



Inovações na Proteção de Sistemas Elétricos: Algoritmos de Seletividade, Ocorrências e Abertura Simultânea

Tema: Sistemas de Controle, Automação e Proteção

Autores: Julio Cezar Bulgaroni de Lisboa

Co-Autores: Leidiane Pereira Neves

Empresa: Enel Distribuição São Paulo

Resumo

Este trabalho tem como objetivo apresentar três automatismos sistêmicos, com algoritmos distintos que avaliam o resultado do estudo de proteção do sistema de distribuição de energia na grande São Paulo, que realizam a análise de um alimentador com o propósito de determinar sua coordenação e seletividade, avaliando cada equipamento de proteção integrado ao sistema de distribuição de energia, gerando também indicadores importantes de performance dos equipamentos e inputs para o plano de manutenção.

A importância de um sistema coordenado e seletivo é amplamente reconhecida, uma vez que impacta diretamente os indicadores de continuidade controlados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), através do módulo 8 do PRODIST. Além disso, influencia o tempo necessário para localizar defeitos e, por conseguinte, o tempo de restabelecimento de energia, bem como os custos operacionais envolvidos.

Ao longo deste trabalho, exploraremos em detalhes os algoritmos denominados Check de Seletividade, Check de Ocorrências e Check de Abertura Simultânea, que se mostram fundamentais para a resolução ágil e precisa dos problemas de seletividade e coordenação na proteção dos alimentadores. Esses checks permitem analisar múltiplas ocorrências de forma automatizada, algo que seria inviável manualmente, otimizando o tempo de análise e agilizando o diagnóstico de falhas. Assim, a análise desses algoritmos nos permitirá compreender como eles contribuem para a eficiência dos processos de estudos de proteção, garantindo um fornecimento de energia mais confiável para os consumidores.

1. Introdução

Ao longo dos anos, a Enel Distribuição São Paulo (EDSP) tem se empenhado em melhorar a confiabilidade do sistema de proteção, alinhando-se com as metas e resoluções estabelecidas pela ANEEL. Para isso, a EDSP gerencia aproximadamente mais de 37.500 dispositivos de proteção, incluindo Religadores Trifásicos (9.770 pontos), Chaves Automáticas (799 pontos), Religadores Monofásicos (2.508 pontos), Bases Fusíveis (23.959 pontos) e Seccionalizadores Automáticos (1.471 pontos).

Para facilitar a gestão desses dispositivos e garantir agilidade no processo de parametrização, foram implementados ajustes padronizados de proteção para as religadoras e chaves automáticas. Essa padronização permite uma análise mais eficiente das ocorrências, reduz erros de ajustes e otimiza o desempenho dos equipamentos, com configurações específicas para cada localização no alimentador.

Como parte desse avanço, a EDSP desenvolveu dois algoritmos cruciais: o Check de Seletividade e o Check de Ocorrências. O primeiro, Check de Seletividade, identifica equipamentos não coordenados com os ajustes padrões de proteção e toma medidas corretivas para garantir a coordenação dos dispositivos. O segundo, Check de Ocorrências, verifica se o equipamento aberto durante uma ocorrência é o primeiro a montante do ponto de defeito. Se não for, ele é submetido a uma análise detalhada pela equipe de Proteção da EDSP. Já o terceiro, Check de Abertura Simultânea, detecta se houve abertura simultânea por proteção entre equipamentos de telecontrole (RA, CA e DJ).

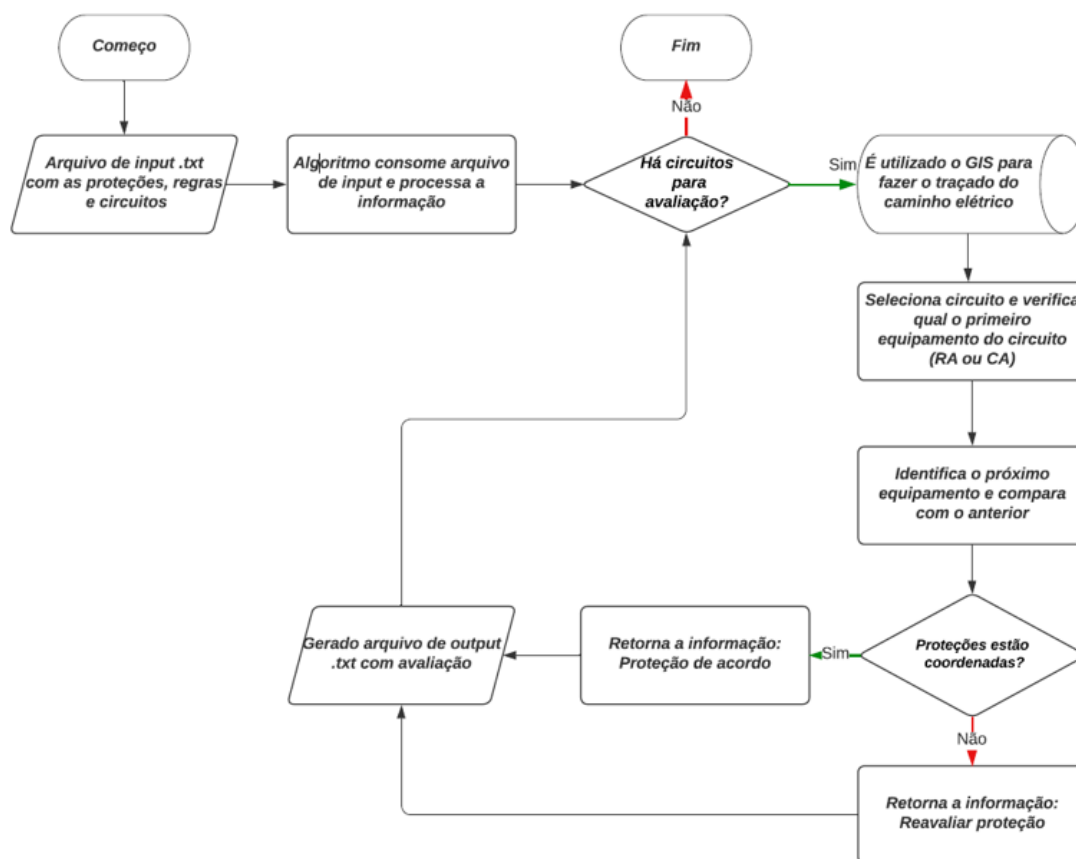
Essas inovações reforçam o compromisso da EDSP com a confiabilidade e a continuidade do serviço, oferecendo uma rede de distribuição mais segura e eficiente. A implementação desses algoritmos representa um salto significativo na proteção elétrica, impactando diretamente a qualidade do serviço prestado. Convidamos você a prosseguir com a leitura para descobrir como essas soluções inovadoras contribuem para a excelência operacional da EDSP e aumentam a resiliência da rede, trazendo benefícios tangíveis para todos os consumidores.

2. Desenvolvimento

2.1 Check de Seletividade

A equipe de Proteção da EDSP desenvolveu um algoritmo com o objetivo de avaliar se as proteções do alimentador estão seletivas e coordenadas. Atualmente, essa análise é realizada tanto para o alimentador tronco (trecho de rede que parte da subestação de distribuição e alimenta diversos ramais) quanto para o alimentador ramal.

Para o funcionamento do Check de Seletividade, o algoritmo requer o caminho elétrico do alimentador, informações sobre o tipo de proteção atual para cada equipamento e dados de combinações permitidas, listando todas as configurações de proteção possíveis. Abaixo um fluxograma demonstrando o processo de análise do algoritmo:



Fluxograma 1 - Processo de Avaliação entre equipamentos

Utilizando a ferramenta GIS (Geographic Information System, GE Smallworld Electronic Office), o algoritmo encontra o primeiro equipamento de proteção do circuito, em nosso caso, a religadora RA1. Seguindo o caminho elétrico, após identificar RA1, o algoritmo continua até encontrar a próxima RA ou CA, identificando então o equipamento RA2.

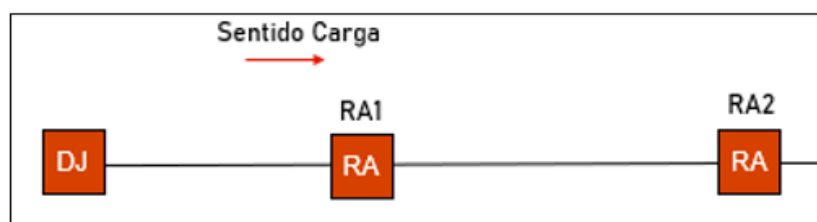


Figura 1 - RA2 segundo equipamento do circuito

Ao localizar os equipamentos RA1 e RA2, o algoritmo consulta no servidor o tipo de proteção atual e futura desses equipamentos.

Número do Equipamento	Proteção Atual	Proteção Futura
RA1	R0601	Não há
RA2	R0301	Não há

Tabela 1 - Proteções de RA1 e RA2

Para concluir a análise e verificar se as proteções de RA1 e RA2 são compatíveis — ou seja, se estão coordenadas e seletivas —, o algoritmo utiliza uma lista com todas as combinações permitidas de proteção.

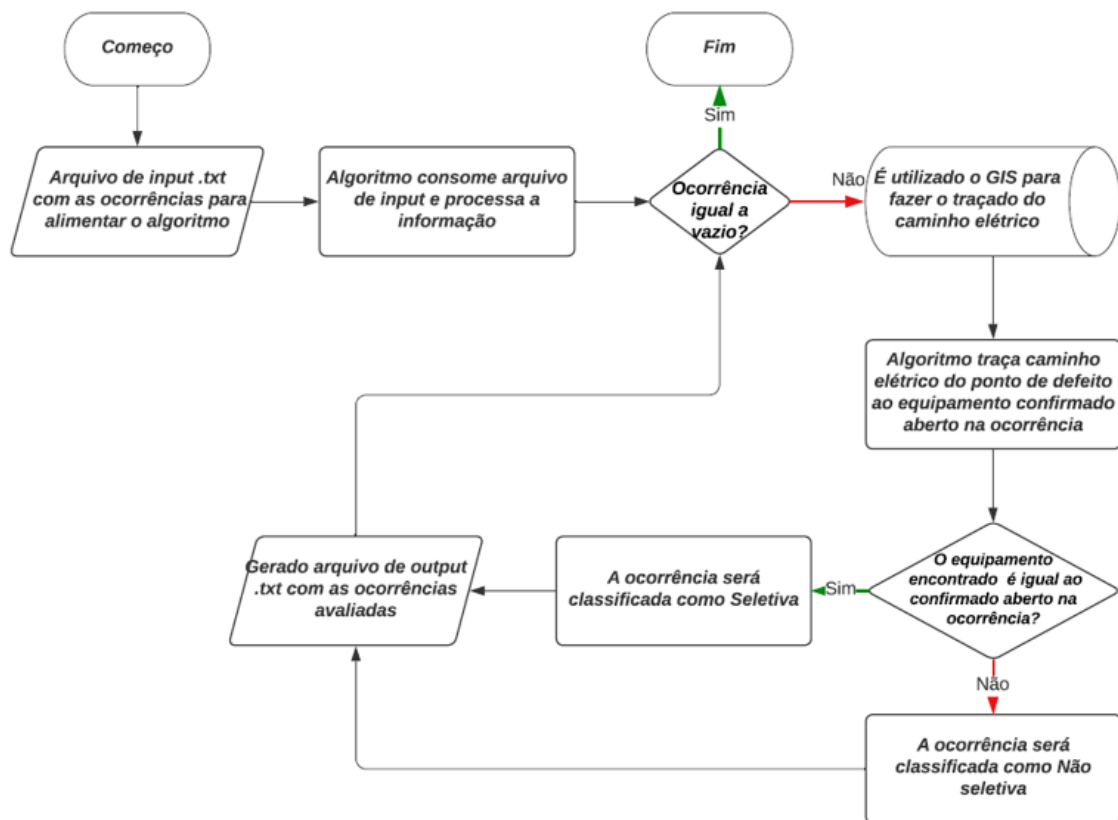
Proteção RA1	Condição Adicional RA1	Proteção RA2	Condição Adicional RA2
R0601	Distância do DJ > 2,5km	R0201	Não há
R0601	Distância do DJ > 2,5km	R0301	Não há
R0601	Distância do DJ > 2,5km	R0501	Não há
R0601	Distância do DJ > 2,5km	R0701	Não há
R0601	Distância do DJ > 2,5km	R0801	Não há
R0601	Distância do DJ > 2,5km	R1001	Não há
R0601	Distância do DJ > 2,5km	R1501	Não há
R0601	Distância do DJ > 2,5km	C0214	Não há

Tabela 2 - Lista com possibilidades entre Proteções

Conforme mostrado na tabela acima, o algoritmo analisou as proteções de RA1 e RA2 e confirmou que são compatíveis, conforme indicado na tabela de possibilidades (em destaque em negrito). Isso significa que as proteções não entrarão em conflito, garantindo seletividade entre elas. Como resultado, o algoritmo gera um log com o texto “Proteções em acordo”.

2.2 Check de Ocorrências

O algoritmo criado no “Check de Ocorrências” é um método eficaz para determinar se uma ocorrência foi seletiva ou não seletiva. O algoritmo compara o equipamento que foi confirmado aberto em campo com o ponto do defeito, se o equipamento confirmado aberto for o primeiro equipamento a montante do ponto de defeito, a ocorrência será seletiva. Abaixo um fluxograma demonstrando o processo de análise do algoritmo:



Fluxograma 2 - Processo de Avaliação

É realizado uma extração com todas as ocorrências primárias do sistema Power On (sistema de gestão de ocorrências, GE Smallworld Eletronic Office), do mês que servirá como dados de input para que o algoritmo possa consumir e prosseguir com as análises. Para este algoritmo também foi utilizado o GIS para traçar o caminho elétrico.

Na tabela abaixo vemos quais são estes dados de 'input' que são consumidos pelo algoritmo:

EVENTO	CAUSA	SUB CAUSA	CONFIRMADO ABERTO	DATA	PONTO DO DEFEITO
11757772-1	201	10	RA3143163	29/06/2023	5481509

Tabela 3 - Dados de input consumidos pelo algoritmo

Ao processar esta informação, o algoritmo avalia o equipamento confirmado aberto com o campo ponto do defeito, e caso eles sejam os mesmos, a ocorrência é classificada como Seletiva. Contudo, caso o equipamento indicado no ponto de defeito seja diferente, o algoritmo verifica através da ferramenta trace, qual é o equipamento de proteção a montante mais próximo do local descrito no ponto de defeito.

Abaixo interpretaremos as informações trazidas pelo algoritmo:

EVENTO	CIRCUITO	CONFIRMADO ABERTO	ID PONTO DO DEFEITO	PONTO DO DEFEITO	EQUIP. A MONTANTE	RESULTADO
11757772	LAP 0107	RA3143163	CONDUTOR	5481509	RA3143163	Seletivo

Tabela 4 - Dados de output trazidos pelo algoritmo

Primeiramente, o algoritmo identifica a localização do ponto de defeito - 5481509, extraída de sistema Power On, após isso é utilizado a ferramenta trace para identificar o equipamento que está a montante do trecho de rede ou do equipamento sem função de proteção (chaves de manobras e faca fusível). Neste caso, o equipamento RA3143163 é encontrado, em seguida, o algoritmo compara o equipamento encontrado com o equipamento confirmado aberto, onde podemos concluir que se trata de uma ocorrência seletiva pois ambos os equipamentos são iguais.

Na imagem abaixo podemos ilustrar a fim de compreender melhor as informações passadas acima, mostrando a RA3143163 como confirmado aberto. O ponto de defeito dado, se trata de um trecho de rede de número 5481509 e a ferramenta trace, indo no sentido fonte até encontrar um equipamento de proteção, neste caso, a própria RA3143163:

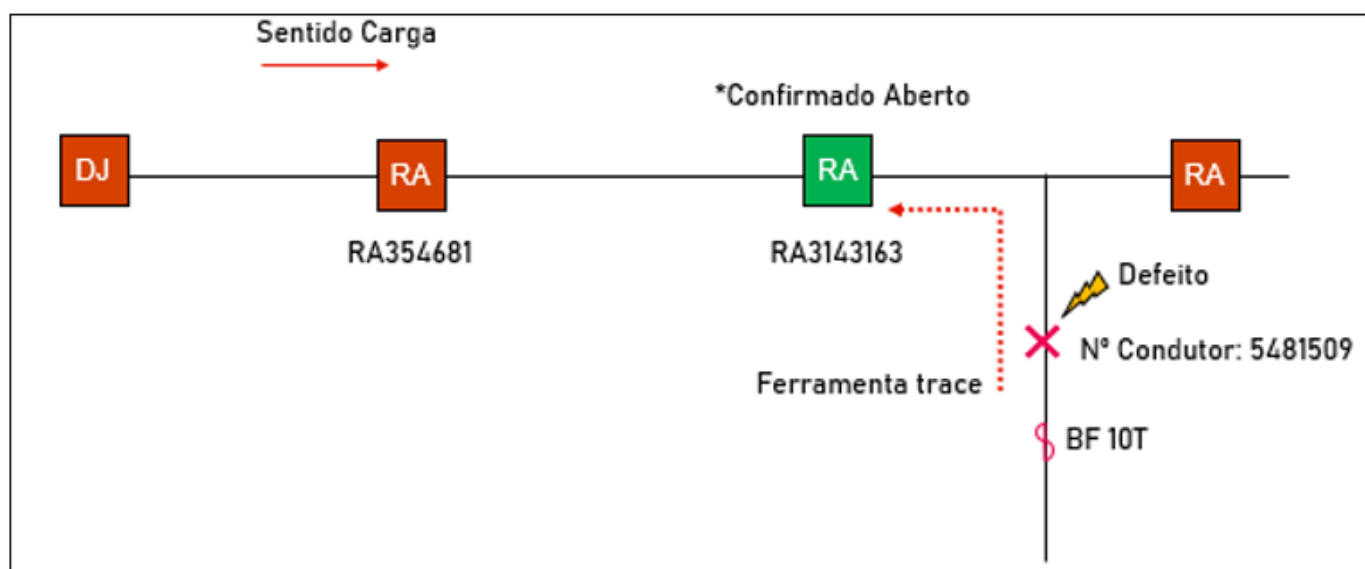


Figura 2 - Compreensão da análise realizada pelo algoritmo no circuito

2.3 Check de Abertura Simultânea

O algoritmo denominado *Check de Abertura Simultânea* é utilizado para determinar se, em uma ocorrência específica, houve abertura de mais de um equipamento. Para isso, ele utiliza como base o circuito e verifica, na tabela de eventos do SCADA, quais equipamentos atuaram por proteção, sem intervenção de telecomando.

Com a ajuda do sistema PowerOn (sistema de gestão de ocorrências, GE Smallworld Eletronic Office) é feito uma extração com todas as ocorrências primárias do mês que servirá como dados de 'input' para que o algoritmo possa consumir e prosseguir com as análises. Na tabela abaixo vemos quais são estes dados de 'input' que são consumidos pelo algoritmo:

ORDER	CONFIRMADO_ABERTO	CIRCUITO	DATA	TEMPO ANTES	TEMPO APÓS
13402132-1	R3126176	SMA 0104	21/09/2024 12:02:10	300	120

Tabela 5 - Dados de input consumidos pelo algoritmo

Com as informações acima, o algoritmo verifica na tabela de eventos do SCADA todos os equipamentos telecomandados do mesmo circuito (RA, CA e DJ) que registraram alarme de 'Estado Aberto' no intervalo de tempo definido nos dados de entrada, isto é, 300 segundos antes e 120 segundos após a estampa de tempo de início da ocorrência (01/09/2024 às 11h27m08s).

Algumas condições são necessárias para a geração do resultado, sendo:

- a. Os alarmes de 'Estado Aberto' não podem ter sido originados por controle (operador COD ou FDIR – Fault Detection, isolation and restoration);
- b. Descartar equipamentos que registraram alarme de 'Estado fechado' após um 'Estado aberto', pois pode se tratar apenas de um ciclo de religamento;
- c. Filtro com somente o circuito da ocorrência.

Após cumpridas as exigências acima, o resultado da avaliação retornará o número da ordem avaliada e os equipamentos que atenderam os critérios, retornando as seguintes informações:

ORDER_NUMBER	CONFIRMADO_ABERTO
13402132-1	R3126176
13402132-1	R6688401

Tabela 6 - Dados de output trazidos pelo algoritmo

Nota-se que para a ordem 13402132-1 retornaram dois equipamentos dentro do mesmo circuito no intervalo de tempo mencionado anteriormente, e a fim de confirmar o resultado obtido, uma consulta na tabela de eventos do SCADA poderá ser realizada.

De acordo com o SCADA pode-se observar que a religadora R3126176 configurada com proteção (1 instantâneo e 3 temporizados) iniciou seu ciclo de religamento às 2024-09-21 12:01:47.000 e foi a lockout às 2024-09-21 12:02:49.442. Contudo, ao analisar os logs é possível verificar que a religadora R6688401 configurada com função seccionalizador de 3 contagens também foi a lockout.

LOCAL	EQUIPAMENTO	DESCRIPTIVO DO EVENTO	ESTAMPA DE TEMPO
R3126176	RA	SMA104 13.8KV 79CY ALARME	21/09/2024 12:01:46.869
R3126176	RA	SMA104 13.8KV EST ABERTO	21/09/2024 12:01:47.0
R3126176	RA	SMA104 13.8KV EST FECHADO	21/09/2024 12:01:48.0
R3126176	RA	SMA104 13.8KV FSV ATUADO	21/09/2024 12:01:48.306
R3126176	RA	SMA104 13.8KV GND ATUADO	21/09/2024 12:01:48.309
R3126176	RA	SMA104 13.8KV FSB ATUADO	21/09/2024 12:01:48.313
R3126176	RA	SMA104 13.8KV FSA ATUADO	21/09/2024 12:01:48.316
R3126176	RA	SMA104 13.8KV EST ABERTO	21/09/2024 12:01:48.450
R3126176	RA	SMA104 13.8KV 50 ATUADO	21/09/2024 12:01:49.868
R3126176	RA	SMA104 13.8KV ESTC ABERTO	21/09/2024 12:01:58.0
R3126176	RA	SMA104 13.8KV EST FECHADO	21/09/2024 12:02:13.470
R3126176	RA	SMA104 13.8KV EST ABERTO	21/09/2024 12:02:13.935
R3126176	RA	SMA104 13.8KV EST FECHADO	21/09/2024 12:02:48.942
R3126176	RA	SMA104 13.8KV EST ABERTO	21/09/2024 12:02:49.442
R6688401	RA	SMA104 13.8kV EST ABERTO	21/09/2024 12:02:50.143

Tabela 7 - Eventos do Scada

Com essas informações em mãos, é possível iniciar uma análise mais aprofundada para entender a causa raiz do desligamento simultâneo entre os equipamentos, encontrarmos por exemplo, problemas de religamentos nos equipamentos, falhas nos processos de alimentação dos equipamentos e até mesmo erros de parametrização, auxiliando no processo de manutenção, sendo um indicativo de defeito. Além disso, pode-se revisar as ocorrências do mês e calcular, em percentuais, a taxa de ordens sem abertura simultânea.

3. Resultados

Os resultados deste estudo mostraram que o uso dos algoritmos possibilitou uma automação eficaz na análise dos estudos de proteção da Enel São Paulo, garantindo seletividade e coordenação dos nossos equipamentos de proteção. Mesmo com uma rede com muitos equipamentos e extremamente dinâmica, com essas ferramentas, conseguimos avaliar todos os equipamentos e ocorrências de forma mensal, permitindo identificar rapidamente as principais causas de falhas e mapear ações corretivas, o que contribui diretamente para a continuidade do serviço e a redução de interrupções. Mapeamos, como exemplo, defeitos nos equipamentos, transferências/manobras e erros de parametrização de forma automática, sendo algoritmos que garantem a qualidade do sistema de proteção.

A seguir, os gráficos apresentam a performance de seletividade no período analisado, destacando o desempenho consistente dos algoritmos em identificar e facilitar o estudo posterior.

No Check de Seletividade, o desempenho monitorado entre novembro de 2023 e outubro de 2024 manteve uma média de 99% de seletividade, evidenciando a eficácia da ferramenta em manter a rede coordenada e segura. No Check de Ocorrências, no período de novembro de 2023 a outubro de 2024, a média de seletividade foi de 88.72%, o que demonstra a efetividade em identificar ocorrências não seletivas e permitir intervenções rápidas. Em relação ao Check de Abertura Simultânea, a taxa média de ordens sem abertura simultânea é de 89,15%. Isso indica que 10,85% dos casos precisam ser analisados para garantir que não ocorram mais aberturas simultâneas.

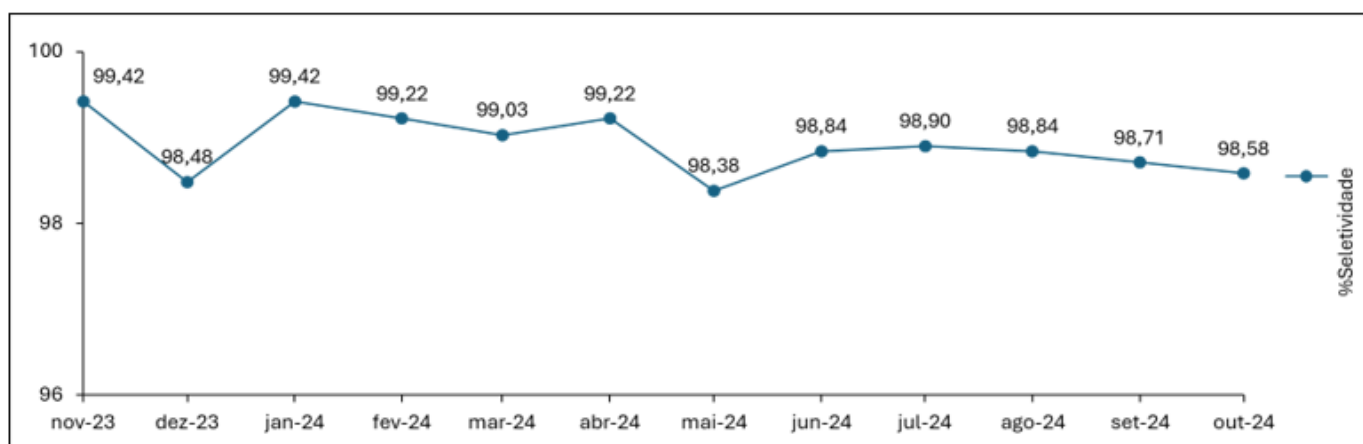


Figura 3 - Percentual de Seletividade no Check de Seletividade

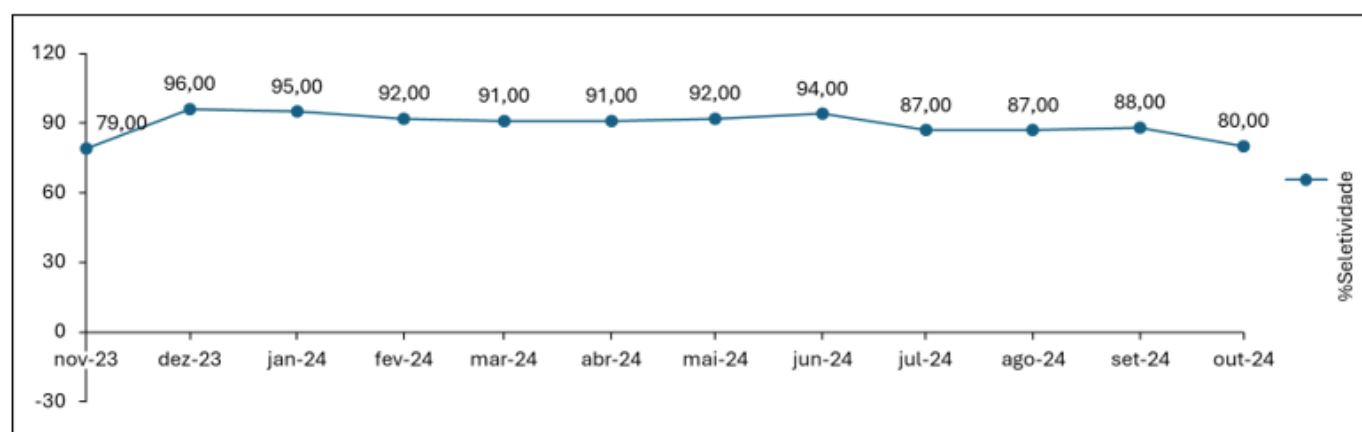


Figura 4 - Percentual de Seletividade no Check de Ocorrências

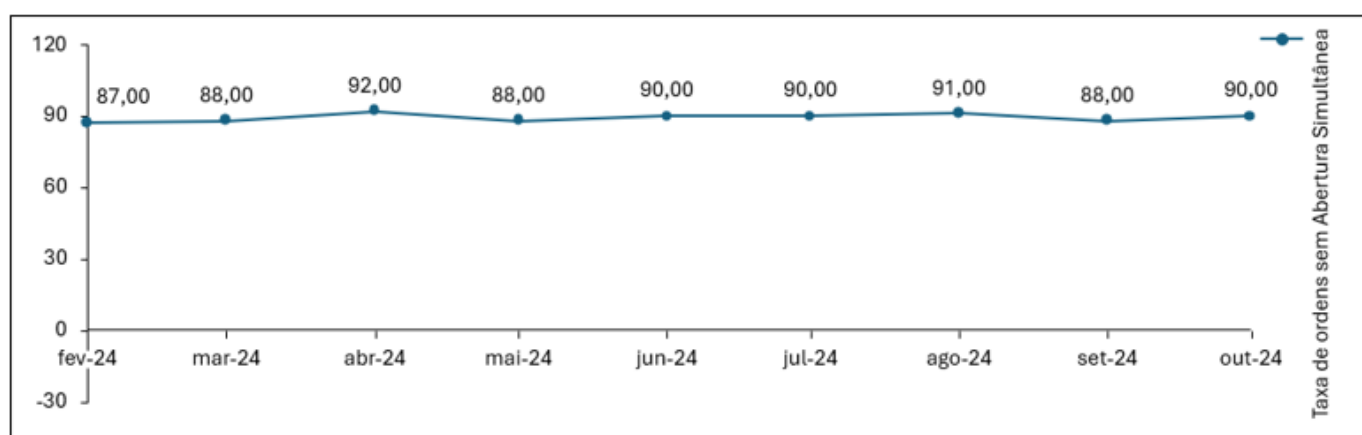


Figura 5 – Taxa de Ordens sem Abertura Simultânea

3. Conclusão

Em conclusão, os algoritmos Check de Seletividade e Check de Ocorrências têm se mostrado ferramentas valiosas para aprimorar a confiabilidade e a eficiência dos estudos de proteção do sistema de distribuição de energia da EDSP. O Check de Seletividade atua de forma preditiva, identificando antecipadamente situações de risco para a seletividade, o que permite ações preventivas e mantém o sistema devidamente coordenado.

Por outro lado, o Check de Ocorrências realiza uma análise pós-evento, verificando se o sistema atuou de forma seletiva com base nos dados da ocorrência. Essa capacidade de avaliação rápida e precisa, facilita a identificação de problemas de desempenho dos equipamentos e possibilita a implementação de correções para evitar a reincidência, otimizando a análise de todas as ocorrências no período.

Por fim, o Check de abertura simultânea ajuda a identificar quantos religadores e seccionadores do sistema foram acionados simultaneamente. Dessa forma, é possível intervir e solucionar não apenas problemas relacionados à proteção, mas também questões envolvendo os próprios equipamentos, como, por exemplo, danos no painel do religador (relé, bateria danificada, entre outros).

A EDSP orgulha-se de ser pioneira no uso desses algoritmos, que permitiram à área de proteção criar indicadores de seletividade baseados em dados de performance, promovendo uma visão detalhada e estratégica das operações. Esse compromisso com a inovação reflete-se diretamente na qualidade dos serviços prestados aos nossos clientes.

Esses algoritmos são fundamentais para a continuidade da nossa missão de fornecer um serviço cada vez mais seguro, eficiente e confiável. À medida que evoluímos e expandimos o uso dessas soluções, continuamos a reforçar a resiliência e a confiabilidade do sistema de distribuição de energia, proporcionando uma experiência de alta qualidade para nossos consumidores.

4. Referências bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Prodist Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica– Brasil. NASCIMENTO, J. P.; BRITO, N.; SOUZA, B. Coordination of overcurrent relays in radial distribution systems: An analytical approach. 2018.

MAMEDE, J. Proteção de sistemas elétricos de potência. [Reimpr]. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

SATO, F. Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

Deb, K. Optimization for Engineering Design: Algorithms and Examples. PHI Learning, 2012.