

Melhoramento da Resiliência em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Usando Alocação de GD e Sistemas de Armazenamento de Emergência Móveis

Juan M. Home-Ortiz, Lucas C. Yamaguti, Jairo G. Yumbra,
Ozy D. Melgar-Dominguez, José R. S. Mantovani *

* Departamento de Engenharia Elétrica
UNESP, Ilha Solteira Brasil

juan.home@unesp.br, lucas.yamaguti@unesp.br,
jairo.yumbra@unesp.br, ozzydamedo@gmail.com,
mant@dee.feis.unesp.br

Abstract: This paper presents a planning and operational strategy to improve the recoverability of the distribution systems (DSs) against a set of possible line fault scenarios. Within this strategy, the planning actions consist of allocating dispatchable distributed generation (DG) units while the operational actions include the complete dynamic restoration process. The restoration process considers the radial system reconfiguration and islanding operation, all while simultaneously considering the pre-positioning and displacement of mobile emergency storage units. The proposed strategy is formulated as a single objective stochastic scenario-based mixed-integer linear programming model, considering uncertainties associated with the solar irradiation and demand consumption in a multi-period formulation. The objective function minimizes the investment cost of new dispatchable DG units and the amount of energy shedding within the system. The proposed model is validated using the 33-node DS under different cases and results show the benefits of simultaneously solving the planning problem with a restoration process.

Resumo: Este artigo apresenta uma estratégia de planejamento e operação para melhorar a recuperabilidade dos sistemas de distribuição (SDs) frente a um conjunto de possíveis cenários de faltas de linha. Dentro dessa estratégia, as ações de planejamento consistem na alocação de unidades de geração distribuída (GD) despacháveis, enquanto as ações operacionais incluem o processo completo de restauração dinâmica. O processo de restauração considera a reconfiguração do sistema, radialidade da rede, operação ilhada dos GDs e o pré-posicionamento e deslocamento de unidades móveis de armazenamento de emergência. A estratégia proposta é formulada como um modelo de programação linear inteiro misto baseado em cenários, considerando incertezas associadas à irradiação solar e à demanda em uma formulação multiperíodo. A função objetivo minimiza o custo de investimento de novas unidades DG despacháveis e o corte de carga do sistema. O modelo proposto é validado usando um sistema de 33 barras em diferentes casos e os resultados mostram os benefícios de resolver simultaneamente o problema de planejamento com um processo de restauração.

Keywords: Distributed generation allocation; distribution systems; mobile emergency storage; restoration; resilience.

Palavras-chaves: Alocação de geração distribuída; sistemas de distribuição; sistemas de armazenamento de emergência móvel; restauração; resiliência.

NOMENCLATURA

Conjuntos

Γ_S Conjunto de nós com subestação

* O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processos: 2019/01841-5, 2019/23755-3, 2018/12422-0 e 2015/21972-6. O Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processo 304726/2020-6. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Γ_G^N	Conjunto de nós candidatos a instalação de GD despachável
Γ_N^{saem}	Conjunto de barras com possibilidade de conexão de SAEM
Γ_C^t	Conjunto de cenários de operação estocásticos
$\Gamma_{\bar{n}}^{saem}$	Conjunto de unidades SAEM pré-posicionadas
Γ_B	Conjunto de ramos reais do sistema
Γ_B^*	Conjunto de ramos reais e fictícios com índices ij e ji
Γ_B^h	Conjunto de ramos fictícios
Γ_F	Conjunto de eventos de falhas

Γ_G	Conjunto de nós com uma GD despachável	$q_{i,t,c,f}^{pv}$	Potência reativa injetada por um gerador renovável
Γ_N	Conjunto de barras reais do sistema	$q_{ij,t,c,f}$	Fluxo de potência reativo pela linha
Γ_N^f	Conjunto de nós que não foram afetados pelo cenários com falha	$\tau_{st,i,n,f}^x$	Tempo de viagem do SAEM n desde a garagem até uma barra do sistema
Γ_P	Conjunto de nós com uma unidade geradora PV	$soc_{i,t,c,f}^{saem}$	Estado de carga do SAEM conectado em uma barra
Γ_{st}	Conjunto de garagens das unidades móveis	$v_{i,t,c,f}^{sqr}$	Quadrado da tensão em uma barra barra.
Γ_T	Conjunto de períodos		
<i>Parametros</i>			
Δ_t	Duração do período de tempo		
ϕ^{pv}	Fator de geração de potência das unidades PV		
$\rho_{t,c}$	Probabilidade do cenário estocástico		
σ_i^{dg/l_s}	Custo de investimento em GD / custo de corte de carga		
$\xi_{i,t,c}$	Nívelde geração PV		
C_i^t	Tempo necessário para conectar uma unidade SAEM no nó i		
\bar{I}_{ij}	Limite da potência atual que percorre a linha		
P^d/Q^d	Demanda de potência ativa/reactiva		
$P_{i,t,c}^{pv}$	Capacidade de geração disponível nas unidades PV		
R_{ij}/X_{ij}	Resistência/reactância no ramo ij		
$\bar{S}_i^{dg/ss}$	Limite de potência aparente da GD / subestação		
$T_{st,i}^{cf}$	Tempo consumido pelo congestionamento durante o traslado das garagens até o nó afetado		
$T_{st,i}^t$	Tempo de viagem de uma garagem até um nó		
\bar{V}, \underline{V}	Limites de magnitude de tensão máxima/mínima		
<i>Variaveis binárias</i>			
$h_{ij,t,f}$	Variável binária usada para determinar a radialidade da rede		
$e_{i,t,c,f}$	Variável binária que define o estado operacional dos SAEMs		
g_i	Variável binária que define o investimento de uma nova GD despachável		
$k_{st,n}^{saem}$	Variável binária que define o pre-posicionamento das SAEMs nas garagens		
$u_{i,n,t,f}$	Variável binária que define a n unidades SAEMs conectadas na barra i		
$w_{i,n,t,f}$	Variável binária que define o período de conexão de um SAM nas barras		
$x_{i,t,f}$	Variável binaria que define o estado operacional, energizada ou desenergizada, de uma barra		
$y_{ij,t,f}$	Variável binária para o estado operacional, aberto ou fechado, de uma chave de manobra		
$z_{st,i,n,f}^{saem}$	Variável binária que determina o deslocamento de n SAEMs desde uma garagem até uma barra do sistema		
<i>Variáveis contínuas</i>			
$\ell_{ij,t,c,f}^{sqr}$	Quadrado da corrente		
$b_{ij,t,c,f}^{v/g}$	Variável de folga usada para determinar a queda de tensão nas barras ij		
$p_{i,t,c,f}^{gd}$	Potência ativa injetada por um GD		
$p_{i,t,c,f}^{ngd}$	Potência ativa injetada por um GD novo		
$p_{i,t,c,f}^{ss}$	Potência ativa injetada por uma subestação		
$q_{i,t,c,f}^{gd}$	Potência reativa injetada por um GD		
$q_{i,t,c,f}^{ngd}$	Potência reativa injetada por um GD novo		
$q_{i,t,c,f}^{ss}$	Potência reativa injetada por uma subestação		
$p_{ij,t,c,f}$	Fluxo de potência ativo pela linha		
$p_{i,t,c,f}^{pv}$	Potência ativa injetada por um gerador renovável		
$p_{i,t,c,f}^{saemc}$	Potência ativa consumida por um SAEM		
$p_{i,t,c,f}^{saemd}$	Potência ativa injetada por um SAEM		

1. INTRODUÇÃO

O problema do planejamento da expansão em sistemas de distribuição (SDs) busca criar um plano de investimento eficaz que forneça segurança e confiabilidade no serviço de energia para seus clientes. Geralmente, o problema é abordado sob condições normais de operação, sem considerar possíveis eventos de falhas. Em consequência, a filosofia tradicional do planejamento deve mudar por estratégias robustas que aumentam a resiliência dos SDs, assim, abordagens atuais devem possuir alternativas que melhorem a recuperação dos sistemas sob condições de emergência Jufri et al. (2019).

A resiliência de um SD pode ser melhorada através da coordenação de diferentes recursos operacionais. Tradicionalmente, a parcela da rede que está fora de serviço, é separada do resto do sistema mediante o chaveamento de switches. No caso de existir geração distribuída (GD) despachável instalada no sistema, o processo de restauração permite a formação de microrredes que melhoram a capacidade de recuperação dos sistemas de distribuição Wang et al. (2020). Por exemplo, em Vargas et al. (2021b) os autores propõem um modelo de programação cônica de segunda-ordem inteiro misto (PCSOIM) para resolver o problema de restauração de SD unicamente com operação de chaves de manobra e a formação de laços no sistema. Por outro lado, a proposta de Vargas et al. (2021a) permite, além da formação de laços, a operação ilhada dos GD do sistema. Os autores em Ding et al. (2017) propõem uma estratégia baseada num modelo de PCSOIM que visa melhorar a capacidade de recuperação mediante a formação de microrredes onde os GD despacháveis operam como unidades mestre fornecendo uma referência em tensão para a microrrede enquanto os GDs renováveis operaram como unidades escravas seguindo a unidade mestre da microrrede à qual pertencem. Uma alternativa similar é apresentada por Chen et al. (2018) que inclui a presença de sistemas de armazenamento de energia junto com a formação de microrredes.

É apropriado que os SDs tenham um nível adequado de flexibilidade para fazer frente a condições de emergência, neste sentido, Lei et al. (2019) consideram um despacho ótimo de geradores de emergência moveis (GEMs) e a presença de equipes de reparo com a formação dinâmica de microrredes para maximizar o fornecimento de energia após um evento de falha. De forma similar, Taheri et al. (2020) propõem uma formulação para otimizar a pré-localização de GEMs e equipes de reparo com a finalidade de preparar o sistema contra um conjunto de possíveis eventos de falha de alto impacto. Consequentemente, os sistemas de armazenamento de emergência moveis (SAEMs) são um recurso interessante para manter um serviço altamente flexível e que podem ser usados como uma

opção que reforça a resiliência dos SDs. Respeito a este tópico, os autores em Kim e Dvorkin (2018) apresentam um modelo de dois estágios junto com um algoritmo de recuperação para resolver a parte de investimento e as possíveis rotas de percurso das unidades de SAEMs com a formação de microrredes, visando minimizar a desconexão de carga durante um evento de falha. De forma similar, em Yao et al. (2019), os SAEMs são usados para processos de restauração resilientes que considera a formação de microrredes e reconfiguração da rede.

Por outro lado, o planejamento da expansão do sistema representa uma forma de proteção direta dos SDs contra eventos de falha de alto impacto Shahbazi et al. (2021). Por exemplo, em Sedzro et al. (2018) considera-se a alocação ótima de GDs e sistemas de geração moveis permitindo a formação de microrredes através de um modelo de programação linear inteira mista (PLIM). Em Home-Ortiz e Mantovani (2020), os autores propõem uma abordagem para determinar a alocação ótima de GDs para melhorar a capacidade de recuperação de sistemas, considerando a formação de microrredes com a filosofia de operação de GDs, mestre-escravo. Zhang et al. (2020) propõem um modelo para a proteção de linhas e alocação de geradores de respaldo, onde o processo de otimização é realizado junto com a reconfiguração da rede, enquanto que a formação das microrredes e feita como um planejamento pré-falha. Em Home-Ortiz et al. (2022) os autores propõem a maximização da capacidade de hospedagem da geração fotovoltaica no SD para melhorar a recuperação do sistema após um evento de falta de grande impacto considerando a formação de microrredes e GEMs. Embora exista uma quantidade significativa de abordagens para tratar os efeitos negativos das falhas de alto impacto nos SDs, o aperfeiçoamento da resiliência por meio do planejamento da expansão tem sido pouco estudado. Por tanto, considerando a revisão da literatura exposta acima, as principais contribuições deste artigo são:

- Partindo do planejamento, é apresentada uma nova estratégia que visa coordenar simultaneamente vários recursos que são: chaveamento dinâmico, SAEMs e formação de microrredes, para melhorar o processo de restauração diante eventos de falha de alto impacto. A estratégia leva em consideração a tomada de decisões na expansão da rede e a operação, através de uma formulação multiperíodo. A abordagem desenvolvida leva em conta a variabilidade e incertezas na demanda e a geração de energia renovável.
- Do ponto de vista da modelagem, é apresentada uma formulação matemática baseada em um modelo PLIM que pode ser utilizado pelo operador do sistema no processo de tomada de decisões para obter um SDs mais resiliente.

A organização deste artigo é a seguinte: Seção 2 apresenta o modelo PLIM do problema; Seção 3 apresenta os resultados discussões ao aplicar o modelo desenvolvido no sistema de distribuição de 33 barras; Por fim, a Seção 4 apresenta as conclusões deste artigo.

2. MODELO MATEMÁTICO

Na presente seção apresenta-se o modelo de PLIM proposto, que visa minimizar o custo de investimento em GD

e o corte de carga no sistema após um evento de falha de alto impacto considerando as restrições físicas e operacionais dos SDs. O modelo de operação em condições de emergência consiste num processo de restauração dinâmica multiperíodo baseado em operações de chaves e SAEMs.

2.1 Função objetivo

A função objetivo (1) utilizada neste estudo busca minimizar o custo de investimento de novas unidades de GD e o corte de carga total dos SDs considerando diferentes cenários de falha e a presença de incertezas relacionadas ao consumo de energia.

$$\min \sum_{i \in \Gamma_G^s} \sigma_i^{gd} g_i + \sum_{t \in \Gamma_T} \sum_{c \in \Gamma_C^t} \sum_{f \in \Gamma_F} \left[\rho_{t,c} \sum_{i \in \Gamma_N} \sigma_i^{ls} \Delta_t P_{i,t,c}^d x_{i,t,f} \right] \quad (1)$$

O primeiro termo de (1) corresponde ao custo de investimento em novos GD e depende do estado da variável binária g_i . O segundo termo de (1) determina o custo de penalização por corte de carga nas barras que não podem ser recuperadas durante o processo de restauração. Assim, considerando um estado de emergência, em cada cenário de falha f , se a barra i estiver em funcionamento no período t , então $x_{i,t,f} = 0$, caso contrário, $x_{i,t,f} = 1$.

2.2 Restrições operacionais

As condições de operação de estado estacionário dos SDs estão determinadas pelo conjunto de restrições (2)-(6), sendo os subíndices i, ij, t, c, f correspondem aos elementos dos conjuntos $\Gamma_N, \Gamma_B, \Gamma_T, \Gamma_C^t, \Gamma_F$, respectivamente.

$$\sum_{ji \in \Gamma_B} p_{ji,t,c,f} - \sum_{ij \in \Gamma_B} (p_{ij,t,c,f} + R_{ij} \ell_{ij,t,c,f}^{sqr}) + P_{i,t,c,f}^{ss} + p_{i,t,c,f}^{pv} + p_{i,t,c,f}^{gd} + p_{i,t,c,f}^{ngd} + p_{i,t,c,f}^{saemd} - p_{i,t,c,f}^{saemc} = P_{i,t,c}^d (1 - x_{i,t,f}), \quad \forall (i, t, c, f), \quad (2)$$

$$\sum_{ji \in \Gamma_B} q_{ji,t,c,f} - \sum_{ij \in \Gamma_B} (q_{ij,t,c,f} + X_{ij} \ell_{ij,t,c,f}^{sqr}) + Q_{i,t,c}^{ss} + q_{i,t,c,f}^{pv} + q_{i,t,c,f}^{gd} + q_{i,t,c,f}^{ngd} = Q_{i,t,c}^d (1 - x_{i,t,f}), \quad \forall (i, t, c, f), \quad (3)$$

$$v_{i,t,c,f}^{sqr} - v_{j,t,c,f}^{sqr} + b_{ij,t,c,f}^v = 2(R_{ij} p_{ij,t,c,f} + X_{ij} q_{ij,t,c,f}), \quad \forall (ij, t, c, f), \quad (4)$$

$$-(\bar{V}^2 - \underline{V}^2)(1 - y_{ij,t,f}) \leq b_{ij,t,c,f}^v \leq (\bar{V}^2 - \underline{V}^2)(1 - y_{ij,t,f}), \quad \forall (ij, t, c, f), \quad (5)$$

$$v_{j,t,c,f}^{sqr} \ell_{ij,t,c,f}^{sqr} = p_{ij,t,c,f}^2 + q_{ij,t,c,f}^2, \quad \forall (ij, t, c, f). \quad (6)$$

O balanço de potência ativa e reativa em cada barra do sistema são representados por (2) e (3), respectivamente. Cada uma destas expressões contém as injeções de potência ativa e reativa na barra i , que está sendo fornecidas pela subestação, unidades de geração PV, GDs despacháveis existentes, novas unidades de GDs despacháveis e unidades SAEM para atender a demanda de potência. Note que, as unidades SAEMs participam somente com a injeção de potência ativa. A queda de tensão entre duas barras é determinada na restrição (4). Devido que a queda de tensão deve ser unicamente calculada entre duas barras interconectadas, a restrição (5) mantém a factibilidade

do modelo no cálculo da queda de tensão no circuito ij . Assim, quando o ramo ij do sistema elétrico está aberto ($y_{ij,f} = 0$), a variável de folga $b_{ij,t,c,f}^v$ encontra-se limitada por (5). Contudo, caso o ramo ij do sistema elétrico esteja fechado ($y_{ij,f} = 1$), $b_{ij,t,c,f}^v$ será igual a zero. A restrição (6) é uma restrição cônica que apresenta o cálculo do fluxo de corrente que percorre o ramo ij e linearizada segundo a aproximação linear proposta em Alguacil et al. (2003).

As restrições operacionais do sistema são determinadas em (7)-(16), onde os subíndices t, c, f correspondem aos conjuntos $\Gamma_T, \Gamma_C^t, \Gamma_F$, respectivamente.

$$0 \leq p_{i,t,c,f}^{ss} \leq \bar{S}_i^{ss}, \quad \forall(i \in \Gamma_S, t, c, f), \quad (7)$$

$$-\bar{S}_i^{ss} \leq q_{i,t,c,f}^{ss} \leq \bar{S}_i^{ss}, \quad \forall(i \in \Gamma_S, t, c, f), \quad (8)$$

$$|q_{i,t,c,f}| \leq \sqrt{2}\bar{S}_i^{ss} - p_{i,t,c,f}^{ss}, \quad \forall(i \in \Gamma_S, t, c, f), \quad (9)$$

$$0 \leq p_{i,t,c,f}^{gd} \leq \bar{P}_i^{gd}, \quad \forall(i \in \Gamma_G, t, c, f), \quad (10)$$

$$-\bar{S}_i^{gd} \leq q_{i,t,c,f}^{gd} \leq \bar{S}_i^{gd}, \quad \forall(i \in \Gamma_G, t, c, f), \quad (11)$$

$$|q_{i,t,c,f}^{gd}| \leq \sqrt{2}\bar{S}_i^{gd} - p_{i,t,c,f}^{gd}, \quad \forall(i \in \Gamma_G, t, c, f), \quad (12)$$

$$0 \leq p_{i,t,c,f}^{pv} \leq \bar{P}_i^{pv}, \quad \forall(i \in \Gamma_P, t, c, f), \quad (13)$$

$$|q_{i,t,c,f}^{pv}| \leq p_{i,t,c,f}^{pv} \tan(\arccos(\phi^{pv})), \quad \forall(i \in \Gamma_P, t, c, f), \quad (14)$$

$$\underline{V}^2 \leq V_{i,t,c,f}^{sqr} \leq \bar{V}^2, \quad \forall(i \in \Gamma_N, t, c, f), \quad (15)$$

$$\ell_{ij,t,c,f}^{sqr} \leq (\bar{I}_{ij})^2 y_{ij,t,f}, \quad \forall(ij \in \Gamma_B, t, c, f). \quad (16)$$

As restrições (7)-(9) representam uma linearização da capacidade da subestação. As restrições (10)-(12) determinam os limites da injeção de potência ativa e reativa dos GDs instalados na rede, respectivamente. As restrições (13) e (14) definem os limites operacionais das unidades de geração PV. Por último, as restrições (15) e (16) determinam os limites operacionais de tensão nas barras e de corrente nos ramos dos sistemas, respectivamente.

2.3 Sistemas de armazenamento de emergência móveis

Durante uma condição de emergência, as concessionárias podem despachar SAEMs com o intuito de melhorar a capacidade de recuperação do SD. Essas unidades SAEMs devem se posicionar de forma estratégica para ir no menor tempo possível de viagem desde o posto de estacionamento até a barra em que será conectada, possibilitando a recuperação do fornecimento de energia as unidades consumidoras. Essa estratégia é formulada em (17)-(29), onde os subíndices st, t, c, n, i, f pertencem aos conjuntos $\Gamma_{st}, \Gamma_T, \Gamma_C^t, \Gamma_N^{saem}, \Gamma_N^{saem}, \Gamma_F$, respectivamente.

$$\sum_{i \in \Gamma_N^{saem}} \sum_{n \in \Gamma_N^{saem}} z_{st,i,n,f}^{saem} \leq \sum_{n \in \Gamma_N^{saem}} k_{st,n}^{saem}, \quad \forall(st, f), \quad (17)$$

$$z_{st,i,n,f}^{saem} \leq z_{st,i,n-1,f}^{saem}, \quad \forall(st, i, n, f), \quad (18)$$

$$\tau_{st,i,n,f}^x = (T_{st,i}^{cf} T_{st,i}^t + C_i^t) z_{st,i,n,f}^{saem}, \quad \forall(st, i, n, f), \quad (19)$$

$$\sum_{t \in \Gamma_T} t w_{i,n,t,f} \geq \sum_{st \in \Gamma_{st}} \tau_{st,i,n,f}^x, \quad \forall(i, n, f), \quad (20)$$

$$\sum_{t \in \Gamma_T} t w_{i,n,t,f} \leq \sum_{st \in \Gamma_{st}} \tau_{st,i,n,f}^x, \quad \forall(i, n, f), \quad (21)$$

$$\sum_{t \in \Gamma_T} w_{i,n,t,f} = \sum_{st \in \Gamma_{st}} z_{st,i,n,f}^{saem}, \quad \forall(i, n, f), \quad (22)$$

$$u_{i,n,t',f} = \sum_{t \in \Gamma_T} w_{i,n,t,f}, \quad \forall(i, n, f, t' : t < t'), \quad (23)$$

$$0 \leq p_{i,t,c,f}^{saemc} \leq \bar{P}^{saem} \sum_{n \in \Gamma_N^{saem}} u_{i,n,t,f}, \quad \forall(i, n, t, c, f), \quad (24)$$

$$0 \leq p_{i,t,c,f}^{saemd} \leq \bar{P}^{saem} \sum_{n \in \Gamma_N^{saem}} u_{i,n,t,f}, \quad \forall(i, n, t, c, f), \quad (25)$$

$$0 \leq soc_{i,t,c,f}^{saem} \leq \overline{SOC}^{saem} \sum_{n \in \Gamma_N^{saem}} u_{i,n,t,f}, \quad \forall(i, n, t, c, f), \quad (26)$$

$$soc_{i,t,c,f}^{saem} = soc_{i,t-1,c,f}^{saem} + \eta_i^{ch} \Delta t p_{i,t,c,f}^{saemc} - \eta_i^d \Delta t p_{i,t,c,f}^{saemd}, \quad \forall(i, n, t, c, f), \quad (27)$$

$$p_{i,t,c,f}^{saemc} \leq M^{saem} \bar{P}^{saem} e_{i,t,c,f}, \quad \forall(i, n, t, c, f), \quad (28)$$

$$p_{i,t,c,f}^{saemd} \leq M^{saem} \bar{P}^{saem} (1 - e_{i,t,c,f}), \quad \forall(i, n, t, c, f). \quad (29)$$

Após a ocorrência da falha, a concessionária pode enviar unidades de SAEMs desde a estação da garagem st até a barra i . A restrição (17) garante que o número de SAEMs enviados para a barra i não exceda o número de unidades disponíveis. A expressão (18) define a sequência de envio dos SAEMs até a barra i . A equação (19) define o tempo (τ^x) que cada unidade consome para se deslocar de st até a barra i . As restrições (20) e (21) utilizam o tempo de viagem para estimar o tempo total até a conexão da unidade SAEM na barra i . A equação (22) é usada para relacionar as variáveis dos SAEMs com as variáveis binárias usadas para estimar o tempo de conexão. A restrição (23) estabelece que as unidades instaladas na barra i permaneçam instaladas nessa barra durante os períodos de tempo seguintes. Em (24) e (25) determina-se o carregamento e descarregamento da unidade instalada na barra i , respectivamente. A restrição (26) indica a capacidade total instalada na barra i em relação ao número de unidades conectadas. A equação (27) calcula a quantidade de energia armazenada nas unidades conectadas ao sistema. Finalmente, as restrições (28) e (29) determinam o estado operacional das unidades, sendo que os SAEMs podem operar em estado de carregamento ou descarregamento, mas não de forma simultânea. Na formulação proposta, M^{saem} é um número grande.

2.4 O problema de restauração e formação de microrredes

Na abordagem proposta, o processo de restauração coordenada de forma dinâmica o acionamento de chaves de manobra para a reconfiguração da rede e a formação de microrredes. Considera-se um esquema de operação GD mestre-escravo, conforme apresentado por Ding et al. (2017), junto com o despacho dos SAEMs. O processo de restauração visa separar o conjunto de barras que estão energizadas das barras que estão fora de serviço. Para conseguir isto, esta estratégia inclui uma rede fictícia que é composta por uma subestação e circuitos conectados em todas as barras do sistema real. O intuito deste sistema fictício é formar uma rede que conecte todas as barras que estão fora de serviço durante o processo de restauração, conseguindo separar o sistema em duas partes. Logo, a formação de microrredes manterá uma topologia radial e adotará como

barra de referência a barra com maior capacidade de GD despachável.

O conjunto de restrições (30)-(32) conserva a radialidade das regiões do sistema que estão energizadas e as que estão fora de serviço, respectivamente, evitando a interconexão entre subestações. Além disso, auxilia na formação de microrredes. Os índices t, f são referentes aos conjuntos Γ_T, Γ_F , respectivamente.

$$h_{ij,t,f} + h_{ji,t,f} = y_{ij,t,f}, \quad \forall (ij \in \Gamma_B \cup \Gamma_B^h, t, f), \quad (30)$$

$$\sum_{ij \in \Gamma_B^*} h_{ij,t,f} = 1, \quad \forall (i \in \Gamma_N | i \notin \Gamma_S, t, f), \quad (31)$$

$$h_{ij,t,f} = 0, \quad \forall (ij \in \Gamma_B^* | i \in \Gamma_S, t, f). \quad (32)$$

A variável binária $h_{ij,t,f}$ define o estado operacional do ramo ij . Logo, se $y_{ij,t,f} = 0$, a chave do ramo ij encontra-se aberta para o cenário de falha f , caso contrário, se $y_{ij,t,f} = 1$, o estado operacional da chave será fechada. A equação (30) define a relação de conexão entre as barras i e j , sendo que a variável binária $h_{ij,t,f}$ determina a direção de conexão entre as barras i e j considerando às subestações como raízes de um grafo do tipo árvore de expansão. Se $h_{ij,t,f} = 1$, as barras i e j são conectadas de j para i no cenário de falha f . A restrição (31) garante que todas as barras do sistema estejam conectadas a uma subestação, seja no circuito real o fictício. Para evitar a conexão entre barras de duas subestações, a restrição (32) fixa a variável $h_{ij,t,f} = 0$ caso a barra i faça seja uma subestação ($i \in \Gamma_S$).

O modelo proposto determina o estado de operação dos GD despacháveis do sistema, assim, o estado operacional de mestre ou escravo das unidades de GD despacháveis é determinado nas restrições (33)-(35). Os índices ij, t, c, f correspondem aos conjuntos $\Gamma_B^h, \Gamma_T, \Gamma_C^t, \Gamma_F$, respectivamente.

$$v_{i,t,c,f}^{sqr} + b_{i,t,c,f}^g = (V_i^G)^2, \quad \forall (i \in \Gamma_G, t, c, f), \quad (33)$$

$$|b_{i,t,c,f}^g| = M^v(1 - y_{ij,t,f}), \quad \forall (ij, t, c, f | j \in \Gamma_G \wedge i \in \Gamma_S), \quad (34)$$

$$y_{ij,t,f} = y_{ij,t-1,f}, \quad \forall (ij, t, c, f | j \in \Gamma_G \wedge i \in \Gamma_S). \quad (35)$$

A equação (33) define a tensão nas barras que, em estado de emergência, vão operar como unidade mestre e serão a barra de referência na formação de uma microrred. A variável de folga $b_{i,t,c,f}^g$ é calculada em (34) de acordo com o estado do circuito que conecta a barra com o sistema fictício. Caso o circuito fictício seja fechado, a unidade de GD da barra i operará como uma unidade mestra durante o processo de restauração, a variável $b_{i,t,c}^g$ será nula ($b_{i,t,c}^g = 0$) e a tensão na barra será fixada como $(V_i^G)^2$. Finalmente, de acordo com (35), o estado operacional da unidade GD despachável deve permanecer invariável para os períodos subsequentes.

As restrições auxiliares (36)-(38) são usadas para completar o modelo de restauração.

$$|x_{i,t,f} - x_{j,t,f}| \leq (1 - y_{ij,t,f}), \quad \forall (ij \in \Gamma_B, t, f), \quad (36)$$

$$x_{j,t,f} \geq y_{ij,t,f}, \quad \forall (ij \in \Gamma_B^h, t, f), \quad (37)$$

$$x_{i,t,f} = 0, \quad \forall (i \in \Gamma_N^f, t, f). \quad (38)$$

A restrição (36) garante que as regiões do sistema que estejam energizadas não tenham conexões com as regiões não operacionais. Caso o ramo ij seja fechado ($y_{ij,t,f} = 1$),

então os estados das barras i e j devem ser iguais, $x_{i,t,f} = x_{j,t,f}$, caso contrário, o ramo ij estará aberto ($y_{ij,t,f} = 0$) e $x_{i,t,f}$ e $x_{j,t,f}$ serão independentes um do outro. A restrição (37) garante que as barras que estão fora de serviço estejam conectadas apenas ao sistema fictício. Durante um cenário de falha, as barras que não foram diretamente afetadas pela falta devem continuar energizadas, nesse sentido, a equação (38) fixa a variável de corte de serviço $x_{i,t,f}$ com o valor de 0 nas barras que não foram diretamente afetadas pela falta.

2.5 Restrições para a alocação de GDs despacháveis

Para melhorar a capacidade de recuperação do sistema, analisa-se a alocação de GD despacháveis, esperando que elas auxiliem no fornecimento de potência e funcionem como unidades escravas durante as condições de emergência.

$$0 \leq p_{i,t,c,f}^{ngd} \leq \bar{P}_i^{ngd} g_i, \quad \forall (i \in \Gamma_G^N, t, c, f), \quad (39)$$

$$\underline{Q}_i^{ngd} g_i \leq q_{i,t,c,f}^{ngd} \leq \bar{Q}_i^{ngd} g_i, \quad \forall (i \in \Gamma_G^N, t, c, f), \quad (40)$$

$$|q_{i,t,c,f}^{ngd}| \leq \sqrt{2} \bar{P}_i^{ngd} - p_{i,t,c,f}^{ngd}, \quad \forall (i \in \Gamma_G^N, t, c, f). \quad (41)$$

A variável binária g_i analisa se o investimento em uma nova unidade despachável é apropriado. Finalmente, o conjunto de restrições lineares (39)-(41) definem os limites de potência ativa e reativa das novas unidades GDs.

3. SISTEMA TESTE E RESULTADOS

O modelo proposto é testado através do sistema de 33 barras adaptado de Baran e Wu (1989) apresentado na Fig. 1. Este sistema possui duas garagens com duas unidades de SAEMs disponíveis cada uma. A capacidade destes dispositivos são de 0,30 MW e 1,00 MWh respectivamente. O sistema tem três unidades de GD despachável com capacidade de 0,75 MVA com um fator de potência de 0,80 p.u. Em estado de emergência, estas unidades estão disponíveis para operar como unidades mestres na formação de microrredes. Por outro lado, existem cinco unidades de GD fotovoltaica, cada uma de 0,20 MW. No contexto do planejamento, as barras 11, 15, 20, 23, and 28 são consideradas como candidatas para a instalação das unidades de GD despachável, levando em conta que cada unidade tem a capacidade de 0,20 MVA com um custo de investimento de US\$10000. As incertezas próprias da demanda de potência e a irradiação solar são consideradas com 24 cenários estocásticos de doze períodos temporais. Estes cenários foram obtidos a partir de dados históricos e reduzidos usando o método de agrupamento k-means segundo o apresentado por Home-Ortiz et al. (2019).

O modelo de otimização foi implementado na linguagem de modelagem matemática AMPL e resolvido mediante o solver comercial CPLEX 20.1.0. As simulações numéricas tem sido realizadas num computador com um processador de 2,8 GHz Intel® Core™ i7-7700HQ e 16 GB de RAM.

3.1 Casos de estudo

A solução do modelo proposto, considera os tres cenários de alto impacto e definidos de forma aleatoria que são

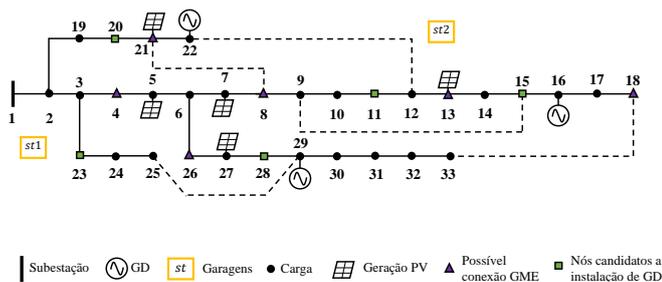


Figura 1. Topologia inicial do sistema de 33 barras

Tabela 1. Cenários de falta e o seus impactos no sistema de 33 barras

Cenário de falta	Circuito em falta	Demanda desconnectada	Demanda energizada	Barras energizadas
1	2-3, 7-8, 15-16, 24-25	87,62%	598 kW	1, 2, 19, 20, 21, 22
2	1-2, 5-6, 7-8, 10-11, 20-21, 28-29	100,00%	0 kW	1
3	4-5, 10-11, 13-14, 20-21, 31-32	61,78%	1846 kW	1, 2, 3, 4, 19, 20, 23, 24, 25

apresentados na Tabela 1. Note que a demanda torna-se fluctuante em cada período, e a tabela 1 mostra as porcentagens de carga conectada e desconectada respectivamente, que são obtidas considerando um cenário de demanda pico. A robustez do modelo proposto é validada através dos casos de estudo detalhados em seguida:

- Caso I: O processo de restauração é baseado unicamente na operação de chaves de manobra. O resto de recursos mencionados, alocação de GD e despacho de SAEMs são desconsiderados.
- Caso II: A mais do chaveamento, este caso considera a alocação de GDs. O despacho dos SAEMs são desconsiderados.
- Caso III: Neste caso, a alocação de GD é despeçada enquanto que o chaveamento e despacho de SAEMs atuam na restauração.
- Caso IV: Todos os recursos operacionais e de investimento são considerados no problema.

Para cada caso de estudo, a Tabela 2 apresenta as chaves abertas, chaves fechadas e o período em que deve ser feito o chaveamento. Por outro lado, o itinerário dos SAEMs incluem o ponto de estadia padrão, a barra de conexão e o tempo de deslocamento. As Fig. 2 e Fig. 3 comparam as demandas ativas conectadas em cada caso, e que foram obtidas para os cenários de falha mais críticos, 1 e 2 respectivamente.

Caso I Neste caso, a solução propõe um processo de restauração em varias etapas para cada cenário de falha. No cenário de falha 1, o processo de restauração forma duas microrredes com os GDs das barras 16 e 29 operando como unidades mestres. Como apresentado na Fig. 1, no período t_0 , existe uma porcentagem de demanda conectada de 59,89% que vai aumentando até atingir 63,93% no período 11. No cenário de falha dois, o processo de restauração forma duas microrredes com as unidades de GDs das barras 16 e 29 operando como unidades mestres. No primeiro período t_0 existe um 46,97% de demanda

Tabela 2. Resultados do processo de restauração para os casos I - IV

Caso	Cen. Falta	Chaves abertas	chaves fechadas	SAEM
I	1	[(4-5, 29-30, 31-32) t_0 ; (30-31) t_1]	[(12-22, 18-33) t_0 ; (31-32) t_{11}]	-
	2	[(8-9, 24-25, 29-30, 31-32) t_0 ; (9-10) t_9]	[(8-21, 12-22, 18-33, 25-29) t_0 ; (9-15) t_{10}]	-
	3	[(5-6, 7-8, 9-10) t_0 ; (8-21) t_3 ; (7-8) t_{11}]	[(8-21, 9-15, 12-22, 18-33, 25-29) t_0 ; (7-8) t_3 ; (8-21) t_{11}]	-
II	1	[(23-24, 29-30, 31-32) t_0 ; (30-31) t_6]	[(8-21, 18-33) t_0 ; (31-32) t_{11}]	-
	2	[(24-25, 29-30, 30-31) t_0]	[(8-21, 9-15, 18-33, 25-29) t_0]	-
	3	-	[(8-21, 9-15, 12-22, 18-33, 25-29) t_0]	-
III	1	[(26-27, 29-30, 30-31) t_0 ; (6-26) t_1 ; (5-6) t_3 ; (3-4) t_7 ; (6-7) t_{10}]	[(12-22, 18-33, 25-29) t_0 ; (26-27) t_1 ; (6-26) t_{10} ; (5-6) t_{11}]	st5 → 4 (2h); st5 → 4 (2h); st16 → 18 (2h); st16 → 26 (3h); st5 → 13 (4h); st5 → 21 (3h); st16 → 8 (2h); st16 → 18 (2h).
	2	[(13-14, 14-15, 24-25, 29-30, 30-31) t_0]	[(8-21, 9-15, 12-22, 18-33, 25-29) t_0 ; (14-15) t_1]	st5 → 13 (4h); st5 → 21 (3h); st16 → 8 (2h); st16 → 18 (2h).
	3	[(7-8) t_0 ; (27-28) t_{10} ; (9-15) t_{11}]	[(8-21, 9-15, 12-22, 18-33, 25-29) t_0 ; (7-8) t_{10} ; (27-28) t_{11}]	st5 → 4 (2h); st16 → 18 (2h); st16 → 26 (3h); st5 → 13 (4h); st5 → 21 (3h); st16 → 8 (2h); st16 → 18 (2h).
IV	1	[(4-5, 6-7, 23-24, 29-30, 30-31) t_0]	[(8-21, 18-33, 25-29) t_0 ; (4-5) t_1]	st5 → 4 (2h); st16 → 18 (2h); st16 → 26 (3h); st5 → 13 (4h); st5 → 21 (3h); st16 → 8 (2h); st16 → 18 (2h).
	2	[(24-25, 30-31) t_0 ; (3-23) t_7]	[(8-21, 9-15, 12-22, 18-33, 25-29) t_0 ; (30-31) t_1 ; (24-25) t_{10}]	st5 → 13 (4h); st5 → 21 (3h); st16 → 8 (2h); st16 → 18 (2h).
	3	-	[(8-21, 9-15, 12-22, 18-33, 25-29) t_0]	st5 → 13 (4h); st5 → 21 (3h); st16 → 8 (2h); st16 → 18 (2h).

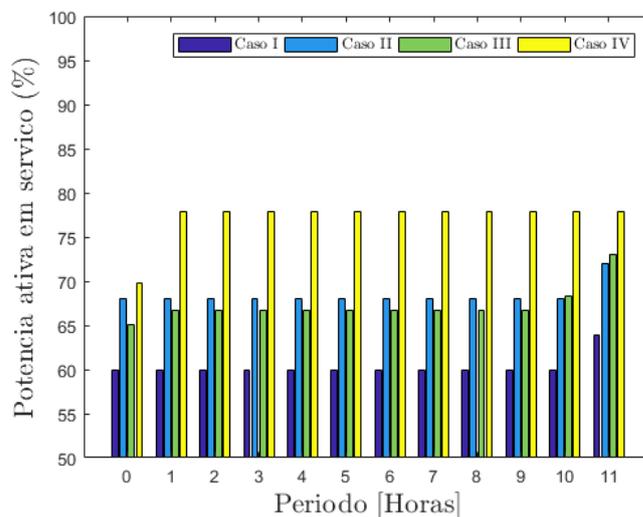


Figura 2. Potência ativa em serviço em cada período no cenário de falha 1

ativa conectada que aumenta até 48,59% no período t_{10} . No cenário de falha três, o processo de restauração forma uma microrrede com a unidade GD da barra 22 operando como unidade mestre. A porcentagem de demanda ativa conectada, é de 96,77% em todos os períodos.

Caso II Neste caso, o plano de investimento propõe a instalação de quatro unidades de GDs despacháveis nas

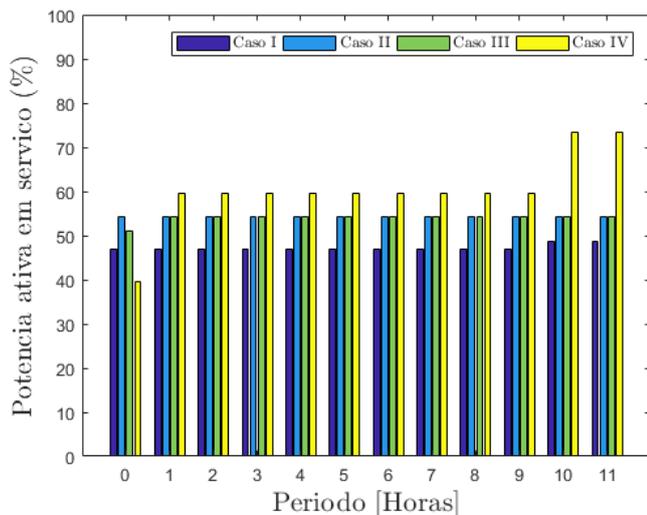


Figura 3. Potência ativa em serviço em cada período no cenário de falta 2

barras 11, 15, 23 e 28 com custo total de investimento é de US\$ 40000. Para o cenário de falha 1, o processo de restauração forma duas microrredes com as unidades GDs das barras 16 e 29 operando como unidades mestres. A percentagem de demanda ativa recuperada no período t_0 é 67,97% que cresce até 72,01% no período t_{11} . Por outro lado, a restauração pro cenário de falha 2 propõe a formação de duas microrredes com duas unidades de GDs alocadas nas barras 16 e 29 que operam como unidades mestres para manter o 54,24% de demanda ativa conectada durante todos os períodos. No cenário de falha 3, é possível manter o 100% de demanda ativa conectada. Neste caso o processo de restauração não considera a formação de microrredes e todas as unidades de GD operam como escravas da subestação que é a barra de referência do sistema.

Caso III Considerando a restauração do sistema com o despacho de SAEMs, a solução do problema apresenta um resultado mais eficiente quando comparado com o caso I.

No cenário de falta 1, formam-se duas microrredes com os GD despacháveis das barras 16 e 29 operando como unidades mestre. No período t_0 o sistema tem uma carga energizada de 65,01% que aumenta até 66,62% 68,24% e 73,08% nos períodos t_1 , t_{10} e t_{11} , respectivamente. Neste cenário de falta, quatro SAEMs são conectadas no sistema, duas na barra 4, uma na barra 18 e uma na barra 26. Considerando o cenário de falta 2, a solução propõe a formação de duas microrredes com os GD despacháveis das barras 16 e 29 sendo a referência em tensão dessas microrredes. O sistema, em estado restaurativo, tem uma demanda total energizada de 51,01% no período t_0 que aumenta até 54,24% no período t_1 mantendo-se constante nos seguintes períodos. O processo de restauração propõe a conexão de três SAEMs no sistema nas barras 8, 13 e 21. No cenário de falta 3 é possível restaurar 100% da carga do sistema, desde o primeiro período, com a formação de uma microrrede e a conexão de duas SAEMs no sistema. A microrrede formada tem como referência o GD da barra 16 e as SAEMs devem ser instaladas nas barras 8 e 18.

Caso IV Considerando a restauração do sistema com o despacho de SAEMs, a solução do problema apresenta um plano de investimento com a instalação de quatro GD nas barras 11, 15, 23 e 28 com um custo total de US\$ 40000.

No cenário de falta 1, formam-se duas microrredes com os GD despacháveis das barras 16 e 29 operando como unidades mestre. No período t_0 o sistema tem uma carga energizada de 66,62% que aumenta até 77,93% no período t_1 e mantém-se constante nos períodos seguintes. Neste cenário de falta, três SAEMs são conectadas no sistema nas barras 4, 18 e 26. Considerando o cenário de falta 2, não tem formação de microrredes pelo que todas as unidades de GD estão operando como unidades escravas. O sistema, em estado restaurativo, tem uma demanda total energizada de 39,70% no período t_0 que aumenta até 59,62% no período t_1 e aumenta novamente no período t_{10} até 73,35%. Neste cenário de falta, quatro SAEMs devem ser conectadas no sistema nas barras 13, 21, 8 e 18. Finalmente, no cenário de falta 3, o processo de restauração consegue restaurar 100% da carga. A solução desconsidera a formação de microrredes e o despacho de SAEMs.

3.2 Discussões

Os resultados mostram as vantagens da alocação de GDs, pois a capacidade de recuperação dos SDs atinge melhores níveis. Isto é demonstrado com o incremento de demanda ativa conectada quando comparado com os casos que desconsideram o investimento em unidades de GD despachável. Note que a alocação de unidades de GD despachável não representa um problema operacional sob condições normais de operação, pois estes dispositivos podem ser controlados segundo os requisitos da rede.

Quando a alocação de GD despachável é desprezada (Caso I), o a percentagem de demanda ativa recuperada é menor o que indica que o sistema é menos resiliente. No entanto, pro Caso III, as unidades de SAEMs conseguem uma melhoria na quantidade de energia energizada do sistema em estado restaurativo ao longo dos períodos de análise. Isto é apresentado nas figuras Fig. 2 e Fig. 3 onde pode-se observar que, em todos os períodos, a percentagem de potência restaurada no caso III é maior que a que pode ser restaurada no caso I. Finalmente, os melhores resultados são obtidos nos casos II e IV que consideram a alocação ótima de GD no sistema. Nestes casos, a percentagem de carga restaurada é maior que nos casos I e III em todos os cenários de falta analisados.

4. CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta um modelo de programação linear inteira-mista para resolver a alocação de geração distribuída visando obter um sistema de distribuição resiliente. Como estratégias de operação, o modelo proposto considera um esquema de restauração completo após um conjunto de eventos de falha de alto impacto que inclui o chaveamento dinâmico de chaves de manobra, a reconfiguração da topologia da rede, a formação de microrredes e o despacho e conexão de sistemas de armazenamento de emergência moveis (SAEMs).

Os resultados numéricos mostram a vantagem de resolver os problemas de planejamento e restauração de forma

simultânea como um único problema de otimização. Neste sentido, os resultados mostram que quantidade de demanda ativa recuperada é maior quando considerada a alocação de GD despachável. Por outro lado, a consideração dos SAEMs representa uma vantagem operativa para melhorar a recuperação e a resiliência dos SDs. Como trabalhos futuros, pode-se considerar a presença de novos recursos operacionais tais como equipes de reparo e programas de resposta em demanda para estados de emergência. Uma abordagem multiobjetivo pode ser consideradas já que a minimização dos custos de investimento pode ser contrária ao melhoramento da capacidade de resposta do sistema a eventos de falta.

REFERÊNCIAS

- Alguacil, N., Motto, A.L., e Conejo, A.J. (2003). Transmission expansion planning: a mixed-integer lp approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, 18(3), 1070–1077. doi:10.1109/TPWRS.2003.814891.
- Baran, M.E. e Wu, F.F. (1989). Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Power Engineering Review*, 9(4), 101–102.
- Chen, B., Chen, C., Wang, J., e Butler-Purry, K.L. (2018). Multi-time step service restoration for advanced distribution systems and microgrids. *IEEE Trans. Smart Grid*, 9(6), 6793–6805.
- Ding, T., Lin, Y., Bie, Z., e Chen, C. (2017). A resilient microgrid formation strategy for load restoration considering master-slave distributed generators and topology reconfiguration. *Applied energy*, 199, 205–216.
- Home-Ortiz, J.M., Melgar-Dominguez, O.D., Mantovani, J.R.S., e Catalão, J.P. (2022). Pv hosting capacity assessment in distribution systems considering resilience enhancement. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 32, 100829.
- Home-Ortiz, J.M., Pourakbari-Kasmaei, M., Lehtonen, M., e Mantovani, J.R.S. (2019). Optimal location-allocation of storage devices and renewable-based dg in distribution systems. *Electric Power Systems Research*, 172, 11–21.
- Home-Ortiz, J.M. e Mantovani, J.R.S. (2020). Resilience enhancing through microgrids formation and distributed generation allocation. In *2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)*, 995–999. IEEE.
- Jufri, F.H., Widiputra, V., e Jung, J. (2019). State-of-the-art review on power grid resilience to extreme weather events: Definitions, frameworks, quantitative assessment methodologies, and enhancement strategies. *Applied energy*, 239, 1049–1065.
- Kim, J. e Dvorkin, Y. (2018). Enhancing distribution system resilience with mobile energy storage and microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(5), 4996–5006.
- Lei, S., Chen, C., Li, Y., e Hou, Y. (2019). Resilient disaster recovery logistics of distribution systems: Co-optimize service restoration with repair crew and mobile power source dispatch. *IEEE Trans. Smart Grid*, 10(6), 6187–6202.
- Sedzro, K.S.A., Lamadrid, A.J., e Zuluaga, L.F. (2018). Allocation of resources using a microgrid formation approach for resilient electric grids. *IEEE Trans. Power Systems*, 33(3), 2633–2643.
- Shahbazi, A., Aghaei, J., Pirouzi, S., Niknam, T., Shafiekhah, M., e Catalão, J.P. (2021). Effects of resilience-oriented design on distribution networks operation planning. *Electric Power Systems Research*, 191, 106902.
- Taheri, B., Safdarian, A., Moeini-Aghtaie, M., e Lehtonen, M. (2020). Distribution system resilience enhancement via mobile emergency generators. *IEEE Trans. Power Delivery*.
- Vargas, R., Macedo, L.H., Home-Ortiz, J.M., Mantovani, J.R.S., e Romero, R. (2021a). Optimal restoration of active distribution systems with voltage control and closed-loop operation. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(3), 2295–2306.
- Vargas, R., Macedo, L.H., Home-Ortiz, J.M., e Romero, R. (2021b). Optimal restoration of distribution systems considering temporary closed-loop operation. *IEEE Systems Journal*, 15(4), 5483–5494.
- Wang, Y., Rousis, A.O., e Strbac, G. (2020). On microgrids and resilience: A comprehensive review on modeling and operational strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110313.
- Yao, S., Wang, P., Liu, X., Zhang, H., e Zhao, T. (2019). Rolling optimization of mobile energy storage fleets for resilient service restoration. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(2), 1030–1043.
- Zhang, G., Zhang, F., Zhang, X., Wu, Q., e Meng, K. (2020). A multi-disaster-scenario distributionally robust planning model for enhancing the resilience of distribution systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 122, 106161.