

Automatic Power Restoration in Distribution Systems Modeled Through Multiagent Systems

G. F. A. Martins, A. B. Almeida

Abstract—This paper proposes a restoration strategy based on Multiagent Systems to solve the restoration problem in distribution systems. The model addresses the sequential stages of energy restoration in order to define the rules, actions, and operating environment of each agent, taking into account the analysis of technical reports and operational guidelines. This model considers the application of a strategic plan for energy restoration with the possibility of load shedding, which addresses the mapping of out-of-service areas, the assessment of the supply capacity of each feeder and the maximization of loads restored through switching. The presented model is applied to a typical distribution network, the simulation results show that the proposed model is capable of restoring out of service loads without violating the operational restrictions of the distribution system.

Index Terms—Distribution System, Smart Grid, Network Restoration, Multiagent System.

I. INTRODUÇÃO

Os Sistemas de Distribuição (SDs) representam a conexão final entre as distribuidoras de energia e consumidores, desempenhando um papel fundamental para o desenvolvimento da sociedade. Portanto, os SDs devem garantir alto nível de qualidade de serviço. Uma modo de avaliar o serviço, no Brasil, é através dos indicadores coletivos [1]. Índices como DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) fornecem um indicador abrangente da confiabilidade do SD.

No Brasil, conforme dados da ANEEL [1], o DEC registrado no ano de 2018 foi de 17,45 horas, considerando as mais de 82,1 milhões de unidades consumidoras atendidas em território nacional. Desse valor, apenas 0,44 horas correspondem à duração das interrupções causadas externamente aos SDs, enquanto 17,01 horas são originadas internamente aos SDs. Isso significa que 97,47% do DEC ocorrido no Sistema Elétrico de Potência (SEP) possui, como origem, eventos decorrentes nos SDs. No caso do FEC, no mesmo ano, foram registradas 8,76 interrupções, sendo 8,07 causados internamente aos SDs. Esses dados indicam que 92,12% do FEC apresentado pelo SEP foram originados por eventos decorrentes dos SDs. As Fig. 1 e 2 apresentam os indicadores DEC e FEC, conforme dados apresentados pela ANEEL.

Frente aos dados, há um crescente interesse por parte dos agentes reguladores e distribuidoras de energia em estudos que buscam possíveis soluções para problemas relacionados

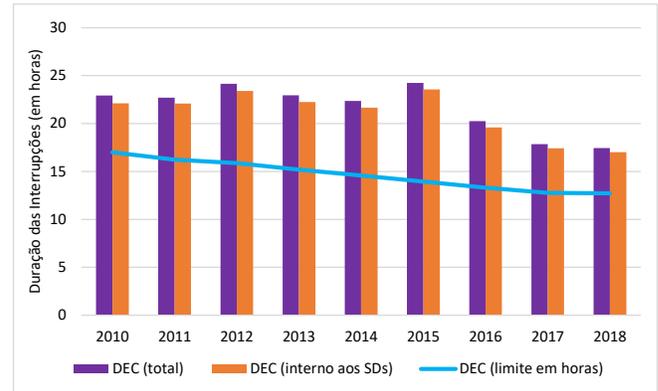


Fig. 1. Resultados de DEC no período de 2010 a 2018, adaptado de [1].

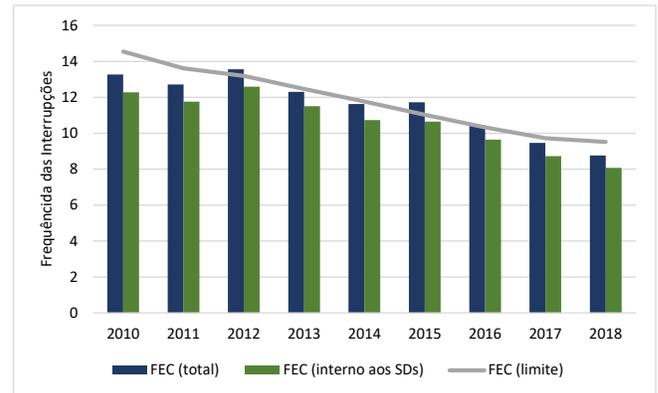


Fig. 2. Resultados de FEC no período de 2010 a 2018, adaptado de [1].

aos desligamentos nos SDs. Nesse contexto, os interessados buscam continuamente por melhorias dos serviços, seja por meio do aprimoramento das práticas ou pelo desenvolvimento de novas tecnologias.

No entanto, por mais que se invista na redução dos desligamentos, as interrupções são inevitáveis e imprevisíveis (exceto aquelas programadas internamente e externamente à distribuidora). Portanto, é imprescindível um mecanismo que restaure as cargas do SD. Assim, pesquisas que objetivam melhorias do processo de restabelecimento dos SDs foram propostas. Em [2], foi proposto um algoritmo evolucionário multi-objetivo com base em tabelas de subpopulação, que armazena as melhores soluções de acordo com cada critério, restrição ou uma combinação deles em tabelas subpopulação distintas. Cada tabela mapeia uma região relevante perto da Fronteira de Pareto no espaço objetivo. O conjunto de todas

G. F. A. Martins, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu, Brasil, e-mail: (gyaanflavio@gmail.com).

A. B. Almeida, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu, Brasil, e-mail: (adbaal@yahoo.com.br).

Manuscript received November xx, 2019; revised December xxx, 2019.

as tabelas garante uma diversidade significativa de regiões próximas a Fronteira de Pareto, aumentando a probabilidade de gerar novas soluções que também estão perto da Fronteira de Pareto. Um novo modelo matemático multi-objetivo para o problema de restauração em SDs é proposto em [3], o qual parte de um modelo inteiro misto não linear, transformando-o em um de programação cônica de segunda ordem inteira mista, que pode ser resolvido de forma eficiente utilizando diversos *solvers* comerciais. Algoritmo viterbi para identificar e melhorar o plano de restauração do SD diante de situações de múltiplas falhas para melhorar a resiliência da rede é proposto em [4]. Em [5], um algoritmo evolutivo multiobjetivo com busca local e corte de cargas é proposto, precedido por uma etapa determinística concentrada na região problema que, segundo o autor, é capaz de lidar com consumidores de níveis de prioridade diferentes, dando um tratamento diferenciado para chaves manuais e remotas. Destaca-se ainda que apesar de considerar a possibilidade de corte de cargas, o método prioriza a geração de planos que não provoquem desligamentos temporários. Um novo esquema de codificação para as cargas a serem restauradas é proposto [6], em que as variáveis que codificam o funcionamento das chaves são separadas em grupos, a fim de definir as operações de cruzamento e as mutações executadas, resultando numa redução do espaço de busca pelas soluções. Minimização da carga de consumidores fora de serviço e redução dos custos baseada em gráfico heurístico é proposto por [7]. A abordagem é baseada na lógica do algoritmo modificado de Prim, que encontra as árvores de extensão mínima. Os custos de operação dos equipamentos são representados pelos coeficientes de custos de comutação. Os coeficientes de custo são atribuídos a todos os ramos em uma área de tensão. Já em [8] é proposta a otimização baseada em permutação para o problema de restauração de carga com melhor tempo de estimativa de manobras, formulada em duas funções objetivo. O espaço de busca é codificado como um conjunto de vetores de permutação contendo todos os interruptores manobráveis. O problema de otimização é resolvido usando *Simulated Annealing* seguido por um refinamento de busca local.

Essas técnicas resolvem o problema do ponto de vista centralizado, o que pode ser uma desvantagem, principalmente quando associadas às expectativas das *Smart Grids*. Na literatura, muito se discute sobre as incertezas envolvidas com a adoção de controles centralizados para o gerenciamento das futuras redes, principalmente quando listadas as tendências futuras, por exemplo, alto volume de dados [9], alta inserção de recursos energéticos distribuídos [10] e o aumento da complexidade dos SDs em vista à automação de seus componentes [11].

Para lidar com esses desafios, os sistemas autônomos e distribuídos foram, em grande medida, perseguidos pela comunidade científica para aplicação em SDs [12], [13]. Dentre as propostas, o Sistema Multiagente (SMA) despertou grande interesse na literatura [14], demonstrando ser uma técnica adequada para essa finalidade devido às suas características importantes de autonomia, visões locais e controle distribuído, sendo considerada uma das abordagens mais promissoras para o gerenciamento das futuras redes.

Na literatura, os serviços oferecidos por uma *Smart Grid* estão associados com a capacidade que esta possui em responder e coordenar ações diante de eventos diversos, objetivando corrigir perturbações, minimizar impactos e melhorar a estabilidade do sistema durante distúrbios [15]. Afirma-se, ainda, que a principal funcionalidade de uma *Smart Grid* é a capacidade de recuperar suas cargas fora de serviço de maneira automática [11], também conhecida como *Self-Healing*. Este termo apresenta como premissa ações corretivas automáticas que coordena e executa ações de modo a minimizar a duração das interrupções, bem como recuperar as cargas fora de serviço em favor da confiabilidade geral do sistema.

Nesse contexto, o presente trabalho propõe uma arquitetura para o restabelecimento do SD baseada em Sistemas Multiagentes. Esse modelo aborda questões práticas de interesse de distribuidora em que foram elaboradas as ações de cada agente, cujo objetivo é a aplicação de um plano estratégico para o restabelecimento de energia com possibilidade de corte de carga, o qual aborda o mapeamento das áreas fora de serviço, a avaliação da capacidade de suprimento de cada alimentador e a maximização das cargas restauradas através de chaveamento.

Cabe destacar que este trabalho é baseado em [16], [17]. As diferenças entre tais trabalhos e o presente trabalho está na adição de um terceiro nível na arquitetura hierárquica, a implementação de um método de fluxo de potência e o mapeamento das áreas fora de serviço. Tais trabalhos foram modelados para dois níveis hierárquicos, os quais não abordam a Subestação do SD, assim, o presente trabalho propõe a adição de um terceiro nível hierárquico para representá-la. Com a inclusão da Subestação no modelo, atribui-se aos agentes do sistema um método de fluxo de potência, necessário para verificar se as soluções encontradas cumprem com os limites operacionais permitidos, o que, comparado a esses trabalhos, não é realizado pelos próprios agentes do sistema. Em relação ao mapeamento das áreas fora de serviço, pouco se discute por parte desses autores, portanto, o presente trabalho elaborou um mecanismo de comunicação entre os agentes para mapear as áreas fora de serviço. Logo, a ampliação do modelo para três níveis, a inclusão do método de fluxo de potência e o mapeamento dos setores fora de serviço, foram as contribuições deste trabalho.

II. RESTABELECIMENTO DE ENERGIA EM SDs

O problema de restabelecimento de energia dos SDs consiste em procurar por uma topologia de forma a otimizar alguma função objetivo, sujeita à restrições que representam os limites físicos e operacionais [18].

Para um melhor entendimento, em situações de contingência que ocasiona a atuação do sistema de proteção, resulta na interrupção no fornecimento de energia. Nesse instante, o ramal de alimentação se encontra dividido em duas partes, montante e jusante. Na parcela localizada à montante, encontram-se os setores energizados, enquanto à jusante os setores fora de serviço. A parcela à jusante contém outras duas divisões, uma referente ao setor em falta e a outra referente aos setores saudáveis situados após o setor em falta.

Diante da presente situação, é elaborada uma estratégia que permita o isolamento da falta para que as atividades

de manutenção sejam prestadas aos demais setores desligados fora de serviço durante a manobra, vez que existe a possibilidade de energia aos setores saudáveis disponíveis sem violar os limites da estratégia, que busca alternar consumidores prejudicados, e o restabelecimento de energia.

III. PROPOSTA DE UM MODELO DE PROCESSO DE RESTABELECIMENTO

O modelo proposto é dividido em três níveis, conforme ilustra a Fig. 3. O primeiro nível é composto por um Agente Alimentador (AS), o segundo por Agentes Alimentadores (AAL) e o terceiro por Agente Dispositivo (AD). Os SDs radiais, em que o Agente Subestação e, em sua saída, e os transformadores, sendo representados situados no início de cada linha de transmissão. Para cada Agente Alimentador existe um conjunto de Agentes Dispositivos, os quais representam as chaves automáticas

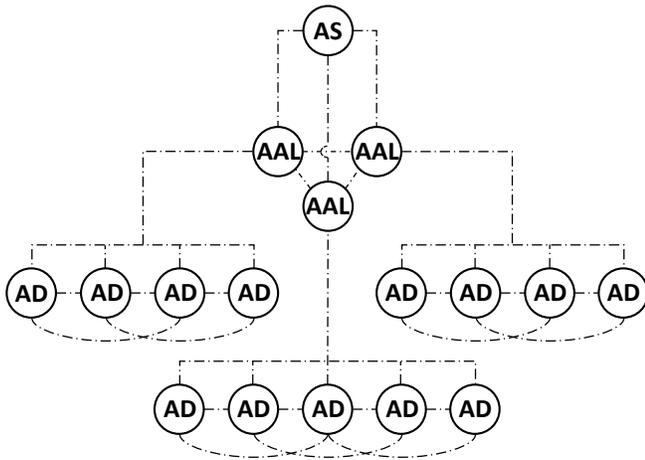


Fig. 3. Arquitetura hierárquica do modelo adaptado.

A partir da estrutura hierárquica, o modelo proposto deverá, ao final do processo, restaurar o maior número possível de cargas fora de serviço. A Fig. 4 ilustra a execução do modelo.

A estratégia busca, inicialmente, restabelecer o SD com um único chaveamento através de uma negociação entre os Agentes Alimentadores mais próximos ao local defeituoso. Caso a capacidade disponível desses alimentadores seja insuficiente, é elaborada uma tabela a partir da comunicação entre os agentes, em que os dados são coletados e organizados em grupos. Caso os grupos violem o limite de carregamento dos alimentadores candidatos, é iniciada a atividade por “subcontrato”, que consiste em aliviar o carregamento desses alimentadores com a transferência de carga envolvendo outros alimentadores. Caso ainda seja insuficiente, é iniciado o corte seletivo de carga.

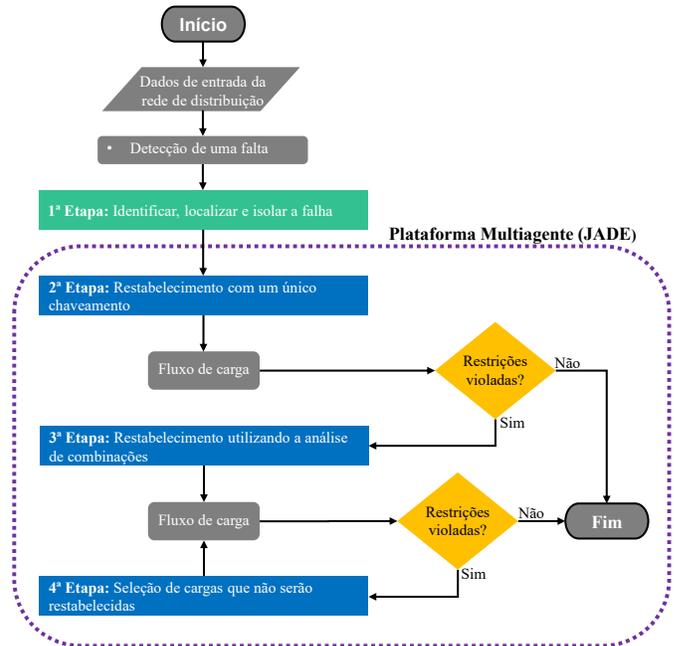


Fig. 4. Fluxograma de execução do modelo.

No modelo proposto, há um método de fluxo de carga implementado no Agente Subestação de modo a verificar se a solução cumpre com os limites operacionais permitidos.

A. Plataforma de Simulação

O modelo foi implementado no *framework* JADE (*Java Agent DEvelopment Framework*), o qual disponibiliza um conjunto de recursos que auxiliam e simplificam a implementação de sistemas multiagente através de um *middleware*, assegurando o cumprimento das normas através de um conjunto abrangente de serviços que atende às especificações do padrão FIPA (*The Foundation for Intelligent, Physical Agents*). Possui ainda um conjunto de ferramentas gráficas que suportam a depuração e implantação dos agentes e a interceptação de mensagens ACL (*Agent Communication Languages*) e as mostram graficamente usando uma notação semelhante aos diagramas de sequência UML (*Unified Modeling Language*) [22].

A estrutura de comunicação, ilustrada pela Fig. 5, possui três níveis, sendo implementado o protocolo de comunicação FIPA *Contract Net*, que consiste num processo comunicativo descentralizado em que os participantes firmam um contrato de modo a garantir a interoperabilidade.

A Figura 5 ilustra um SD com três alimentadores conectados na barra da subestação. Os equipamentos com sigla R_B representam religadores situados no início de cada alimentador, enquanto aqueles com sigla S podem ser chaves automatizadas ou religadores automáticos com possibilidade de operar em modo chave. Quando essas chaves se encontram no estado NF, possuem a função de efetivar manobras no SD, enquanto no estado NA, possibilitam a interligação entre alimentadores.

B. Fluxo de Carga

Neste trabalho, adotou-se o *Backward Forward Sweep* (BFS) por ser um método eficiente, bastante consolidado em

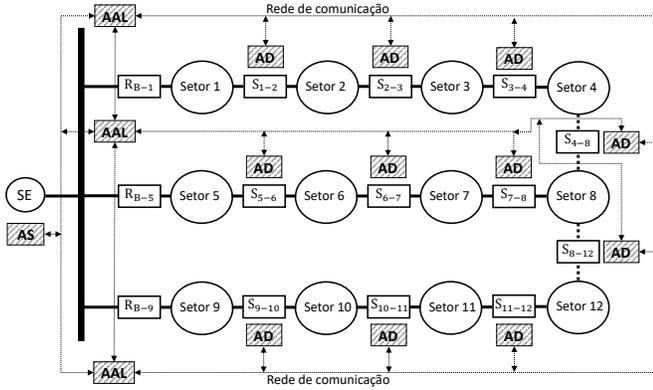


Fig. 5. Estrutura de comunicação entre agentes de um SD, adaptado de [9].

estudos que necessitam da solução do fluxo de carga em SDs. O método BFS foi implementado a partir da proposta de [23]. Em resumo, este autor propõe uma arquitetura orientada a objetos que parte do princípio do método BFS para aplicações de fluxo de potência em SDs.

O método BFS utiliza um esquema de varredura que parte do princípio do teorema de grafos, compondo uma estrutura de dados em formato de árvore para então iniciar as varreduras que verificam o cumprimento das leis de Kirchhoff. Em resumo, a varredura é iniciada pela soma das correntes injetadas a partir dos nós terminais até a subestação da rede, na sequência, são calculadas as quedas de tensões partindo dos nós mais próximos da subestação até os nós terminais [24].

C. Descrição do Modelo

O modelo proposto é baseado em certas práticas operacionais dos SDs, apresentadas a seguir:

- O SD deve permanecer radial durante o processo de restabelecimento [25];
- Durante o restabelecimento de serviço, a tensão e a corrente não devem violar os limites permitidos [20];
- O tempo das atividades de restabelecimento está associado ao número de operações de comutação [19], que deve ser mantido o menor possível [9]. Um SD real possui diversos tipos de chaves, o que implica na qualidade do serviço, visto que há diferenças no tempo de operação das chaves. Por exemplo, chaves remotas são operadas de 30s a 40s, enquanto chaves manuais são de 1200s a 1500s, aproximadamente [21]. Conforme [9], um baixo número de manobras reduz a possibilidade de surtos de comutação, distúrbios de transitórios devido às comutações e o risco de novas interrupções;
- A estratégia de restabelecimento busca topologias temporárias, tempo em que são realizadas as atividades de manutenção na falta. Concluído os reparos, o SD deve retornar a sua topologia original, portanto, uma estratégia que apresente uma topologia próxima à original facilita a sequência de operações reversas [9];
- Estratégias que buscam minimizar o número de chaveamento estão associadas com a redução tanto do tempo quanto dos custos operacionais envolvidos, adicionalmente, esta solução se encontra próxima da topologia

original. Nesse contexto, certos autores propõem que a restauração através de um único chaveamento deve ser avaliada [26], [27]. Posteriormente, parte-se para a análise combinatória, dando prioridade em realocar as cargas nos alimentadores adjacentes de modo a garantir uma topologia próxima à original [9];

- Nem sempre é possível recuperar todas as cargas, o que resulta em uma restauração parcial [20]. Nesse sentido, pode-se optar pelo não restabelecimento ou pelo corte, obedecendo o grau de prioridade das cargas.

A partir dessas observações, foram obtidas as equações matemáticas do modelo proposto, apresentadas a seguir:

1) Função Objetivo:

- Maximizar o número de cargas atendidas, levando em conta a prioridade das cargas:

$$\text{Max} \sum_{i=1}^{Nbus} B_i * L_i * S_i \quad (1)$$

Onde: S_i é a carga da barra i , L_i é a variável de decisão ($L_i = 1$ para restaurado e $L_i = 0$ para não restaurado), B_i é o coeficiente associado a prioridade da barra i e $Nbus$ é o número de barras de carga do sistema.

- Minimizar o número de operações de chaveamento:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{Nchave} |x_i - x_{io}| \quad (2)$$

Onde: $Nchave$ é o número total de chaves; x_i é a posição da chave na rede restaurada e x_{io} é a posição da chave imediatamente depois da falta isolada, sendo igual a 1 em modo fechado e 0 em modo aberto.

2) Restrições:

- As tensões das barras devem permanecer em seus limites:

$$V_{min} \leq |V_i| \leq V_{max} \quad (3)$$

Onde: V_i é a tensão na barra i , V_{max} e V_{min} são as tensões máximas e mínimas aceitáveis.

- O fluxo de corrente não deve ultrapassar o limite máximo:

$$|I_{k-i}| \leq I_{max_{k-i}} \quad (4)$$

Onde: I_{k-i} é a corrente no ramo $k-i$, e $I_{max_{k-i}}$ é a corrente máxima aceitável neste trecho.

- A soma dos fluxos que saem da fonte de alimentação não deve exceder a sua capacidade total disponível:

$$\sum_{i \in out_k} (S_i) \leq G_k \quad (5)$$

Onde: S_i é a potência da barra i ; G_k é a potência disponível da Subestação e out_k são todas as barras do sistema que absorvem potência da subestação.

- Durante as atividades de chaveamento, o SD deve permanecer radial. Portanto, para satisfazer esta condição, cada setor deve ser alimentado por um único ramo.

D. Restauração com um Único Chaveamento

Nesta etapa, o Agente Alimentador responsável pelo alimentador defeituoso, chamado de iniciador, verifica a possibilidade de restabelecimento com um único chaveamento, através da negociação com os agentes que representam os alimentadores mais próximos. A seguir, é apresentada a execução dessa etapa:

- 1) O Agente Alimentador envia uma mensagem *request* a todos os Agentes Dispositivos em seu respectivo ramal de alimentação, solicitando seu estado.
 - a) O levantamento dos setores fora de serviço pode ser representado por (6).

$$SetorOFF = Setor_k * x_k \quad k = 1, \dots, n(6)$$

onde: $Setor_k$ é o setor avaliado; x_k é o estado deste setor (0 para energizado e 1 para desenergizado); k é a identificação do setor; n é o número total de setores e $SetorOFF$ é um vetor que armazena os setores identificados como fora de serviço.

- b) O cálculo das demandas por setor pode ser representado por (7).

$$S_k = \sum_{i=1}^N S_k^i \quad (7)$$

onde: S_k é a demanda do setor k ; S_k^i é a demanda da barra i pertencente ao setor k e N é o número total de barras do setor k .

- 2) Conhecido os setores fora de serviço e as respectivas demandas, o Agente Alimentador iniciador envia uma chamada de proposta *Call for Proposal* para os agentes vizinhos, ou seja, alimentadores adjacentes ao iniciador, definidos como “opção 1”. Nessa chamada, a capacidade disponível dos alimentadores é comparada com a demanda total dos setores fora de serviço, que pode ser representado por (8).

$$CDA_{max} \geq \sum_{i=1}^k S_k \quad k = 1, \dots, nf - 1 \quad (8)$$

onde: CDA_{max} é a máxima capacidade disponível do alimentador e nf é o número total de setores fora de serviço, exceto o setor em falta, representado por $nf - 1$.

- 3) Se houver compatibilidade, a chamada é respondida com *Accept-Proposal*. Após, o iniciador envia uma mensagem ao Agente Dispositivo de interligação para fechar seus contatos. Caso mais de um alimentador possa assumir as cargas, é selecionado aquele que possui maior capacidade disponível.
- 4) Se não houver compatibilidade, a chamada é respondida com *Reject-Proposal*. Em seguida, o Agente Alimentador iniciador notifica o Agente Subestação para que assuma as próximas atividades.

E. Recuperação Através da Análise de Combinações

As ações desta etapa, realizadas pelo Agente Subestação, resultam em uma tabela de combinações. Cada grupo formado (combinação de setores) possui uma demanda e uma prioridade associada a um alimentador candidato ao chaveamento,

bem como as chaves envolvidas em sua transferência. A partir da tabela, são realizados os seguintes passos:

- 1) As combinações são formadas e organizadas de acordo com a capacidade disponível de cada alimentador adjacente (opção 1).
- 2) Em caso de insuficiência de suprimento dos alimentadores ou de violação de alguma restrição, o Agente Subestação solicita que os Agentes Alimentadores opção 1 “subcontrate” outros alimentadores, definidos como “opção 2”. Esse subcontrato é uma negociação ofertada aos vizinhos “indiretos” do iniciador, ou seja, “vizinho do vizinho”, que possui como objetivo transferir parte da carga do vizinho opção 1 para o vizinho opção 2, assim aumentando a capacidade disponível do alimentador opção 1. A tabela é então atualizada, o que pode resultar em dois cenários:
 - O aumento da capacidade do alimentador é suficiente para assumir todas as cargas fora de serviço, portanto, o restabelecimento é finalizado.
 - Caso ainda não seja suficiente, o processo resulta no restabelecimento parcial das cargas e, portanto, é iniciado o corte seletivo de carga.

F. Tabela de Combinações

A tabela de combinações, inicialmente proposta por [28], contém colunas com as seguintes informações: a identificação dos alimentadores; a combinação dos setores Z_{C_k} , apresentada em (9); a demanda para cada combinação Z_{C_k} , como pode ser vista (11); as chaves que delimitam cada combinação Z_{C_k} sendo organizada aos pares, em que uma delas é a chave de interligação e a outra varia conforme o ponto extremo do conjunto; por fim, a prioridade para cada combinação Z_{C_k} , apresentada em (12).

$$Z_C = \left\{ Z_{C_k} = \bigcup_{i=1}^k SetorOFF_k \right\} \quad k = 1, \dots, nf - 1 \quad (9)$$

onde: Z_C representa as possíveis combinações dos setores fora de serviço, sendo inferior ao total apresentado em (10); nf é o número total de setores fora de serviço; cada elemento Z_{C_k} é um conjunto de k setores adjacentes delimitados por duas ou mais chaves, sendo ao menos uma delas de interligação; o setor que sofreu a falta não entra nas combinações.

$$Comb_{max} = \sum_{i=1}^{nc} C_i \quad (10)$$

onde: $Comb_{max}$ representa o número máximo de combinações; C é conjunto de combinações dos setores e nc é o número de conjuntos.

$$S_{C_k} = \sum_{i=1}^k S_i \quad (11)$$

onde: S_{C_k} é a demanda para cada combinação Z_{C_k}

$$Prioridade_{C_k} = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N Ip_k^i * S_k^i \quad (12)$$

onde: I_p^i é o índice de prioridade da barra i pertencente ao setor k ; S_k^i é a demanda desta barra; N é o número de barras contidas no setor k ; k é a identificação do setor e K representa os setores pertencentes ao conjunto Z_{C_k} .

A informação contida na segunda coluna da tabela de combinações, mencionada na seção III-F, é obtida através do mapeamento realizado pelos Agentes Dispositivos, inicializado apenas quando o Agente Subestação solicitar aos Agentes Dispositivos de interligação tal serviço. Uma vez notificados, esses agentes enviam uma mensagem aos seus vizinhos, perguntando o posicionamento da chave (aberto ou fechado) e seu estado (energizado ou desenergizado). Com base nas respostas, o alimentador defeituoso é identificado, assim, conforme a comunicação se propaga ao longo desse alimentador, os Agentes Dispositivos posteriores carregam a informação de seus antecessores, com isso, os caminhos a serem restaurados são mapeados, como ilustrado pela Fig. 6.

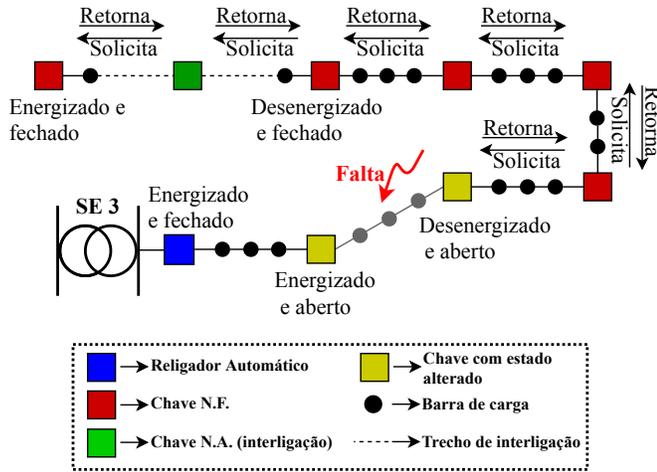


Fig. 6. Processo de mapeamento.

G. Seleção de Cargas para o Não Restabelecimento

As regras adotadas para o corte seletivo de carga são baseadas na prioridade de cada carga, atribuídas em quatro níveis [29], apresentados a seguir:

- Nível 1: São clientes residenciais;
- Nível 2: São clientes comerciais, escolas, instalações esportivas e de entretenimento, etc.;
- Nível 3: São clientes industriais, cuja ausência de suprimento de energia pode resultar em sérios danos financeiros (bancos, refinarias de petróleo, fábricas, etc.);
- Nível 4: São clientes cujo impacto direto pode causar riscos à segurança (hospitais, delegacias, quartéis de bombeiros, sistemas de telecomunicações, etc.).

Além de classificar as barras do sistema em níveis, também é necessário associar valores referentes às prioridades das barras de acordo com os níveis. Como o presente artigo não possui foco em determinar a prioridade de cada barra, foram adotados valores propostos por [17].

H. Cálculo da Capacidade Disponível no Alimentador

O cálculo da capacidade disponível estima, em MVA, o quanto o alimentador pode assumir de carga na condição pré-falta. Quando solicitada essa informação, o Agente Alimentador realiza os seguintes cálculos:

- 1) Cálculo da corrente disponível no ramo:

$$|I_{DR_j}| = |I_{max_j}| - |I_{atual_j}| \quad (13)$$

onde: I_{max_j} representa a corrente máxima no ramo j e I_{atual_j} representa a corrente pré-falta deste ramo.

- 2) Cálculo da corrente disponível no alimentador [16]:

$$|I_{DA}| = \frac{|V_{atual}| - |V_{min}|}{|Z_R|} \quad (14)$$

onde: V_{atual} é a barra que apresentar menor tensão, V_{min} é a restrição mínima de tensão (adotada 0,9 p.u. [16] e Z_R é a somatória das impedâncias de ramo entre a subestação e a chave de interligação do alimentador.

- 3) Cálculo da capacidade disponível no alimentador:

$$I_{CDA} = \min(I_{DR}, I_{DA}) \quad (15)$$

O menor valor encontrado entre (13) e (14) corresponde a I_{CDA} , utilizada no cálculo da capacidade disponível no alimentador, conforme apresentado em (16):

$$CDA_{max} = |V_{min}| * |I_{CDA}| \quad (16)$$

Na atividade de subcontrato em que o vizinho opção 1 transfere parte de sua carga para o vizinho opção 2, é calculado o quanto precisa ser transferido, como pode ser visto em (17):

$$S_{transf} = S_{C_K} - CDA_{max} \quad (17)$$

onde: S_{transf} representa a demanda de transferência, S_{C_K} é a demanda da combinação a ser transferida e CDA_{max} é a capacidade disponível no alimentador. Conhecida a demanda apresentada em (17), o vizinho direto seleciona os setores a serem transferidos. Para isso, ele seleciona os setores próximos da chave de interligação cuja somatória de carga deve ser compatível com a capacidade disponível.

No instante da negociação por subcontrato, o Agente Alimentador (opção 2) realiza os mesmos cálculos apresentados pelas Equações 13, 14, 15 e 16.

IV. RESULTADOS

O resultado obtido com a aplicação da estratégia proposta foi comparado com os resultados dos trabalhos de [16], [17]. Cabe destacar que esses autores também empregaram SMAs para solucionar o problema de restabelecimento de energia dos SDs.

O SD adotado nos testes é composto por duas subestações e quatro alimentadores, apresentando um total de 70 barras e 68 ramos, contendo um total de 72 chaves de manobras, sendo apenas quatro delas de interligação. Os dados do SD foram retirados do trabalho de [30], ilustrado pela Fig. 7.

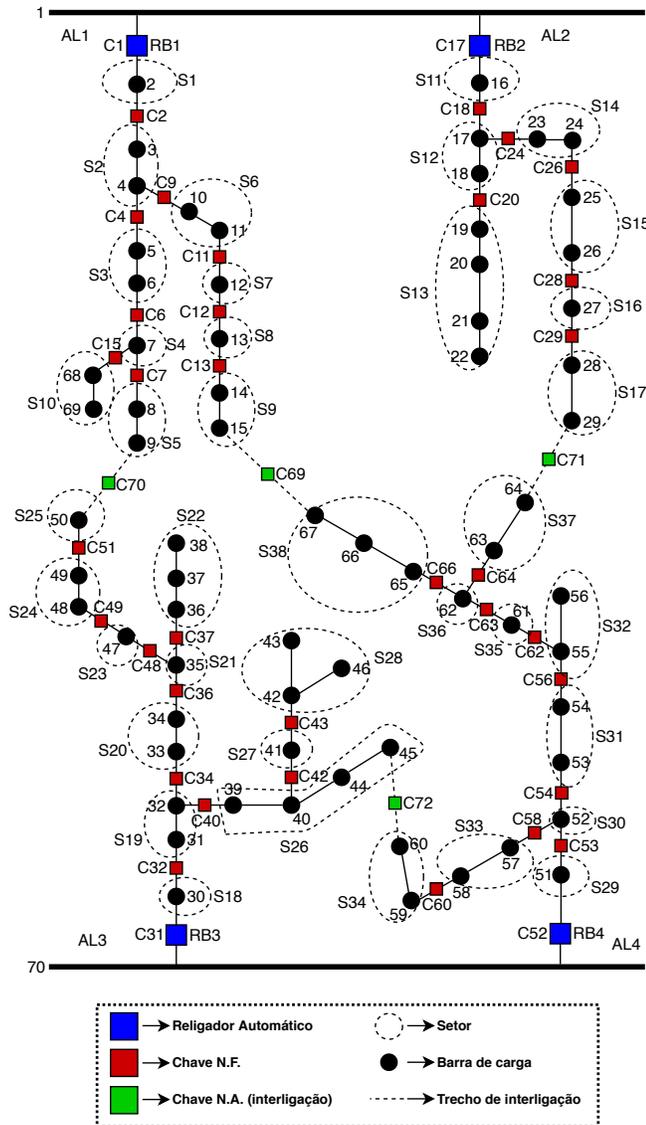


Fig. 7. Ilustração do SD teste, adaptado de [13].

Para fins de análise, os resultados apresentados pelo trabalho de [16] foram denominados de “Método Base I”, os resultados de [17] foram denominados de “Método Base II” e os resultados deste trabalho foram denominados de “Método Proposto”.

Após aplicar uma falta no setor S29 do alimentador 4, a isolamento ocorre com a abertura das chaves C52 e C53, adicionalmente, interrompe a alimentação dos Setores S30 ao S38, os quais possuem uma demanda de 1,322 MVA.

Ao analisar a capacidade disponível dos alimentadores 1, 2 e 3, apresentada pela Tabela I, tais candidatos não conseguem assumir com um único chaveamento das cargas fora de serviço, portanto, iniciou-se o plano de recuperação que envolve as combinações dos setores em grupos.

A Tabela II, também conhecida como tabela de combinações, é obtida a partir dos conceitos apresentados na seção III-F. A Tabela III apresenta as atividades de manobra para os três métodos. Na solução apresentada pelo Método

TABLE I
CAPACIDADE DISPONÍVEL DOS ALIMENTADORES DO CASO I.

CDA_{max} (kVA)	
Alimentador 1	560,159
Alimentador 2	559,340
Alimentador 3	904,168

Base I foi realizada transferência do setor S25 do alimentador 3 para o alimentador 1 com a abertura da chave C51 e o fechamento da chave C70. Na sequência, o alimentador 1 assume o setor S38 do alimentador 4 com a abertura da chave C66 e fechamento da chave C69. Em seguida, o alimentador 2 assume os setores S37 e S36 do alimentador 4 ao abrir a chave C63 e fechar a chave C71. Por fim, o alimentador 3 assume os demais setores do alimentador 4 ao fechar a chave C72. A respeito do Método Base II, a solução obtida é semelhante à anterior, exceto a manobra de transferência de carga do alimentador 3 para o alimentador 1, ou seja, o alimentador 3 assume todos os setores contidos entre a chave C72 e a chave C63, na sequência, o alimentador 1 assume o setor S38 ao abrir a chave C66 e fechar a chave C69, por fim, o alimentador 2 assume os setores S37 e S36 com o fechamento da chave C71. Em relação ao Método Proposto, a solução difere do Método Base II apenas em relação ao setor S35, sendo que o alimentador 2 assume essa carga e não o alimentador 3. As linhas destacadas em cinza da Tabela II referem-se a solução obtida pelo Método Proposto.

TABLE II
TABELA DE COMBINAÇÕES

Setor	Carga (kVA)	Chaves
S38	364,1104	C69, C66
S38, S36	542,7553	C69, C64, C63
S38, S36, S35	552,8176	C69, C64, C62
S38, S36, S35, S32	632,4554	C69, C64, C56
S38, S36, S35, S32, S31	716,3954	C69, C64, C54
S38, S36, S35, S32, S31, S30	736,9383	C69, C64, C58
S38, S36, S35, S32, S31, S30, S33	1.063,34	C69, C64, C60
S37	84,9285	C71, C64
S37, S36	263,5734	C71, C66, C63
S37, S36, S35	273,6357	C71, C66, C62
S37, S36, S35, S32	353,2735	C71, C66, C56
S37, S36, S35, S32, S31	437,2135	C71, C66, C54
S37, S36, S35, S32, S31, S30	457,7564	C71, C66, C58
S37, S36, S35, S32, S31, S30, S33	784,1575	C71, C66, C60
S34	174,0907	C72, C50
S34, S33	500,4918	C72, C58
S34, S33, S30	521,0347	C72, C54
S34, S33, S30, S31	604,9747	C72, C56
S34, S33, S30, S31, S32	684,6125	C72, C62
S34, S33, S30, S31, S32, S35	694,6748	C72, C63, S34, S33, S30, S31, S32, S35, S36 873,3197 C72, C66, C64

TABLE III
SEQUÊNCIA DAS ATIVIDADES DE MANOBRA

Atividade	Método Base I	Método Base II	Método Proposto
1	Abre 51	Abre 63	Abre 66
2	Fecha 70	Fecha 72	Fecha 69
3	Abre 63	Abre 66	Abre 62
4	Abre 66	Fecha 69	Fecha 72
5	Fecha 72	Fecha 71	Fecha 71
6	Fecha 71	-	-
7	Fecha 69	-	-

Devido à pequena diferença entre as atividades de manobra apresentadas pelos três métodos, uma pequena diferença no ponto de operação é observada. A Tabela IV apresenta uma

comparação
restabelecime
tensão do sis

Método
Base I
Base II
Proposto

A partir d
quando com
solução, obte
ao Método I
tensão, porér
devida ao al
transfere part
apresentado r
pode ser um
carregamento
tado Restaurativo e uma situação de emergência e temporária,
portanto, a prioridade é atender o maior número possível
de consumidores, adicionalmente, melhores níveis de tensão
possibilitam o alimentador assumir maiores carregamentos,
visto que a tensão, dentre as restrições, normalmente possui
seus limites violados antes das demais.

Cabe destacar que, assim como nos trabalhos adotados na
comparação, não há nenhum mecanismo inserido na metodolo-
gia proposta que preze pela redução das perdas. No entanto,
pelo fato dos trabalhos adotados na comparação terem usados
como parâmetro avaliativo as perdas de potência, neste artigo
também se optou por inserir tal parâmetro avaliativo.

Por fim, cabe destacar que modelos compostos por proble-
mas multiobjetivo são conflitantes. Por exemplo, considerando
um problema com duas funções objetivo, estas são conside-
radas conflitantes quando ao melhorar uma função objetivo
tende a piorar à outra. Portanto, emprega-se o conceito de
dominância de Pareto [31] para comparar duas soluções do
problema com o objetivo de obter a melhor frente de Pareto.
Isto é, aquela que apresente a melhor distribuição de soluções,
bem como os menores valores para as funções objetivo. Assim,
para complementar os resultados, a Fronteira de Pareto do
estudo de caso apresentado é ilustrada pela Fig. 8.

As soluções apresentadas pela Fig. 8 representam diversas
possibilidades de decisão. Ou seja, é possível escolher uma
solução que apresente um baixo número de manobras, porém,
um baixo atendimento aos consumidores. Da mesma forma
que é possível atender vários consumidores, entretanto, com
um alto número de manobras. A partir desta análise, fica
evidente que as negociações entre agentes resultam em uma
solução que prioriza a maximização das cargas atendidas com
o menor número de chaveamento.

V. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o estudo do problema de resta-
belecimento de energia dos SDs, demonstrando, a partir de

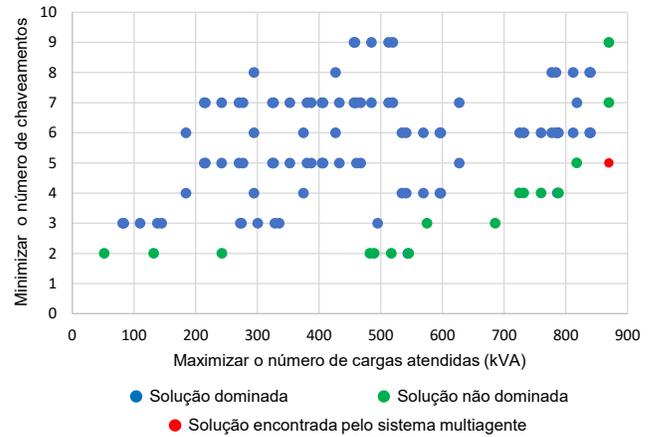


Fig. 8. Fronteira de Pareto.

dados, a importância de estudos voltados para esses sistemas.
No levantamento bibliográfico, foram abordados conceitos que
permitem a compreensão do problema em questão, o qual,
como técnica de solução, implementou um modelo de SMAs.

Na fase de implementação, o protótipo computacional mul-
tiagente foi desenvolvido em JADE. O modelo é aplicado a um
SD típico por meio de simulações, e os resultados obtidos são
comparados com trabalhos semelhantes, os quais mostraram
que o modelo proposto é capaz de restabelecer o sistema de
forma automática com poucos chaveamentos, apenas com a
comunicação entre os agentes.

Com base nos resultados, a diferença de tensão apresentada
entre o Método Proposto e os métodos comparativos é muito
pequena. Além disso, o número de chaveamentos obtido com
a solução do Método Proposto foi igual ao apresentado pelo
Método Base II. Essas informações indicam que o estudo
de caso apresentou uma solução compatível com os demais
trabalhos, o que valida a proposta do presente artigo, visto
que a solução é tão boa quanto os Métodos Bases I e II. Deste
modo, para evidenciar as vantagens do Método Proposto, cabe
destacar que os Métodos Base I e II foram modelados para dois
níveis hierárquicos, os quais não abordam a Subestação do
SD, assim, o presente trabalho propôs a ampliação do modelo
com a adição de um terceiro nível hierárquico para representá-
la. Com a inclusão da Subestação no modelo, atribui-se aos
agentes do sistema um método de fluxo de potência, necessário
para verificar se as soluções encontradas cumprem com os
limites operacionais permitidos, o que deixa o modelo mais
completo, atribuindo maior autonomia e flexibilidade aos
agentes do artigo proposto.

REFERENCES

- [1] Agência Nacional de Energia Elétrica. [Online]. Available: http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes_liferay/indicadores_de_qualidade/decFecSegBrasil.cfm?anoInicio=2010, accessed Feb. 2020.
- [2] D. S. Sanches, J. B. A. London and A. C. B. Delbem, "Multi-objective evolutionary algorithm for single and multiple fault service restoration in large-scale distribution systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 110, pp. 144-153, May. 2014.
- [3] R. Romero, J. F. Franco, F. B. Leão, M. J. Rider and E. S. Souza, "A new mathematical model for the restoration problem in balanced radial distribution systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 2, pp. 1259-1268, May. 2015.

- [4] Y. Chen, S. I. Mahesh and S. K. Amrit, "Modified Viterbi Algorithm Based Distribution System Restoration Strategy for Grid Resiliency," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 1, pp. 310-319, Feb. 2017.
- [5] J. P. R. Fernandes, "Restabelecimento de energia com busca local e corte de cargas", Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 2019.
- [6] E. Carrano, G. S. Silva, E. Cardoso, R. Takahashi, "Subpermutation based evolutionary multiobjective algorithm for load restoration in power distribution networks", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 20, no. 4, pp. 546-562, Aug. 2016.
- [7] S. Dimitrijevic, N. Rajakovic, "Service Restoration of Distribution Networks Considering Switching Operation Costs and Actual Status of Switching Equipment", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 3, pp. 1227-1232, May. 2015.
- [8] F. Goulart, "Permutation-based Optimization for the Load Restoration Problem with Improved Time Estimation of Maneuvers", Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.
- [9] A. Zidan and E. F. El-Saadany, "A Cooperative Multiagent Framework for Self-Healing Mechanisms in Distribution Systems," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 3, pp. 1525-1539, Sep. 2012.
- [10] A. Elmitwally, M. Elsaid, M. Elgamal and Z. Chen, "A Fuzzy-Multiagent Self-Healing Scheme for a Distribution System With Distributed Generations," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 5, pp. 2612-2622, Sep. 2015.
- [11] R. F. Sampaio, L. S. Melo, R. P. S. Leão, G. C. Barroso and J. R. Bezerra, "Automatic restoration system for power distribution networks based on multi-agent systems," *IET Generation, Transmission Distribution*, vol. 11, no. 2, pp. 475-484, 2017.
- [12] I. S. Baxevanos and D. P. Labridis, "Implementing Multiagent Systems Technology for Power Distribution Network Control and Protection Management," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 1, pp. 433-443, Jan. 2007.
- [13] S. Park and J. Lim, "Modelling and control of agent-based power protection systems using supervisors," *IEE Proceedings - Control Theory and Applications*, vol. 153, no. 1, pp. 92-98, Jan. 2006.
- [14] M. H. Moradi, S. Razini and S. M. Hosseinian, "State of art of multiagent systems in power engineering: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, pp. 814 - 824, May. 2016.
- [15] A. Angioni, S. Lu, H. Hooshyar, I. Cairo, S. Repo, F. Ponci, D. D. Giustina, A. Kulmala, A. Dedè, A. Monti, G. D. Rosario, L. V. and C. C. Garcia, "A distributed automation architecture for distribution networks, from design to implementation," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 15, pp. 3 - 13, Sep. 2018.
- [16] A. A. A. Zidan, "Reconfiguration and self-healing mechanisms in distribution systems with high distributed generation penetration," Thesis Doctor of Philosophy, University of Waterloo, Ontario, Canada, 2013.
- [17] F. A. Souza, "Modelo baseado em sistema multiagente para autorrecuperação com corte seletivo de carga e ilhamento com geração distribuída para redes elétricas inteligentes", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 2015.
- [18] R. Taleski and D. Rajcic, "Distribution network reconfiguration for energy loss reduction," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, no. 1, pp. 398-406, Feb. 1997.
- [19] W. Chen, "Quantitative Decision-Making Model for Distribution System Restoration," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 1, pp. 313-321, Feb. 2010.
- [20] Y. Kumar, B. Das and J. Sharma, "Multiobjective, Multiconstraint Service Restoration of Electric Power Distribution System With Priority Customers," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 1, pp. 261-270, Jan. 2008.
- [21] T. Nagata and H. Sasaki, "An efficient algorithm for distribution network restoration," *In Proceedings Power Engineering Society Summer Meeting, Conference Proceedings (Cat. No.01CH37262)*, vol. 1, pp. 54-59, Jul. 2001.
- [22] F. Bellifemine, G. Caire and D. Greenwood, "Developing multi-agent systems with JADE," John Wiley & Sons, 2007.
- [23] J. E. Schulz, "Sistema Especialista Baseado na Orientação a Objetos para Suporte à Análise de Redes Aéreas de Média Tensão," Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu, Brasil, 2015.
- [24] F. Hameed, M. Al Hosani and H. H. Zeineldin, "A Modified Backward/Forward Sweep Load Flow Method for Islanded Radial Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 1, pp. 910-918, Jan. 2019.
- [25] K. Aoki, K. Nara, M. Itoh, T. Satoh and H. Kuwabara, "A new algorithm for service restoration in distribution systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 3, pp. 1832-1839, Jul. 1989.
- [26] W. M. Lin and H. C. Chin, "A new approach for distribution feeder reconfiguration for loss reduction and service restoration," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, no. 3, pp. 870-875, Jul. 1998.
- [27] C. C. Liu, S. J. Lee and S. S. Venkata, "An expert system operational aid for restoration and loss reduction of distribution systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 3, no. 2, pp. 619-626, May. 1988.
- [28] M. Tsai, "Development of an Object-Oriented Service Restoration Expert System With Load Variations," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, no. 1, pp. 219-225, Feb. 2008.
- [29] M. Y. Huang, C. S. Chen and C. H. Lin, "Innovative service restoration of distribution systems by considering short-term load forecasting of service zones," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 27, no. 5, pp. 417-427, Jun. 2005.
- [30] D. Das, "Reconfiguration of distribution system using fuzzy multi-objective approach," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 28, no. 5, pp. 331-338, Jun. 2006.
- [31] A. C. B. Delbem, A. C. P. L. F. Carvalho and N. G. Bretas, "Main Chain Representation for Evolutionary Algorithm Applied to Distribution System Reconfiguration," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 1, pp. 425-436, Feb. 2005.



Gyan Flavio Angelo Martins Possui Graduação em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário Dinâmica das Cataratas (2016) e Mestrado em Engenharia Elétrica e Computação pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (2019). Atualmente, atua como Professor no Centro Universitário Dinâmica das Cataratas em Foz do Iguaçu.



Adriano Batista de Almeida Possui Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (2009), Mestrado (2011) e Doutorado (2015) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá. Foi pesquisador visitante na University of Strathclyde em Glasgow (Escócia) entre 2013 e 2014. Atualmente, é Professor Adjunto do Centro de Engenharias e Ciências Exatas da Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Pesquisador na área de Operação e Controle de Microrredes de Energia Elétrica e em Sistemas

Elétricos de Potência.