57º SBPO
SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
Gramado • RS
DE 5 A 9 DE OUTUBRO DE 2025

Solução Preditiva para Auxílio à Tomada de Decisão em Manobras de Controle de Tensão pelos Operadores de Tempo Real do ONS

Graziela Barbosa Cavalcante
Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)
Rua Júlio do Carmo, 251 - Centro, Rio de Janeiro - RJ
graziela.cavalcante@ons.org.br

Rainer Zanghi
Universidade Federal Fluminense (UFF)
Rua Passo da Pátria, 156, Niterói - RJ
rzanghi@id.uff.br

RESUMO

A tomada de decisão na operação em Tempo Real (TR) no Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) torna-se cada vez mais complexa devido ao crescimento da rede e à maior participação de fontes de energia intermitentes. Embora as Instruções Operativas (IOs) ofereçam diretrizes abrangentes, elas não são capazes de prever todos os cenários possíveis. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta computacional preditiva, com interface que considera a demanda dos operadores, para auxiliar no controle de tensão, uma das ações críticas do dia a dia da operação do Sistema Interligado Nacional (SIN). A solução de controle de tensão preditiva proposta aplica técnicas para Interface Humano Máquina (IHM) de alto desempenho e o método *Goal-Directed Task Analysis* (GDTA) na identificação de requisitos junto aos usuários. São apresentados resultados de testes realizados com os operadores do ONS que demonstraram a efetividade da ferramenta proposta.

PALAVRAS CHAVE. Controle de Tensão; Ferramenta Preditiva; Tomada de Decisão.

Tópicos (indique, em ordem de PRIORIDADE, o(s) tópicos(s) de seu artigo)

ABSTRACT

Decision-making in Real-Time (RT) operations at the Brazil's National Electric System Operator (ONS) is becoming increasingly complex due to grid expansion and the growing participation of intermittent energy sources. Although Operational Instructions (OIs) provide comprehensive guidelines, they cannot predict all possible scenarios. This paper presents the development of a predictive computational tool with an interface designed to meet operator demands, aimed at assisting in voltage control, one of the critical daily actions in the operation of the National Interconnected System (SIN). The proposed predictive voltage control solution applies techniques for high-performance Human-Machine Interface (HMI) and the Goal-Directed Task Analysis (GDTA) method to identify user requirements. Test results with ONS operators demonstrate the tool's effectiveness.

KEYWORDS. Voltage Control; Predictive Tool; Decision-Making;.

Paper topics (indicate in order of PRIORITY the paper topic(s))

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212092
https://proceedings.science/p/212092?lang=pt-br

1. Introdução

A geração e transmissão de energia elétrica no Brasil é coordenada pelo ONS, que enfrenta desafios diários para manter o SIN estável e seguro. A operação em tempo real tornou-se mais complexa devido ao crescimento da rede elétrica e à diversificação das fontes energéticas, como eólica, solar, hidráulica e térmica.

Embora as usinas hidráulicas sejam predominantes, este cenário introduz maior complexidade no controle, exigindo novas abordagens operacionais para a tomada de decisão. Atualmente, os operadores do ONS utilizam métodos tradicionais para manipular variáveis como tensão, carga e frequência, mas a crescente complexidade do sistema demanda ferramentas e tecnologias que considerem previsões de curto e médio prazo e um fluxo eficiente de informações.

Este trabalho apresenta uma ferramenta preditiva para apoiar a operação em tempo real, permitindo decisões rápidas que minimizem prejuízos e garantam a estabilidade do sistema elétrico. A ferramenta desenvolvida é capaz de exibir a predição da variação de tensão nas barras do sistema elétrico ao desligar ou religar uma linha de transmissão. Para isso, utiliza-se o sistema Organon [HPPA, 2024], além de metodologias de IHM de alto desempenho, garantindo maior eficiência na visualização e na tomada de decisão durante a operação do sistema elétrico.

2. Revisão Bibliográfica

O controle de tensão visa manter os níveis dentro dos limites estabelecidos pela ANEEL, conforme o Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede [ONS, 2023], prevenindo sobretensões e subtensões que podem afetar os equipamentos. Para garantir a segurança do sistema, aplica-se o critério $(n-1)$, que assegura operação segura diante de qualquer contingência simples. A segurança do Sistema Elétrico baseia-se em limites térmicos, de tensão e estabilidade [Ferreira, 2008]. Em condições normais, o operador deve manter tensões e frequências próximas dos valores nominais [Kundur e Malik, 2022].

Quando ocorre uma contingência - por distúrbios naturais, falhas de equipamento ou erro humano [Kundur e Malik, 2022] - novos objetivos são definidos para restaurar a operação normal. Se as manobras corretivas não forem eficazes, o sistema entra em estado de emergência, podendo sofrer desligamentos em cascata. Nessa situação, ilustrada na Figura 1, medidas restaurativas devem ser adotadas para recompor o sistema [Kundur e Malik, 2022].

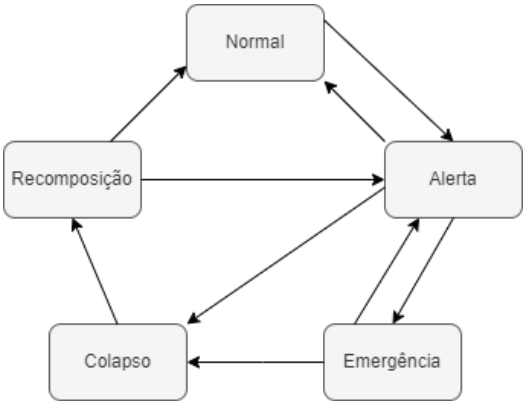


Figura 1: Estados de operação do SEP, adaptado de Kundur e Malik [2022]. Fonte: Própria

No ONS, a estratégia de recomposição divide o sistema em subsistemas com capacidade de se auto-restabelecerem e controlar sua tensão e frequência [Ferreira, 2008]. O controle de tensão pode, assim, colaborar para a recuperação e evitar novas contingências, reforçando a segurança do SIN.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212092
https://proceedings.science/p/212092?lang=pt-br

2.1. IHM para operação da sala de controle

Uma IHM eficaz deve apoiar o processo cognitivo do operador, facilitando a identificação e compreensão de situações anormais e promovendo a consciência situacional [Cyrillo et al., 2022]. No ONS, é fundamental adotar IHMs de alta performance, baseadas em normas como ANSI, ABNT, ISA 101 (projeto de IHMs), ISA 99 (segurança) e ISA 18.2 (alarmes) [Hollifield et al., 2008].

Para alcançar o alto desempenho, recomenda-se o uso limitado de cores, navegação lógica e ausência de animações desnecessárias [ISA, 2016; Rodrigues, 2017]. O *layout* deve refletir o modelo mental do operador, facilitando a percepção, compreensão e antecipação do estado do sistema [Endsley, 1988]. Estas características são essenciais para decisões em ambientes complexos [Hoffman et al., 2005].

O método *Goal-Directed Task Analysis* (GDTA) auxilia na identificação de requisitos para consciência situacional, focando em objetivos, decisões e informações críticas [Hoffman et al., 2005]. No ONS, o operador busca garantir segurança, confiabilidade e eficiência do sistema, sendo o GDTA útil para desenvolver soluções alinhadas às suas necessidades [Cyrillo et al., 2022].

2.2. Módulo SPAS da ferramenta Organon

A ferramenta *Organon* é utilizado para realizar Análises de Segurança Estática e Dinâmica em Tempo Real e tem funcionalidades que auxiliam no Planejamento e Programação da Operação Elétrica [HPPA, 2024]. Ele apresenta diversos módulos para simulações e para a metodologia proposta desse artigo, é utilizado o módulo Sistema de Pré Avaliação de Segurança (SPAS), que realiza a análise preditiva da rede, executando simulações de cenários futuros. Para gerar casos a partir de um caso base, que contenha o estado estimado da rede no horário escolhido, é necessário realizar um modelo de previsão de carga, geração e tensão.

As análises preditivas do Organon permitem antecipar problemas que podem ocorrer em um horizonte de 30 minutos até 2 horas e 30 minutos em relação ao caso base, capacitando os operadores a tomar medidas preventivas. Ou seja, para criar cenários futuros, a ferramenta utiliza informações sobre a rede elétrica e modelos de previsão pré existentes. Com esses dados, ele executa um algoritmo de fluxo de potência ótimo (FPO), otimizando a operação da rede ao considerar custos, geração e demanda, simulando novos cenários que irão representar condições operacionais previstas.

Para a criação dos cenários previstos, os modelos para carga, geração e tensão podem ser:

1. Dados da carga: é possível selecionar o caso de referência, que utiliza como base os valores dos dados estimados no horário definido, ou nas previsões de carga (Previsor de Curtíssimo Prazo (PCCP)), ou ainda pelas modelagens definidas por área de controle na Programação Diária de Produção (PDP). O PCCP é atualizado a cada 10 minutos e fornece previsões para as próximas 48 horas, com intervalos de 10 minutos. Já o PDP é definido no dia anterior e utiliza intervalos de 30 minutos.

2. Dados de geração: Pode-se optar pelo caso de referência ou utilizar os dados provenientes do PDP;

3. Perfil de tensão: é possível escolher entre o caso de referência, o perfil *flat start* ou o *mixed*. No *flat start*, as tensões são inicialmente consideradas como 1 pu (por unidade). Já no formato *mixed*, as barras do tipo PV começam com o valor de referência, enquanto as demais são definidas como 1 pu.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212092
https://proceedings.science/p/212092?lang=pt-br

2.3. SALCT

O Sistema de Apoio à Manobra de Linha para o Controle de Tensão (SALCT) é uma ferramenta *web* desenvolvida para auxiliar os operadores do SIN na tomada de decisões sobre o controle de tensão. Antes, utilizavam-se planilhas em VBA conectadas a bancos de dados, com guias múltiplas e esquema de cores automático para indicar as barras mais impactadas pelo desligamento de linhas da rede.

A ferramenta automatiza a coleta de resultados do Organon para simulações que mostram a variação da tensão nas barras em contingências estáticas, como desligamento ou religamento de linhas de transmissão (LT). Seu uso é mais frequente em períodos de carga leve e em cenários com alta geração fotovoltaica e eólica, que exigem manobras frequentes.

Com base nas variações simuladas, o SALCT exibe tabelas que destacam as barras mais impactadas por cada manobra, permitindo ao operador escolher a LT de desligamento que mantenha a estabilidade do sistema e a tensão dentro dos limites operacionais.

A implementação web trouxe ganhos em relação ao modelo anterior, com consultas em tempo real e resultados organizados em uma única página.

3. Metodologia Proposta

A aplicação preditiva, inexistente na versão em planilhas, permite visualizar variações de tensão em um horizonte de 30 minutos, com requisitos de IHM de alto desempenho e atendendo às demandas dos operadores em TR do ONS. Para isso, o *software* Organon processa um caso base gerado pelo estimador de estados do Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia (SAGE).

A metodologia foi dividida em três etapas:

(1) estudo e entrevistas com a técnica GDTA para compreender a consciência situacional;

(2) desenvolvimento do *backend* e *frontend* da aplicação; e

(3) validação dos resultados com os operadores na sala de controle.

A implementação utilizou o *Visual Studio Code* [Microsoft, 2025], linguagem Python e o *framework* Dash [Plotly, 2025], que facilitou a manipulação e visualização dos dados.

3.1. Aplicação do método GDTA

O método GDTA foi aplicado por meio de entrevistas para analisar a consciência situacional nos processos de tomada de decisão. Segundo Cyrillo et al. [2022], é essencial envolver operadores de diferentes níveis de experiência para ampliar a visão do estudo.

As entrevistas, conduzidas pelo ONS, permitiram identificar objetivos gerais, principais e sub-objetivos relacionados ao controle de tensão. O estudo ressaltou a importância de ações preventivas, como manter tensões e carregamentos dentro de limites, gerenciar intervenções e recompor a transmissão em ocorrências. Tais medidas garantem estabilidade e eficiência ao sistema elétrico e orientaram o desenvolvimento da IHM de alto desempenho [Cyrillo et al., 2022].

Dentro do escopo deste trabalho, foram realizadas entrevistas em todos os centros de operação do ONS, seguindo o estudo de Cyrillo et al. [2022]. As perguntas, baseadas no método GDTA, buscaram compreender as necessidades dos operadores para o desenvolvimento de sistemas de apoio ao controle de tensão, com foco na consciência situacional e na identificação de objetivos e subobjetivos relacionados ao controle de tensão. Detalhes adicionais das entrevistas estão em Cavalcante [2023].

Nas entrevistas foram definidas as melhores abordagens para desenvolver a interface que atenda às necessidades relacionadas ao controle de tensão. Os resultados mostraram que os operadores poderão identificar violações de tensão com maior precisão, evitando manobras desnecessárias. Além disso, o sistema preditivo pode proporcionar maior sensibilidade para determinar o momento ideal de desligar ou religar linhas, permitindo um planejamento antecipado das decisões operacionais.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212092
https://proceedings.science/p/212092?lang=pt-br

3.2. Criação de cenários preditivos no SPAS

Nesta etapa, o Organon oferece uma interface para selecionar os parâmetros a serem considerados na predição. Alguns dos parâmetros configuráveis são: Modelo de dados da carga; Modelos de dados de geração; Dados de fontes renováveis; e Perfil de tensão. Também é possível definir o horário inicial e final do cenário, com base na data do arquivo de estimação de estados, escolhendo um intervalo de previsão que varia de 30 minutos a 2 horas e 30 minutos. Os dados do arquivo de caso base, inseridos na fase inicial, passam por uma verificação de convergência no processo de fluxo de potência, utilizando o método de Newton-Raphson. Após essa etapa, é gerado um arquivo detalhado com informações da rede elétrica, incluindo dados sobre unidades geradoras, linhas de transmissão, barras e outros elementos. O arquivo de previsões, utilizado como entrada, contém dados de previsão eólica, de carga, equipamentos sob intervenção, programação de geração e elos por patamar para o restante do dia. Esse arquivo referencia a estimação de 30 minutos à frente, utilizando a topologia do estimador e aplicando os dados de previsão para gerar um cenário preditivo com informações detalhadas da rede.

Após a verificação de convergência e com a atribuição dos parâmetros de carga, geração e perfil de tensão, além da leitura dos demais arquivos, como os de topologia da rede, é executado o algoritmo de FPO. O FPO considera a carga como restrição, ajustando os valores de tensão e geração das usinas para atender suas especificações, até atingir o objetivo. Após o FPO, é confirmada a convergência [HPPA, 2024].

Vale ressaltar que a implementação no SALCT, realizada no presente trabalho, automatizou a execução do SPAS do Organon para todos os cenários de desligamento. A metodologia permite que o operador possa prever o impacto nas tensões das barras ocasionado pelo desligamento ou religamento de cada LT, em tempo real, utilizando a previsão de 30 minutos à frente.

3.3. Comparação entre SALCT de tempo real e preditivo

No SALCT de tempo real não é utilizado o módulo SPAS do Organon, sendo utilizado apenas a verificação de convergência dos dados estimados para a manobra de linha no tempo real, através do fluxo de potência. Dessa forma, pode-se obter as tensões nas barras com a simulação de contingência de abertura ou fechamento de linhas, calculando a diferença da tensão de pré e pós manobra.

No SALCT com preditivo, ao invés de comparar com o arquivo de estimação de estados (caso base), é utilizado o arquivo com informações da rede elétrica do cenário de 30 minutos à frente, aquisitado pelo módulo SPAS do Organon. Após uma verficação de convergência desse arquivo, são aplicados os modelos de previsão dos parâmetros para a criação do cenário preditivo. Após a simulação, o FPO dará como resultado um arquivo com as tensões esperadas. Dessa forma as diferenças de tensão no cenário de 30 minutos à frente podem ser comparadas com o estado da rede com e sem manobra.

4. Resultados

A Figura 2 exibe com melhor compreensão um resumo da arquitetura geral integrada da ferramenta, tal qual a parte da aplicação preditiva é apresentada em destaque na cor azul.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212092
https://proceedings.science/p/212092?lang=pt-br

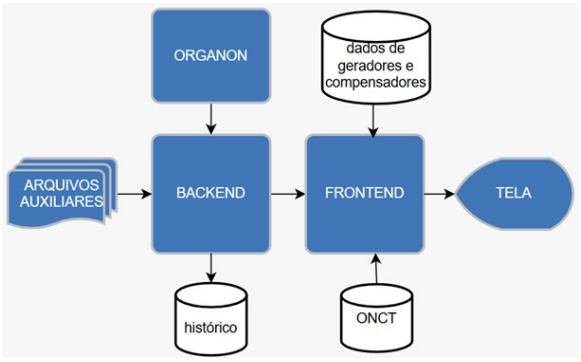


Figura 2: Arquitetura geral do SALCT, com destaque da aplicação preditiva. Fonte: Própria

Na Figura 2 o bloco arquivos auxiliares se refere à planilhas que são atualizadas por outro programa com os nomes de linhas e barras da rede elétrica. O bloco histórico se refere à um banco de dados que armazena as informações do SALCT ao longo do tempo. O bloco ONCT (Operação Normal de Controle de Tensão) se refere à um banco de dados que apresenta as linhas disponíveis para manobra. Por fim, o bloco da base de dados de geradores e compensadores tem o objetivo de apresentar o impacto nesses equipamentos com a manobra da linha.

4.1. *Backend* da ferramenta preditiva no SALCT

Com o propósito de aprofundar a compreensão do *backend* do SALCT com a implementação do modelo preditivo, são apresentados dois fluxogramas que resumem o procedimento atual por meio de elementos gráficos em forma de blocos. Na Figura 3, é descrito o SALCT de tempo real, com a inclusão do bloco 3 que foi desenvolvido com recursos para simulação do SALCT preditivo ilustrado no fluxograma da Figura 4. Deve-se ressaltar que a versão do SALCT de tempo real foi implementada anteriormente, portanto é importante apresentá-la considerando que a versão preditiva utiliza recursos e procedimentos da versão anterior.

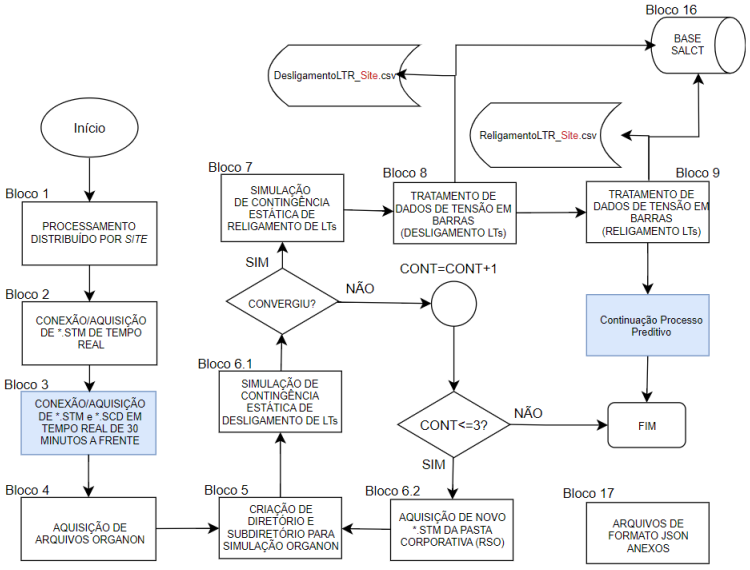


Figura 3: Fluxograma do processo resumido do *backend* - tempo real. Fonte: Própria

Bloco 1: Processamento Distribuído por Site - O programa se divide para promover simulações considerando arquivo de estimação de estados de cada centro de operação, como o

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212092
https://proceedings.science/p/212092?lang=pt-br

de Brasília, de Florianópolis, de Recife e do Rio de Janeiro.

Bloco 2: Conexão/Aquisição do arquivo de estimação de estados (STM) em Tempo Real - Conexão com o Ambiente Organon de Tempo Real para aquisição do arquivo STM mais recente. A cada 1 minuto o programa SALCT busca novos arquivos, para manter atualizado em tempo real.

Bloco 3: Aquisição de arquivo STM de 30 minutos a frente pelo módulo do SPAS. Com a simulação do Preditivo, também é obtido o arquivo de modelagens de previsões que são atribuídos aos parâmetros de carga, geração e perfil de tensão. Para os arquivos da simulação do preditivo, é necessário identificar 30 minutos a frente.

Bloco 4: Aquisição de Arquivos Organon - Em uma pasta não versionada chamada se encontra um subdiretório com arquivos essenciais base para a simulação Organon adequada. Entre esses arquivos, estão os que possuem a inserção de alguma barra nova a ser monitorada para verificar a variação de tensão, os de inserção/exclusão de alguma LT candidata a abertura em IO, entre outros arquivos que contribuem para rodar uma simulação mais atual.

Bloco 5: Criação de Diretório e Subdiretório para Simulação Organon - Dentro de uma pasta chamada *output* há um subdiretório Tempo Real com os resultados de simulação. Esse diretório é criado de forma a garantir a sua unicidade. Dentro de cada uma dessas pastas que possuem em seu nome o horário vigente, há ainda a outras subpastas criadas para abertura e fechamento de linha em tempo real.

Bloco 6.1: Simulação Contingência Estática de Desligamento de LTs - Etapa de simulação voltada para os casos de desligamento de LTs que se encontram sincronizadas nos arquivos de estimação de estados e que sejam candidatas à abertura na IO. As linhas escolhidas são alocadas em um arquivo no SALCT para identificação, são apenas as linhas que podem ser manobradas em instruções de operação. Essa etapa é onde se aplica o arquivo de contingências junto com os arquivos de casos estimados do tempo real para simulação.

Bloco 6.2: Nesta etapa que é vinculada ao bloco 6.1, o código passa a verificar se os arquivos de estimação gerados são convergentes via Organon antes de aplicar a simulação com a contingência estática.

Bloco 7: Simulação de Contingência Estática de Religamento de LTs - Semelhante ao bloco 6.1, mas com a simulação voltada para os casos de religamento de LTs.

Bloco 8: Tratamento de Dados de Tensão em Barras, pelo desligamento de LTs - Tratamento dos dados de simulação e geração de um arquivo com o formato específico para leitura do *frontend*. Esse arquivo relaciona as linhas com as barras que foram mais influenciadas com a manobra e os seus valores de tensão. Nesse ponto há a criação do "DesligamentoLTR_Site.csv".

Bloco 9: Tratamento de Dados de Tensão em Barras, pelo religamento de LTs - Semelhante ao bloco 8 para o religamento de LTs. Criação do arquivo "ReligamentoLTR_Site.csv".

Bloco 10: Criação de Diretório e Subdiretório para Simulação Organon - Semelhante ao bloco 5, mas dentro de cada uma das pastas com o horário vigente também há a criação de subpastas para abertura e fechamento de LT na versão preditivo de 30 minutos a frente.

Bloco 11.1: Simulação de Cenários e Criação do Arquivo do tipo NTW - Etapa de simulação via script no Organon de cenários para criar o arquivo NTW, este que configura a rede do futuro (através do SPAS). Para essa etapa é necessário ter a convergência do arquivo de estimação dos dados. Nesse bloco é onde ocorre a simulação do sistema em 30 minutos à frente, sem contingência.

Bloco 11.2: Nesta etapa que é vinculada ao bloco 11.1, o código passa a verificar se os arquivos de estimação gerados são convergentes via Organon antes da simulação de cenários.

Bloco 12: Simulação de Contingência Estática de Desligamento de LTs - Simulação voltada para os casos com contingência de desligamento de LTs em um cenário de 30 minutos à frente,

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212092
https://proceedings.science/p/212092?lang=pt-br

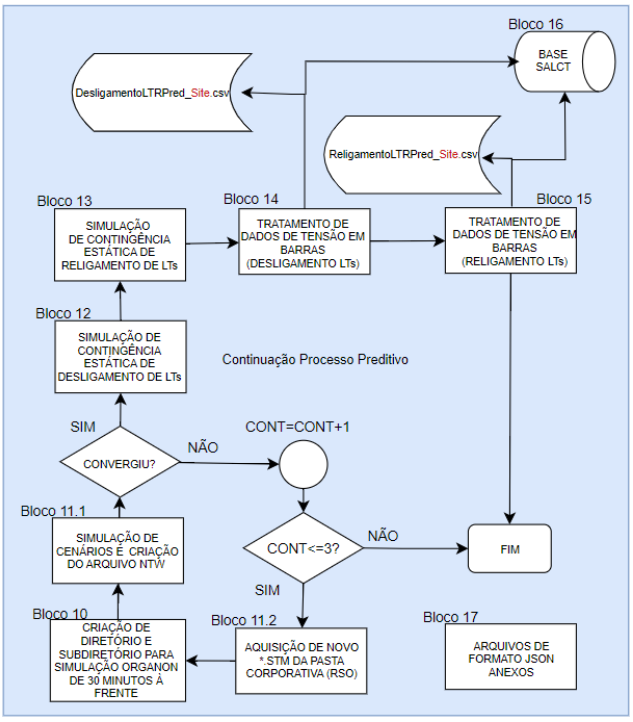


Figura 4: Fluxograma do processo resumido do *backend* - preditivo. Fonte: Própria

estas que sejam candidatas à abertura na IO.

Bloco 13: Simulação de Contingência Estática de Religamento de LTs - Realiza o mesmo que o bloco 12, mas ao invés da simulação de desligamento, será para religamento das LTs.

Bloco 14: Tratamento de Dados de Tensão em Barras, pelo desligamento de LTs - Semelhante ao bloco 8, mas para versão do SALCT preditivo, que é o "DesligamentoLTRPred_Site.csv". Nessa etapa, ocorre a separação das barras mais impactadas e o tratamento existente é a diferença da tensão na barra impactada com e sem o desligamento da LT, no horizonte de 30 minutos à frente.

Bloco 15: Tratamento de Dados de Tensão em Barras, pelo religamento de LTs - Semelhante ao bloco 14, gerando o "ReligamentoLTRPred_Site.csv".

Bloco 16: Cadastro em Base de Dados do SALCT - Armazenamento dos resultados em base de dados condizente, as informações de variações de tensão, potência reativa, entre outros. O principal objetivo dessa base de dados históricos é para uma proposta de evolução como auxílio na tomada de decisão e futuras análises sobre o funcionamento da ferramenta.

Bloco 17: Arquivos do tipo JSON - O sistema escreve paralelamente arquivos *JavaScript Object Notation* (JSON) para consumo do *frontend*. Esse padrão de arquivo é utilizado para transferir informações entre sistemas, no qual contém uma série de dados estruturados em formato texto, como por exemplo os parâmetros utilizados para simulação que podem ser descritos nele e serem consumidos na compilação do código.

Essas variações de tensões aquisitadas do bloco 14 e 15 são exibidas no *frontend* do SALCT. Para cada linha a ser desligada, são apresentadas as barras mais afetadas pela variação da tensão.

4.2. *Frontend*

A partir de estudos de uma IHM de alto desempenho, definida a partir do estudo de normas e do método de GDTA, foi definido o *Frontend* do SALCT, como apresentado na Figura 5.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212092
https://proceedings.science/p/212092?lang=pt-br



Figura 5: Tela do desligamento preditivo das linhas. Fonte: Própria

Algumas características dessa tela como uma IHM de alto desempenho, são:

- Sua interface possui a visualização por tabulares que é uma forma de visualizar diversos dados em conjunto e de forma organizada.

- É uma plataforma simples de manusear e intuitiva, pois possui uma navegação lógica, evitando que o operador percorra diversas telas para conseguir visualizar o que deseja.

- Além disso, possui um *design* monocromático e padronizado, com os valores das medidas em cor branca. Apesar de não ser colorida, destaca-se do fundo de tom azul escuro sendo fácil de identificá-las.

- As cores diferentes de azul e branco, como o roxo, vermelho, amarelo, são usadas como alarme. É de suma importância que o operador consiga identificar com rapidez, destacando essa condição na tela praticamente monocromática.

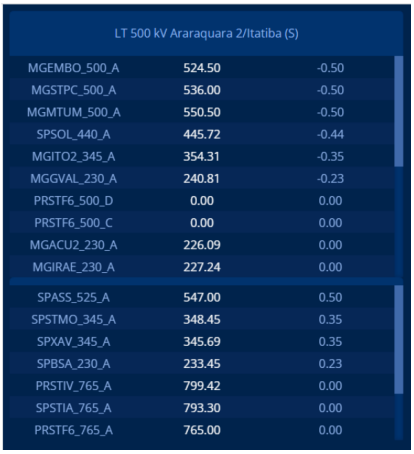
A Figura 6 demonstra um dos tabulares exibidos, referente à uma das linhas de transmissão na tela do desligamento preditivo, para 30 minutos à frente, que foi o tempo escolhido para a análise.

Ainda no *frontend* o operador pode selecionar a visualização no centro de operação desejado, além de escolher se deseja visualizar a partir da contingência de desligamento ou religamento da LT.

4.3. Validação dos resultados

Como validação dos resultados obtidos com a predição, foi comparado o resultado da simulação em tempo real com o preditivo (que prevê 30 minutos à frente) de 30 minutos antes. Para isso foi utilizada a métrica de Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE) que busca avaliar a precisão de previsões, expressando o erro em porcentagem para permitir comparações entre diferentes métodos de previsão. O cálculo do MAPE é descrito em (1), onde n é o número total de observações, y_i representa o valor real na i-ésima observação e p_i, o valor previsto ou obtido pelo modelo na i-ésima observação. Um resultado do MAPE pequeno indica que as previsões estão próximas dos valores observados, indicando precisão no modelo utilizado. Por outro lado, um

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212092
https://proceedings.science/p/212092?lang=pt-br



LT 500 kV Araraquara 2/Itatiba (S)		
MGEMBO_500_A	524.50	-0.50
MGSTPC_500_A	536.00	-0.50
MGMTUM_500_A	550.50	-0.50
SPSOL_440_A	445.72	-0.44
MGITO2_345_A	354.31	-0.35
MGGVAL_230_A	240.81	-0.23
PRSTF6_500_D	0.00	0.00
PRSTF6_500_C	0.00	0.00
MGACU2_230_A	226.09	0.00
MGIRAE_230_A	227.24	0.00
SPASS_525_A	547.00	0.50
SPSTMO_345_A	348.45	0.35
SPXAV_345_A	345.69	0.35
SPBSA_230_A	233.45	0.23
PRSTIV_765_A	799.42	0.00
SPSTIA_765_A	793.30	0.00
PRSTF6_765_A	765.00	0.00

Figura 6: Exemplo de tabela no preditivo do SALCT de uma das linhas a ser desligada. Fonte: Própria

MAPE alto sugere que as previsões estão distantes dos valores reais, sinalizando a necessidade de melhorias no modelo.

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{y_i - p_i}{y_i}\right| \times 100\% \tag{1}$$

A Tabela 1 apresenta as tensões finais de cada barra que foi influenciada pelo desligamento de uma LT, além de manipulações para o cálculo do MAPE. A quarta coluna de cada combinação exibe a variação entre o módulo da tensão final real (V_f) e a tensão final preditiva (V_f') de cada barra, normalizada pela tensão final real (V_f). A partir deste cálculo é possível visualizar o quanto o preditivo está se aproximando do que realmente está para acontecer. Esse estudo foi feito antes da implementação em tela, para confirmar o bom funcionamento da ferramenta, de forma a garantir a segurança do sistema elétrico.

Tabela 1: Manipulação da tensão final para o cálculo do MAPE para carga com modelo PCCP, geração de referência e perfil de tensão de referência.

Barras Influenciadas	$V_f(real)$	$\lvert V_f - V_f' \rvert$	$\frac{\lvert V_f - V_f' \rvert}{V_f}$
SCUHIT_525_A	546,5	8,5	0,0156
SCYTA_525_A	546,5	8,5	0,0156
RSCAX_525_A	539	9,5	0,0176
RSSTA_525_A	543	2	0,0037
...	...	...	...

Com esses dados, foi realizada a soma dos resultados descritos na quarta coluna da Tabela 1 e dividindo pelo total de resultados. Essa análise gera uma métrica de avaliação para cada modelo de previsão em relação aos parâmetros do SPAS. Para compreensão dos cálculos, a Tabela 1 representa um dos resultados de todas as combinações de modelos que foram calculados, enquanto a Tabela 2 permite identificar o melhor método a ser aplicado na versão preditiva do SALCT, com base na combinação de menor MAPE. Nessa Tabela, a primeira coluna indica os parâmetros C, G e T, correspondentes à carga, modelos de geração e perfis de tensão.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212092
https://proceedings.science/p/212092?lang=pt-br

Tabela 2: MAPE dos resultados referente ao preditivo do caso da LT Caxias/Itá.

Combinações de parâmetros	MAPE
C - PCCP, G - Referência, T - Referência	1,12%
C - PDP, G - Referência, T - Referência	1,12%
C - PCCP, G - PDP, T - Referência	1,06%
C - PDP, G - PDP, T - Referência	1,06%
C - Referência, G - PDP, T - Referência	1,06%
C - Referência, G - Referência, T - Referência	1,12%
C - PCCP, G - Referência, T - Flat Start	2,26%
C - PDP, G - Referência, T - Flat Start	2,26%
C - PCCP, G - PDP, T - Flat Start	2,24%
C - PDP, G - PDP, T - Flat Start	2,24%
C - Referência, G - PDP, T - Flat Start	2,24%
C - Referência, G - Referência, T - Flat Start	2,26%
C - PCCP, G - Referência, T - Mixed	2,11%
C - PDP, G - Referência, T - Mixed	2,11%
C - PCCP, G - PDP, T - Mixed	2,35%
C - PDP, G - PDP, T - Mixed	2,35%
C - Referência, G - PDP, T - Mixed	2,35%
C - Referência, G - Referência, T - Mixed	2,11%

Conforme a Tabela 2, o MAPE variou entre 1,06% e 2,35%. A combinação com melhor desempenho foi: Carga em qualquer modelagem, Geração como PDP e perfil de Tensão como Referência, definida como a mais adequada para o backend no cenário em teste. A diferença entre carga PDP e referência mostrou-se pequena diante da escala do sistema, permanecendo em valores decimais pouco representativos para impactar os resultados.

4.4. Aquisição de *feedbacks* com o método GDTA

O GDTA recomenda coletar *feedbacks* em diferentes fases do desenvolvimento da ferramenta. Após a implementação e uso da aplicação proposta, foram realizadas entrevistas para validação, das quais destacam-se duas respostas:

1 - Um operador destacou que aprecia a IHM atual pelas cores confortáveis, intuitividade, facilidade de uso e boa organização das informações.

2 - Outro operador ressaltou o valor de poder visualizar o que está previsto no momento e relacionar com tendências já utilizadas.

Mais detalhes sobre a entrevista podem ser consultados em Cavalcante [2023].

5. Conclusão e Trabalhos Futuros

Os *feedbacks* mostraram que compreender a consciência situacional dos operadores é essencial para o desenvolvimento de IHMs eficientes, devendo ser considerada em todas as ferramentas. A aplicação preditiva no SALCT demonstrou potencial para melhorar a gestão do sistema elétrico. Embora ainda em testes, recebeu avaliações positivas, sendo reconhecida como apoio para antecipar ações de controle e auxiliar na decisão com 30 minutos de antecedência.

Com a solução preditiva, o operador passa a contar, além de seu conhecimento tácito, com informações adicionais que aumentam a confiabilidade de sua decisão. Os resultados destacam a necessidade de validação contínua, devido a possíveis discrepâncias na modelagem da carga. A combinação mais próxima do cenário real, com menor MAPE, utilizou a geração programada (PDP)

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212092
https://proceedings.science/p/212092?lang=pt-br

e a tensão de referência. Conclui-se que a aplicação no SALCT contribui para o controle de tensão e a estabilidade do SIN.

Como trabalhos futuros, sugere-se uma análise prévia do MAPE baseada nas condições atuais do sistema, identificando automaticamente a melhor combinação de modelos. Hoje, o backend utiliza de forma fixa a combinação com menor MAPE entre as avaliadas neste estudo.

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha gratidão a Eng. Luiz Cláudio de Araújo Ferreira, D.Sc., pelo compartilhamento de seu conhecimento e pelo apoio durante a elaboração deste trabalho.

Referências

Cavalcante, G. B. (2023). Desafios para o controle de tensão em tempo real: uma solução para as equipes de operação do ons. Disponível em: https://app.uff.br/riuff;handlse/handle/1/31655.

Cyrillo, Y., Alves, J., Conceição, R., Arcos, R., e Nascimento, G. (2022). Ampliando a consciência situacional nas salas de controle: Dos requisitos à gestão da mudança. In *XVII EDAO - Encontro para Debates de Assuntos de Operação*.

Endsley, M. R. (1988). Design and evaluation for situation awareness enhancement. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 32(2):97–101.

Ferreira, L. C. d. A. (2008). *Análise a Longo-Termo da Estabilidade de Tensão Utilizando Métodos Estáticos e um Sistema Especialista Fuzzy para Representação de Ações de Controle*. PhD thesis, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil.

Hoffman, R. R., Crandall, B., Klein, G., Jones, D. G., e Endsley, M. R. (2005). Protocols for cognitive task analysis. URL `https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA475456.pdf`. Acesso em: 10 jan. 2025.

Hollifield, B., Habibi, E., Oliver, D., e Nimmo, I. (2008). *The High Performance HMI Handbook: A Comprehensive Guide to Designing, Implementing and Maintaining Effective HMIs for Industrial Plant Operations*. Plant Automation Services, Inc., Rio de Janeiro, 1 edition. 206 páginas.

HPPA. *ORGANON: User Guide*, July 2024.

ISA, D. . G. S. (2016). Introdução à norma isa-101: Interfaces homem-máquina. URL `http://isasp.org.br/wp-content/uploads/2020/01/ISA-101-III-Simp%C3%B3sio-ISA-S%C3%A3o-Paulo-Sabesp-Nov2016.pdf`.

Kundur, P. S. e Malik, O. P. (2022). *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill Education, 2 edition.

Microsoft (2025). Code editing. redefined. URL `https://code.visualstudio.com/`.

ONS (2023). Procedimentos de rede vigentes. URL `https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes`.

Plotly (2025). Dash enterprise. URL `https://plotly.com/dash/`.

Rodrigues, A. C. (2017). Boas práticas para desenvolvimento de aplicações scada. URL `https://isasp.org.br/wp-content/uploads/2020/01/ISA_boas-praticas_SCADAPIMS-2017.pdf`.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212092
https://proceedings.science/p/212092?lang=pt-br