



JOÃO HORÁCIO DA SILVA JÚNIOR

**FERRAMENTA ORIENTADA A GRAFOS DE ANÁLISE DA
BASE DE DADOS DO SISTEMAS SCADA/EMS DA CEMIG-GT**

LAVRAS – MG

2021

JOÃO HORÁCIO DA SILVA JÚNIOR

**FERRAMENTA ORIENTADA A GRAFOS DE ANÁLISE DA BASE DE DADOS DO
SISTEMAS SCADA/EMS DA CEMIG-GT**

Trabalho de conclusão de curso, no formato artigo, apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Prof. Silvia Costa Ferreira

Orientadora

LAVRAS – MG

2021

JOÃO HORÁCIO DA SILVA JÚNIOR

**FERRAMENTA ORIENTADA A GRAFOS DE ANÁLISE DA BASE DE DADOS DO
SISTEMAS SCADA/EMS DA CEMIG-GT**

Trabalho de conclusão de curso, no formato artigo, apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

APROVADA em 29 de Novembro de 2021.

Prof. Silvia Costa Ferreira	UFLA
Prof. Vinicius Miranda Pacheco	UFLA
Rafael Franco Cordeiro	CEMIG

Prof. Silvia Costa Ferreira
Orientadora

**LAVRAS – MG
2021**

Nada no mundo se compara à persistência.
(Calvin Coolidge)

RESUMO

A operação remota e centralizada do sistema elétrico é viabilizada por meio dos sistemas SCADA/EMS, que são utilizados, pelos operadores, em grande parte das rotinas operativas realizadas nos Centros de Operação das companhias energéticas. Devido à complexidade inerente à operação do sistema elétrico e à sua dimensão, faz-se necessário o uso de funções avançadas, capazes de auxiliar no processo de tomada de decisão do operador. Tais funções são denominadas “Funções de Análise de Redes” e dentre as quais o Configurador de Redes é responsável por obter a topologia do sistema elétrico em tempo real, informando o estado (ligado/desligado) dos equipamentos (linhas de transmissão, transformadores, etc.). Isto é feito por meio do processamento do modelo topológico, responsável por representar as conexões existentes entre os equipamentos, e do monitoramento dos estados (aberto/fechado) dos equipamentos de manobra (chaves e disjuntores). Para garantir o correto funcionamento do Configurador é necessário que o modelo topológico esteja devidamente parametrizado pela equipe de implantação e manutenção. Desta forma, o desenvolvimento de ferramentas que auxiliem no processo de modelagem topológica, por esta equipe, é justificada. Posto isso, o objetivo deste trabalho é apresentar uma ferramenta que utiliza o banco de dados orientado a grafos Neo4j, criada para propiciar um ambiente de análise visual do modelo topológico. Facilitando o atendimento às demandas de alteração no modelo, garantindo agilidade e segurança neste processo, e empregando confiabilidade ao resultado do configurador que é de extrema importância para tomada de decisão em tempo real.

Palavras-chave: SCADA; EMS; Base de Dados; Grafos; Configurador de Redes; Centro de Operação; SSCD.

ABSTRACT

The remote and centralized operation of the electrical system is made possible through SCADA/EMS systems, which are used by operators in large part of the operating routines carried out in the Operation Centers of power companies. Due to the complexity inherent to the operation of the electrical system and its dimension, it is necessary to use advanced functions, capable of assisting in the decision-making process of the operator. Such functions are called "Network Analysis Functions" and among which the Network Configurator is responsible for obtaining the topology of the electrical system in real time, informing the status (on/off) of the equipment (transmission lines, power transformers, etc.). This is done by processing the topological model, responsible for representing the existing connections among the equipment, and by monitoring the states (open/closed) of the switching equipment (switches and circuit breakers). To ensure the correct functioning of the Configurator, the topological model must be properly parameterized by the implementation and maintenance team. Thus, the development of tools that help in the topological modeling process, by this team, is justified. That said, this work aims to present a tool that uses the graph-oriented database Neo4j, created to provide an environment for visual analysis of the topological model. Making it easier to meet the demands of changing the model, ensuring agility and security in this process, and employing reliability to the configurator result, which is extremely important for decision-making in real time.

Keywords: SCADA; EMS; Database; Graphs; Networks Configurator; Operation Center; SSCD.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
REFERÊNCIAS	9
Título do Artigo	10

1 INTRODUÇÃO

Sistemas Supervisórios ou Sistemas de Supervisão e Controle (SSC) são softwares que têm como função básica permitir a monitoração e a operação de um processo de forma centralizada por meio de uma Interface Homem Máquina (IHM) (ROSÁRIO, 2009). O SSC mais conhecido é o Sistema de Supervisão, Controle e Aquisição de Dados (SCADA) que permite adquirir dados e enviar instruções de comando para instalações distantes. A sua utilização ocorre em larga escala em processos industriais, como por exemplo, na geração, na transmissão e na distribuição de energia elétrica, na metalurgia, nas estações de tratamento de água e de esgoto, e na indústria química (BRANQUINHO et al., 2014).

Dada a complexidade inerente à operação do sistema elétrico e sua dimensão, os sistemas utilizados neste cenário necessitam de funções avançadas de diagnóstico, análise e aconselhamento. O objetivo destas funções é auxiliar no processo de tomada de decisão do operador, visando agilidade e precisão neste processo e, por consequência, garantir a operação correta do sistema elétrico. Estas funções específicas são chamadas de “Funções de Análise de Redes” e fazem parte do Sistema de Gerenciamento de Energia (Energy Management Systems - EMS). O EMS, por sua vez, sempre trabalhará associado a um SCADA, que é responsável por disponibilizar os dados adquiridos (QUEIROZ, 2010).

Quanto a topologia da rede elétrica, esta é determinada pelo Configurador de Redes, função primordial dentre as Funções de Análise de Redes. Sua responsabilidade é informar o estado (ligado/desligado) dos equipamentos da rede (linhas de transmissão, bancos de capacitores, transformadores, cargas, etc). A topologia da rede é obtida através do processamento do estado (aberto/fechado) de cada disjuntor e chave seccionadora contida no modelo topológico do sistema elétrico em questão (COSTA; FALCÃO, 2007; FERREIRA, 2007).

A implantação e manutenção de sistemas SCADA e EMS é uma atividade complexa e de alta criticidade para as concessionárias de geração, transmissão e distribuição de energia, pois interferem na segurança de pessoas e dos ativos da rede elétrica. Grande parte das rotinas de operação do sistema elétrico realizadas nos Centros de Controle, pelos operadores, são desempenhadas por meio desses sistemas, portanto, as ferramentas disponibilizadas para a realização dessas atividades têm consequência direta na qualidade das informações disponibilizadas para a tomada de decisão durante a operação em tempo real. No Centro de Operação do Sistema (COS) da Cemig GT, o Sistema de Supervisão e Controle Distribuído (SSCD) é o

SCADA/EMS em operação desde 1996, e estas atividades são de responsabilidade da equipe de Implantação e Manutenção de Sistemas de Controle (IMSC).

Segundo Costa e Falcão (2007), a disponibilidade e o uso efetivo das funções de Análise de Redes, em tempo real, propiciando a correta identificação da topologia, é “de fundamental importância durante o gerenciamento de energia dentro de um Centro de Operação” e ainda “contribuem de forma decisiva para manter um nível adequado de qualidade de atendimento aos consumidores”. Uma vez que o configurador utiliza o modelo topológico para descobrir quais equipamentos estão conectados entre si, para juntamente com os estados (aberto/fechado) de todos os equipamentos de manobra (chave seccionadora e disjuntores) contidos no modelo obter a topologia em tempo real, é imprescindível então que o modelo esteja devidamente parametrizado para seu correto funcionamento.

O atendimento às demandas de alterações no modelo pela equipe IMSC, que ocorrem devido à integração de novos equipamentos e à alterações topológicas decorrentes de obras de expansão e melhoria da rede elétrica, era realizado em duas etapas. Na primeira, uma análise exploratória era realizada no banco de dados relacional do SSCD para se obter uma representação visual do modelo cadastrado, permitindo descobrir qual nó elétrico era o responsável por determinado ponto de conexão entre equipamentos. Tal análise, se baseava em consultar os dois nós cadastrados para cada equipamento e representar visualmente em um diagrama unifilar por meio de um editor de imagens, ou manualmente com o diagrama impresso, ou até com um trecho do diagrama esboçado em papel. A segunda etapa, por sua vez, consistia em realizar, de fato, às alterações necessárias no modelo topológico na base de dados, por meio das percepções obtidas do modelo cadastrado, após a realização da primeira etapa, juntamente com o entendimento do serviço a ser executado. O processo executado na primeira etapa era de complexa execução e inseguro, consumindo a maior parte do tempo de atendimento, e se fazia necessário para a execução da segunda etapa, tornando-se indispensável, pois nesta, era demandado o conhecimento do modelo topológico para determinar as alterações que seriam efetuadas no banco de dados.

Visando otimizar o processo de atendimento deste tipo de demanda, o objetivo deste trabalho é apresentar uma ferramenta orientada a grafo que foi desenvolvida para propiciar um ambiente de análise visual do modelo topológico cadastrado na base de dados do SSCD. A ferramenta proposta permite a conferência do modelo topológico de forma eficaz, facilitando o atendimento às demandas de alterações no modelo, tornando-as mais seguras, rápidas e as-

sertivas. Isso porque, utilizando a ferramenta, não é mais necessário a execução do custoso procedimento realizado na primeira etapa para realização de alterações no modelo topológico.

A ferramenta foi desenvolvida utilizando tecnologias de código aberto e gratuitas. O banco de dados orientado a grafos Neo4J é seu elemento central e permite a criação do ambiente de análise, o Visual Studio Code (VS Code) é utilizado como plataforma de desenvolvimento e depuração, onde, por meio de um *pipeline* de *scripts* PowerShell o processo de atualização da ferramenta é completamente automatizado. A plataforma de containers Docker é utilizada para a execução do Neo4J e, por fim, o GIT é utilizado para o controle de versão distribuído. Por meio destas ferramentas foi possível desenvolver uma ferramenta distribuída, de forma modular e escalável, com processo de atualização completamente automatizado, onde, o modelo topológico do configurador da rede elétrica é transformado em um modelo topológico orientado a grafo, onde, os nós do grafo representam os equipamentos e os relacionamentos/arestas do grafo representam as ligações físicas entre eles. Esta base já é muito útil para a análise da topologia por meio da interface gráfica do Neo4j, tanto para o processo de integração e comissionamento de ativos, quanto para identificação de erros.

REFERÊNCIAS

BRANQUINHO, M. A. et al. *Segurança de Automação Industrial e SCADA*. Brasil: Elsevier Brasil, 2014.

COSTA, M. R.; FALCÃO, D. M. A identificação de erros de topologia no ambiente de tempo-real. *SNPTEE*, v. 10, 2007. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

FERREIRA, D. G. **Visão integrada da automação da operação e manutenção de sistemas elétricos de potência**. 2007. Dissertação (Pós Graduação: Engenharia Elétrica), UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

QUEIROZ, R. J. N. Implantação de um centro de operação em tempo real de um agente de transmissão do sistema interligado nacional. **Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de**, p. 134, 2010.

ROSÁRIO, J. M. *AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL*. São Paulo, SP, Brasil: Editora Baraúna, 2009.

**ARTIGO - Ferramenta Orientada a Grafos de Análise da Base de Dados do Sistemas
SCADA/EMS da CEMIG-GT**

Este artigo está formatado de acordo com as normas do "Congresso Brasileiro de Automática (CBA) - 2020", em que não foi submetido.

Ferramenta Orientada a Grafos de Análise da Base de Dados do Sistemas SCADA/EMS da CEMIG-GT

João Horácio da Silva Júnior *

* Engenharia de Controle & Automação, Universidade Federal de Lavras, MG, (e-mail: joaoh@estudante.ufla.br).

Abstract: The remote and centralized operation of the electrical system is made possible through SCADA/EMS systems, which are used by operators in large part of the operating routines carried out in the Operation Centers of power companies. Due to the complexity inherent to the operation of the electrical system and its dimension, it is necessary to use advanced functions, capable of assisting in the decision-making process of the operator. Such functions are called "Network Analysis Functions" and among which the Network Configurator is responsible for obtaining the topology of the electrical system in real time, informing the status (on/off) of the equipment (transmission lines, power transformers, etc.). This is done by processing the topological model, responsible for representing the existing connections among the equipment, and by monitoring the states (open/closed) of the switching equipment (switches and circuit breakers). To ensure the correct functioning of the Configurator, the topological model must be properly parameterized by the implementation and maintenance team. Thus, the development of tools that help in the topological modeling process, by this team, is justified. That said, this work aims to present a tool that uses the graph-oriented database Neo4j, created to provide an environment for visual analysis of the topological model. Making it easier to meet the demands of changing the model, ensuring agility and security in this process, and employing reliability to the configurator result, which is extremely important for decision-making in real time.

Resumo: A operação remota e centralizada do sistema elétrico é viabilizada por meio dos sistemas SCADA/EMS, que são utilizados, pelos operadores, em grande parte das rotinas operativas realizadas nos Centros de Operação das companhias energéticas. Devido à complexidade inerente à operação do sistema elétrico e à sua dimensão, faz-se necessário o uso de funções avançadas, capazes de auxiliar no processo de tomada de decisão do operador. Tais funções são denominadas "Funções de Análise de Redes" e dentre as quais o Configurador de Redes é responsável por obter a topologia do sistema elétrico em tempo real, informando o estado (ligado/desligado) dos equipamentos (linhas de transmissão, transformadores, etc.). Isto é feito por meio do processamento do modelo topológico, responsável por representar as conexões existentes entre os equipamentos, e do monitoramento dos estados (aberto/fechado) dos equipamentos de manobra (chaves e disjuntores). Para garantir o correto funcionamento do Configurador é necessário que o modelo topológico esteja devidamente parametrizado pela equipe de implantação e manutenção. Desta forma, o desenvolvimento de ferramentas que auxiliem no processo de modelagem topológica, por esta equipe, é justificada. Posto isso, o objetivo deste trabalho é apresentar uma ferramenta que utiliza o banco de dados orientado a grafos Neo4j, criada para propiciar um ambiente de análise visual do modelo topológico. Facilitando o atendimento às demandas de alteração no modelo, garantindo agilidade e segurança neste processo, e empregando confiabilidade ao resultado do configurador que é de extrema importância para tomada de decisão em tempo real.

Keywords: SCADA; EMS; Database; Graphs; Networks Configurator; Operation Center; SSCD.

Palavras-chaves: SCADA; EMS; Base de Dados; Grafos; Configurador de Redes; Centro de Operação; SSCD.

1. INTRODUÇÃO

Sistemas Supervisórios ou Sistemas de Supervisão e Controle (SSC) são softwares que têm como função básica permitir a monitoração e a operação de um processo de forma centralizada por meio de uma Interface Homem Máquina (IHM) (Rosário, 2009). O SSC mais conhecido é o Sistema de Supervisão, Controle e Aquisição de Dados (SCADA) que permite adquirir dados e enviar instruções de comando para instalações distantes. A sua utilização ocorre em larga escala em processos industriais, como por exemplo, na geração, na transmissão e na distribuição de energia elétrica, na metalurgia, nas estações de tratamento de água e de esgoto, e na indústria química (Branquinho et al., 2014).

Dada a complexidade inerente à operação do sistema elétrico e sua dimensão, os sistemas utilizados neste cenário necessitam de funções avançadas de diagnóstico, análise e aconselhamento. O objetivo destas funções é auxiliar no processo de tomada de decisão do operador, visando agilidade e precisão neste processo e, por consequência, garantir a operação correta do sistema elétrico. Estas funções específicas são chamadas de “Funções de Análise de Redes” e fazem parte do Sistema de Gerenciamento de Energia (Energy Management Systems - EMS). O EMS, por sua vez, sempre trabalhará associado a um SCADA, que é responsável por disponibilizar os dados adquiridos (QUEIROZ, 2010).

Quanto a topologia da rede elétrica, esta é determinada pelo Configurador de Redes, função primordial dentre as Funções de Análise de Redes. Sua responsabilidade é informar o estado (ligado/desligado) dos equipamentos da rede (linhas de transmissão, bancos de capacitores, transformadores, cargas, etc). A topologia da rede é obtida através do processamento do estado (aberto/fechado) de cada disjuntor e chave seccionadora contida no modelo topológico do sistema elétrico em questão (Costa and Falcão, 2007; Ferreira, 2007).

A implantação e manutenção de sistemas SCADA e EMS é uma atividade complexa e de alta criticidade para as concessionárias de geração, transmissão e distribuição de energia, pois interferem na segurança de pessoas e dos ativos da rede elétrica. Grande parte das rotinas de operação do sistema elétrico realizadas nos Centros de Controle, pelos operadores, são desempenhadas por meio desses sistemas, portanto, as ferramentas disponibilizadas para a realização dessas atividades têm consequência direta na qualidade das informações disponibilizadas para a tomada de decisão durante a operação em tempo real. No Centro de Operação do Sistema (COS) da Cemig GT, o Sistema de Supervisão e Controle Distribuído (SSCD) é o SCADA/EMS em operação desde 1996, e estas atividades são de responsabilidade da equipe de Implantação e Manutenção de Sistemas de Controle (IMSC).

Segundo Costa and Falcão (2007), a disponibilidade e o uso efetivo das funções de Análise de Redes, em tempo real, propiciando a correta identificação da topologia, é “de fundamental importância durante o gerenciamento de energia dentro de um Centro de Operação” e ainda “con-

tribuem de forma decisiva para manter um nível adequado de qualidade de atendimento aos consumidores”. Uma vez que o configurador utiliza o modelo topológico para descobrir quais equipamentos estão conectados entre si, para juntamente com os estados (aberto/fechado) de todos os equipamentos de manobra (chave seccionadora e disjuntores) contidos no modelo obter a topologia em tempo real, é imprescindível então que o modelo esteja devidamente parametrizado para seu correto funcionamento.

O atendimento às demandas de alterações no modelo pela equipe IMSC, que ocorrem devido à integração de novos equipamentos e à alterações topológicas decorrentes de obras de expansão e melhoria da rede elétrica, era realizado em duas etapas. Na primeira, uma análise exploratória era realizada no banco de dados relacional do SSCD para se obter uma representação visual do modelo cadastrado, permitindo descobrir qual nó elétrico era o responsável por determinado ponto de conexão entre equipamentos. Tal análise, se baseava em consultar os dois nós cadastrados para cada equipamento e representar visualmente em um diagrama unifilar por meio de um editor de imagens, ou manualmente com o diagrama impresso, ou até com um trecho do diagrama esboçado em papel. A segunda etapa, por sua vez, consistia em realizar, de fato, às alterações necessárias no modelo topológico na base de dados, por meio das percepções obtidas do modelo cadastrado, após a realização da primeira etapa, juntamente com o entendimento do serviço a ser executado. O processo executado na primeira etapa era de complexa execução e inseguro, consumindo a maior parte do tempo de atendimento, e se fazia necessário para a execução da segunda etapa, tornando-se indispensável, pois nesta, era demandado o conhecimento do modelo topológico para determinar as alterações que seriam efetuadas no banco de dados.

Visando otimizar o processo de atendimento deste tipo de demanda, o objetivo deste trabalho é apresentar uma ferramenta orientada a grafo que foi desenvolvida para propiciar um ambiente de análise visual do modelo topológico cadastrado na base de dados do SSCD. A ferramenta proposta permite a conferência do modelo topológico de forma eficaz, facilitando o atendimento às demandas de alterações no modelo, tornando-as mais seguras, rápidas e assertivas. Isso porque, utilizando a ferramenta, não é mais necessário a execução do custoso procedimento realizado na primeira etapa para realização de alterações no modelo topológico.

A ferramenta foi desenvolvida utilizando tecnologias de código aberto e gratuitas. O banco de dados orientado a grafos Neo4J é seu elemento central e permite a criação do ambiente de análise, o Visual Studio Code (VS Code) é utilizado como plataforma de desenvolvimento e depuração, onde, por meio de um *pipeline* de *scripts* PowerShell o processo de atualização da ferramenta é completamente automatizado. A plataforma de containers Docker é utilizada para a execução do Neo4J e, por fim, o GIT é utilizado para o controle de versão distribuído. Por meio destas ferramentas foi possível desenvolver uma ferramenta distribuída, de forma modular e escalável, com processo de atualização completamente automatizado, onde, o modelo topológico do configurador da rede elétrica é transformado

em um modelo topológico orientado a grafo, onde, os nós do grafo representam os equipamentos e os relacionamentos/arestas do grafo representam as ligações físicas entre eles. Esta base já é muito útil para a análise da topologia por meio da interface gráfica do Neo4j, tanto para o processo de integração e comissionamento de ativos, quanto para identificação de erros.

2. BANCOS DE DADOS ORIENTADO A GRAFOS

Bancos de dados são conjuntos de dados relacionados que são modelados seguindo determinada estrutura, de forma a permitir sua recuperação quando necessário. São divididos em dois paradigmas, o Relacional e o Não Relacional. Nos tradicionais bancos de dados relacionais, os dados são guardados em estruturas pré-definidas representadas por tabelas. Por sua vez, os bancos de dados não relacionais guardam dados sem uma estrutura pré-definida (Date, 2004).

Uma tecnologia computacional em ascensão é o banco de dados orientado a grafos. Ele é um exemplo de bancos de dados não relacional, que é projetado de forma a dar a mesma relevância ao relacionamentos entre os dados quanto aos próprios dados em si (Neo4j, 2021b). Os grafos são estruturas compostas por vértices/nós e arestas, utilizadas para o estudo das relações (arestas) entre os objetos (nós) de um determinado conjunto (Prestes, 2020). Logo, problemas que possuem uma estrutura em que informações importantes são atreladas ao relacionamento entre os objetos, em diversas camadas hierárquicas, é onde este tipo de tecnologia se destaca em relação a bancos de dados relacionais.

Por meio do Modelo de Grafo de Propriedades, os dados são armazenados nos nós e nos relacionamentos por meio de propriedades (Neo4j, 2021b). Às entidades que compõem o Modelo de Grafo de Propriedades são brevemente descritas a seguir:

- Propriedades: atributos do objeto em questão (nó ou relacionamento), são identificados a partir de pares chave/valor;
- Nós: entidades do Grafo, podem ter qualquer número de propriedades e um ou mais rótulos (identifica diferentes entidades no domínio, i.e tipo do nó);
- Relacionamentos: arestas do Grafo utilizadas para representar relações entre os dados semanticamente importantes no domínio, sempre tem uma direção (embora possa-se navegar entre os dados com eficiência em qualquer direção), um rótulo (tipo), um nó final e um nó inicial e também qualquer número de propriedades.

3. FERRAMENTA DE ANÁLISE DO MODELO TOPOLÓGICO

O modelo topológico tem como finalidade representar as conexões físicas existentes entre todos os equipamentos que compõem a rede elétrica. Para que, em conjunto com os estados aberto e fechado dos equipamentos de manobra, o configurador de redes possa determinar e monitorar a configuração da rede elétrica em tempo real.

3.1 Histórico e Motivação

No SSCD, o modelo topológico é armazenado no banco de dados relacional Oracle Rdb/VMS onde, cada equipamento é cadastrado associando-se a dois nós elétricos. A condição básica para determinar que os equipamentos em uma mesma instalação estão conectados é que estes tenham o mesmo nó cadastrado. O processo de modelagem da topologia era realizado em duas etapas manuais descritas a seguir:

- (1) Com base nos dados cadastrados no banco de dados (Tabela 1) era realizada a enumeração dos nós no diagrama unifilar (Figura 1), indicando visualmente os nós associados a cada equipamento da rede. Isso evidencia quais equipamentos têm uma conexão física entre si, e qual o nó que representa esta conexão, conforme o pequeno exemplo real apresentado na Tabela 1 e na Figura 1.
- (2) Com posse das informações obtidas na primeira etapa, as alterações necessárias no modelo eram identificadas e então transcritas para planilhas de entrada dos programas de manutenção da base de dados.

Tabela 1. Exemplo de equipamentos cadastrados no banco de dados do SSCD

Nome	Tipo	Nó1	Nó2	Tensão (kV)
12K1	CHAVE	13	50	138
12K2	CHAVE	14	50	138
12K4	DISJUNTOR	50	51	138
12K5	CHAVE	51	52	138
12K6	CHAVE	14	52	138

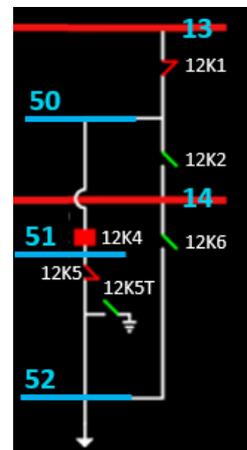


Figura 1. Diagrama unifilar com os nós enumerados indicando visualmente os equipamentos conectados e qual o nó dessa conexão.

O procedimento que era realizado na primeira etapa para se obter uma visualização do modelo topológico da rede em estudo, era inseguro, de difícil execução e passível de falhas. Isso gerava enorme dificuldade de se encontrar erros de modelagem topológica ao longo de toda rede sob controle e supervisão do COS devido à grande quantidade de equipamentos e, por consequência, à grande quantidade de dados envolvidos.

Sendo assim, a aplicação de um banco de dados orientado a grafos é justificada, pois, se mostra uma excelente solução para se organizar os dados e possibilitar a exibição dos

relacionamentos semanticamente relevantes para visualização do modelo topológico em forma de grafo de todos os equipamentos da rede sob operação do COS. Permitindo também a execução automatizada de consultas que validem as informações da topologia do sistema como um todo.

3.2 Concepção e implementação

A premissa para implementação foi desenvolver uma ferramenta distribuída, de forma modular e escalável, dotada de um banco de dados orientado a grafos como seu elemento central. O propósito deste desenvolvimento é criar um ambiente de análise visual de todo modelo topológico da rede elétrica cadastrado, de forma confiável, prática e intuitiva, com processo de atualização completamente automatizado utilizando tecnologias gratuitas e de código aberto.

Para tal, optou-se pelo uso do banco de dados Neo4j em sua distribuição Docker Image oficial, por ser um banco de dados orientado a grafos nativo. Nativo, pois o Neo4j implementa o modelo de grafo de propriedade em nível de armazenamento, permitindo alta eficiência na realização de consultas complexas por meio da linguagem de consulta declarativa (similar ao SQL) otimizada para grafos Cypher. Além disso, possui uma interface Web para manipulação e visualização dos dados cadastrados (Neo4j, 2021b).

Em resumo, o Docker é um leve mecanismo de virtualização para executar aplicações ou processos em um ambiente isolado Linux chamado container, o que facilita o gerenciamento e a configuração da aplicação (Neo4j, 2021a). A persistência dos dados a serem utilizados e/ou gerados pela aplicação/processo executado no container é feita por um mecanismo do Docker chamado volume, onde diretórios na máquina hospedeira são apontados na criação do container, que são utilizados para esta finalidade (Docker, 2021a). Por fim, para possibilitar a sua execução em ambiente Windows, foi utilizado o Docker Desktop WSL 2 backend (Docker, 2021b).

O processo de atualização, desde a configuração e gerenciamento do container Neo4j na plataforma Docker, a extração dos dados no banco em produção no SSCD, o carregamento dos dados obtidos na base de dados do Neo4j e o processamento/transformação dos dados carregados em um modelo orientado a grafos, foi automatizado por meio de um *pipeline* de *scripts* PowerShell. Utilizando o Visual Studio Code (VS Code) como plataforma de desenvolvimento e depuração dos *scripts*, devido a sua fácil integração, por meio de extensões, com o PowerShell e também com o GIT, este, por sua vez, utilizado para o controle de versão distribuído. O *pipeline* é apresentado na Figura 2 e os *scripts* PowerShell que o compõem são detalhados a seguir:

Prepare-Neo4j.ps1: Interrompe a execução, se necessário, e apaga o container Neo4j. Posteriormente, limpa toda a base de dados do Neo4j apagando os arquivos no diretório que é apontado como volume de dados do container.

Prepare-SSCD.ps1: Como o modelo topológico do SSCD é cadastrado em um banco de dados relacional, os dados que o compõem estão armazenados em diversas tabelas que

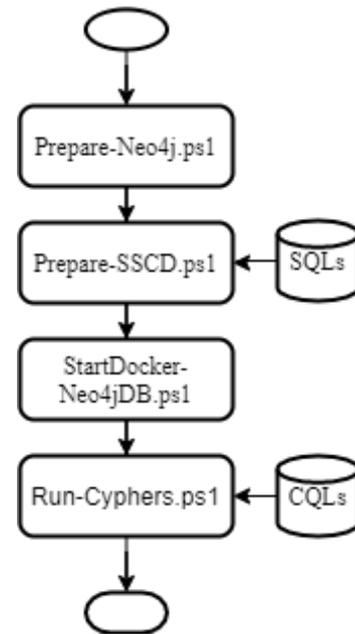


Figura 2. *Pipeline* de *scripts* PowerShell que automatiza o processo de atualização da ferramenta.

se relacionam por meio de chaves estrangeiras. Em resumo, existe uma tabela que define um equipamento genérico com informações topológicas e tabelas individuais que herdam informações da primeira e também definem informações específicas por tipo de equipamento, além de tabelas que definem informações gerais como localização e nome.

Logo, para a extração dos dados necessários, foi desenvolvido um SQL que realiza consultas nas tabelas necessárias e mescla os dados, resultando uma linha por equipamento. O resultado da consulta é similar ao apresentado na Figura 1, com exceção da coluna Localização e Empresa que foram suprimidas por motivos de confidencialidade.

Cada coluna resultante da execução da consulta SQL e sua utilidade na identificação do equipamento para transformação do modelo topológico são sucintamente descritos a seguir:

- Localização: nome da instalação (usina ou subestação) que o equipamento está instalado;
- Nome: identificador do equipamento;
- Tipo: mnemônico do tipo de equipamento. A Tabela 2 apresenta os mnemônicos dos equipamentos que compõem o modelo topológico do SSCD;
- N1: número do nó que está conectado;
- N2: número do nó que está conectado. Aqui, vale ressaltar que para utilizar a mesma estrutura dos equipamentos que são ligados em série, para os equipamentos de ligação paralela, do tipo SHUNT, que são caracterizados por terem apenas um ponto de conexão (nó) na topologia do sistema, no caso de geradores, barras, terminais de linha, cargas, capacitores, reatores, compensadores estáticos e síncronos este atributo é definido como o número “999” na base de dados e o processo do SSCD que é responsável pelo configurador de redes, durante a leitura do banco de dados, interpreta esse valor como nulo e o desconsidera;

Tabela 2. Mnemônicos dos equipamentos que compõem o modelo topológico

Mnemônico	Equipamento
GERA	Gerador
BARR	Barra
TTRF	Terminal de Transformador
TRAF	Transformador
TLIN	Terminal de Linha
CARG	Carga
CHAV	Chave
DISJ	Disjuntor
BSHT	Banco Shunt
	(Capacitores e Reatores)
CEST	Compensadores Estáticos
CSIN	Compensadores Síncronos

- Tensão: valor nominal de tensão do equipamento em kilovolts;
- Empresa: nome da empresa dona do ativo.

Uma vez que a base de produção é dinâmica, para garantir que o processo de atualização da ferramenta seja automatizado e que o ambiente esteja sempre atualizado, foi utilizada uma aplicação em C# denominada SQLtoCSV-Cli que já era utilizada em outros programas desenvolvidos pela equipe. Basicamente, esta aplicação executa consultas SQL e exporta os resultados para arquivos CSV. A partir de um diretório de entrada com os arquivos SQL, um arquivo de configuração XML que determina os servidores, as instâncias e os banco de dados a serem consultados e, por fim, um diretório de saída onde os arquivos CSV são salvos com o mesmo nome do arquivo SQL. A cada execução desta aplicação os arquivos CSV de mesmo nome são substituídos mantendo-os sempre atualizados. No caso, o diretório de saída escolhido foi o diretório que é apontado como volume de importação do container Neo4j, para posterior importação destes arquivos.

StartDocker-Neo4jDB.ps1: Cria e inicializa a execução em segundo plano de um novo container Neo4j. A partir de um arquivo de composição Docker que define todos os parâmetros de configuração e gerenciamento necessários do container, como a imagem Docker a ser utilizada e sua versão, as portas a serem disponibilizadas na máquina hospedeira, os apontamentos de diretórios da máquina hospedeira como volumes, a reserva inicial e o limite de memória reservada para aplicação, a gestão de usuários, bem como os plugins utilizados e suas configurações.

Run-Cyphers.ps1: Neste ponto, já com todo o ambiente preparado, é executado o *pipeline* de *scripts* CQL apresentado na Figura 3, que é responsável pelo carregamento e transformação do modelo topológico em um modelo orientado a grafos, finalizando o processo de atualização da ferramenta. Os *scripts* CQL que compõem esse *pipeline* são detalhados a seguir:

- CarregarCsvNodacao.cql: carrega os dados do arquivo CSV na base de dados do Neo4j, criando um nó do tipo (ElementoOperativo) por registro e com suas propriedades sendo as colunas.
- CriarIndicesConfigurador.cql: para melhorar a performance das consultas, cria um índice para cada uma das seguintes propriedades dos nós do tipo (Elemento-

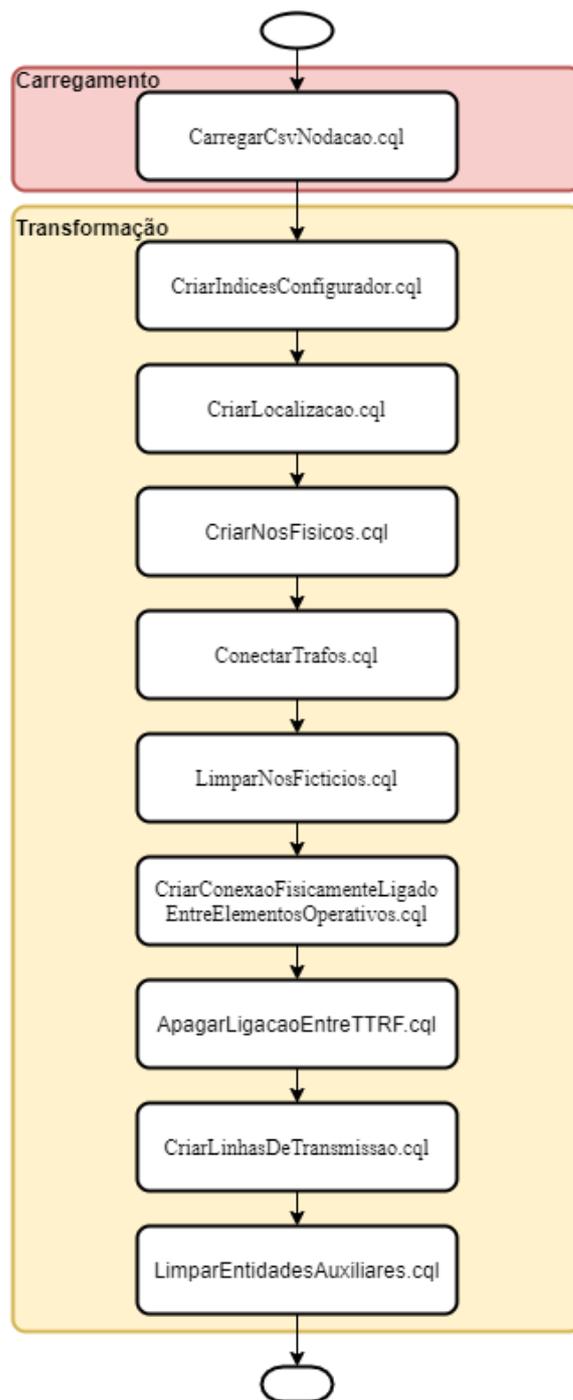


Figura 3. Pipeline de *scripts* CQL que é responsável pelo carregamento e transformação do modelo topológico em um modelo orientado a grafos.

- Operativo) criados: localização, nome, tipo, nó1, nó2 e tensão.
- CriarLocalizacao.cql: cria, se ainda não existir (Merge), um nó do tipo (Localizacao) com uma propriedade NOME e relacionamentos do tipo [localizado] entre este nó e os nós do tipo (ElementoOperativos) que são desta localização.
- CriarNosFisicos.cql: cria um nó do tipo (No) com as propriedades LOCALIZACAO e NUMERO e dois relacionamentos com este, um do tipo [conectado]

com os nós do tipo (ElementoOperativo) e um do tipo [no_fisico] com os nós do tipo (Localizacao).

- ConectarTrafos.cql: cria um relacionamento do tipo [Transformador] com a propriedade NOME entre os nós do tipo (ElementoOperativo) que são terminais de transformadores pertencentes a um mesmo transformador (tem a mesma localização, tem o começo do nome igual ao nome do transformador que ele compõe e tem nó interno comum com os outros terminais de transformador).
- LimparNosFicticios.cql: apaga os nós do tipo (No) que são desprezados pelo modelo topológico (NUMERO = "999").
- CriarConexaoFisicamenteLigadoEntreElementosOperativos.cql: cria o relacionamento do tipo [fisicamente_ligado_a] entre os nós do tipo (ElementoOperativo) que tem um relacionamento do tipo [no_fisico] com um nó do tipo (No) comum entre si.
- ApagarLigacaoEntreTTRF.cql: apaga os relacionamentos do tipo [fisicamente_ligado_a] entre os nós do tipo (ElementoOperativo) que também tem um relacionamento do tipo [Transformador] entre si.
- CriarLinhasDeTransmissao.cql: cria um relacionamento do tipo [linha_transmissao] entre dois nós do tipo (ElementoOperativo) que são terminais de linha, têm o mesmo nome e são de localizações diferentes.
- LimparEntidadesAuxiliares.cql: apaga as entidades intermediárias utilizadas para conversão do modelo relacional para gráfico, sendo estas:
 - Nós dos tipos: (Localizacao) e (No);
 - Relacionamentos dos tipos: [localizado], [conectado] e [no_fisico].

4. APLICAÇÃO E RESULTADOS

Em suma, a partir da execução do *pipeline* de *scripts* PowerShell apresentado na Figura 2, o ambiente é completamente preparado e o modelo topológico orientado a grafo é obtido através do mapeamento da base de dados relacional do configurador da rede elétrica. Esta execução dá origem ao ambiente de análise visual da ferramenta, por meio da agradável interface gráfica do Neo4j apresentada na Figura 4.

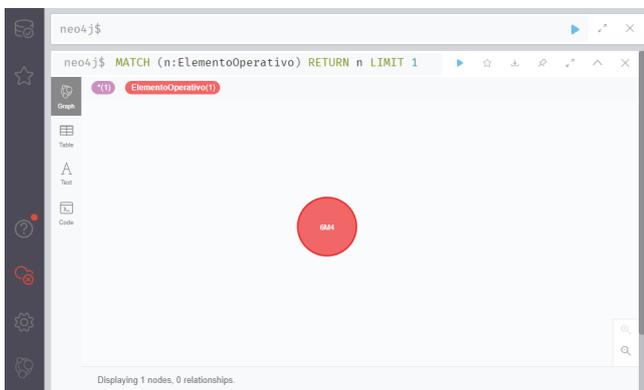


Figura 4. Interface Web Neo4j.

O processo de modelagem da topologia devido a integração de novos equipamentos a rede elétrica, em obras de expansão e melhoria, se tornou muito mais simples e assertivo, pois utilizando este ambiente, torna-se possível navegar

interativamente, por meio de um duplo clique, pelos nós que têm relacionamento entre si. Desta forma, rapidamente se obtém uma representação visual do modelo topológico cadastrado, evidenciando os equipamentos conectados e qual o nó de cada conexão, conforme apresentado na Figura 5. Nesta, as bolotas são nós do tipo (ElementoOperativo) identificados pela propriedade Nome, representando os equipamentos, e as setas são os relacionamentos do tipo [fisicamente_ligado_a] identificados com a propriedade No, representando o nó associado aquela ligação entre equipamentos.

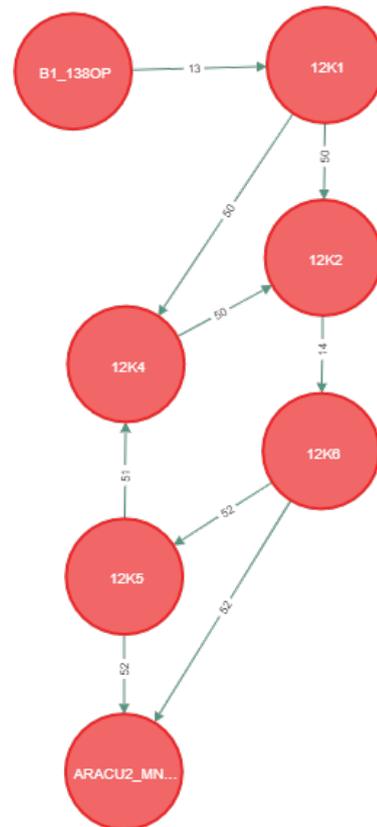


Figura 5. Visualização do modelo topológico no Neo4j

Nota-se que a Figura 5 representa a mesma topologia que foi obtida na Figura 1 através da primeira etapa do processo de modelagem topológica, o que era bastante custoso e inseguro. Vale ressaltar que utilizando a ferramenta essa topologia é obtida com apenas 6 duplo cliques, garantindo mais agilidade ao atendimento das demandas e uma maior confiabilidade ao processo, pois, ela se baseia estritamente no modelo topológico cadastrado no banco de dados relacional. Tendo em vista a praticidade de se obter a representação visual do modelo já cadastrado, por meio da ferramenta, tornou-se viável realizar sua conferência em maior escala, o comparando com o diagrama unifilar atual. Isso se faz útil, pois diversas instalações foram comissionadas e entregues a operação remota há anos, senão décadas.

Além disso, por meio de consultas Cypher, também é possível obter informações específicas da topologia, que sejam relevantes em algum aspecto da operação, cadastradas no modelo. Por exemplo, se for necessário descobrir qual o disjuntor responsável pela interligação de cada unidade geradora, por meio de uma consulta no banco de dados re-

lacional seria bastante complexo, entretanto, com o modelo orientado a grafo a consulta torna-se significativamente mais simples. Pois, no modelo orientado a grafo é possível consultar os nós e os seus relacionamentos, para o caso em questão, a consulta buscaria os nós do tipo (ElementoOperativo) que tem propriedade Tipo = GERA, tem relacionamento [fisicamente_ligado_a] com outro nó do tipo (ElementoOperativo) que, por sua vez, tem a propriedade Tipo = DISJ.

Assim, a manutenção do modelo topológico do sistema foi drasticamente melhorada, reduzindo o tempo de implementação e de diagnóstico de erros. De fato, o processo em questão era manual e hoje possui uma ferramenta com uma interface gráfica para visualização do modelo cadastrado, que facilita a execução de validações, por meio de consultas Cypher.

5. CONCLUSÃO

Para a análise topológica, a ferramenta é muito útil para tomada de decisão em alterações e inclusões de equipamentos na base de dados. Por meio dela é possível consultar os nós dos equipamentos cadastrados, facilitando a manutenção da base de dados a ser implementada e o diagnóstico de erros, além de possibilitar consultas pontuais para equipamentos e também consultas mais complexas como validações. A ferramenta favorece o correto funcionamento do configurador de redes, que é uma das funcionalidades do EMS em que há uma grande dificuldade para se identificar erros de cadastro em tempo de desenvolvimento. Há de se ressaltar que um erro de cadastro da topologia pode mascarar, em tempo real, o desligamento de um ativo e retardar, em muito, o seu restabelecimento, trazendo consequências econômicas para a companhia e riscos operativos para o sistema elétrico como um todo, podendo inclusive gerar sobrecarga e, em última instância, desligamentos em outros equipamentos da rede.

REFERÊNCIAS

- Branquinho, M.A., Moraes, L.C., Seidi, J., Azevedo Jr, J., and Branquinho, T.B. (2014). *Segurança de Automação Industrial e SCADA*. Elsevier Brasil, Brasil.
- Costa, M.R. and Falcão, D.M. (2007). A identificação de erros de topologia no ambiente de tempo-real. *SNPTEE*, 10. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Date, C.J. (2004). *Introdução a Sistemas de BANCOS DE DADOS*. Elsevier Brasil, Brasil.
- Docker (2021a). *Use volumes*. URL <https://docs.docker.com/storage/volumes/>. (Acesso em: 05/09/2021).
- Docker (2021b). *Use volumes*. URL <https://docs.docker.com/desktop/windows/wsl/>. (Acesso em: 05/09/2021).
- Ferreira, D.G. (2007). *Visão integrada da automação da operação e manutenção de sistemas elétricos de potência*. Dissertação (Pós Graduação: Engenharia Elétrica), UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.
- Neo4j (2021a). *Neo4j with Docker*. URL <https://neo4j.com/developer/docker/>. (Acesso em: 05/09/2021).
- Neo4j (2021b). *What is a Graph Database?* URL <https://neo4j.com/developer/graph-database/>. (Acesso em: 05/09/2021).
- Prestes, E. (2020). *Introdução à Teoria dos Grafos*. URL <http://www.inf.ufrgs.br/~prestes/Courses/Graph%20Theory/Livro/LivroGrafos.pdf>. (Acesso em: 05/09/2021).
- QUEIROZ, R.J.N. (2010). *Implantação de um centro de operação em tempo real de um agente de transmissão do sistema interligado nacional*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 134.
- Rosário, J.M. (2009). *AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL*. Editora Baraúna, São Paulo, SP, Brasil.