



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO FACULDADE DE
ARQUITETURA, ENGENHARIA E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

JEAN LUCAS RIBEIRO LIMA

Restabelecimento de Energia em Sistemas de Distribuição Trifásicos de Grande Porte

Trabalho Final de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Tolomeu Marques

CUIABÁ, MT
2022

JEAN LUCAS RIBEIRO LIMA

Restabelecimento de Energia em Sistemas de Distribuição Trifásicos de Grande Porte

Trabalho Final de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Tolomeu Marques

CUIABÁ, MT
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

L732r Lima, Jean Lucas Ribeiro.
Restabelecimento de energia em sistemas de distribuição trifásicos de grande porte [recurso eletrônico] / Jean Lucas Ribeiro Lima. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 26 f., il. color., pdf). -- 2022.

Orientador: Leandro Tolomeu Marques.
TCC (graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Cuiabá, 2022.
Modo de acesso: World Wide Web: <https://bdm.ufmt.br>.
Inclui bibliografia.

1. Computação evolutiva; Fluxo de potência; Redes inteligentes; Tempo de execução. I. Marques, Leandro Tolomeu, *orientador*. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

DESPACHO

Processo nº 23108.106589/2022-70

Interessado: @interessados_virgula_espaco@

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA MONOGRAFIA: "RESTABELECIMENTO DE ENERGIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO TRIFÁSICOS DE GRANDE PORTE".

ALUNO: JEAN LUCAS RIBEIRO LIMA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito para a obtenção de grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 22 de dezembro de 2022.

Nota final: 9,13 (nove vírgula treze)

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Leandro Tolomeu Marques (Orientador)

Prof. Dr. Fillipe Matos de Vasconcelos

Profa. Dra. Camila dos Anjos Fantin



Documento assinado eletronicamente por **LEANDRO TOLOMEU MARQUES, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 22/12/2022, às 18:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **FILLIPE MATOS DE VASCONCELOS, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 22/12/2022, às 18:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **CAMILA DOS ANJOS FANTIN, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 22/12/2022, às 20:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5400985** e o código CRC **3766B5B1**.

Este trabalho é dedicado a minha mãe Eliane, minha amiga Eurides e meu irmão Kleber pelo esforço, incentivo e parceria para que pudesse estar focado em ao longo de todo percurso.

Agradecimentos

À Deus em primeiro lugar pela vida e todas oportunidades concedidas, À Eliane, Eurides, Kleber e Ariane pela paciência, carinho e incentivo;

À UFMT, FAPEMAT, PROPEQ;

À todo corpo de membros do DENE e demais departamentos pelos ensinamentos técnicos e experiências em todos encontros em sala, que contribuíram muito para minha evolução pessoal;

À todos os colegas que contribuíram desde ajuda em dúvidas no código até sugestões na metodologia e discussões importantes a respeito do tema;

Finalmente, ao meu orientador Prof. Dr. Leandro Tolomeu Marques pela sua orientação, paciência e incentivo.

Resumo

A solução do problema do restabelecimento no menor tempo possível, envolve ferramentas de alto desempenho computacional. Dentro da literatura existem, lacunas de estudos de desempenho em ferramentas de restabelecimento trifásico. Propõe-se neste trabalho o estudo comparativo do desempenho de uma ferramenta levando em conta fluxo de potência trifásico, analisando sua viabilidade. Para tal, a ferramenta foi executada em setores em falta simples, realizada a comparação com os resultados de tempos de execução e indicadores de consumidores restabelecidos obtidos por [1]. Dentre os resultados obtidos, constou-se maior ordem de tempo total de execução para os três sistemas de distribuição simulados, sendo que para os sistemas de maior número de barras a taxa de variação se apresentou menor em redes de grande porte. Portanto, considera-se viável a consideração dos sistema trifásico em ferramentas de restabelecimento, no sentido de maior precisão das soluções geradas.

Palavras-chave: Computação evolutiva; Fluxo de potência; Redes inteligentes; Tempo de execução.

Abstract

The solution of the restoration problem in the shortest possible time involves high computational performance tools. Within the literature, there are gaps in performance studies on three-phase restoration tools. It is proposed in this work the comparative study of the performance of a tool taking into account three-phase power flow, analyzing its viability. To this end, the tool was executed in simple fault sectors, comparing with the results of execution times and indicators of restored consumers obtained by [1]. Among the results obtained, there was a higher order of total execution time for the three simulated distribution systems, and for systems with a greater number of buses, the variation rate was lower in large networks. Therefore, it is considered feasible to consider the three-phase system in restoration tools, in the sense of greater accuracy of the generated solutions.

Keywords: Evolutionary computing; Power Flow; Smart Grid; Execution Time.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Representação do sistema elétrico	15
Figura 2 – Topologia da rede de 53 bus, retirada de [6].	18
Figura 3 – Tempo execução simulando faltas em diversos setores aplicando ferramenta trifásica para o sd Londrina Full	19
Figura 4 – Tempo execução simulando faltas em diversos setores a metodologia1 de [16] para o sd Londrina Full	19
Figura 5 – Número de manobras totais obtidas pela metodologia 2 para o sd londrina full.	19
Figura 6 – Tempo execução simulando faltas em diversos setores aplicando ferramenta trifásica para o sd londrina City	19
Figura 7 – Tempo execução simulando faltas em diversos setores aplicando ferramenta trifásica para o sd 53 bus	19
Figura 8 – Tempo execução simulando faltas em diversos setores aplicando ferramenta trifásica para o sd 53 bus	19
Figura 9 – Tempo execução comparando os três SD's	20
Figura 10 – Tempo execução obtido por [16] nos mesmos SD's utilizados	20
Figura 11 – Tempo execução comparando os três SD's	20

Lista de tabelas

Tabela 1 – SD's utilizados e suas características	18
Tabela 2 – Lista de setores em falta	18
Tabela 3 – Representação inicial	25
Tabela 4 – Representação Final, segundo [5]	26

Lista de abreviaturas e siglas

FCV	Fluxo de Carga Varredura Direta Inversa
SD	Sistema de Distribuição
RE	Restabelecimento de Energia
BEL	Busca Exaustiva Local
BELM	Busca Exaustiva Local Modificada
RNP	Representação Nó Profundidade
<i>NSGA-II</i>	<i>Elitist Non dominated Sorted Genetic Algorithm</i>
PNS	Potência Não Suprida

Sumário

Lista de ilustrações	9
Lista de tabelas	9
Sumário	12
1 INTRODUÇÃO	13
2 MODELAGEM DO PROBLEMA DE RE	15
3 MODELAGEM DO PROBLEMA DE FC POR VARREDURA .	16
4 TESTES, RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
5 CONCLUSÃO	21
APÊNDICE A – GRAFOS	23
APÊNDICE B – REPRESENTAÇÃO NÓ PROFUNDIDADE	25

Restabelecimento de Energia em Sistemas de Distribuição Trifásicos de Grande Porte

Jean Lucas Ribeiro Lima
Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, Brasil
limajeanelucas@gmail.com

Leandro Tolomeu Marques
Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, Brasil
leandrotolomeu@gmail.com, jbalj@sc.usp.br

Resumo - A solução do problema do restabelecimento no menor tempo possível, envolve ferramentas de alto desempenho computacional. Dentro da literatura existem, lacunas de estudos de desempenho em ferramentas de restabelecimento trifásico. Propõe-se neste trabalho o estudo comparativo do desempenho de uma ferramenta levando em conta fluxo de potência trifásico, analisando sua viabilidade. Para tal, a ferramenta foi executada em setores em falta simples, realizada a comparação com os resultados de tempos de execução e indicadores de consumidores restabelecidos obtidos por [1]. Dentre os resultados obtidos, constou-se maior ordem de tempo total de execução para os três sistemas de distribuição simulados, sendo que para os sistemas de maior número de barras a taxa de variação se apresentou menor em redes de grande porte. Portanto, considera-se viável a consideração dos sistema trifásico em ferramentas de restabelecimento, no sentido de maior precisão das soluções geradas.

Palavras-Chave - Computação evolutiva; Fluxo de potência; Redes inteligentes; Tempo de execução.

POWER RESTORATION IN LARGE THREE-PHASE DISTRIBUTION SYSTEMS

Abstract - The solution of the restoration problem in the shortest possible time involves high computational performance tools. Within the literature, there are gaps in performance studies on three-phase restoration tools. It is proposed in this work the comparative study of the performance of a tool taking into account three-phase power flow, analyzing its viability. To this end, the tool was executed in simple fault sectors, comparing with the results of execution times and indicators of restored consumers obtained by [1]. Among the results obtained, there was a higher order of total execution time for the three simulated distribution systems, and for systems with a greater number of buses, the variation rate was lower in large networks. Therefore, it is considered feasible

to consider the three-phase system in restoration tools, in the sense of greater accuracy of the generated solutions.

Keywords - Evolutionary computing; Power Flow; Smart Grid; Execution Time.

FC Fluxo de Carga Varredura Direta Inversa
SD Sistema de Distribuição
RE Restabelecimento de Energia
BEL Busca Exaustiva Local
BELM Busca Exaustiva Local Modificada
RNP Representação Nó Profundidade
NSGA-II *Elitist Non dominated Sorted Genetic Algorithm*
PNS Potência Não Suprida

I. INTRODUÇÃO

Para que a energia chegue até os consumidores finais, diversos processos sistemáticos são implementados visando a continuidade e a reconstituição do atendimento em menor tempo possível quando uma falta ocorre. O problema de restabelecimento de energia (RE) é um problema de otimização combinatorial, e envolve a operação das chaves. Segundo [1], após a ocorrência de uma falta permanente há a necessidade de sua localização, seguido da obtenção de um plano de restabelecimento que isole o setor faltoso e restabeleça o maior número de consumidores possível. Dentro deste contexto, surgem os problemas da tentativa de restauração destes consumidores sintetizados em setores¹ em casos de falta. Tal fator traz grande dificuldade devido sua caracterização como problema de otimização multiobjetivo, sobretudo em sistemas de grande porte.

Na década de 90, a partir do avanço do uso de microcomputadores, diversas pesquisas de análise do sistema elétrico via ferramentas computacionais foram evidenciadas.

Dentro deste contexto, estudos como [2] e [3], trouxeram uma metodologia de cálculo do fluxo de potência, com consideração a geração distribuída [4], elementos shunt e reguladores do Sistema de Distribuição (SD). O grande problema no período se deu pela baixa capacidade de processamento computacional, inviabilizando o uso de métodos iterativos

¹Conjunto trechos do sistema separados por chaves.

baseados em matrizes em SD's de grande porte. Este se deu pela necessidade da intensa manipulação de matrizes de tamanho proporcional ao número de barras no SD.

Tal fator se mostrava mais crítico no processo de reconfiguração da rede, devido a necessidade de executar muitas vezes esta manipulação, tendo uma fiel representação do SD e seus elementos primários: as chaves e barras. Para poder ser representadas, necessitavam de algoritmos de reordenação e representação pós simulação, de maneira mais complexa e ineficiente.

Os algoritmos de reordenação de barras trouxeram alternativa para representação do sistema no início da simulação. Na década de 2000, trabalhos na literatura como [5], empregaram o uso mais frequente de grafos para representar os SD's. Desta forma toda topologia da rede foi representada via modelagem fora da ferramenta, sendo apenas percorrida e modificada dentro desta.

Fora o problema de representação do SD, outro problema típico, se mostrou na consideração de todos objetivos conflitantes entre si, encontrando um ponto ótimo de reconfiguração que atende todas as restrições e reduz o número de energia não suprida e manobras em chaves que interligam os setores.

A seguir é realizada uma síntese dos principais métodos presentes na literatura:

- 1) Programação matemática: [6] e [7] abordam metodologias de RE, baseadas em programação matemática por redução dos objetivos a pesos normalizados e teoria de decisão por lacuna, respectivamente. Esta modalidade traz como vantagem a característica determinística do problema, porém, trazendo como desvantagem a carência de trabalhos validando a metodologia em redes de grande porte.
- 2) Heurística: O uso de regras pré-definidas como em [8], [9] e [4], é utilizado por tais metodologias, que por meio de índices primários geram soluções em casos menos complexos. Estas por sua vez, são interligadas a qualidade das regras inicialmente estabelecidas, além do fato de não serem ótimas globais.
- 3) Meta Heurística: Dentro das metodologias Heurísticas que utilizam Algoritmos Genéticos, [10] e [11], traz a fusão de várias considerações de problemas e variáveis relacionadas a limitações dos equipamentos da rede, em uma única função. Tal abordagem traz como desvantagem a indução da solução do problema, sem levar em conta o conflito que as soluções podem gerar entre si. Tal consideração faz com que as soluções geradas tenham certo grau de imprecisão devido a consideração unificada dos objetivos. [12], utiliza a otimização dos parâmetros de velocidade e posição das partículas visando o local ótimo em relação a vizinhança, dada pela teoria do Particle Swarm Optimization. Porém, assim como a metodologia AG, traz a simplificação dos objetivos em uma única função de alteração de velocidade e posição da partícula.
- 4) Demais Metodologias: Os sistemas especialistas(SE), abordam o problema utilizando regras baseadas em

métodos de soluções utilizados por operadores de concessionárias [13]. Já Sistemas Multi Agentes (SMA), utilizam-se de uma integração entre os equipamentos como por exemplo chaves, transformadores, relés interconectados entre si e com centrais de operação via redes de telecomunicações [14] e [15].

A ferramenta proposta por [1], utiliza-se de um método híbrido heurísticos, meta-heurísticos, junto a abordagem de uso de tabelas de armazenamento das diversas soluções, sendo estas divididas pelos objetivos mais marcantes de cada uma delas trazendo uma estrutura de representação da topologia da rede [16]. Estas fusões a metodologia raiz, trazem um ambiente favorável a eficiência computacional da ferramenta e maior robustez as restrições impostas no SD. Tal junção gera vantagens no sentido de trazer consideração a vários objetivos conflitantes, maior velocidade de processamento, capacidade abrangente de geração de soluções para diversos tipos de problemas.

Porém, o sucesso da ferramenta depende de um algoritmo para verificar se tais soluções candidatas geradas, são factíveis. A ferramenta responsável por realizar o levantamento dos dados que serão utilizados para tal avaliação é o Fluxo de Carga (FC). Ele atua calculando os valores de tensão em todas as barras, assim como parâmetros de uso dos condutores de rede, dos transformadores, perdas de potência na linha, além de níveis de queda de tensão. Neste trabalho, ainda era considerada a ferramenta de FC monofásico, ou seja, considerando apenas uma única fase. Neste sentido o presente trabalho, considerou-se uma extensão a ferramenta proposta por [1] para os consumidores das três fases.

Dentro do contexto de RE, portanto, a eficiência computacional do FC, é de extrema importância visto que, todas as soluções geradas serão analisadas por várias vezes para todo o SD, sobretudo considerando as três fases. Dentre todas as partes da ferramenta é considerado o fator de maior influência dentro do tempo total da ferramenta. Portanto a agilidade da ferramenta é dada por um FC eficiente e robusto.

Atualmente algumas metodologias de RE tem sido implementadas e testadas visando aumento da eficiência computacional, refinamento das soluções geradas e adição de cada vez mais objetivos. Utilizando conceito de grafo o processo de análise de configurações geradas por variação das configurações, dependem do fluxo de carga [17].

Via uso de redes neurais há a necessidade de treinamento da rede em função do número de chaves [18], [19], [20] e [21]. Através da busca em profundidade em árvores esparsas gera-se soluções factíveis em casos de múltiplas faltas [22]. A consideração de geradores distribuídos, levando em conta a integração do sistema de transmissão e SD, contribuem para o processo de RE [23].

O carregamento de veículos elétricos, pode beneficiar a restauração do sistema, desde que coordenando a distribuição [24]. Busca em árvores esparsas, as quais modelam a rede visam buscar soluções ótimas para o sistema, modelando micro-redes como árvores, minimizando assim, as manobras de chaveamento [25].

O uso de Sistemas Multi Agentes atrelado a consideração ao impacto do RE pós falta, e confiabilidade da solução proposta é mostrado em [26]. Por meio de medições em tempo real de correntes nas barras do SD considera-se a incerteza dos valores no momento do RE [27].

Trabalhos anteriores limitam-se ao estudo de ferramentas de restabelecimento no sentido de análise qualitativa em função da heurística de questões como sequência de chaveamento, metodologias de reconfiguração ou restrições do sistema, ou seja, analisam as soluções geradas em termos não relacionados com o fluxo de carga diretamente, ainda mais com as metodologias propostas por [5], [28], [16], [1].

Dentro da metodologia para o fluxo de carga trifásico, buscou-se estender a ferramenta proposta por [1] dentro das limitações técnicas, visando a melhoria no cálculo do fluxo trifásico, tendo considerações a metodologia de pré-processamento dos dados, em um contexto deslocado da ferramenta de restabelecimento. Neste trabalho aplicou-se este fluxo dentro de toda a ferramenta analisando sua influência dentro da ferramenta como um todo.

O estudo se torna relevante para análise da possibilidade de maior precisão das soluções geradas pelos indivíduos a serem utilizados no plano de restabelecimento, versus a perda relativa de eficiência computacional devido a consideração trifásica. Em um estudo de viabilidade econômica para elaboração de estratégia de negócios de concessionários, tal parâmetro pode gerar maior eficiência operacional do ponto de vista econômico. Por outro lado, considerando o sistema trifásico, mais variáveis entram em jogo, fazendo com que a solução proposta seja mais rigorosa do ponto de vista de restrições (Perdas, limites dos equipamentos da rede). Tal fator pode levar a uma diminuição de energia não suprida, ou seja, menos consumidores são deixados fora de serviço, da mesma forma que estes possuem energia de maior qualidade chegando em sua edificação.

A ferramenta trifásica dentro do contexto de restabelecimento, mesmo que menos eficiente computacionalmente, pode tornar as soluções mais precisas e para casos importantes e mais complexos possui uma faixa de tempos de execução próximos a medida que os sistemas aumentam sua extensão.

A proposta do artigo se deu em apresentar um progresso em relação a [1] no sentido da consideração trifásica e também, na análise da viabilidade de se considerar a ferramenta trifásica de RE, em relação a seu tempo de execução dentro de sistemas de grande porte.

Na seção II é mostrada a definição do problema de RE, apresentada em [1], considerando os componentes trifásicos; Já a seção III, são abordados os fundamentos teóricos para o entendimento dos resultados; A seção III-B, aborda a metodologia base utilizada; Seção IV, traz a metodologia proposta neste; Por fim, a V são apresentados os resultados e discutidas suas causas, sendo também sugestões e considerações para trabalhos futuros.

II. MODELAGEM DO PROBLEMA DE RE

Baseando-se em [29], o problema do RE trifásico pode ser definido matematicamente, através:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min. } \lambda_\omega(G), \psi_{RCS}(G, G^i), \psi_{MCS}(G, G^i) \\
 & \text{tal que, } \forall \omega \in F[A, B, C] \\
 & \text{s. t. } \quad A(G)x_\omega(G) = c_\omega \\
 & \quad A(G)Y_{\omega x}(G)A(G)^t v_\omega(G) = c_\omega \\
 & \quad X_\omega(G) \leq 1 \\
 & \quad B_\omega(G) \leq 1 \\
 & \quad V_\omega(G) \leq 1 \\
 & \quad G \text{ sendo uma configuração radial}
 \end{aligned} \tag{1}$$

onde,

- G Configuração radial do SD representado por uma floresta de grafos,
- $\lambda_\omega(G)$ o número de consumidores fora de serviço em G ,
- $\psi_{RCS}(G, G^i)$ número necessário de manobras MCR necessárias para obter G de G^i , onde G^i representa uma floresta de grafos, após os setores faltosos identificados e isolados,
- $\psi_{MCS}(G, G^i)$ número necessário de manobras MCM necessárias para obter G de G^i ,
- $A(G)$ matriz incidência de G ,
- $x_\omega(G)$ vetor complexo de correntes de linha trifásico de G ,
- c_ω vetor complexo de correntes no conjunto F, das fases F[A,B,C], nas barras de carga ($c_j \leq 0$) e corrente complexa injetada pelas subestações ($c_j > 0$),
- $Y_{\omega x}(G)$ matriz diagonal de admitância no conjunto de fases F da rede de G ;
- $v_\omega(G)$ vetor de tensão complexa de F em G ;
- $X_\omega(G)$ carregamento máximo de rede em G , dado por $X_\omega(G) = \text{MAX}\{x_{j\omega}/\bar{x}_{j\omega}\}$, onde $\bar{x}_{j\omega}$ valor limite de corrente e $x_{j\omega}$ a magnitude de corrente na barra j em F,
- $B_\omega(G)$ máximo carregamento de subestação de G , dado por $B_\omega(G) = \text{MAX}\{b_{s\omega}/\bar{b}_{s\omega}\}$, onde $\bar{b}_{s\omega}$ o maior valor dentre as correntes injetadas $b_{s\omega}$ pela subestação s , dentre as três fases,
- $V_\omega(G)$ máxima queda de tens ao relativa em G , dado por $V_\omega(G) = \text{MAX}\{|v_{s\omega} - v_{k\omega}|/\delta\}$, onde $v_{s\omega}$ é dado pela tensão no nó da subestação s , $v_{k\omega}$ dado pela tensão no nó da barra k e δ a máxima queda de tensão permitida (10% nesse estudo, i.e., $\delta = 0.1$).

A. Condições de contorno

O presente trabalho se limitou ao contexto de avaliação da eficiência computacional, do Fluxo de Carga trifásico aplicado a ferramenta de restabelecimento proposta em [1]. Isto se deu pela implementação do fluxo trifásico dentro da ferramenta proposta por [1] e analisando sua respectiva eficiência, não abordando os seguintes tópicos:

- Priorização e sequência de chaveamento levando em conta tipos de manobras (manuais ou automáticas);
- Consideração a prioridade de atendimento a consumidores;
- Existência de reguladores de tensão, elementos shunt e geração distribuída;

Dentro do contexto do sistema de distribuição, considera-se uma conexão entre barramento vindo das subestações abaixadoras e as cargas conectadas no sistema, as quais tem contato ao nó terra [30]. Neste sentido, em um primeiro momento a potência circula do sentido geração-carga conectado aos respectivos consumidores conectados a barra. A configuração predominantemente radial faz com que na maioria dos casos exista apenas um sentido de propagação da corrente. A tensão fornecida como visto no circuito da figura 1, mostra duas fases de transformação de potência, indicando transmissão e distribuição. Nesta a tensão que chega as cargas é dada pela tensão nos terminais do circuito, tendo perdas pela impedância da rede. Fora considerada a topologia e impedância da rede sendo a mesma para as três fases.

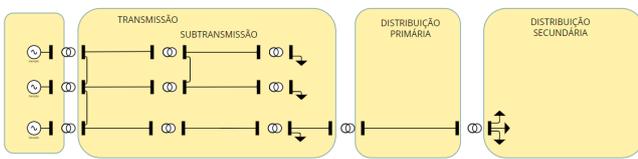


Fig. 1. Representação sistema elétrico.

As cargas apresentam maior dificuldade de representação, devido sua natureza variável e imprevisível. Segundo [30], as maneiras comumente utilizadas são da consideração de variáveis como constantes através dos modelos de impedância, corrente e potência constante denominados (ZIP). Neste trabalho considerou-se o modelo de potência constante.

Elementos shunt, podem ser considerados em sistemas de transmissão e distribuição. Os elementos Shunt são basicamente capacitores e indutores [30]. Neste caso foram desconsiderados, devido a natureza comparativa do estudo, mantendo-se as mesmas condições originalmente utilizadas em [1].

III. MODELAGEM DO PROBLEMA DE FC POR VARREDURA

A. Representação Nó Profundidade

Da necessidade de algoritmos de reordenação de barras na literatura a Representação Nó Profundidade (RNP), através do conceito de grafo, trouxe a melhora de desempenho quanto a representação da topologia. Neste sentido [5], utilizou estes conceitos para representar o sistema de distribuição utilizando a RNP, onde se dividiu em dois tipos de RNP's. RNP Alimentador: Cada vértice representa uma barra com consumidores acoplados já sua aresta trechos da linha; RNP Setor: Cada vértice representa uma árvore ou conjunto de barras e trechos, e sua aresta representa pontos de seccionamento de chaves; Desta forma são indexados a identificação dos nós e sua profundidade (número de arestas em relação a dois vértices). Em [31], chegou-se a equação de complexidade de tempo do algoritmo na aproximação da ordem de $O(\sqrt{t})$, demonstrando que para o aumento do número de entradas de barras o aumento do tempo se aproximou de uma constante.

B. FC monofásico

Partindo da premissa do sistema predominantemente radial, metodologias que explorem esta condição possuem vantagem comparativa em relação a métodos utilizando redes malhadas [28], o mesmo apresentou a junção entre as metodologias propostas por [2] e [5]. O FC, trabalha percorrendo sentido subestação barra e vice versa, realizando processo iterativo em relação ao recálculo da tensão em vista.

- 1) Passo inicial: Defini-se o valor de módulo e ângulo de todas as barras do sistema como barras $V\theta$, em todas fases;
- 2) Pré-Varredura: Calcular a corrente em todas as barras do sistema a partir de valores de tensão disponíveis, na primeira iteração obviamente teremos correntes de barra calculadas com a tensão de referência.

$$c_i^k(G) = \frac{S_i(G)}{V_i^{(k-1)}(G)} - Y_i^{sh}(G) \times V_i^{(k-1)}(G), i = 1, 2, \dots, t \quad (2)$$

onde,

- $c_i^k(G)$ corresponde a corrente do índice i (barra i) e da iteração k no grafo G;
 - $V_i^{(k-1)}(G)$ tensão da barra i da iteração k-1 no grafo G;
 - $Y_i^{sh}(G)$ elementos shunt do circuito no grafo G;
 - $S_i(G)$ potência da barra atual (já previamente conhecida, pelas cargas) no grafo G;
- 3) Varredura Inversa (Backward Sweep) : Calcula-se a corrente de trecho a qual considera toda a corrente necessária para alimentar as barras a jusante, em outras palavras somar todas correntes de barra do nó folha para o nó raiz:

$$J_i^k(G) = J_{i+1}^k(G) + c_{i+1}^k(G) \quad (3)$$

onde,

- $J_{i+1}^k(G)$ corresponde a corrente do trecho e iteração k no grafo G;
- 4) 5.Varredura Direta (Forward Sweep): Atualiza-se a tensão com os dados anteriores junto à queda de tensão calculada:

$$V_i^{(k)}(G) = V_{i-1}^{(k)}(G) - Z_i(G) \times J_i^k(G) \quad (4)$$

onde,

- $V_i^{(k)}(G)$ corresponde a tensão na barra do grafo G;
- 5) Tolerância: Calcular o erro entre a tensão da barra, na iteração atual em relação a mesma na iteração anterior. Se esse erro for maior que a tolerância pré-determinada, volta-se à pré-varredura utilizando os valores de tensão da iteração anterior, senão o FC convergiu e chegou ao fim.

$$\delta_{erro} = V_i^{(k)}(G) - V_i^{(k-1)}(G) \quad (5)$$

onde,

- δ_{erro} corresponde à tolerância. Caso seja menor que o valor predefinido encerra-se o processo, senão retorna-se à *pré varredura*;

C. Metodologia de Referência

Em sistemas complexos, com objetivos conflitantes, além do fato de existirem dificuldades no encontro de soluções determinísticas, há a necessidade de utilização de métodos meta heurísticos, que forneçam soluções estocásticas. Neste sentido no problema de restabelecimento, utiliza-se o conceito de algoritmos genéticos, mais especificamente em métodos multiobjetivos: NSGA-II [32]. Esta metodologia inicialmente proposta por [32], foi incrementada por [16], posteriormente por [29] e [1], trazendo o uso de operadores atualizados e a organização dos indivíduos não dominados, com suas respectivas características, em linhas específicas junto com demais indivíduos parecidos, aplicados a fronteiras de pareto. Entende-se por indivíduos não dominados como sendo soluções em que não é possível melhorar um objetivo sem deprestar a solução de outro. Neste sentido indivíduos que estão mais próximos deste ideal, são chamados indivíduos factíveis.

Na literatura outras metodologias de resolução de problemas de otimização combinatorial, tratam objetivos conflitantes visando obter ponto ótimo para todas os objetivos simultaneamente. Segundo [1], tais fatores trazem perda de informações para geração de indivíduos de qualidade.

Foi proposto por [33], uma metodologia de Busca Exaustiva Local (BEL) capaz de obter a restauração completa, quando possível de todos setores desligados desnecessariamente (chamados saudáveis) e restauráveis através do uso de chaves Normalmente Aberto (NA). De forma geral são isolados setores faltosos, levantados os setores saudáveis buscando todas as chaves Normalmente Aberto (NA) nas extremidades deste, capazes de realizar sua devida energização. Caso seja possível, obtém-se todas as combinações destas chaves para tal. Caso não seja, as soluções geradas, segundo [1] se utilizadas como ponto de partida para o AEMO gerar sua população inicial, conferem maior eficiência ao mesmo.

Posteriormente [1], incrementou-a denominando-a BELM, com uma heurística de consideração a prioridade de consumidores integrada à diminuição dos níveis de energia não suprida, algo não tratado anteriormente.

IV. METODOLOGIA PROPOSTA

A partir deste ponto tal metodologia será referida como metodologia 2 no decorrer do trabalho. Dentro do contexto trifásico, considerando a metodologia anteriormente apresentada faz-se necessária a consideração do sistema com impedância e topologia idêntica nas três fases, assim podendo ser utilizada a ferramenta proposta, sendo alvo de trabalho futuros tais considerações de parâmetros diferentes. Neste sentido a metodologia pre-processamento consistiu em a partir de uma fase fictícia estar recebendo os dados das fases e estar realizando os cálculos por fase, utilizando valores da fase A, como ponto de partida para as demais fases a fim de otimizar

a convergência do fluxo. Abaixo seguem dois algoritmos, o primeiro mostrando a execução do FC trifásico e a segunda como tal é aplicado à ferramenta de RE.

Algorithm 1 FC Trifásico

Entrada: Dados entrada barras

- 1: Defina todas barras como $V\theta$ Calcule a corrente c_w em todas as barras de (G) como em 1
 - 2: **for** $f = 1$ to $length(F[A, B, C])$ **do**
 - 3: Execute o $FC_{Metodologia1\phi}$ sem GD em G
 - 4: $Dados_{fase_f} \leftarrow$ fase (f)
 - 5: Aplique $FC_{1\phi}(Dados_{fase_f}(G))$
 - 6: $Fase(f) \leftarrow Dados_{fase_f}(G)$
 - 7: Calcule $X(G), B(G), V(G)$
 - 7: **end for**
-

Algorithm 2 FC aplicado no problema de RE

Ensuro: Arquivos de Saída

- Avalie a configuração pré-falta usando o $FC_{3\phi}$:*
- if** (*SetorRestauravel* == true) **then**
- 2: Execute a BELM
 - 3: *Avalie a configuração inicial usando o $FC_{3\phi}$*
 - 4: **if** (*SoluçãoBELM* == factivel) **then**
 - 5: Utilize a solução gerada como solução ao problema
 - 6: **else**
 - 7: **for** $i = l - 2$ to $Gmax$ **do**
 - 8: $indivíduo_i \leftarrow$ $indivíduo(i - 1)(Operador)$
 - 9: Avalie o $indivíduo_i$ usando o $FC_{3\phi}$
 - 10: **end for**
 - 11: **end if**
 - 12: **else**
 - 13: Não é possível restaurar os consumidores
 - 14: **end if**
 - 15: Agrupe os indivíduos gerados em tabelas
 - 16: Organize a fronteira de Pareto
 - 17: Sintetize as melhores soluções ao operador
 - 18: **return** Melhores indivíduos
-

Dentro da ferramenta o FC, atua desde a chamada avaliação pré falta, a qual avalia como a rede estava antes da falta, entendo como se dá a operação da rede e suas violações mostradas em (1). Após a isolamento dos setores faltosos, ocorre a aplicação da BELM [1], visando a busca por chaves vizinhas que possam reconectar os consumidores afetados em sua totalidade dentro de determinados setores. Da mesma forma o FC avalia as soluções geradas por esse método. Disto caso sejam relevantes a ferramenta utiliza-os como solução final. Caso estes indivíduos não sejam adequados parte-se para o chamado processo evolutivo, onde é formada a população inicial. Cada indivíduo gerado, seja por qualquer um dos operadores propostos por [16] e [1] é avaliado via fluxo e são analisadas via funções fitness que avaliam a factibilidade do indivíduo pelo número de gerações necessárias para convergência da solução.

V. TESTES, RESULTADOS E DISCUSSÃO

A. Procedimentos

Inicialmente foram implementadas via programação a metodologia 2, consistindo na ampliação à consideração trifásica. Para este fim, o ponto crítico em relação a influência no desempenho, se deu pela alteração do fluxo de carga, considerando as três fases. A partir da ferramenta de restabelecimento, aplicou-se três sistemas de distribuição mostrados na tabela I, utilizando a metodologia 2, contendo variados setores em falta simples. Desta forma houve a geração de resultados, provenientes da ferramenta, já com consideração trifásica. Tais setores são mostrados através de seus identificadores na tabela II, sendo simulados através de testes exaustivos, em 40 execuções para cada setor em falta.

TABELA I
SD'S UTILIZADOS E SUAS CARACTERÍSTICAS.

Sistema	Barras	Setores	Alimentadores	Chaves
53 bus	53	53	6	61
Londrina city	21.656	3.148	68	3.580
Londrina full	40.606	3.479	83	3.893

TABELA II
LISTA DE SETORES EM FALTA

Sistema	53 bus	Londrina city	Londrina full
Setor em Falta	2	264	98
	13	816	732
	14	902	1266
	22	1055	1275
	26	1571	1549
	27	2561	1587
	35	2568	2333
	36	2585	2532
	37	2616	2682
38	2849	3542	

B. Equipamentos e Softwares utilizados

Quanto aos resultados mostrados da metodologia 1, foram retirados de [1] a título de contextualização com os resultados obtidos na metodologia 2. Tendo o computador utilizado neste, as seguintes configurações:

- 32Gb de Memória RAM;
- Processador intel I7;
- Sistema operacional Linux na distribuição Ubuntu 18.4;
- Para implementação linguagem C, através da IDE Eclipse C/C++.

Na metodologia 2 os testes foram simulados, através de um computador com as seguintes características:

- 16Gb de Memória RAM;
- Processador intel I7, 11° Gen;
- Sistema operacional Linux na distribuição Ubuntu 20.4;
- Para implementação linguagem C, através da IDE Eclipse C/C++.

C. Resultados

No processo de encontro da melhor configuração em contexto de contingência e tendo em vista restabelecer mais rápido o sistema o tempo elaboração do plano de restabelecimento faz parte de todo o processo de atendimento dos consumidores.

Para a obtenção dos tempos de execução, foram utilizados conjuntos de dados das soluções finais escolhidas da fronteira de pareto.

Os dados obtidos a partir das simulações, foram tratados de forma a gerar indicadores frente a consideração de desempenho. Com isto são analisadas diferenças entre a ferramenta original e nova com as devidas alterações.

Dentro da simulação se tornou viável a exibição apenas da topologia da rede de 53 bus, isso pelo fato da dimensão das redes maiores não ser tão visível devido ao número de barras. Segue abaixo a figura 2, mostrando a topologia da rede de 53 bus.

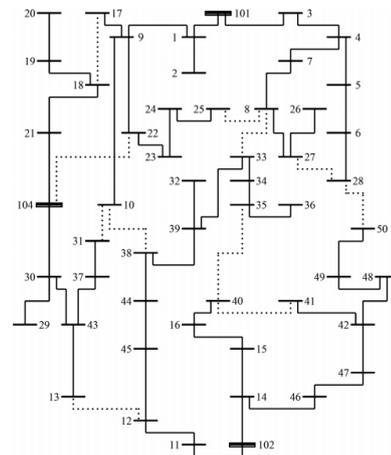


Fig. 2. Topologia da rede de 53 bus, retirada de [6].

Dos resultados obtidos simulando o sistema Londrina Full, são mostrados na figura 3 os tempos de execuções obtidos fruto das 40 execuções da ferramenta utilizando a metodologia 1 na figura 4 mostra os resultados obtidos por [1].

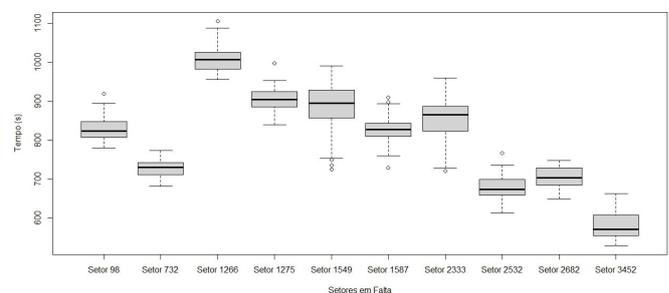


Fig. 3. Tempo execução simulando faltas em diversos setores aplicando ferramenta trifásica para o sd Londrina Full.

Apesar da diferença entre os setores, utilizados para simulação é possível obter uma comparação geral, já que [1], considerou prioridade de consumidores em determinados setores, o que este trabalho não abordou. Em seu trabalho

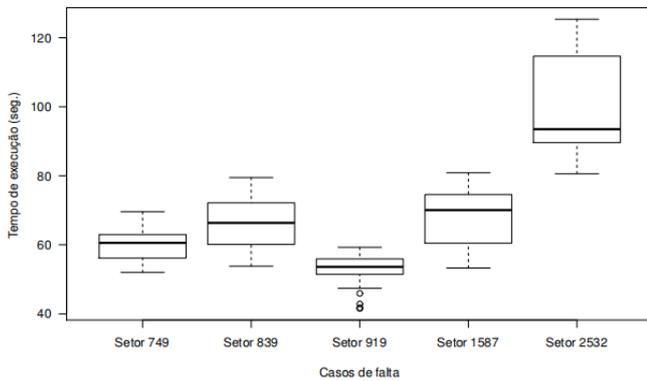


Fig. 4. Tempo execução simulando faltas em diversos setores a metodologia 1 de [1] para o *sd Londrina Full*.

levando em conta as características descritas, [1] obteve valores de tempo médio para os setores considerados na faixa de 85 segundos, com exceção do setor 2532 com média de 100 segundos. No presente trabalho o mesmo setor teve tempo de execução médio de 500 segundos. Dentro da totalidade dos setores simulados neste, o setor 2532 esteve entre os menores tempos de execução, indicando a maior complexidade dos outros setores em falta.

Observa-se uma alteração nos setores 732, 2532, 2682 e 3452, apresentaram de maneira geral um tempo de execução menor. Percebe-se que houve menores dispersões dos dados, assim como as caudas apresentaram pequena amplitude tanto para limites máximos e mínimos, o que indica tempos de execução mais concentrados para todos os indivíduos. Outro fator esteve na distribuição dos dados que com exceção do setor 3452, apresentam simetria de distribuição de uma forma geral, o que indica que existiu um certo padrão de tempo de execução mais frequente em torno do valor médio do tempo de execução. Tal setor teve assimetria de distribuição negativa, ou seja, houve grande frequência de dados com menor tempo de execução em relação a aos valores comuns deste setor, representados pela mediana.

Para o caso de resultado de manobras, fora considerados os dados de todas as soluções geradas, portanto incluindo soluções infactíveis, exibidas como outliers. A figura 5, mostra a concentração do número total de manobras de chaves obtidas na metodologia 2. Dentro dos indivíduos gerados, houve tendência de valor médio de manobras na faixa de 20-30 manobras, seguido por outliers, ou seja, indivíduos não adequados para a solução. Em [1], foram obtidos no setor 2532, sob condições diferentes um número total de manobras de 33 manobras.

A figura 6, apresenta os resultados de tempo de execução do *SD de Londrina city*. Os setores: 264, 1571 e 2849, apresentaram maior tempo de execução em relação aos demais (até na ordem de 900 segundos). Os dois últimos tendo uma assimetria na distribuição dos dados e maior dispersão em relação aos demais. Os outros setores tiveram o máximo tempo de 500 segundos, mantendo uma pequena variação neste valor.

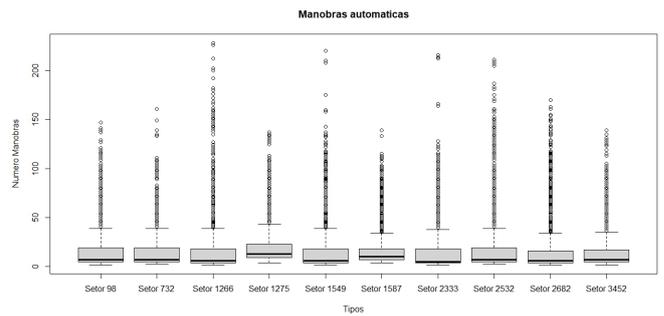


Fig. 5. Número de manobras totais obtidas pela metodologia 2 para o *sd londrina full*.

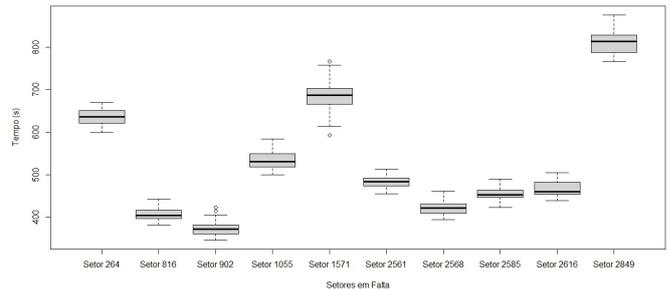


Fig. 6. Tempo execução simulando faltas em diversos setores aplicando ferramenta trifásica para o *sd londrina City*.

Para o sistema de 53 barras (figura 7), setores: 13, 14, 22, 26, 27 e 35 apresentaram os maiores valores, com maior dispersão em relação aos demais. Já para os indivíduos factíveis, houve uma ligeira redução da dispersão dos dados, mantendo as características anteriores. O que evidenciou que a aplicação dos setores em falta, demonstrou tempos de execução com maior valor sendo *38 segundos*, atendo outros setores com menor complexidade de resolução. Exclusivamente o caso de falta no setor 14, fora abordado por [6] e [1], sendo que os tempos totais de execução de 27,8 segundos e 3,8 segundos respectivamente. Tal comparação demonstra que para esta ferramenta proposta, os tempos de execução foram superiores as duas que consideram o sistema monofásico em até 24 segundos.

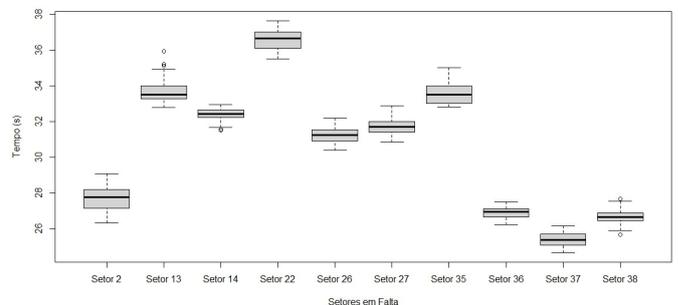


Fig. 7. Tempo execução simulando faltas em diversos setores aplicando ferramenta trifásica para o *sd 53 bus*.

Porém a título de comparação, em [25] sob condição de sistema trifásico, fora obtido como resultado utilizando a falta

em um setor do SD *IEEE 37 bus* o tempo de execução da ordem de 1133.551 segundos no pior caso de falta. Da ferramenta proposta, o pior caso de falta fora obtido via falta no setor 1266, com tempo total de execução de 1105.115501 segundos. Se tratando da análise de um sistema de 37 barras versus 40.000 barras os tempos para a ferramenta ficaram relativamente baixos em relação a outra metodologia.

Apesar que para a rede *Londrina city*, alguns setores apresentarem tempos de execução próximos a rede de 40.000 barras, diminuindo a taxa de variação do aumento do tempo total de execução. Para os indivíduos factíveis, houve a diminuição da dispersão dos tempos finais com existência de outliers para os casos de *SD's: Londrina city e full*, algo que ficou mais acentuado na última rede.

Tal tendência é evidenciada nas figuras 8 a 10, onde é possível observar a linha de tendência dos dados das três redes distribuído no eixo das abscissas do gráfico. Mais uma vez é possível observar que para as outras redes com exceção de *SCL city*, abordadas nas duas metodologias, levando em conta o fato de algumas considerações de prioridade de consumidores e setores diferentes, de maneira geral, percebe-se que houve aumento no tempo de execução da ferramenta obtida pela metodologia 2.

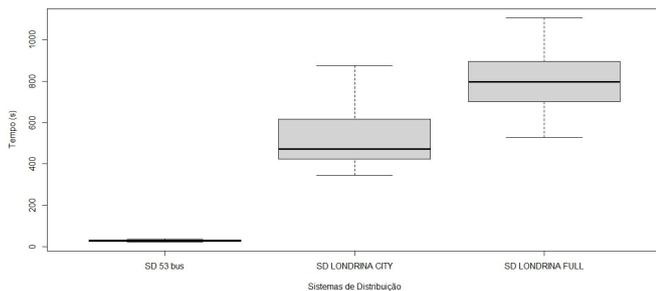


Fig. 8. Tempo execução comparando os três SD's.

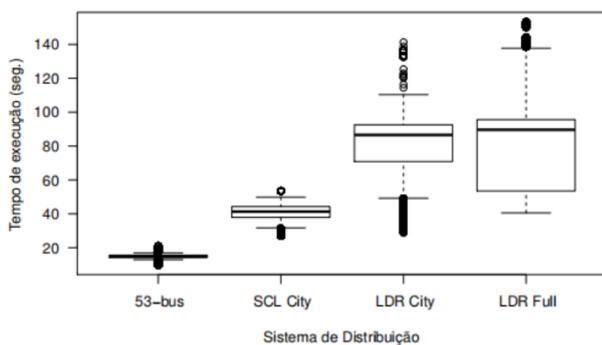


Fig. 9. Tempo execução obtido por [1] nos mesmos SD's utilizados.

De modo geral, os resultados obtidos demonstraram um aumento na ordem de tempo total de execução em relação aos tempos obtidos por [1], visto que a aplicação do fluxo em setores que necessitavam da aplicação da metodologia evolutiva exigiu a avaliação de cada indivíduo gerado via fluxo de carga, nas três fases. Tais resultados, eram esperados

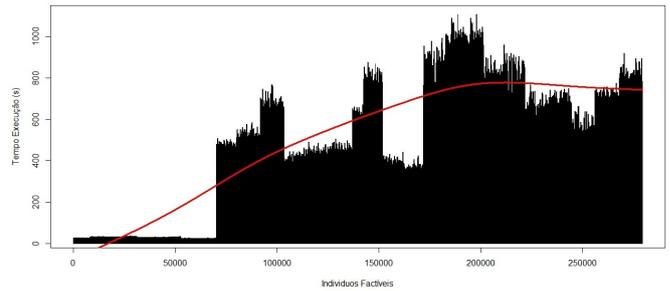


Fig. 10. Tempo execução comparando os três SD's.

visto que o aumento do número de execuções do fluxo de carga, faria com que os valores de geração de soluções aumentariam de certa forma. Porém, percebe-se que este tempo fica suscetível ao setor em que ocorre a falta, tal fator se deve por fatores externos ao fluxo de carga sendo eles, Heurística de possibilidades de geração de indivíduos, número de manobras de chaveamento e geração dos indivíduos até que se chegue a configuração desejada, atendendo as restrições impostas pelos equipamentos e órgãos reguladores. Apesar de tais constatações, observa que para os casos de indivíduos factíveis, os tempos de execução para os piores casos de falta tanto da rede de Londrina city e full obtiveram tempos de execução próximos, apesar do dobro do número de barras no sistema. Sendo estes indivíduos, mais importantes para elaboração do plano de restabelecimento, pode se considerar os resultados satisfatórios.

Assim como a proposta de [5], [31], [28], [16], [29], [1] a união entre RNP, FC e NSGA-II, BELM e junção com o AEMT mesmo em condições adversas obteve bom desempenho mesmo considerando sistema trifásico. Cabe salientar que realmente houve aumento do tempo de execução, porém, para os casos de maior complexidade (falta no setor 2849 do sistema Londrina city e 1275 do sistema Londrina Full) das faltas os tempos se mantiveram próximos para duas redes com tamanhos diferentes. Claro que para rede de Londrina city fora uma aumento expressivo, porém mostra que nesse caso para a complexidade da falta no setor 1275 do SD londrina Full o aumento do tempo não chegou a ser o dobro do tempo como no caso anterior.

Portanto pode-se considerar a ferramenta de restabelecimento trifásica como alternativa para melhor avaliação da real condição da rede em casos de contingência, mesmo que ocorra um aumento significativo do tempo de execução, para o caso de redes de maior porte existe uma tendência de estabilização do tempo de execução para obtenção dos indivíduos factíveis em função do aumento da rede como proposto na literatura.

Seguem algumas considerações:

- As metodologias computacionais de consideração ao RE trazem maior agilidade ao processo de restabelecimento e levam em conta parâmetros importantes, ponderando custo versus benefício e oferecendo soluções ótimas para melhor aproveitamento da topologia e dos equipamentos do SD como um todo;

- Com um fluxo de potência ágil é possível considerar mais possibilidades e poder tomar a melhor decisão quanto a melhor configuração para o SD;
- Do lado dos consumidores, é pensado o atendimento sem interrupções e de qualidade. Do lado dos concessionários, reduzir custos e atender normas vigentes. Tal fator (faltas) depende dos fenômenos naturais e acidentes. Como se sabe que não há possibilidade de prevê-los, há a necessidade de ferramentas que lidem e contenham os efeitos negativos destes imprevistos. Quanto mais possibilidades de configuração e topologia da rede são consideradas e todas estas possibilidades se aproximam mais da realidade do sistema, maior redução dos custos e melhor atendimento dos consumidores. Neste sentido o fluxo de carga tem importância crítica no contexto de tempo de execução da ferramenta de restabelecimento trifásico, então sendo de suma importância sua máxima eficiência computacional na avaliação de cada configuração gerada independente da metodologia de consideração da reconfiguração do SD.

Torna-se interessante um estudo mais aprofundado levando em conta aspectos específicos quanto priorização de consumidores, variação de demanda, qualidade dos indivíduos gerados e correlações entre a geração de soluções frente a existência de diferentes cargas nas fases. No sentido de aprimoramento da ferramenta, recomenda-se levar em conta que para o caso de três fases no sistema surge a influência de restrições de desequilíbrio de tensão, não consideradas neste trabalho.

A ineficiência da ferramenta de restabelecimento trifásica pode ser justificada pela elaboração de soluções mais precisas e criteriosas, em casos de maior complexidade de resolução o tempo de execução mantém valores dentro de limites satisfatórios.

A partir dos resultados mostrados principalmente para as redes de grande porte (*Londrina city e full*), observa-se para determinados setores em falta a abordagem meta heurística mesclada com o uso do FC, junto a uma representação eficiente, demonstrou aumento de tempo de execução, principalmente para alguns setores em falta de solução mais complexa. A cada setor, um conjunto de soluções apresenta diferentes comportamentos, sendo a maior dificuldade reduzir tais discrepâncias em função do aumento do tempo. Sendo o problema de RE, composto por um conjunto de variáveis limitadas a inúmeras restrições conflitantes, muitas vezes o aprofundamento em um destes objetivos pode levar a piora de outros indicadores. O fluxo de carga trifásico, pode aumentar o tempo de execução da ferramenta de restabelecimento, porém, por outro lado torna as soluções geradas mais precisas. Mesmo que ocorra aumento substancial no tempo, este é atenuado a medida que o SD é aumentado.

VI. CONCLUSÃO

O problema de RE exige análise minuciosa de inúmeras possibilidades de soluções possíveis para restauração. Estas são realizadas através de indicadores gerados pelo FC, tendo este importância crítica na influência do tempo de execução

da ferramenta computacional de RE. A partir da proposta de extensão da metodologia em [1], comparou-se a relação de tempo de execução deste trabalho e a metodologia base. Foram simulados setores em falta simples, aplicando a metodologia desenvolvida e obtendo os tempos de execução. Percebe-se da consideração trifásica o aumento do tempo de execução. Este influenciado por fatores como complexidade da falta. Sugere-se trabalhos futuros que possam considerar mais objetivos como variação de demanda, geração distribuída, análise de aspectos qualitativos do problema de RE interligados ao desenvolvimento de estratégias de aumento de eficiência do FC.

REFERÊNCIAS

- [1] L. T. MARQUES, "Restabelecimento de energia em sistemas de distribuição considerando aspectos práticos." Tese de doutorado em Engenharia Elétrica—EESC/USP.
- [2] D. Shirmohammadi, H. Hong, A. Semlyen, and G. Luo, "A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 3, no. 2, pp. 753–762, May 1988.
- [3] M. Baran and F. Wu, "Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 4, no. 1, pp. 735–743, Jan 1989.
- [4] D. Shirmohammadi, "Service restoration in distribution networks via network reconfiguration," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 7, no. 2, pp. 952–958, Apr 1992.
- [5] A. C. B. Delbem, A. C. P. L. F. de Carvalho, C. A. Policastro, A. K. Pinto, K. Honda, and A. C. Garcia, "Node-depth encoding for evolutionary algorithms applied to network design," in *Genetic and Evolutionary Computation Conference*, 2004, pp. 678–687.
- [6] R. Romero, J. F. Franco, F. B. Leão, M. J. Rider, and E. S. de Souza, "A new mathematical model for the restoration problem in balanced radial distribution systems," *IEEE TPS*, vol. 31, no. 2, pp. 1259–1268, 2016.
- [7] K. Chen, W. Wu, B. Zhang, and H. Sun, "Robust restoration decision-making model for distribution networks based on information gap decision theory," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 2, pp. 587–597, 2015.
- [8] K. N. Miu, H. D. Chiang, and R. J. McNulty, "Multi-tier service restoration through network reconfiguration and capacitor control for large-scale radial distribution networks," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 15, no. 3, pp. 1001–1007, 2000.
- [9] M. Gholami, J. Moshtagh, and F. Felegari, "A new heuristic algorithm for service restoration in unbalanced distribution networks," in *Electrical Power Distribution Networks, 19th Conference on*, 2014, pp. 71–75.
- [10] K. Manjunath and M. Mohan, "A new hybrid multi-objective quick service restoration technique for electric power distribution systems," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 29, no. 1, pp. 51 – 64, 2007.
- [11] A. Zidan and E. F. El-Saadany, "Incorporating load variation and variable wind generation in service restoration plans for distribution systems," *Energy*, vol. 57, no. 0, pp. 682 – 691, 2013.
- [12] D. Chen, X. Chen, J. Liu, X. Dong, and Y. Liao, "Service restoration study of distribution system with distributed generators based on particle swarm optimization," in *2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection*, vol. 2, 2011, pp. 1176–1181.
- [13] C.-H. Lin, C.-S. Chen, T.-T. Ku, C.-T. Tsai, and C.-Y. Ho, "A multiagent-based distribution automation system for service restoration of fault contingencies," *ETEP*, pp. 239–253, 2011.
- [14] C.-S. Chen, C.-H. Lin, and H.-Y. Tsai, "A rule-based expert system with colored petri net models for distribution system service restoration," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 17, pp. 1073–1080, 2002.
- [15] M.-S. Tsai, "Development of an object-oriented service restoration expert system with load variations," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 23, no. 1, pp. 219–225, 2008.
- [16] A. C. Santos, A. C. B. Delbem, J. B. A. London Jr., and N. G. Bretas, "Node-depth encoding and multiobjective evolutionary algorithm applied to large-scale distribution system reconfiguration," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 25, no. 3, pp. 1254 –1265, aug. 2010.

- [17] D. T. Vedullapalli, R. Hadidi, and L. S. Bozeman, "Distribution system restoration using graph theory after multiple faults," *IET Energy Systems Integration*, vol. 2, no. 3, pp. 235–242, 2020. [Online]. Available: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1049/iet-esi.2019.0118>
- [18] Y. Oualmakran, J. Melendez, and S. Herraiz, "Self-healing for smart grids: Problem formulation and considerations," in *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 2012 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on*, Oct., pp. 1–6.
- [19] K. S. Kumar, K. Rajalakshmi, and S. P. Karthikeyan, "A modified artificial neural network based distribution system reconfiguration for loss minimization," in *2014 International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE)*, 2014, pp. 1–5.
- [20] C. Xingang, T. Hao, Y. Bing, L. Changxin, and C. Xiaoqing, "Multi-objective distribution network reconfiguration based on deep learning algorithm," in *2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, 2018, pp. 1–4.
- [21] H. Tang, J. Zhu, C. Chen, Z. Zhang, and D. Zhang, "Distribution network reconfiguration based on back propagation neural networks," in *2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, 2019, pp. 2578–2582.
- [22] S. Eng, O. Penangsang, R. S. Wibowo, I. Suryawati, and C. Chhlonh, "Distribution system restoration using spanning tree based on depth first search visual in gui," in *2019 5th International Conference on Science and Technology (ICST)*, vol. 1, 2019, pp. 1–6.
- [23] R. R. Nejad, A. Golshani, and W. Sun, "Integrated transmission and distribution systems restoration with distributed generation scheduling," in *2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, 2018, pp. 1–5.
- [24] W. Sun, N. Kadel, I. Alvarez-Fernandez, R. R. Nejad, and A. Golshani, "Optimal distribution system restoration using phev," *IET Smart Grid*, vol. 2, no. 1, pp. 42–49, 2019. [Online]. Available: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1049/iet-stg.2018.0054>
- [25] J. Li, X.-Y. Ma, C.-C. Liu, and K. P. Schneider, "Distribution system restoration with microgrids using spanning tree search," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 6, pp. 3021–3029, 2014.
- [26] L. Yang, Y. Xu, H. Sun, M. Chow, and J. Zhou, "A multiagent system based optimal load restoration strategy in distribution systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 124, p. 106314, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061520307080>
- [27] N. V. Kovački and P. M. Vidović, "Distribution network supply restoration using measurement-based robust optimization approach," *Electric Power Systems Research*, vol. 210, p. 108170, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779622003832>
- [28] A. C. Santos, M. Nanni, M. R. Mansour, A. C. B. Delbem, J. B. A. London, and N. G. Bretas, "A power flow method computationally efficient for large-scale distribution systems," *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2008 IEEE/PES*, pp. 1–6, Aug. 2008.
- [29] L. T. Marques, A. C. B. Delbem, J. B. A. London, and M. H. M. Camillo, "Service restoration in large-scale distribution systems considering three levels of priority customers," in *PowerTech, IEEE*, June 2015, pp. 1–6.
- [30] A. J. Monticelli and A. Garcia, *Introducao a Sistemas de Energia Eletrica*. Campinas: Unicamp, 2003.
- [31] T. W. de Lima and A. C. B. Delbem, "Estruturas de dados eficientes para algoritmos evolutivos aplicados ao projeto de redes," *Relatório Técnico 301*, 2007, notas Didáticas do ICMC-USP.
- [32] K. Deb, *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. New York: Wiley, 2001.
- [33] M. H. M. Camillo, M. E. V. Romero, R. Z. Fanucchi, T. W. de Lima, A. B. C. Delbem, and J. B. A. London, "Exhaustive search and multi-objective evolutionary algorithm for single fault service restoration in a real large-scale distribution system," in *2015 IEEE Power Energy Society General Meeting*, July 2015, pp. 1–5.

APÊNDICE A – Grafos

Da necessidade de algoritmos de reordenação de barras na literatura a representação Nó Profundidade, através do conceito de grafo, trouxe a melhora de desempenho quanto a representação da topologia.

Conceito de grafo. *Dado um dado conjunto $G(V,A)$, sendo:*

V um conjunto de vértices ou nós de G ,

A um conjunto de pares ordenados $u=[v,w]$ sendo v e w pertencentes a V , sendo u uma aresta de G ;

Orientação. *Aresta u , possui relação assimétrica de tal modo que v é pai de w e a recíproca não é verdadeira;*

Ordem(n). *Número de arestas correspondentes ao grafo;*

Adjacência. *Caso exista uma aresta $u=[v,w]$, V é adjacente a w , se existe uma aresta incidente aos dois nós. No caso de grafo orientado, trata-se como sucessores ou antecessores, sendo w sucessor se existe um arco que parte de v para w . V antecessor, se existe um arco que sai de v para w ;*

Grau. *Número de arestas incidentes sobre um nó. No caso de grafo orientado existem dois tipos:*

- *Grau de emissão: Quantidade de arcos que saem deste nó;*
- *Grau de recepção: Quantidade de arcos que chegam neste nó;*

Cadeia. *Caso exista uma sequência de arestas adjacentes;*

Ciclo. *Trata-se de uma cadeia simples e fechada, em que o nó inicial corresponde também ao nó final;*

Caminho. *Cadeia onde todos estão orientados para o mesmo caminho;*

Conexo. *Caso exista pelo menos uma cadeia para cada par de vértices, tem-se um grafo conexo.*

Base. *Tem-se uma base, caso: Dois vértices pertencentes a B não estão ligados por nenhum caminho; Qualquer vértice não pertencente a B , pode ser atingido por um caminho iniciado por B ;*

Raiz. *Corresponde a um conjunto unitário de da Base do grafo;*

Árvore. *É um grafo conexo e acíclico, onde ordem $n \geq 2$, onde:*

- *Conexo e acíclico;*
- *Conexo onde arestas = $n-1$;*
- *Acíclico onde arestas = $n-1$;*
- *Acíclico aceitando no máximo um ciclo, quando se insere uma aresta;*
- *Conexo até o momento em que se retira uma aresta;*
- *Só existe uma cadeia simples entre dois nós (para todos nós se aplica);*

Floresta. *Grafo onde as componentes conexas são árvores.*

APÊNDICE B – Representação Nó Profundidade

A base conceitual do trabalho foi descrita pelos trabalhos de [28] em que se tratavam dois métodos de cálculo de fluxo de potência por varredura direta e inversa na representação de dados Nó-Profundidade.

A representação nó-profundidade (RNP) é baseada nos conceitos de correntes de grafo. Essas correntes são representadas por árvores unidas, que representam o sistema de distribuição. Sendo árvores, grafos acíclicos e conexos, herdando os conceitos citados anteriormente. A representação intermediária, se trata da união de correntes de grafo principais. A união dessas correntes gera a representação de todo sistema [5]; Alguns conceitos importantes:

- Os nós a montante a um nó X, representam os nós na direção da raiz;
- Os nós a jusante a esse mesmo nó, são os nós que ficam na direção das folhas; Passos para Representação Nó-Profundidade:
- A árvore é representada escolhendo um ponto de partida, e percorrendo os nós a jusante;
- Enumera-se todos caminhos desse ponto às folhas da árvore;
- Insere-se em ordem crescente os nós não repetidos, eliminando os nós repetidos; Representa-se a profundidade de cada nó em relação a raiz;

Tabela 3 – Representação inicial

Representação Intermediária					
1	2	8			
1	3	9	10		
1	3	4	11	12	13
1	3	4	5	14	
1	3	4	5	6	7
1	3	4	5	15	

1. Organiza-se a árvore pela representação intermediária com nós repetidos lado a lado
2. Percorre-se apenas os nós não repetidos
3. O espaço entre cada nó equivale uma profundidade;

Assim a matriz de representação T fica:

Tabela 4 – Representação Final, segundo [5]

MATRIZ T															
NÓ	1	2	8	3	9	10	4	11	12	13	5	14	6	7	15
PROF	0	1	2	1	2	3	2	2	3	4	3	4	3	4	4

No caso acima percebe-se um alimentador com 15 nós, representado na matriz RNP. Tais dados são subdivididos pelos nós e sua respectiva profundidade em relação a um caminho de referência arbitrário. Partindo de uma representação de todos nós a iniciando da referência, omite-se as barras repetidas, de tal forma que são filtrados apenas os caminhos entre a referência e o destino, endereçados pela profundidade. Pode-se estender o conceito, caso a metodologia implementada seja aplicada em problemas de reconfiguração. Nesse caso, representa-se uma RNP dentro de outra RNP de setor. Isso pode ser explicado pelo uso da divisão conceitual: RNP de setor e RNP de Alimentador. No conceito de RNP de setor, os nós correspondem a um conjunto de barras assim como as arestas representam chaves seccionadoras. Já segundo [1], a RNP de alimentador em seu nó representa barras de carga ou de passagem, assim como as arestas representam comumente a linha de transmissão, exceto o trecho entre os ramos da árvore e a raiz contendo chaves seccionadoras. Tal conceito permite a representação da topologia da rede permitindo-se a simulação de manobras de chaves, geração de novas configurações e consequentemente restabelecimento.