fig. 1 Interação entre os sistemas legados e os módulos utilizados no controle Volt-Var.

Com o auxílio desse modelo e de cálculos de fluxo de potência, o algoritmo de otimização do CVV define uma lista de ações de controle ótima. Essa lista é enviada para o SCADA, que fica responsável por enviar os comandos para os equipamentos em campo. As trocas de informação entre os sistemas legados da concessionária e os módulos utilizados no CVV são realizadas através de um barramento de interoperabilidade, também desenvolvido ao longo do projeto, que utiliza o padrão CIM (Common Information Model) definido na norma IEC61968.

Os processos realizados por cada módulo são executados em paralelo e de maneira assíncrona, cada um com uma periodicidade. A importação de redes, cujo os dados de referência não são atualizados frequentemente, pode ter sua periodicidade de execução configurada entre diária, semanal ou mensal. O processo de estimação de estados e a otimização do CVV, cujo os dados de referência são alterados de acordo com as mudanças no carregamento da rede, podem ter sua periodicidade de execução configurada entre minutos e dezenas de minutos.

O processo de controle Volt-Var é composto de três etapas sequenciais: (i) gestão de alarmes (ii) otimização do CVV e (iii) envio das ações de controle para o sistema SCADA. O gatilho para o início do processo é um temporizador configurável, de acordo com a periodicidade desejada. O fluxograma da Fig. 2 mostra as etapas do processo.

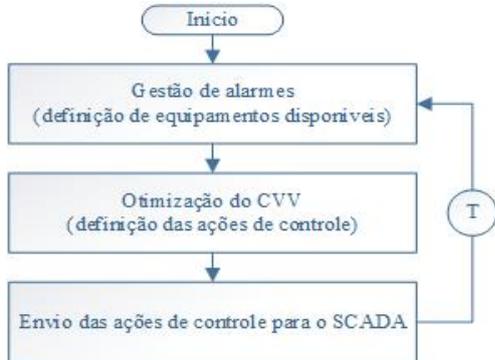


Fig. 2 Etapas do processo de controle Volt-Var.

Na etapa de gestão de alarmes é feita a aquisição, através do barramento de interoperabilidade, dos alarmes dos equipamentos em campo, disponíveis no sistema SCADA. São considerados aptos para controle somente os equipamentos online, habilitados, operando em lógica remota e manual. Sendo assim, equipamentos que não atendam a esses critérios são retirados da lista de equipamentos disponíveis, utilizada na etapa de otimização. Além de reduzir o espaço de busca do problema de otimização, essa seleção de equipamentos faz com que seja possível executar integralmente o plano de manobras resultante, aumentando a eficiência e a precisão do processo.

Na sequência é realizada a otimização do CVV. O problema de otimização é solucionado com o algoritmo de otimização por colônia de formigas, cujo funcionamento é detalhado na seção 2.2.

Como resultado da otimização, é obtida a lista otimizada de ações de controle, que é enviada para o sistema SCADA através do barramento de interoperabilidade. Além disso, são obtidos resultados referentes às condições de operação da rede, antes e depois da aplicação das ações definidas no processo, em relação ao estado dos equipamentos, às perdas técnicas na rede e à tensão nas barras com carga.

## 2.2. OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA DE FORMIGAS

A otimização por colônia de formigas é um algoritmo, proposto por Marco Dorigo em 1991, que tenta reproduzir o comportamento das formigas na busca por alimento.

Através da observação do comportamento desses insetos na natureza e de experiências realizadas em laboratório, foi constatado que após certo tempo de busca a maioria das formigas encontra o menor caminho entre a colônia e a fonte de alimento. O fato foi explicado pela deposição de feromônio pelas formigas ao caminhar e pela proporcionalidade entre a chance de uma formiga escolher certa rota e a quantidade de feromônio existente nessa rota.

No início da busca, quando feromônio nenhum foi depositado, as chances de uma formiga escolher entre uma ou outra rota são iguais. Ao percorrer certo caminho até a fonte de alimento e voltar para o formigueiro as formigas depositam feromônio pelas rotas que passam. Essa substância química sofre uma evaporação natural com o passar do tempo, fazendo com que rotas mais longas, que demoram mais para ser percorridas, se tornem menos atrativas. Em rotas mais curtas, a concentração de feromônio tende a ser maior, por conta da deposição mais frequente da substância, fazendo com que estas rotas sejam mais atrativas (Goliatt, 2013).

O funcionamento do algoritmo consiste em submeter uma população de formigas, ou seja, um conjunto de possíveis soluções do problema, à uma sequência de deslocamentos entre a colônia e a fonte de alimento. A cada iteração, a quantidade de feromônio presente em cada rota (percorrida ou não) é atualizada, de modo a atualizar a probabilidade de cada rota ser escolhida por uma formiga.

O processo, mostrado no fluxograma da Fig. 3, tem como critério de parada um determinado número de iterações  $N_{max}$  a ser executado, e a solução do problema é representada pela formiga que percorreu o menor caminho, ou seja, a melhor avaliada.

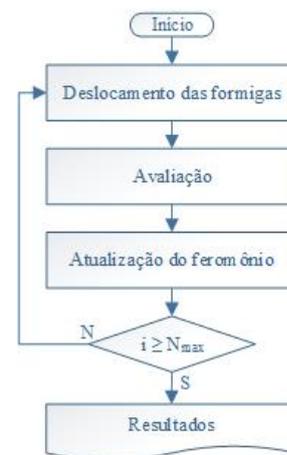


Fig. 3 Fluxograma da otimização por colônia de formigas.

A maior parte do custo computacional para resolução do problema de otimização do CVV através de meta-heurísticas é decorrente dos cálculos de fluxo de potência realizados na etapa de avaliação. Para cada possível solução é necessário um cálculo de fluxo de potência. Ao ser aplicada ao problema de otimização do CVV, a otimização por colônia de formigas converge para soluções de qualidade em poucas iterações, mesmo ao se utilizar poucas formigas (Medeiros, 2018).

### 2.2.1. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A formulação do problema é tal que se deve encontrar o tap dos OLTCs e dos RTs e o estado dos BCs que minimizam a função objetivo  $f$ , dada por:

$$\text{Min } f = 1 - (\omega p * \mu p + \omega v * \mu v + \omega c * \mu c) \quad (1)$$

Onde:  $\mu p$  é a nota referente às perdas técnicas na rede, calculada de acordo com uma função de pertinência de valor entre 0 e 1.  $\mu v$  é a média aritmética das notas referentes ao nível de tensão atribuídas às barras com carga da rede, calculadas de acordo com uma função de pertinência de valor entre 0 e 1.  $\mu c$  é a média aritmética das notas referentes à quantidade de chaveamentos atribuídas aos equipamentos do controle de tensão e reativos, calculadas de acordo com uma função de pertinência de valor entre 0 e 1.  $\omega p$ ,  $\omega v$  e  $\omega c$  cujo a soma é unitária, são constantes para ponderação dos respectivos objetivos do CVV.

As funções de pertinência utilizadas nos cálculos de  $\mu p$ ,  $\mu v$ , e  $\mu c$  são definidas em (Medeiros, 2018). Os valores de  $\omega p$ ,  $\omega v$  e  $\omega c$  são editáveis através da interface da ferramenta de controle otimizado de tensão e reativos. Sendo assim, é possível definir a ponderação dos objetivos de CVV para cada rede em que a funcionalidade for aplicada, de acordo com as prioridades de cada caso.

### 2.2.2. CODIFICAÇÃO

Na otimização por colônia de formigas, as possíveis soluções para o problema são caminhos entre a colônia e a fonte de alimento percorridos pelas formigas. A quantidade de feromônio presente em cada rota corresponde à probabilidade dessa rota ser escolhida por uma formiga. Essas probabilidades são atualizadas ao final de cada iteração do processo de otimização. No caso da otimização do CVV, os trechos do caminho são associados à posição de tap dos OLTCS e RTs e ao estado dos BCs presentes no sistema de distribuição. A Fig. 4 apresenta um exemplo de codificação binária de uma possível solução para o problema de otimização do CVV.

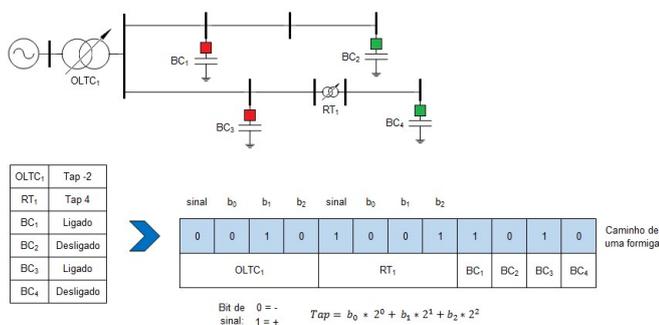


Fig. 4 Exemplo de codificação de um caminho feito por uma formiga.

### 2.2.3. DESLOCAMENTO DAS FORMIGAS

Nessa etapa do algoritmo as formigas da colônia se deslocam da colônia para a fonte de alimento. Esse deslocamento é feito trecho a trecho, e para cada trecho é realizado um sorteio para definir se a formiga irá percorrer a rota superior ou inferior, determinando o valor que será utilizado (1 ou 0, respectivamente). A probabilidade de uma formiga escolher certa rota depende da quantidade de feromônio presente nela. O processo, mostrado na Fig. 5, é repetido até que todas as formigas da colônia cheguem na fonte de alimento.

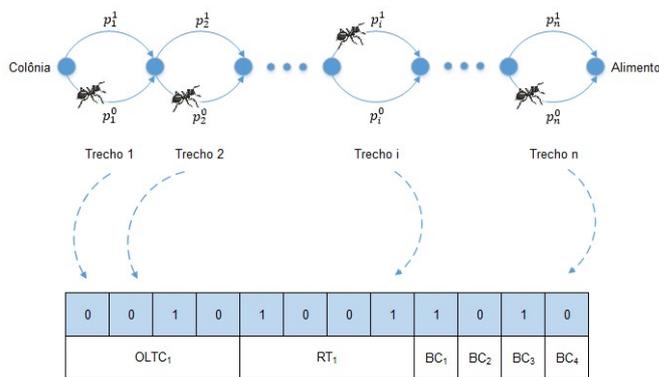


Fig. 5 Deslocamento de uma formiga no diagrama de rotas.

### 2.2.4. AVALIAÇÃO

Nesse passo do algoritmo, os caminhos percorridos por cada formiga da colônia são avaliados. A qualidade dos caminhos é medida por uma função de avaliação, que nesse caso é diretamente relacionada com a função objetivo do problema.

Para cada formiga, o modelo da rede é alterado de acordo com os dados de seu caminho, ou seja, a posição de tap dos OLTCS e RTs e o estado dos BCs são definidos de acordo com os dados armazenados no caminho da formiga. Em seguida, um cálculo de fluxo de potência na rede é executado. Com o resultado do fluxo de potência, são atribuídas notas referentes a cada objetivo almejado para a otimização, como perdas técnicas na rede, nível de tensão nas barras e número de chaveamentos executados pelos equipamentos.

A partir dessas notas, a função de avaliação é calculada. O número obtido representa a qualidade da solução codificada na formiga, e é tão maior quanto melhor for a qualidade da solução.

### 2.2.5. ATUALIZAÇÃO DO FEROMÔNIO

Nessa etapa do algoritmo, a quantidade de feromônio existente em todas as rotas (percorridas ou não) é atualizada. Essa quantidade, que é numericamente igual à probabilidade de a rota ser escolhida por uma formiga, é inicializada com o valor de 0,5 e a cada iteração sofre alterações por conta da evaporação do feromônio e da deposição da substância pelas formigas.

O cálculo da evaporação e deposição de feromônio nas rotas garante que, para todos os trechos, a soma da probabilidade de uma formiga escolher a rota superior e a rota inferior seja unitária (Kong, 2006).

## 2.3. PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO E ANÁLISE

A ferramenta de controle otimizado de tensão e reativos foi desenvolvida de modo a se tornar um módulo adicional da plataforma SINAPgrid, disponibilizada pela empresa Sinapsis. Essa plataforma possui anos de engenharia investidos em seu desenvolvimento e todas as ferramentas disponíveis, tais como cálculo de fluxo de potência, podem ser utilizadas pela ferramenta.

## 2.4. ESTUDO DE CASO

De modo a verificar a integração da ferramenta de controle otimizado de tensão e reativos ao barramento de interoperabilidade e seu desempenho, foi realizado um estudo de caso. Como área piloto desse estudo, foram escolhidas as redes das subestações de CIT (CIA III) e PUD. A Fig. 6 mostra a topologia das redes, sendo CIT representada em tons de azul e PUD em tons de vermelho.

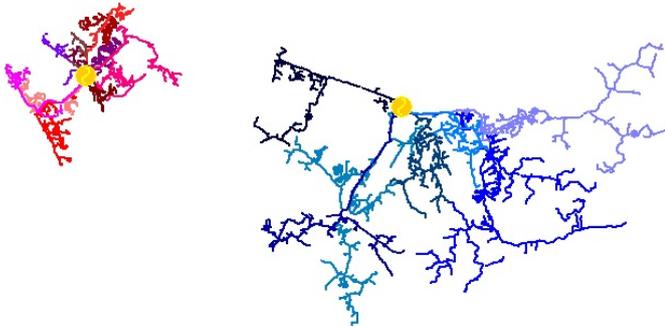


Fig. 6 Topologia das redes de CIT e PUD.

A ferramenta de controle Volt-Var foi instalada em um servidor da Neoenergia, ambiente destinado à sua utilização. O sistema SCADA utilizado foi o Action.NET, instalado no Laboratório de Redes Elétricas Inteligentes da USP. Os IEDs dos equipamentos utilizados no controle de tensão e reativos também foram os controladores disponíveis no laboratório. As redes das subestações escolhidas foram emuladas no ambiente do laboratório. De maneira simplificada, a Fig. 7 mostra a arquitetura em que os módulos se organizam. As setas com traço pontilhado representam o fluxo de dados entre a funcionalidade de CVV e o sistema SCADA. As setas com traço sólido representam as interações entre os módulos.



Fig. 7 Arquitetura da interação entre os módulos.

A interface de exibição do diagrama unifilar da rede de CIT e dos respectivos equipamentos controlados pela funcionalidade de controle Volt-Var no ambiente do SCADA é mostrada na Fig. 8.

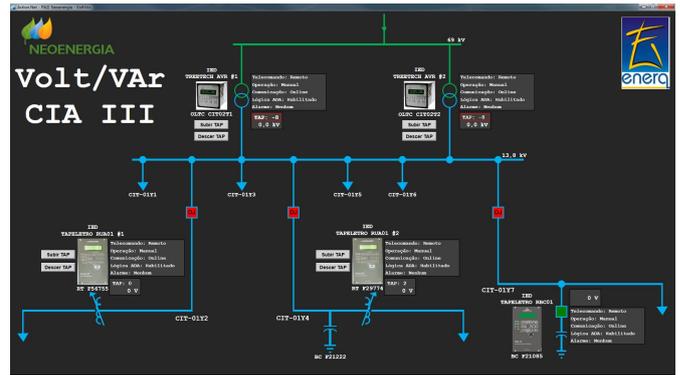


Fig. 8 Interface de exibição do diagrama unifilar da rede de CIT no SCADA.

### 2.4.1. RESULTADOS DE INTEGRAÇÃO

A cada execução da funcionalidade de controle Volt-Var, a ferramenta realiza uma requisição, a partir do servidor da Neoenergia, dos alarmes dos equipamentos de controle, disponíveis no SCADA. A Fig. 9 mostra o log do início do processo de requisição, na interface do módulo que executa os conectores referentes a cada tipo de alarme.

Através da captura da comunicação entre o barramento de interoperabilidade e o sistema SCADA, foi evidenciado que todas as requisições feitas chegaram ao SCADA e foram respondidas, através do uso dos conectores e do barramento.

Verificou-se que do momento em que é realizada a leitura do arquivo de requisição até a escrita do arquivo de resposta, passando pela execução de todos os conectores, leva-se em torno de 20 segundos.

Tipo	Mensagem	Data	Hora	Tempo (s)
Success	Conexão com barramento para leitura!	14/11/2019	14:34:39	
Start	Conexão com barramento para leitura!	14/11/2019	14:34:39	
Start	Coleta de dados UspOnLoadTapChangerEnabledAlarm	14/11/2019	14:34:39	
Success	Coleta de dados UspOnLoadTapChangerCommunication	14/11/2019	14:34:39	
Success	Encerrar conexão com barramento!	14/11/2019	14:34:39	
Start	Encerrar conexão com barramento!	14/11/2019	14:34:39	
Success	Conexão com barramento para leitura!	14/11/2019	14:34:38	
Start	Conexão com barramento para leitura!	14/11/2019	14:34:38	
Start	Coleta de dados UspOnLoadTapChangerCommunication	14/11/2019	14:34:38	
Success	Coleta de dados UspOnLoadTapChangerAutomatism	14/11/2019	14:34:38	
Success	Encerrar conexão com barramento!	14/11/2019	14:34:38	
Start	Encerrar conexão com barramento!	14/11/2019	14:34:38	
Success	Conexão com barramento para leitura!	14/11/2019	14:34:37	
Start	Conexão com barramento para leitura!	14/11/2019	14:34:37	
Start	Coleta de dados UspOnLoadTapChangerAutomatism	14/11/2019	14:34:37	
Success	Coleta de dados UspOnLoadTapChangerCommandEnabled	14/11/2019	14:34:37	1
Success	Encerrar conexão com barramento!	14/11/2019	14:34:37	
Start	Encerrar conexão com barramento!	14/11/2019	14:34:37	
Success	Conexão com barramento para leitura!	14/11/2019	14:34:36	
Start	Conexão com barramento para leitura!	14/11/2019	14:34:36	
Start	Coleta de dados UspOnLoadTapChangerCommandEnabled	14/11/2019	14:34:36	
Start	Volt Var - Coleta de dados: READ_CVV.xml	14/11/2019	14:34:36	
Information	Volt Var - DB Ativada	14/11/2019	14:34:36	
Information	Volt Var Ativada	14/11/2019	14:34:36	
Information	Arquivo novo de Log criado	14/11/2019	14:34:26	

Fig. 9 Início do processo de execução dos conectores.

### 2.4.2. RESULTADOS DE DESEMPENHO

Os resultados em relação às perdas técnicas na rede, ao nível de tensão nas barras com carga e ao número de chaveamentos dos equipamentos em um dia de operação foram obtidos para três cenários:

- “CVV desligado”, considerando os taps dos OLTCs e RTs na posição central e os BCs desligados.

- “CVV horário”, considerando os taps dos OLTCs e RTs definidos automaticamente de modo a deixar a tensão na barra do enrolamento secundário em 1,0 p.u. e os BCs ligados das 16h00 às 21h00.

- “CVV ADA”, aplicando a funcionalidade de controle otimizado de tensão e reativos para definição dos taps dos OLTCs e RTs e o estado dos BCs.

A posição de tap dos OLTCs e dos RTs e o estado dos BCs após a aplicação da funcionalidade de controle otimizado de tensão e reativos e o número total de chaveamentos executados pelos equipamentos na rede de CIT são mostrados na Tabela 1.

A Tabela 2 mostra o número de barras com carga com tensão fora dos limites desejáveis parametrizados, entre 0,97 p.u. e 1,03 p.u., para os três cenários de controle Volt-Var (desligado, horário e ADA) na rede de CIT.

As ações de controle definidas pela funcionalidade de controle Volt-Var, de modo a alterar o tap e o estado dos equipamentos ao longo do dia de operação, foram responsáveis por reduzir consideravelmente o número de barras com tensão fora dos limites desejáveis. Na rede de CIT, em 22 dos 24 patamares a redução do número de barras com tensão fora dos limites desejáveis foi de pelo menos 90%, tanto em relação ao CVV desligado quanto em relação ao CVV horário. Na rede de PUD, 100% das barras passou a ter valor de tensão dentro do limite desejável após a aplicação da funcionalidade de CVV em todos os patamares.

**Tabela 1. Estado dos equipamentos em cada patamar e número total de chaveamentos (CIT)**

Patamar	OLTC 1	OLTC 2	RT 1	RT 2	BC 1	BC 2
	CIT02T2	CIT02T1	F29774	F56755	F21222	F21085
0	-2	-2	0	-3	1	0
1	-2	-2	0	-2	1	0
2	-2	-2	0	0	1	0
3	-2	-2	0	2	1	0
4	-1	-1	0	0	1	1
5	-1	-1	0	0	1	1
6	-1	-1	0	0	1	1
7	-2	-2	0	2	1	0
8	-2	-2	0	2	1	0
9	-2	-2	3	0	1	1
10	-3	-3	5	-1	1	0
11	-3	-3	3	0	1	0
12	-3	-3	3	0	1	1
13	-3	-3	3	0	1	1
14	-3	-3	1	2	1	1
15	-3	-3	1	2	1	1
16	-3	-3	1	2	1	1
17	-3	-3	1	2	1	1
18	-3	-3	1	2	1	1
19	-3	-3	1	2	1	1
20	-3	-3	1	2	1	1
21	-3	-3	1	2	1	1
22	-2	-2	0	0	1	1
23	-2	-2	0	0	1	1
Chaveamentos	4	4	10	17	0	5

**Tabela 2. Número de barras (fases) com carga com tensão fora dos limites desejáveis (CIT)**

Patamar	Número de barras fora dos limites desejáveis			Redução [%] em relação ao CVV	
	CVV			Desligado	Horário
	Desligado	Horário	ADA		
0	771	107	0	100,00	100,00
1	487	72	0	100,00	100,00
2	367	63	0	100,00	100,00
3	320	63	0	100,00	100,00
4	237	63	0	100,00	100,00
5	320	63	0	100,00	100,00
6	456	93	0	100,00	100,00
7	593	216	0	100,00	100,00
8	3392	278	142	95,81	48,92
9	3932	498	44	98,88	91,16
10	4156	451	44	98,94	90,24
11	4185	440	49	98,83	88,86
12	4133	503	29	99,30	94,23
13	4111	608	0	100,00	100,00
14	4084	585	15	99,63	97,44
15	4196	481	37	99,12	92,31
16	4113	611	9	99,78	98,53
17	4090	555	0	100,00	100,00
18	4196	401	0	100,00	100,00
19	4197	531	0	100,00	100,00
20	4197	394	0	100,00	100,00
21	4149	359	0	100,00	100,00
22	3786	214	0	100,00	100,00
23	2728	131	0	100,00	100,00

A Fig. 10 mostra o "perfil de tensão" nas barras com carga da rede de CIT no patamar de maior demanda, das 11h às 12h. Por “perfil de tensão” entende-se uma ordenação dos valores de tensão nas barras, do maior para o menor, não levando em consideração a topologia da rede.

Após a aplicação da funcionalidade de controle Volt-Var otimizado, o nível de tensão das barras com carga da rede, em tons de verde no gráfico, foi elevado, fazendo com que todas as barras passassem a ter valores de tensão dentro da faixa adequada de atendimento (entre 0,93 p.u. e 1,05 p.u.).

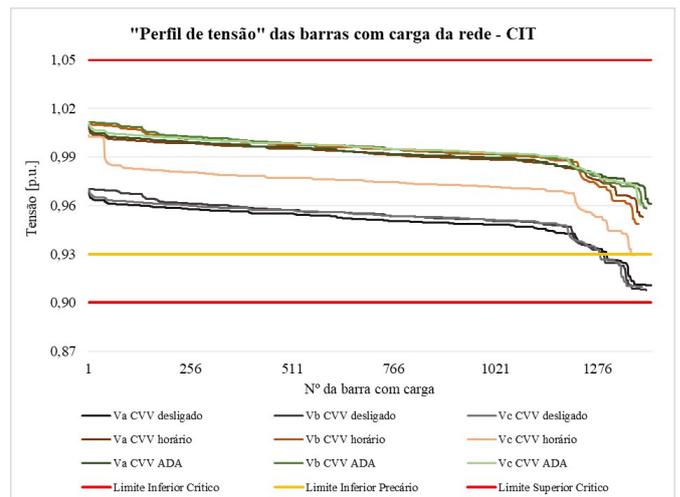


Fig. 10 "Perfil de tensão" nas barras com carga da rede no patamar de maior demanda (CIT)

As perdas em cada patamar horário para os três cenários de controle Volt-Var na rede de CIT são mostradas na Fig. 11.

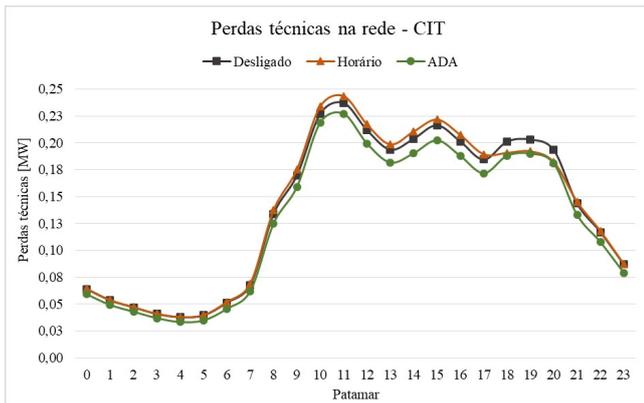


Fig. 11 Perdas técnicas por patamar (CIT)

Após a aplicação da funcionalidade de controle otimizado de tensão e reativos, as perdas foram menores em relação aos casos de CVV desligado e de CVV horário em todos os patamares horários. Totalizando o dia de operação na rede de CIT, as perdas técnicas do CVV ADA foram de 3,11 MWh, 6,61% menores em relação ao caso CVV desligado (3,33 MWh) e 7,42% menores em relação ao caso CVV horário (3,36 MWh). Na rede de PUD, as perdas técnicas do CVV ADA foram de 2,29 MWh, 9,28% menores em relação ao caso CVV desligado (2,53 MWh) e 7,75% menores em relação ao caso CVV horário (2,49 MWh).

### 3. CONCLUSÕES

Nesse artigo foi apresentada uma ferramenta para realização do controle otimizado de tensão e reativos, no contexto da automação avançada da distribuição.

A ferramenta, desenvolvida no âmbito de projeto de P&D, utiliza uma abordagem centralizada do controle Volt-Var, no nível do sistema DMS, baseada em um modelo detalhado da rede de distribuição. Esse modelo é obtido com informações de outros sistemas legados da concessionária, tais como GIS, MDM e SCADA, através dos módulos de importação de redes e de estimação de estados, desenvolvidos separadamente. Para resolução do problema de otimização do controle de tensão e reativos foi utilizado o algoritmo de otimização por colônia de formigas.

Em vista do estudo de caso apresentado, observa-se que a ferramenta, instalada em um servidor da Neoenergia, foi integrada com sucesso ao barramento de interoperabilidade. A aquisição de alarmes dos equipamentos em campo, disponíveis no SCADA, através do barramento foi realizada em um tempo compatível com a ordem de grandeza esperada para essa etapa do processo de controle Volt-Var.

Ao ser aplicada às subestações de CIT e PUD, reproduzidas em um ambiente de emulação de redes elétricas, observou-se que a funcionalidade se comportou conforme o esperado em relação aos objetivos primários do controle Volt-Var. O número de barras com carga com tensão fora dos limites desejáveis foi reduzido consideravelmente e as perdas técnicas também foram reduzidas em relação aos casos utilizados para comparação.

Ressalta-se que a abordagem utilizada permite que a funcionalidade tenha características desejáveis no contexto das redes elétricas inteligentes, tais como a possibilidade de execução do controle otimizado em casos de reconfiguração de rede e o controle coordenado dos equipamentos, ocasionando uma menor necessidade de chaveamentos ao longo do dia, e consequentemente uma preservação da vida útil desses equipamentos.

Devido à integração ao barramento de interoperabilidade, espera-se que a ferramenta se integre facilmente, com o devido desenvolvimento de conectores específicos, a outros sistemas SCADA que também estejam conectados ao barramento.

### 4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Goliatt, P.V., Angelo, J.S. and Barbosa, H.J. (2013). Colônia de formigas. *Manual de Computação Evolutiva e Metaheurística*, pp 87-105. UFMG, Belo Horizonte.
- Dabic, V., Siew, C., Peralta, J. and Acebedo, D. (2010). BC Hydro's experience on Voltage VAR optimization in distribution system. *IEEE PES T&D 2010*, pp 1-7. New Orleans.
- Kong, M. and Tian, P. (2006). Introducing a binary ant colony optimization. *Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence*, pp 444-451. Springer, Bruxelas.
- Manbachi, M. et al. (2016). Real-Time communication platform for smart grid adaptive Volt-VAR optimization of distribution networks. *IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering*. Oshawa.
- Medeiros, T.S. and Kagan, N. (2016). Bio-inspired metaheuristics applied to Volt/VAR control optimization problem in smart grid context. *IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power*, pp. 295-300. Belo Horizonte.
- Medeiros, T.S. (2018). Meta-heurísticas bio-inspiradas para otimização multiobjetivo do controle Volt/VAR no contexto das redes elétricas inteligentes. USP, São Paulo.
- Rahimi, S., Marinelli, M. and Silvestro, F. (2012). Evaluation of requirements for Volt/VAR control and optimization function in distribution management systems. *IEEE International Energy Conference and Exhibition*, pp. 331-336. Florença.
- Singh, S. and Singh, S.P. (2016). A smart Volt-Var optimization engine for energy distribution system. *IEEE International Conference on Emerging Trends in Electrical Electronics & Sustainable Energy Systems*. Sultanpur.
- Uluski, R.W. (2010). VVC in the smart grid era. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-7. Providence.