Unisanta Science and Technology, **2025, 1, July**
Published Online 2025 Vol.14 N°1 http://periodicos.unisanta.br/index.php/sat)

UNISANTA
Science and Technology
ISSN 2317-1316

Sistemas de Respostas e Controle de Emergência em Situações de Sobrecarga às Contingências locais – Um Estudo de Caso

Josinaldo Souza de Almeida[1], Yago Duarte Viana[1], Arnaldo de Carvalho Junior[1]

IFSP [1] – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
Rua Maria Cristina, 50 - Jardim Cas- queiro - Cubatão – SP, 11533 160.

E-mail: josina1967@gmail.com, yagooh03@gmail.com, adecarvalhojr@ifsp.edu.br
Received Mar, 2025

Resumo: Os Sistemas de Resposta e Controle de Emergência (SRCE) são essenciais para a estabilidade das redes elétricas em cenários de sobrecarga e contingência. No Brasil, o Esquema Regional de Alívio de Carga (ERAC), coordenado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), é uma ferramenta estratégica para prevenir apagões e preservar a operação de setores essenciais, podendo manter até 70% da carga elétrica do Sistema Interligado Nacional (SIN) em situações críticas. Avanços como a Internet das Coisas (Internet of Things – IoT), sensores inteligentes e automação têm elevado a eficácia do ERAC, viabilizando monitoramento remoto, detecção de anomalias em tempo real e respostas rápidas, reduzindo impactos econômicos e sociais. Este trabalho apresenta um estudo de caso em uma usina siderúrgica paulista, no qual o corte seletivo de carga em áreas prioritárias durante eventos de subfrequência mostrou-se eficaz para proteger infraestruturas estratégicas e manter a continuidade operacional. Apesar dos ganhos, persistem desafios como a adaptação da infraestrutura e a integração de novas tecnologias. Conclui-se que a modernização das redes elétricas, aliada a soluções como o ERAC e a IoT, é indispensável para assegurar um fornecimento de energia confiável, resiliente e apto a atender às demandas futuras..

Palavras-chave: ERAC, ONS, rejeição de cargas, sistema elétrico de potência.

Emergency Response and Control Systems in Situations of Local Contingencies Overload – A Case Study

Abstract: Emergency Response and Control Systems (SRCE) are essential for maintaining the stability of power grids under overload and contingency conditions. In Brazil, the **Regional Load Relief Scheme** (ERAC), coordinated by the National Electric System Operator (ONS), is a strategic tool to prevent blackouts and preserve the operation of essential sectors, capable of maintaining up to 70% of the load of the National Interconnected System (SIN) in critical situations. Technological advances such as the **Internet of Things** (IoT), smart sensors, and automation have enhanced ERAC's effectiveness by enabling remote monitoring, real-time anomaly detection, and rapid responses, thereby reducing economic and social impacts. This work presents a case study conducted at a steel plant in the state of São Paulo, in which selective load shedding in priority areas during underfrequency events proved effective in protecting strategic infrastructure and maintaining operational continuity. Despite these improvements, challenges remain, such as adapting existing infrastructure and integrating new technologies. It is concluded that the modernization of power grids, combined with solutions such as ERAC and IoT, is indispensable to ensure a reliable, resilient power supply capable of meeting future demands.

Keywords: RLRS, NESO, load shedding, electrical power system.

Copyright © 2025 ISESC.

UNISANTA
Science and Technology
ISSN 2317-1316

1. INTRODUÇÃO

O estilo de vida contemporâneo é caracterizado por um ritmo acelerado, no qual o uso da energia elétrica está intrinsecamente incorporado às atividades diárias, muitas vezes de forma imperceptível [1]. Desde acender as luzes ao despertar, acessar a internet para fins profissionais ou de lazer, até carregar dispositivos eletrônicos que mantêm a sociedade conectada e produtiva, a eletricidade é um elemento essencial e onipresente [2]. Sua relevância, entretanto, se evidencia principalmente em situações de interrupção no fornecimento, quando seu papel vital para o funcionamento da sociedade moderna torna-se inquestionável [3].

1.1. Sistema Elétrico Interligado (SIN)

No Brasil, o Sistema Interligado Nacional (SIN) constitui a infraestrutura fundamental para o suprimento de energia elétrica, assegurando que setores industriais, comerciais e residenciais recebam fornecimento contínuo e estável [4]. Diante da crescente dependência tecnológica e da complexidade operacional do setor elétrico, a confiabilidade do SIN assume caráter estratégico. Eventos como sobrecargas, contingências e condições climáticas extremas figuram entre os principais desafios à sua estabilidade, demandando respostas rápidas e coordenadas para prevenir apagões e colapsos sistêmicos [5].

1.2. Esquema Regional de Alívio de Carga (ERAC)

Em situações de risco iminente de colapso, o Esquema Regional de Alívio de Carga (ERAC) desempenha papel crucial na preservação da estabilidade do sistema elétrico nacional [6]. O mecanismo consiste no corte seletivo de cargas previamente definidas, realizado por meio de relés inteligentes que monitoram o consumo, principalmente em instalações industriais. O objetivo é restabelecer o equilíbrio de frequência e tensão durante momentos críticos, prevenindo falhas em cascata que poderiam comprometer o sistema.

Essa abordagem difere do método tradicional de "rejeição de carga", no qual o desligamento ocorria diretamente no alimentador principal, resultando na interrupção total do fornecimento para amplas áreas [7].

1.3. Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)

A coordenação e execução das ações do ERAC cabem ao Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), que atua para minimizar impactos ao consumidor final e preservar a integridade da rede [8]. A modernização tecnológica do setor tem incorporado soluções como a Internet das Coisas (Internet of Things – IoT) e sistemas de monitoramento remoto, aumentando a precisão e a eficiência das operações [9].

Sensores inteligentes e sistemas automatizados permitem a detecção de anomalias em tempo real, viabilizando respostas rápidas e coordenadas [10]. Essa modernização não apenas aprimora a eficiência operacional do ERAC, como também fortalece a resiliência do SIN diante de um cenário energético cada vez mais complexo.

O presente estudo analisa os desafios enfrentados pelo ERAC, com foco na ocorrência de atuações indevidas da proteção de subfrequência e seus impactos no sistema. Adicionalmente, são apresentadas estratégias de mitigação, visando o aprimoramento contínuo do esquema e a segurança no fornecimento de energia elétrica no Brasil. Garantir um sistema robusto e confiável não é apenas uma necessidade técnica, mas também um compromisso com o desenvolvimento econômico, social e tecnológico do país.

2. DESENVOLVIMENTO

Para atender às novas regulamentações da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) referentes ao Esquema Regional de Alívio de Carga (ERAC), uma empresa siderúrgica localizada no estado de São Paulo realizou um estudo técnico visando selecionar equipamentos compatíveis com as novas diretrizes. Esses dispositivos deveriam possibilitar a retirada mínima de carga exigida, evitando, ao mesmo tempo, danos aos equipamentos, perdas significativas de produção ou comprometimento da integridade dos ativos industriais.

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) opera em condição de equilíbrio entre a potência gerada e a consumida, estabelecendo-se em regime permanente para uma frequência nominal. No entanto, está sujeito a perturbações que podem desestabilizá-lo. Nesses casos, torna-se necessária a execução de cortes de carga para restabelecer o equilíbrio do sistema [11].

A atuação da proteção por meio do ERAC segue a lógica operacional ilustrada no fluxograma da **Figura 1** [12].

O estudo avaliou quais equipamentos poderiam realizar o corte de carga do sistema sem sofrer impactos estruturais ou funcionais que inviabilizassem seu retorno à operação após a normalização da frequência do sistema. O objetivo foi garantir que, durante a atuação do esquema,

Copyright © 2025 ISESC.

não ocorressem falhas mecânicas ou elétricas capazes de danificar permanentemente os ativos.

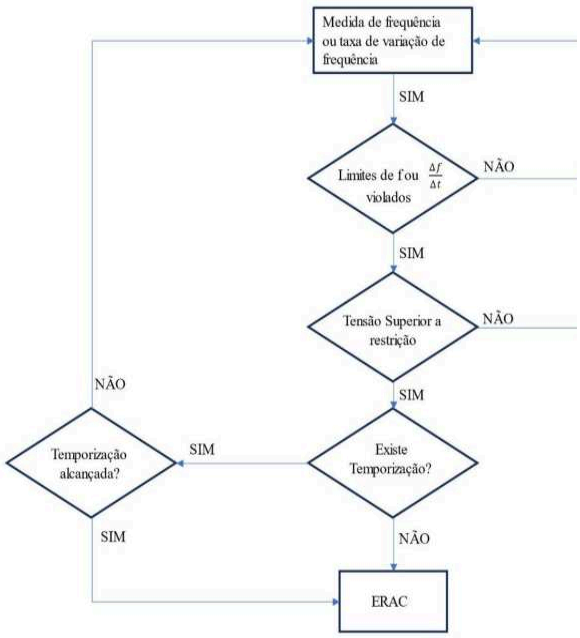


Figura 1. Fluxograma ERAC [12].

A partir dessas análises, iniciou-se o projeto de definição da ação sobre os equipamentos. Para reduzir riscos, optou-se por priorizar equipamentos rotativos, em especial motores elétricos de grande porte, cuja parada rápida poderia ser executada de forma controlada. Essa estratégia visou minimizar desvios operacionais e a geração de sucata na linha de produção, possibilitando a retomada imediata das atividades assim que frequência e tensão retornassem aos níveis nominais.

Na arquitetura projetada, foram previstos relés "escravos" instalados nas áreas onde ocorreriam os desligamentos e um relé "mestre" localizado na subestação principal de entrada. Esse relé central receberia, por meio de rede Ethernet, as informações transmitidas pelos demais relés. Para viabilizar a comunicação, empregou-se fibra óptica integrada ao cabo de para-raios, conhecido como Optical Ground Wire (OPGW).

O relé mestre, além de monitorar a frequência do sistema, teria a função de acompanhar o consumo instantâneo de cada unidade fabril, priorizando, em caso de subfrequência, a parada dos equipamentos ou fábricas previamente definidos. De acordo com o Manual de Procedimentos da Operação (Módulo 5 – Submódulo 5.12, edição de 29/07/2024, revisão 22), publicado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), o primeiro estágio de atuação é configurado para 58,5 Hz, com corte de 5% da carga da respectiva região [13].

O documento estabelece cinco estágios de corte, variando de 58,5 Hz (1º estágio, 5% de corte) até 57,5 Hz (5º estágio, 9% de corte), abrangendo todas as regiões do país [13]. A **Figura 2** apresenta o diagrama básico dessa estrutura de controle e proteção.

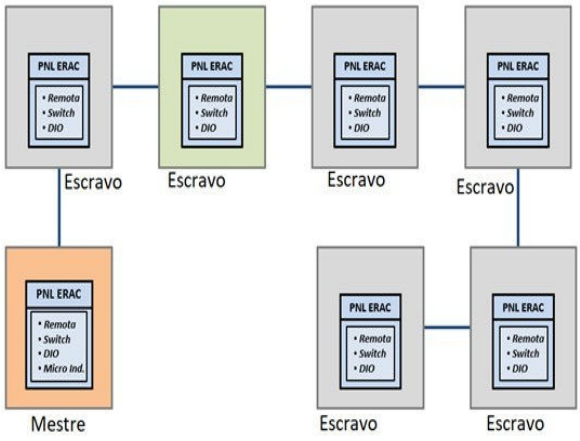


Figura 2. Distribuição dos reles.

A ação de desligamento será executada por meio do circuito de *trip* dos disjuntores ou contatores alimentadores dos motores, promovendo a sua interrupção e, consequentemente, a retirada da carga correspondente do sistema.

Cada relé escravo estará instalado nas unidades fabris, juntamente com seus respectivos dispositivos periféricos. Esses conjuntos formarão uma rede de monitoramento cujas informações serão processadas para gerar uma classificação de prioridades. Essa priorização será organizada em um *ranking*, determinado pelo consumo instantâneo e pela quantidade de carga necessária para atingir o percentual de corte previsto — até 10% do consumo regional, conforme estipulado.

O *ranking* não será estático, variando de acordo com a condição operacional das unidades. Por exemplo, caso determinada fábrica esteja com sua produção interrompida por qualquer motivo, seu desligamento não contribuiria de forma significativa para alcançar o valor mínimo de corte de energia, tornando ineficaz sua inclusão na sequência de desligamento. A lógica dessa priorização está representada na **Figura 3**.

A Equação 1 e Equação 2 apresentam um exemplo extraído de uma *Análise de Desempenho do ERAC – 2023*, referente a uma perturbação ocorrida em 15/08/2023 [7].

Copyright © 20 ISESC

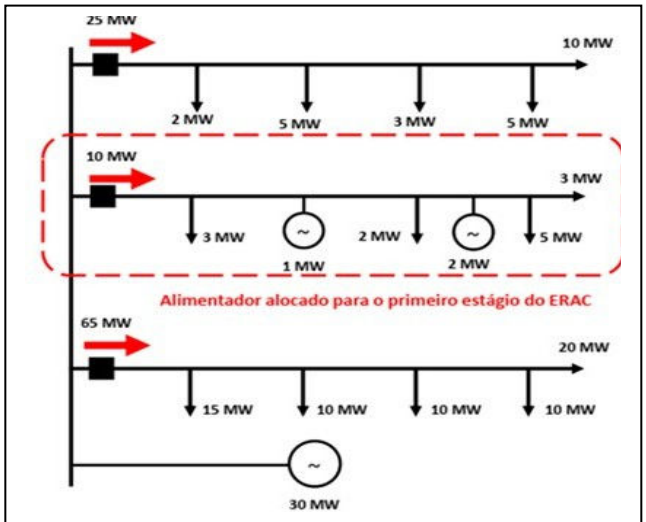


Figura 3. Exemplo de corte de carga.

$$C_T = 25+10+65 = 100\ MW \quad (1)$$

$$C_{ERAC}(\%) = \frac{10}{100} \cdot 100 = -10\% \quad (2)$$

Onde: C_T é a Carga total da empresa antes da ocorrência, C_{ERAC}, no valor de 10 MW, é a carga alocada para o ERAC e $C_{ERAC}(\%)$ é o percentual de carga alocada para o ERAC.

Conforme o exemplo, o montante de carga a ser desligado para proporcionar alívio ao sistema corresponde ao circuito de 10 MW. Esse circuito permanecerá desenergizado até que as variáveis do sistema, como tensão e frequência, retornem aos valores normais - sendo a frequência nominal no Brasil de 60 Hz.

A equipe responsável pelo projeto estabeleceu como objetivo principal evitar que todas as fábricas fossem desligadas durante uma atuação do ERAC até a completa normalização das variáveis do sistema. Por esse motivo, optou-se por não desligar o disjuntor principal de uma subestação, ainda que tal solução fosse mais simples de implementar. Essa abordagem, porém, teria impactos negativos significativos sobre o processo produtivo da empresa.

A estratégia adotada foi atuar diretamente sobre motores elétricos de grande porte, ao invés de cortar a alimentação geral. Essa medida possibilitou o corte da carga necessária, ao mesmo tempo em que facilitou o restabelecimento das operações assim que as condições de frequência e tensão fossem normalizadas. Em uma siderúrgica, motores de grande porte são essenciais para processos como a laminação de placas a quente ou a frio, justificando a escolha de um controle seletivo.

Para assegurar a operação contínua das unidades remotas (*remotas*) e dos dispositivos de proteção, os gabinetes que abrigam os relés e módulos de atuação foram projetados para receber alimentação confiável em corrente contínua (CC). Esse suprimento é garantido por um conjunto de baterias conectado a um sistema retificador, assegurando que, na ausência da energia alternada (CA) fornecida pela concessionária, as baterias assumam a carga e mantenham o sistema operando normalmente.

As subestações já dispõem de conjuntos de baterias dedicados ao sistema de proteção elétrica, os quais foram aproveitados para a operação do ERAC. A **Figura 4** apresenta o diagrama do sistema proposto.

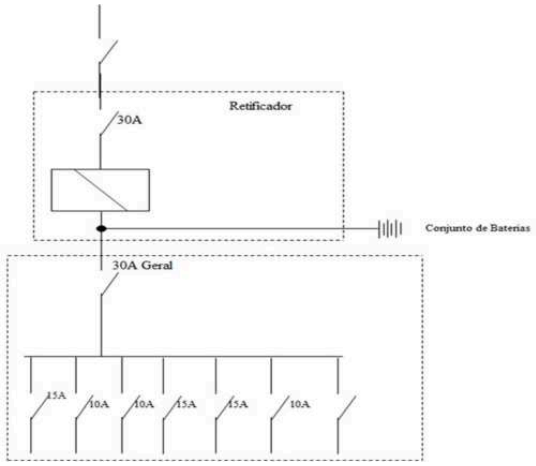


Figura 4. Retificação e conjunto de baterias.

Com relés e unidades remotas alimentados em corrente contínua, o retorno à operação dos equipamentos é garantido, uma vez que seus sistemas de controle permanecem supridos por uma fonte de energia estável e confiável. Para aumentar a robustez da solução, as fontes de alimentação foram projetadas com redundância, conforme a **Figura 5**. As remotas possuem um *hardware* que contempla uma estrutura conforme **Figura 6**.

- COM – Módulo de comunicação com as portas ethernet (RJ-45 ou fibra óptica) disponibilizando, no mínimo, os protocolos IEC-61850 e DNP 3;
- DI – Módulo de entradas digitais com sequência de eventos (*sequence of events* - SOE) de 1 ms e relógio sincronizado por sistema de posicionamento global (*global positioning system* - GPS);
- DO – Saídas digitais com verificação antes da ope- ração (*check before operate* - CBO);
- AI – Entradas analógicas. No ERAC seria um módulo para leitura direta dos sinais de TP e TC para medição da frequência e demais grandezas elétricas. A leitura poderá ser feita por outro

Copyright © 2025 ISESC

equipamento (multimedidor ou relé de proteção) desde que atenda aos tempos de resposta a atuação do ERAC.

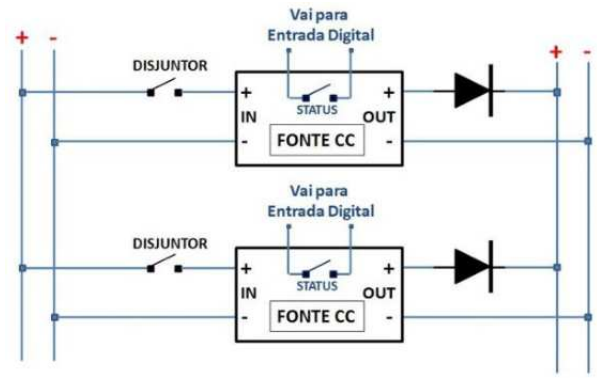


Figura 5. Fontes redundantes.

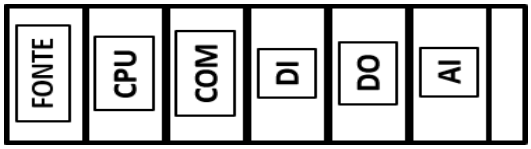


Figura 6. *Hardware* remota.

O relé mestre, localizado na subestação principal de entrada, será responsável por executar o algoritmo de alívio de carga, enviando comandos de desligamento às unidades remotas (*relés escravos*). Este dispositivo deverá estar sincronizado por GPS, garantindo precisão temporal nas operações, e será capaz de gerar relatórios detalhados para o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

3. APLICAÇÃO

A metodologia empregada para o controle das cargas das áreas monitoradas pelo ERAC baseou-se na instalação de unidades remotas nas zonas designadas como *alvos* de controle e supervisão. A comunicação entre essas remotas é realizada por fibra óptica integrada ao cabo para-raios - *Optical Ground Wire* (OPGW) — em uma rede Ethernet, conforme ilustrado na **Figura 7**.

As remotas se comunicam com os medidores por meio do protocolo *Modbus RTU*, utilizando o meio físico RS-485 ilustrado na **Figura 8**. Sob o comando do relé mestre, a remota envia sinais de desligamento aos disjuntores através de contatos de saída dos módulos de saída digital (*Digital Output – DO*). Para garantir que a corrente do circuito de *trip* seja suficiente para acionar o disjuntor ou contator responsável pelo desligamento do equipamento, a saída DO comanda um relé auxiliar.

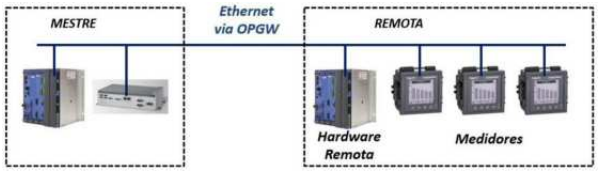


Figura 7. Configuração das remotas.

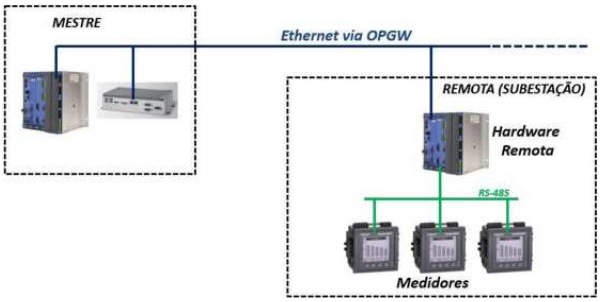


Figura 8. Comunicação entre Mestre e Remota.

Esses relés operam com tensões de controle superiores à da saída DO, sendo alimentados por circuitos em corrente contínua (CC) considerados seguros, variando entre 48 VCC e 250 VCC. Na planta em estudo, são utilizadas tensões de 125 VCC e 250 VCC. A **Figura 9** apresenta exemplos de relés utilizados.

Nas remotas do sistema supervisório, empregam-se relés de interposição ONROM modelo LY-4N-D2, que possuem quatro contatos SPDT, diodo de amortecimento em paralelo com a bobina e LED indicador de acionamento. Para minimizar a formação de arco durante o acionamento da bobina de *trip*, são utilizados dois contatos em série exemplificados na **Figura 10**.



Figura 9. Exemplos de reles auxiliares.

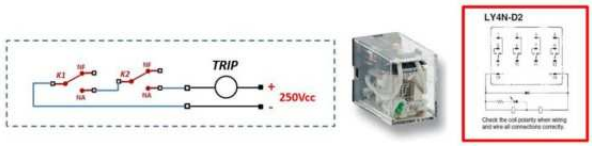


Figura 10. Rele utilizado nas remotas.

Copyright © 20 ISESC

O diagrama unifilar da **Figura 11** apresenta os disjuntores do sistema ERAC que atuarão quando a frequência atingir os valores previamente configurados. Os quadrados vermelhos representam os disjuntores das bombas (simbolizadas por um círculo com a letra "M" no interior), que serão desligadas pelo ERAC ao atingir a frequência de 58,5 Hz, obedecendo à prioridade programada no relé mestre.

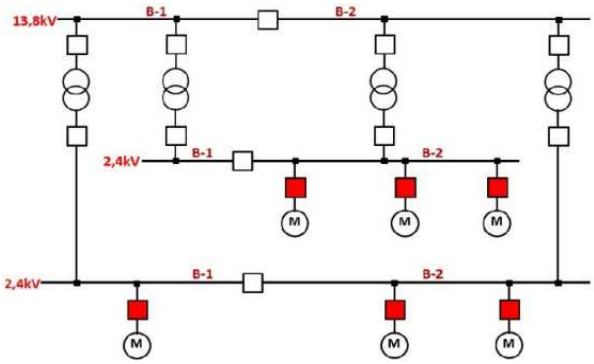


Figura 11. Diagrama Unifilar 1 dos disjuntores do ERAC.

Essa prioridade, calculada em tempo real pelo relé mestre com base nas cargas previamente selecionadas pela empresa, assegura que, ao atingir os valores estabelecidos para o ERAC, sejam desligados apenas equipamentos ou áreas efetivamente operacionais. Essa estratégia evita o desligamento de setores inativos, o que impediria atingir a carga mínima necessária para o corte, além de prevenir rejeições de carga desnecessárias.

As **Figuras 12** e **13** apresentam diagramas unifilares adicionais das áreas incluídas no sistema ERAC do projeto, totalizando seis áreas que podem ser afetadas em caso de atuação do esquema devido à queda de frequência no Sistema Interligado Nacional (SIN).

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é responsável pelo monitoramento do ERAC. O consumidor livre realiza o levantamento das cargas disponíveis para corte, devidamente auditáveis, e envia essas informações ao ONS em formato padronizado [14].

4. CONCLUSÕES

A pesquisa sobre o Esquema Regional de Alívio de Carga (ERAC) e sua aplicação no Sistema Interligado Nacional (SIN) evidenciou a complexidade e a importância estratégica desse mecanismo no contexto do fornecimento de energia elétrica no Brasil. Diante da crescente demanda por eletricidade e das condições desafiadoras do setor, estratégias como o ERAC são fundamentais para prevenir falhas catastróficas e

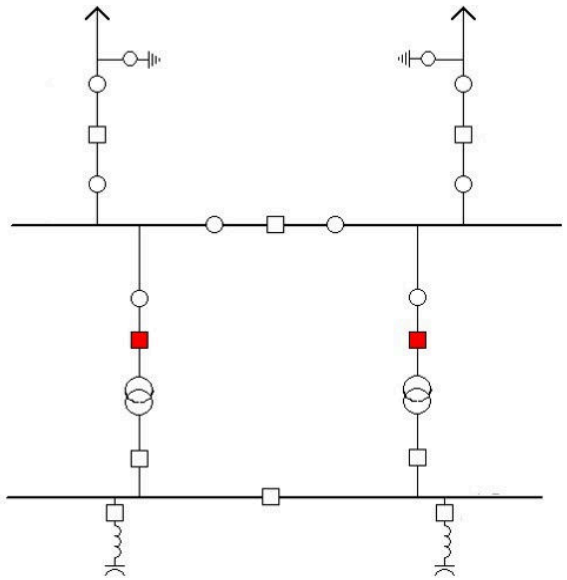


Figura 12. Diagrama Unifilar 2 dos disjuntores do ERAC.

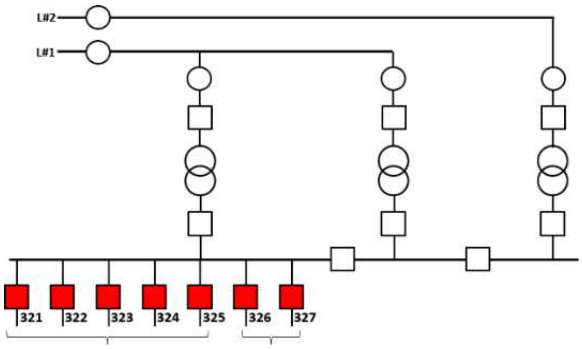


Figura 13. Diagrama Unifilar 3 dos disjuntores do ERAC.

assegurar a estabilidade do sistema em situações de sobrecarga ou contingência.

Os avanços tecnológicos, em especial a integração da Internet das Coisas (*IoT*) e de sistemas automatizados de monitoramento, mostraram-se decisivos para o aprimoramento da eficácia do ERAC. A capacidade de detectar anomalias em tempo real e de coordenar respostas rápidas e precisas elevou significativamente a eficiência do esquema, reduzindo os impactos aos consumidores e fortalecendo a resiliência do SIN.

Entretanto, os resultados desta pesquisa também ressaltam a necessidade de avanços contínuos na gestão e operação do ERAC, com destaque para a prevenção de atuações indevidas da proteção de subfrequência. A adoção de metodologias mais sofisticadas e a atualização

Copyright © 2025 ISESC

constante das tecnologias empregadas são medidas essenciais para enfrentar os desafios futuros do setor elétrico.

Em síntese, confirma-se que a modernização do setor elétrico e a evolução das estratégias de alívio de carga são determinantes para a confiabilidade do fornecimento de energia no Brasil. O aperfeiçoamento contínuo dessas práticas é indispensável para a construção de um sistema elétrico mais eficiente, seguro e sustentável, capaz de atender, de forma robusta e resiliente, às demandas crescentes da sociedade.

REFERÊNCIAS

[1] TAKAYAMA, N.; MORIKAWA, T.; BIELINIS, E. Relation between psychological restorativeness and lifestyle, quality of life, resilience, and stress-coping in forest settings. International journal of environmental research and public health, v. 16, n. 8, p. 1456, 2019. https://doi.org/10.3390/ijerph16081456.

[2] SANQUIST, T. F., ORR, H., SHUI, B., BITTNER, A. C., Lifestyle factors in U.S. residential electricity consumption, Energy Policy, Volume 42, 2012, Pages 354-364, ISSN 0301-4215, https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.11.092.

[3] MÁRIA, L.; BOHUŠ, L. Societal vulnerability to electricity supply failure. Interdisciplinary Description of Complex Systems: INDECS, v. 20, n. 1, p. 16-26, 2022. https://doi.org/10.7906/indecs.19.3.4.

[4] SOUZA, CMR; GALLO, Fabrício. A reestruturação do setor elétrico brasileiro: Sistema Interligado Nacional e a energia elétrica como mercadoria. Anais do V Simpósio Nacional de Geografia Política, Território e Poder, Alfenas, 2019.

[5] SILVA, Seluivy Gonçalves; MONTEIRO, Raul Vitor Arantes; GUIMARÃES, Geraldo Caixeta. Sistema interligado nacional: análise da metodologia de acesso e do planejamento da expansão com foco nos atrasos dos empreendimentos. Dados, v. 2014, p. 2015, 2013.

[6] SANTOS, Gabriel Quevedo dos; CURIN, Gabriela; MARCHESAN, Gustavo. Ajustes do ERAC para assegurar a estabilidade do sistema elétrico em cenários de desequilíbrio de frequência. In: Proceedings of the 16th Seminar on Power Electronics and Control (SEPOC 2024). Brasil, 2025.

[7] ONS. Análise do desempenho do ERAC – Perturbação do Dia 15/08/2023 às 08:30hs. Operador Nacional do Sistema, 2023. Disponível em: https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/RAP%202023.08.15%2008h030min%20vers%C3%A3o%20final.pdf. Acesso em Março 25, 2025.

[8] LIMA, E. d et al. Avaliação da rotina operacional do operador nacional do sistema elétrico brasileiro (ONS) em relação às ações de gerenciamento de riscos associados à segurança cibernética. RISTI (PORTO), E49, p. 301-312, 2022.

[9] BEDI, G., VENAYAGAMOORTHY, G. K., R., SINGH, R., BROOKS R. and WANG, K. -C., Review of Internet of Things (IoT) in Electric Power and Energy Systems," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 5, no. 2, pp. 847-870, April 2018. https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2802704.

[10] JARADAT, M., JARRAH M., BOUSSELHAM A., JARARWEH Y., AL-AYYOUB M., The Internet of Energy: Smart Sensor Networks and Big Data Management for Smart Grid, Procedia Computer Science, Volume 56, 2015, Pages 592-597, ISSN 1877-0509, https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.250.

[11] - SILVA, L. E.; JULIANO, C. M.; DENIS V. C. Análise temporal de conexões com tecnologias web aplicadas na supervisão de um esquema regional de alívio de carga - ERAC, Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Automática, Bonito-MS, 2010.

[12] - ANDRADE, K. M. Proposta de um método para bloqueio do esquema regional de alívio de carga frente a inércia rotativa de desligamento dos motores de indução, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, 2021.

[13] ONS. Manual de procedimento da operação módulo 5 submódulo 5.12, Operador Nacional do Sistema Elétrico, pág. 1-64, 2024. Disponível em: https://www.ons.org.br/%2FMPO%2FDocumento%20Normativo%2F3.%20Instru%C3%A7%C3%B5es%20de%20Opera%C3%A7%C3%A3o%20-%20SM%205.12%2F3.7.%20Opera%C3%A7%C3%A3o%20de%20Instala%C3%A7%C3%B5es%2F3.7.3.%20Nordeste%2F3.7.3.8.%20%C3%81rea%20500%20kV%20da%20Regi%C3%A3o%20Nordeste%2FIO-OI.NE.CAN_Rev.01.pdf. Aces so em Março 25, 2025.

[14] ONS. Monitoramento dos Esquemas Regionais de Alívio de Carga, Repositório SINTegre – Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2020. Disponível em: https://www.ons.org.br/ecmdocuments/Submódulo%206.14-OP_2020.12.docx. Acesso em Março 25, 2025.

Copyright © 20 ISESC