

Uma abordagem para a Automação Avançada da Distribuição no contexto das Redes Elétricas Inteligentes

Raphael T. Sakai*, Carlos F. M. Almeida*, Luiz H. L. Rosa*, Nelson Kagan*, Danilo S. Pereira*, Thiago S. Medeiros*, Henrique Kagan*, Márcio R. Cruz*, José A. A. Júnior*, Gustavo Travassos**, José A. S. Brito**

*Universidade de São Paulo (e-mail: raphaeltoshio@usp.br)

**Grupo Neoenergia (e-mail: gtravassos@neoenergia.com)

Abstract: Recent technological advances, with advanced measurement and automation infrastructures, and sophisticated computational intelligence mechanisms, create opportunities, among others, to improve the operational efficiency of electrical systems and power quality indicators within the context of smart grids (SG). Distribution companies have corporate supervisory, control, monitoring, georeferencing and management systems and have invested in automation and modernization projects of their electric grids for this purpose. Thus, this paper presents an approach for the development of a DMS – Distribution Management System, for Advanced Distribution Automation (ADA) applications, which includes state estimator, Volt/VAr control, fault location, isolation, and self-restoration tools, so that an interoperability bus (BCIM) integrates the corporate systems with the operational management. The developed applications were tested for real networks, in a computational environment, and integrated with the environment of the NAPREI / USP Smart Grids laboratory. The results demonstrate the processes of integrating ADA applications into a commercial service bus, which communicates the company's legacy systems, of testing their applications, and its challenges.

Resumo: Os recentes avanços tecnológicos, com avançadas infraestruturas de medição e de automação, e sofisticados mecanismos de inteligência computacional, criam oportunidades, dentre outras, de melhorar a eficiência operacional de sistemas elétricos e os indicadores da qualidade da energia, dentro do contexto das redes elétricas inteligentes (REIs). Empresas distribuidoras dispõem de sistemas corporativos de supervisão, controle, monitoramento, georreferenciamento e gestão e têm investido em projetos de automatização e modernização de suas redes elétricas com esse propósito. Dessa forma, este artigo apresenta uma abordagem para o desenvolvimento de um DMS – *Distribution Management System*, para aplicações de Automação Avançada da Distribuição (ADA), que inclui ferramentas de estimador de estados, controle Volt/VAr, localização de faltas, isolamento e autorrestauração, de modo que um barramento de interoperabilidade (BCIM) integra todos os sistemas corporativos com a gestão operacional. As aplicações desenvolvidas foram testadas para redes reais, em ambiente computacional, integradas ao ambiente do laboratório de Redes Elétricas Inteligentes NAPREI/USP. Os resultados demonstram os processos da integração das aplicações da ADA a um barramento de serviços comercial, o qual se comunica sistemas legados da empresa, testes de suas aplicações e seus desafios.

Keywords: Advanced Distribution Automation; Estimated State; Volt/VAr Control; FLISR (Fault Location, Isolation, and Self-Healing); Power Quality.

Palavras-chaves: Automação Avançada da Distribuição; Estimação de Estados; Controle Volt/VAr; FLISR (Localização de Faltas, Isolamento e Autorrestauração); Qualidade de Energia.

1. INTRODUÇÃO

Sistemas DMS – *Distribution Management System* consistem em várias ferramentas que auxiliam a distribuidora de energia no gerenciamento das redes de distribuição e incluem várias funções como o gerenciamento de processos para garantia de confiabilidade do sistema, gerenciamento de tensão e perdas na rede, gerenciamento pelo lado da demanda, de ocorrências e equipes de campo, entre outras (ROSA, 2018).

A automação das redes elétricas de distribuição sugere várias funcionalidades que são definidas por Automação Avançada

da Distribuição (do inglês, ADA – *Advanced Distribution Automation*).

Em razão de maiores exigências pelas agências reguladoras por operações mais eficazes dos sistemas elétricos, com base nos indicadores de fornecimento e qualidade de energia, empresas distribuidoras de energia têm investido em projetos de automatização das redes elétricas.

Um dos grandes desafios para a implementação das ferramentas propostas é a integração dos diversos sistemas computacionais presentes nos ambientes corporativos e operacionais das concessionárias de energia.

Isto posto, este artigo visa ilustrar a interação entre as funcionalidades de DMS desenvolvido e um barramento de interoperabilidades (BCIM) o qual se comunica a sistemas legados da empresa. A plataforma DMS desenvolvida contém funcionalidades ADA aplicadas às redes elétricas reais: localização de faltas, isolamento do trecho e autorrestauração da rede (FLISR – *Fault Location, Isolation and Service Restoration*), estimação de estados e controle Volt/VAR.

Existem diversos estudos que auxiliaram no estabelecimento de metodologias utilizadas no desenvolvimento das ferramentas para a automação dos sistemas de distribuição.

Os trabalhos desenvolvidos por Parikh *et al.* (2013) e Koch-Ciobotaru *et al.* (2014) propõem técnicas para implementação de funcionalidades FLISR (*Fault Location, Isolation and Service Restoration*) baseadas na norma IEC 61850, para redução da duração de interrupções em situações de contingência. Assim, o trabalho desenvolvido por Pereira (2019), estabelece uma metodologia para localização de faltas utilizando algoritmos evolutivos.

Medeiros (2018) desenvolveu um estudo comparativo de técnicas de otimização para controle de tensão e reativos (Volt/VAR) em redes elétricas inteligentes. A metodologia utilizada no desenvolvimento do módulo de controle Volt/VAR é baseada na técnica de otimização por Colônia de Formigas, mencionada em Mustafar *et al.* (2007).

O presente trabalho foi desenvolvido, implementado e validado pelo Grupo NEOENERGIA no contexto do Programa P&D ANEEL, com suporte fornecido pelo Laboratório de *Smart-Grids* do Núcleo de Apoio a Pesquisas de Redes Elétricas Inteligentes (NAPREI) na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Dessa forma, novas funcionalidades de ADA foram disponibilizadas com integração de sistemas corporativos legados – SCADA, OMS, GIS e MDM. O conceito de Automação Avançada da Distribuição é apresentado na seção 2 e, a seção 3, os sistemas corporativos da empresa. Em seguida, a seção 4 apresenta arquiteturas para a conexão dos módulos de DMS propostos aos sistemas corporativos. A seção 5 traz a demonstração das funcionalidades implementadas.

2. AUTOMAÇÃO AVANÇADA DA DISTRIBUIÇÃO

Define-se a Automação Avançada da Distribuição (ADA – *Advanced Distribution Automation*) como um conjunto de tecnologias que possibilita o monitoramento, controle e operação dos componentes de distribuição pela concessionária de energia em tempo real a partir de locais remotos (GAMBHIR, 2012).

As REIs geram funcionalidades que garantem a qualidade e confiabilidade no fornecimento de energia. Essas funcionalidades estão divididas em: Subestação de Distribuição (SED), Sistema de Distribuição de Média Tensão (SDMT) e Sistema de Distribuição de Baixa Tensão (SDBT) e são definidas por (KAGAN *et al.* 2013):

- SED: monitoramento, comando e manutenção de equipamentos de potência (transformadores, disjuntores, chaves, religadores, bancos de capacitores,

as linhas etc.) através dos dispositivos eletrônicos inteligentes (conhecidos por IEDs – *Intelligent Electronic Device*) destes equipamentos;

- SDMT: utilização das informações advindas dos IEDs para a localização de faltas, isolamento do trecho, restauração automática do fornecimento de energia elétrica, estimação de estados da rede elétrica e controle Volt/VAR;
- SDBT: interatividade direta da concessionária de energia com os clientes, por meio dos medidores inteligentes e informações que incentivem hábitos de consumo.

Atualmente, as funcionalidades de SED já são aplicadas pelas empresas distribuidoras. Já as funcionalidades de automação dos SDMT e SDBT se encontram em desenvolvimento no setor brasileiro, dados os avanços tecnológicos dos dispositivos microprocessados e nas áreas de telecomunicações e tecnologia da informação (TI).

3. SISTEMAS CORPORATIVOS

O desenvolvimento das funcionalidades de ADA para os SDMT contempla os seguintes sistemas corporativos em operação na empresa: **SCADA** (*Supervisory Control and Data Acquisition*): implementa as funções de aquisição, tratamento e distribuição de dados do sistema elétrico (tensões, correntes, estados de equipamentos de proteção etc.); **OMS** (*Outage Management System*): contém a configuração atualizada da rede (estado de chaves), a partir do controle georreferenciado das ocorrências ou manobras que acontecem na rede em “tempo real”; **GIS** (*Geographical Information System*): contém dados de topologia da rede, ou seja, informações de cadastro da rede, chaves seccionadoras, religadores, fusíveis, ligações, sensores etc; **MDM** (*Metering Data Management*): concentra e gerencia dados de medições das unidades consumidoras de energia (consumidores livres e cativos) geradores e pontos de fronteira da concessionária, além de outros equipamentos inteligentes produzidos ao longo do programa P&D do Grupo NEOENERGIA, como qualímetros, transformadores e sensores.

Todos os sistemas foram integrados nesse projeto por uma infraestrutura computacional baseada no barramento de interoperabilidade (BCIM), que segue o padrão IEC 61968, conhecido também como modelo CIM – *Common Information Model*. Dessa forma, torna-se viável o consumo dos dados fornecidos por estes sistemas pelos módulos desenvolvidos das funcionalidades ADA, além de outros benefícios, tais como: a interoperabilidade entre sistemas de fabricantes diversos, a redução de custos com a integração de sistemas de TI e maior facilidade para adequações em casos de mudanças futuras de sistemas.

4. ARQUITETURAS DAS FUNCIONALIDADES ADA PARA SDMT

O conceito da Automação Avançada da Distribuição para sistemas de distribuição em média tensão envolve as funcionalidades de localização de faltas, isolamento do trecho

e autorrestauração da rede (FLISR – *Fault Location, Isolation and Service Restoration*), estimação de estados e controle Volt/VAR.

Com base na descrição dos sistemas corporativos disponíveis para o desenvolvimento das ferramentas propostas de funcionalidades ADA em sistemas de distribuição de média tensão, a Figura 1 ilustra a interação global entre módulos, o barramento BCIM e os sistemas (GIS, MDM, SCADA e OMS).

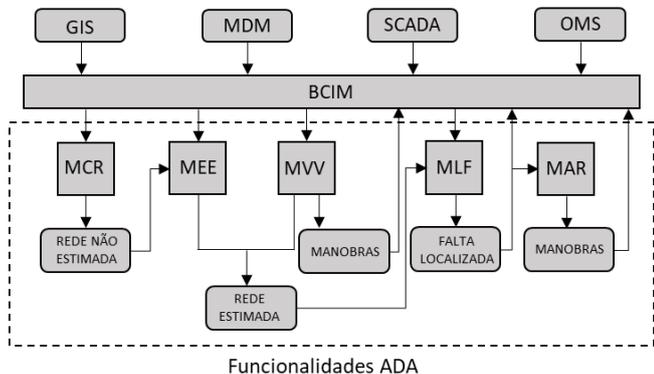


Fig 1. Interação global dos sistemas

As funcionalidades são desenvolvidas sobre uma plataforma comercial própria ao desenvolvimento de DMS, adequada para a modelagem e análise de redes inteligentes, e que permite, também, a representação integrada e completa de qualquer topologia de rede.

4.1. Módulo Construção de Redes

O módulo Construção de Redes (MCR) é o único que não foi desenvolvido para a plataforma DMS. É essencial para o início/reinício dos processos. Tem a finalidade de buscar dados sobre a topologia de rede no sistema GIS e, então, realizar a montagem inicial da rede (não estimada). Os dados de topologia de rede referem-se aos equipamentos cadastrados no sistema GIS: trechos, barras, chaves, transformadores, cargas, reguladores etc. A Figura 2 ilustra a interação do MCR ao BCIM:

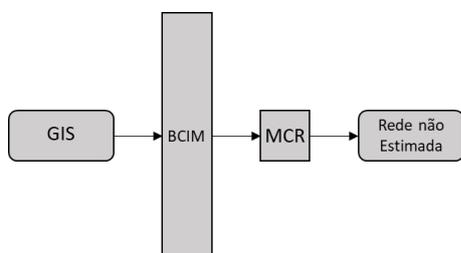


Fig 2. Interação entre o módulo de construção de redes e o barramento CIM

4.2. Módulo Estimador de Estados

O módulo Estimador de Estados (MEE) tem a finalidade de apresentar o estado aproximado da rede de distribuição em operação a partir de dados de medição (tensões, correntes, potências etc.), estados de equipamentos (aberto/fechado,

posição de tapes etc.) e carregamento de ativos dos diferentes pontos da rede, obtidos em tempo real através do BCIM. De tempos em tempos, o estado da rede é atualizado pelo MEE, através de novas consultas aos sistemas integrados no BCIM.

A Figura 3 ilustra a interação do MEE ao BCIM:

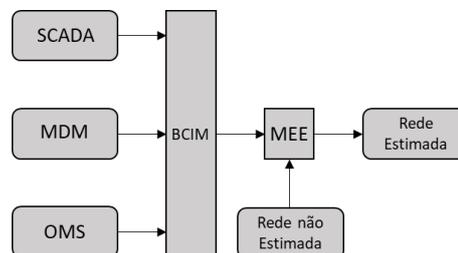


Fig 3. Interação entre o módulo de estimação de estados e o barramento CIM

São solicitados ao BCIM dados relacionados ao sistema SCADA (estados do disjuntor da subestação e de religadores ao longo da rede), MDM (medições de tensão e corrente dos diversos consumidores, sensores, geradores e pontos de fronteira) e OMS (estados das chaves não supervisionadas). A partir dessas informações e da rede não estimada, o MEE executa o algoritmo de forma a ajustá-la com as informações obtidas.

4.3. Módulo Controle Volt/VAr

O módulo de controle Volt/VAr (MVV) tem a finalidade de realizar o controle otimizado de tensão e reativos. A otimização do controle Volt/VAr propõe um conjunto de ações de controle, de modo a melhorar as condições de operação da rede tanto em relação aos níveis de tensão quanto às perdas técnicas. Esta otimização é realizada com base em um modelo detalhado do sistema de distribuição, obtido a partir do MEE.

A Figura 4 ilustra a interação do MVV ao sistema SCADA através do BCIM:

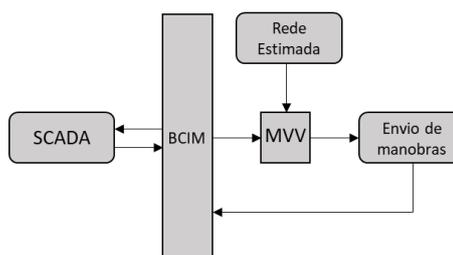


Fig 4. Interação entre o módulo de controle Volt/VAr e o barramento CIM

A partir da rede estimada, o MVV gera um conjunto de ações de controle (manobras) a ser enviado aos equipamentos em campo, a fim de aprimorar as condições operacionais da rede.

4.4. Módulo Localizador de Falhas

O módulo de localização de faltas (MLF) é uma das soluções para as funcionalidades FLISR, cujo objetivo principal é determinar a localização de faltas, isola-las, e restaurar o fornecimento de energia em tempo real e curto intervalo de

tempo. Os efeitos da redução dos tempos refletem nos indicadores de continuidade de serviços (DEC, FEC etc.).

Dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs), tais como relés de proteção de disjuntor, religadores, sensores de curto-circuito, transformadores inteligentes, qualímetros dentre outros, instalados ao longo da rede elétrica, permitem o monitoramento, controle e proteção dos sistemas de distribuição. Estes equipamentos são capazes de gerar alarmes, medições e outros dados. Determinados tipos de equipamentos são integrados ao SCADA e outros ao MDM. Por fim, estes sistemas estão integrados ao BCIM.

A Figura 5 ilustra a interação do MLF ao BCIM:

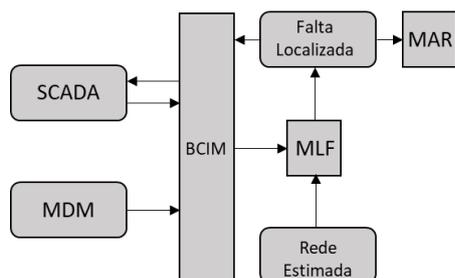


Fig 5. Interação entre o módulo de localização de faltas e o barramento CIM

O MLF utiliza os dados de topologia de rede estimados e os dados de alarmes de falta, obtidos através do BCIM, de forma a fornecer possíveis pontos da localização do defeito. Os resultados da localização são enviados ao BCIM e ao módulo de Autorrestauração (MAR), dando-se início ao processo de verificação da disponibilidade de planos de manobras.

4.5. Módulo Autorrestauração

O módulo de Autorrestauração (MAR) também é incluído às soluções para as funcionalidades FLISR. Tem por finalidade criar uma lista de manobras de equipamentos para restauração em tempo real da maior parte do sistema após uma contingência, porém, respeitando sempre as restrições de carregamento nas linhas e transformadores e os limites de tensão nos barramentos dos consumidores.

A Figura 6 ilustra a interação do MAR ao sistema SCADA através do BCIM.

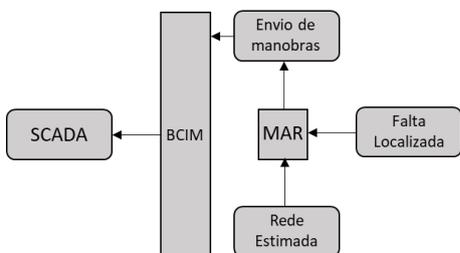


Fig 6. Interação entre o módulo de autorrestauração e o barramento CIM

A partir dos resultados da localização de faltas para a rede estimada, o MAR cria um plano de manobras em lista com

equipamentos possíveis de serem manobrados e o envia ao BCIM.

4.6. Sequência de execução das ações

São dois os cenários de operação: em condições normais (regime permanente) e de contingência (presença de defeito na rede elétrica). A visão geral dos processos de execução dos módulos ADA é mostrada na Figura 7.

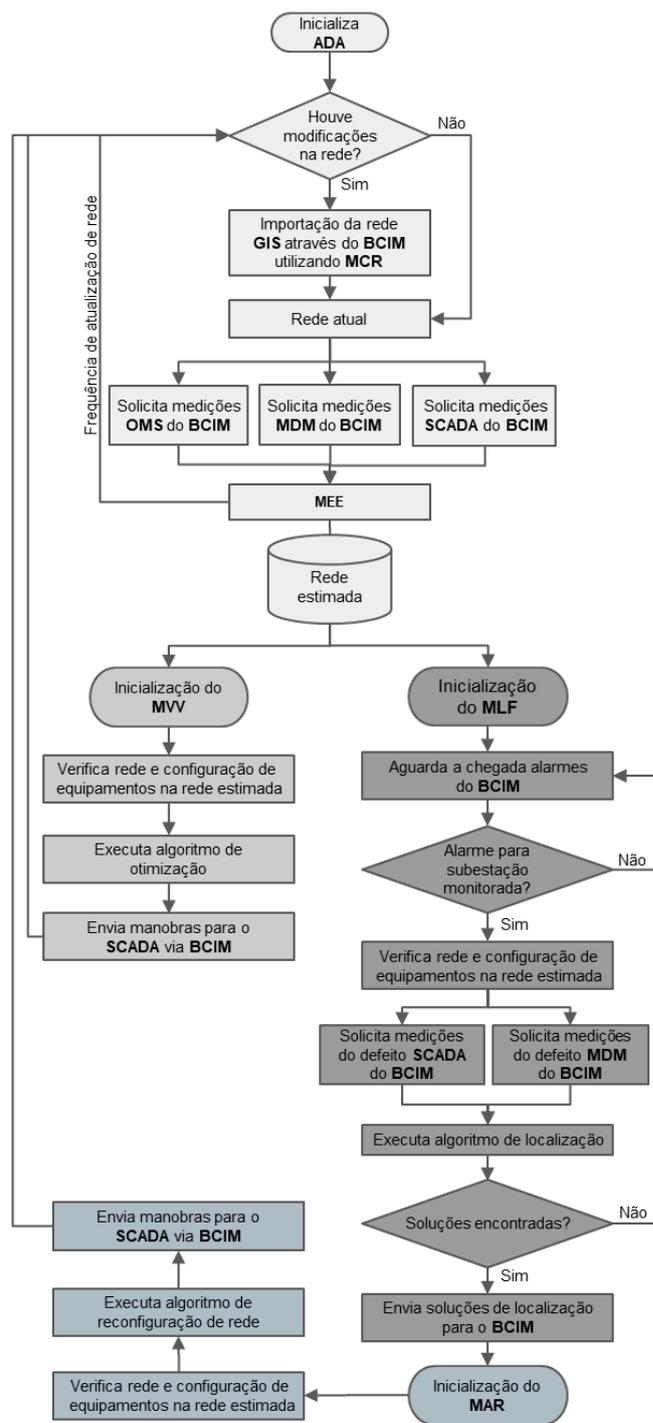


Fig 7. Visão geral dos processos

Ao inicializar-se os módulos ADA uma primeira varredura é executada. Caso exista alguma modificação de rede (por exemplo, alteração de cadastros), ou não haja redes disponíveis, efetua-se a importação da rede GIS do barramento CIM (BCIM) via MCR. Caso contrário, a rede é mantida.

O MEE solicita periodicamente em intervalo de alguns minutos (configurável) ao BCIM medições do OMS, MDM e SCADA, executa o algoritmo e fornece a rede estimada, em constante processo de atualização da rede. Concomitantemente, o MVV realiza uma verificação da rede e as configurações dos equipamentos na rede estimada. Em seguida, executa o algoritmo de otimização e envia manobras de equipamentos (transformadores, reguladores de tensão e banco de capacitores) para o SCADA via BCIM. Assim, em condições normais de operação, os processos de estimação de estados e controle Volt/VAR seguem em regime permanente.

Em situações de contingência, equipamentos inteligentes instalados ao longo do alimentador emitem alarmes caso sejam sensibilizados por sobrecorrente ou subtensão, os quais são enviados ao BCIM via infraestrutura de telecomunicações. Dessa forma, o MLF identifica a chegada desses alarmes e inicia o processo de localização de faltas, caso refiram-se às subestações monitoradas. Então, o MLF efetua a verificação da rede e a configuração dos equipamentos na rede estimada.

Em seguida, solicita medições relativas ao defeito ao SCADA e ao MDM no BCIM. A partir das medições, o algoritmo de localização é executado. Havendo soluções encontradas, os resultados de localização são enviados ao BCIM e inicia-se o processo de restauração de rede. Senão, o MLF passa a aguardar a chegada de novos alarmes.

Por fim, o MAR é executado quando as soluções da localização de faltas são encontradas. O algoritmo analisa os resultados da localização, a rede e a configuração de equipamentos na rede estimada. Em seguida, executa o algoritmo de reconfiguração de rede e envia planos de manobras para o SCADA via BCIM.

A Tabela 1 informa os tipos de dados consumidos pelos módulos de cada sistema corporativo.

5. VALIDAÇÃO DA ARQUITETURA PROPOSTA POR MEIO DE UMA APLICAÇÃO EM LOCALIZAÇÃO DE FALTAS E AUTORRESTAURAÇÃO

Esta seção apresenta a simulação de operação normal e em contingência na rede elétrica, em ambiente computacional, como forma de validar a arquitetura proposta. O objetivo nesta seção é descrever, então, o funcionamento da integração de cada módulo, sem ênfase na explicação específica da funcionalidade em cada módulo (equacionamentos, algoritmos etc.), conforme as referências previamente citadas.

O perfil da rede elétrica de distribuição utilizada é mostrado na Figura 8. Esta rede possui 7 alimentadores, enumerados 1 a 7, conforme indicado. O alimentador número 3 foi utilizado para o teste das funcionalidades FLISR. Este alimentador possui chaves de transferência para os alimentadores 5, 6 e 7, e, assim, pode ser socorrido por um deles.

Tabela 1. Tabela informativa sobre os dados consumidos pelos módulos

| Módulo | Sistema Corporativo | Dados Consumidos |
|--------|---------------------|--|
| MCR | GIS | Informações sobre: subestações, transformadores, chaves, barras, cabeamento, cargas, reguladores de tensão e banco de capacitores. |
| MEE | OMS | Estados de chaves e religadores |
| MEE | SCADA | Estados de disjuntores e religadores |
| MEE | SCADA | Medições de disjuntores e religadores. |
| MEE | MDM | Medições de consumidores do grupo A, consumidores livres, geração, fronteira e sensores. |
| MVV | SCADA | Alarmes de telecomando, automatismo e comunicação dos transformadores de subestação, reguladores de tensão e banco de capacitores. |
| MLF | SCADA | Alarmes de sobrecorrente registrados por disjuntor, religador, sensores e seccionizador. |
| MLF | SCADA | Medições de tensão e corrente de curto-circuito registradas pelo(s) equipamento(s) sensibilizado(s) no evento. |
| MLF | MDM | Alarmes de sobrecorrente e/ou subtensão registrados por qualímetros e transformadores inteligentes. |
| MLF | MDM | Medições (oscilografia) de curto-circuito registradas pelo(s) equipamento(s) sensibilizado(s) no evento. |
| MAR | - | Não são consumidos dados dos sistemas corporativos. |

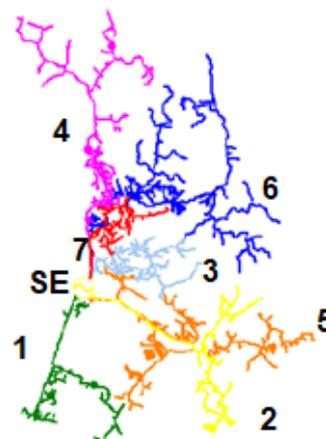


Fig 8. Rede elétrica para o Estudo de Caso

Inicialmente, os dados de rede são importados através do MCR. Após a montagem da rede, o processo de estimação da rede é iniciado, através do MEE.

Em seguida, o processo de controle Volt/VAR (MVV) é iniciado. A funcionalidade foi aplicada à subestação a partir do próprio ambiente do laboratório de redes elétricas

inteligentes da USP, utilizando os IEDs físicos disponíveis e os IEDs virtuais. Assim, as funcionalidades não ficam limitadas à quantidade dos equipamentos físicos disponíveis no laboratório, as quais utilizam sistemas legados reais. A Figura 9 apresenta a tela do sistema SCADA em uma das execuções do processo.

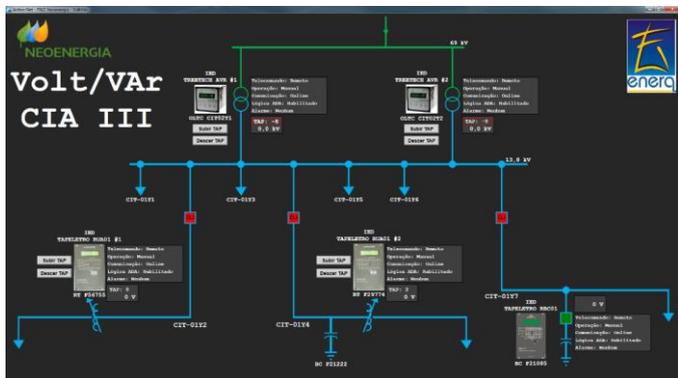


Fig 9. Sistema SCADA para controle Volt/VAR

Os processos de estimação de estados e controle Volt/VAR devem se executar em regime permanente, até o momento em que ocorra alguma anomalia na rede elétrica.

Como forma de validar a arquitetura proposta em situação de contingência, uma falta foi, então, simulada no alimentador **número 3**, e o MLF foi executado. A partir dos dados solicitados ao SCADA e MDM através do BCIM, o MLF apresenta possíveis soluções, as quais são enviadas ao SCADA via BCIM. A partir da área de busca estabelecida pelo MLF, o MAR é executado em seguida. Estes módulos encontram-se indicados na Figura 10.

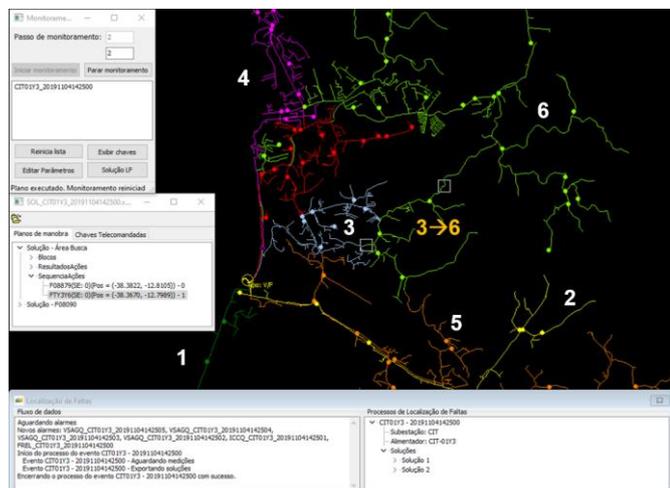


Fig 10. MLF e MAR – Resultados dos processos de localização de faltas e autorrestauração

Observa-se, a realização das manobras: abertura de uma chave telecomandada à jusante de uma das soluções de localização e o fechamento da chave vis-à-vis com o alimentador 6; e parte do alimentador 3 pode ser, então, restabelecido. As duas chaves também estão indicadas nos quadrados na figura. Os planos de manobras gerados pelo MAR são, então, enviados ao SCADA via BCIM.

6. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou o desenvolvimento de funcionalidades da Automação Avançada da Distribuição na estrutura de DMS conciliando os sistemas corporativos do Grupo NEOENERGIA e o ambiente do laboratório de Redes Elétricas Inteligentes da Universidade de São Paulo.

Dada as dificuldades existentes de integração dos diversos sistemas computacionais presentes nos ambientes corporativos e operacionais das concessionárias de energia, o trabalho propôs, então, o desenvolvimento das funcionalidades de ADA para viabilizar a introdução do DMS.

As ferramentas de DMS desenvolvidas para a ADA foram direcionadas aos sistemas de distribuição em média tensão e abrangem as funcionalidades de estimação de estados, controle Volt/VAR e FLISR. Assim, permitem que a concessionária de energia monitore em tempo real o atual carregamento das redes de distribuição a partir da sua infraestrutura de dados. Além disso, possibilita identificar e localizar rapidamente faltas que eventualmente ocorram na rede elétrica, e até restaurar parte do sistema elétrico afetado, aprimorando a qualidade de seus serviços prestados.

Por fim, o estudo de caso demonstrou a sequência de ações das ferramentas desenvolvidas para as arquiteturas propostas, contemplando redes elétricas reais e os sistemas corporativos da distribuidora. O relacionamento entre as funcionalidades do DMS com o barramento de serviços comercial foi, então, ilustrado, trocando informações com os sistemas legados e adequando-se às restrições destes.

7. REFERÊNCIAS

- Gambhir, J. (2012). An Overview of Smart Grid. *International Journal of Engineering Inventions*, 2012, 90-99
- Kagan, N., and others. (2013). *Redes Elétricas Inteligentes no Brasil*. Synergia, Rio de Janeiro.
- Koch-Ciobotaru, and others. (2014). Distributed FLISR Algorithm for Smart Grid Self-Reconfiguration based on IEC61850. *3rd International Conference on Renewable Energy Research and Applications*, 2014, 418-423.
- Medeiros, T. S. (2018). Meta-heurísticas bio-inspiradas para otimização multiobjetivo do controle Volt/VAr no contexto das redes elétricas inteligentes. *Escola Politécnica, USP*.
- Mustafar, M. F., and others. (2007). Ant colony optimization (ACO) based technique for voltage control and loss minimization using transformer tap setting. *2007 5th Student Conference on Research and Development*, 1-6
- Parikh, and others. (2013). Fault location, isolation and service restoration (FLISR) technique using IEC 61850 GOOSE. *2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2013, 1-6.
- Pereira, Danilo de S. (2019). Localização de faltas em redes de distribuição no contexto de redes elétricas inteligentes utilizando algoritmos evolutivos. *Escola Politécnica, USP*.
- Rosa, L. H. L. (2018). Metodologia para desenvolvimento e aplicação de um emulador de Redes Elétricas Inteligentes em ambiente controlado. *Escola Politécnica, USP*.