

Balanceamento de Redes de Distribuição Rurais de Média Tensão Utilizando Algoritmos Genéticos: Um Estudo de Caso Real

Tema: Redes de Distribuição

Autores: Matheus Magno de Araújo Garcia

Co-Autores: João Paulo Abreu Vieira

Empresa: Equatorial Pará Distribuidora de Energia S.A

Resumo

O balanceamento de carga em alimentadores de distribuição trifásicos é um desafio continuamente enfrentado pelas concessionárias de energia elétrica. Um alimentador com um alto índice de desbalanceamento pode contribuir para um aumento nas perdas técnicas e comprometer o sistema de proteção, pois uma corrente elevada no neutro pode dessensibilizar a proteção 51N do alimentador e, portanto, expor o sistema à faltas monofásicas ou de alta impedância (FAIs) onde a corrente de curto circuito circulante no neutro pode atingir valores próximos à corrente nominal de carga. Isso eleva o risco de falhas operacionais, danos aos ativos e interrupções prolongadas de energia. Para o estudo de caso foi utilizado um alimentador do sistema de distribuição do estado do Amapá, caracterizado por uma grande extensão e um grande número de derivações monofilares com retorno por terra (MRTs), o que intensifica o desbalanceamento. Este artigo investiga o problema e propõe uma solução de rebalanceamento alterando as conexões dos MRTs entre as fases, buscando uma solução ótima através de algoritmos genéticos (AG).

1. Introdução

Em diversas áreas rurais com baixa densidade populacional, o sistema de distribuição de energia frequentemente adota o tipo Monofilar com Retorno por Terra (MRT), conectados ao longo de alimentadores trifásicos, pois atendem apenas pequenas cargas, além de ser uma solução de baixo custo. Esses alimentadores que possuem uma grande quantidade dessas derivações monofásicas podem apresentar uma alta taxa de desequilíbrio de corrente, devido à má distribuição das cargas entre as fases, dessa forma a corrente no neutro passa a ter um valor significativo (Lin et al. 2023).

Em um sistema perfeitamente equilibrado, os módulos das correntes nas 3 fases são iguais, defasados em 120° entre si, resultando em uma corrente no neutro nula, porém em aplicações reais haverá um desbalanceamento natural do sistema. A corrente no neutro pode ser expressa como a soma fasorial das correntes nas 3 fases A, B e C, de acordo com (1).

$$\mathbf{I}_N = \mathbf{I}_A + \mathbf{I}_B + \mathbf{I}_C \quad (1)$$

A corrente de cada fase é representada por um fasor em (2).

$$\mathbf{I}_\phi = |I_\phi| e^{j\theta_\phi} = \cos \theta_\phi + j \sin \theta_\phi \quad (2)$$

Onde $|I_\phi|$ é o módulo da corrente e θ_ϕ é o ângulo de defasagem entre as fases.

Para chegar ao módulo de I_N , a soma em (1) pode ser expandida usando (2), dessa forma é encontrada uma parte real e imaginária para I_N , conforme (3) e (4), respectivamente.

$$\text{Re}(I_N) = |I_A| \cos \theta_A + |I_B| \cos \theta_B + |I_C| \cos \theta_C \quad (3)$$

$$\text{Im}(I_N) = |I_A| \sin \theta_A + |I_B| \sin \theta_B + |I_C| \sin \theta_C \quad (4)$$

As componentes reais e imaginárias compõem a corrente no neutro e o seu módulo é calculado a partir da Equação (5).

$$I_N = \sqrt{\text{Re}(I_N)^2 + \text{Im}(I_N)^2} \quad (5)$$

Se for considerado uma defasagem de 120° entre as fases, é possível chegar a uma expressão apenas com o módulo das correntes I_a , I_b e I_c , como é mostrado em (6).

$$I_N = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{3}}{2} (I_A - I_B) \right)^2 + \left(-\frac{1}{2} (I_A + I_B) + I_C \right)^2} \quad (6)$$

Para medir o índice de desequilíbrio D entre as correntes do alimentador utiliza-se a expressão dada por (7), considerando a corrente média nas 3 fases

$$D = \frac{\max(\Delta I_A, \Delta I_B, \Delta I_C)}{I_{\text{média}}} \times 100\% \quad (7)$$

Onde I_a , I_b e I_c são dadas por (8), para cada fase do alimentador.

$$\Delta I_\phi = |I_\phi - I_{\text{média}}| \quad (8)$$

O índice de desequilíbrio é uma métrica que compara a diferença entre a maior corrente de fase e a corrente média, quanto maior for essa diferença, maior será o desequilíbrio e, consequentemente, maior será a corrente no neutro.

Para os alimentadores que possuem uma alta taxa de desequilíbrio, os relés de proteção contra sobrecorrente no neutro precisam ser ajustados com uma corrente elevada o suficiente para que não haja atuação indevida, de acordo com a relação em (9).

$$I_{\text{pick-up}} = k \cdot I_{N \text{ máx}} \quad (9)$$

Onde k é um fator de segurança para garantir que o relé não atue em condições nominais de carga, mas que ainda seja capaz de detectar correntes significativas que indiquem a presença de uma falta. Geralmente utiliza-se um fator entre 1,1 e 1,3.

Com o ajuste de neutro elevado, o sistema de proteção convencional fica vulnerável a faltas monofásicas ou de alta impedância, pois em determinadas barras do sistema, o nível de curto-circuito fase-terra é inferior a corrente de atuação do neutro do relé, fazendo com que o mesmo não consiga detectar a falta (Aljohani et al. 2020) e a mesma seja sustentada por longos períodos.

As faltas de alta impedância (FAI) são defeitos no sistema elétrico de distribuição onde a corrente de falta é significativamente pequena devido à presença de uma resistência elevada. Esses defeitos ocorrem comumente quando o condutor entra em contato com solo ou com alguma vegetação que esteja próximo à rede.

Com uma corrente de falta pequena, a mesma pode não ser detectada pelos sistemas de proteção de sobrecorrente convencionais (Hamatwi et al. 2023), pois a corrente medida no início do alimentador após a falta permanece dentro do intervalo de corrente nominal de carga.

É dito em (Ghaderi et al. 2015) que relatórios indicam que 5% a 10% das faltas em todo o sistema elétrico são FAIs, porém esse número deve ser maior, uma vez que apenas curtos-circuitos francos são incluídos nas estatísticas. De acordo com (Hamatwi et al. 2023), as FAIs são identificadas como a segunda maior causa de mortes relacionadas ao sistema elétrico no Brasil, e a maior causa de incêndios no mundo todo. Detectar faltas de alta impedância não é uma tarefa fácil e nem sempre é possível identifica-la, porém existem métodos que podem aumentar o grau de detecção. Na literatura há métodos baseados em análises harmônicas, com o uso da transformada rápida de Fourier (FFT) para detectar harmônicas características de FAI. (Sulaiman et al. 2012). A transformada discreta de Wavelet (TWD) também é uma técnica eficaz para detecção de FAI, pois é capaz de detectar transientes e pequenas distorções características de FAI (Sushama et al. 2009).

A Schweitzer Engineering Laboratories (SEL) atualmente comercializa relés de proteção de alimentadores e religadores com funções de proteção contra FAIs (SEL 2023), existem diferentes lógicas de detecção embarcadas nos relés, sendo elas:

- *Phase Discontinuity Detection* (PDD): Quando o condutor de uma das fases da rede MT se parte e toca a superfície, haverá um grande desbalanço entre as correntes, e esse desbalanço pode ser observado pela proporção entre a corrente de sequência negativa com a corrente de sequência positiva, nesse caso haverá uma lógica no relé que detectará quando houver uma variação abrupta dessa proporção.
- Detecção de FAI com elemento de sobrecorrente de neutro (50G HIZ): Tem como premissa o comportamento de um cabo de média tensão quando se rompe e toca ao solo, pois é esperado que o cabo ricocheteie fazendo com que atue e resete os elementos de sobrecorrente diversas vezes em um pequeno intervalo de tempo. Foi implementado uma lógica no relé que realizará a contagem de atuações, se esta contagem atingir um valor máximo, poderá ser disparado um alarme ou trip para atuação do sistema de proteção.
- *Arc Sense Technology* (AST): São utilizados algoritmos para detecção de FAI's baseados em componentes harmônicas ímpares e inter-harmônicas presentes nos sinais de corrente. O algoritmo executa a soma das diferenças das correntes (SDI), na qual os valores das correntes são comparados com os

valores do ciclo anterior, o relé é capaz de gravar os valores do SDI para condições normais de carga e usá-lo como referência, qualquer variação abrupta indicará a possibilidade de uma falta (Hou 2007).

Para melhorar a detecção de faltas fase-terra convencionais ou de alta impedância, é ideal que o alimentador possua um desbalanço pequeno de carga, permitindo um ajuste de sobrecorrente de neutro menor que a corrente mínima de falta monofásica em toda a extensão do alimentador.

Para atingir esse objetivo, diversas abordagens de rebalanceamento de carga têm sido pesquisadas na literatura, uma solução comum é a redistribuição manual dos ramais monofásicos entre as fases do alimentador, o critério de conexão de cada derivação monofásica pode ser baseado em sistemas de medição ou em softwares que possam calcular o fluxo de potência e estimar a carga em cada ponto do sistema.

Essa técnica também pode ser otimizada utilizando ferramentas computacionais para determinar a melhor configuração que apresente o menor desequilíbrio, com o uso métodos heurísticos, como o algoritmo de otimização por enxame de partículas - PSO (*Particle Swarm Optimization*) e o uso de algoritmos genéticos. (Jin et al. 2004; Suleiman et al. 2022). Os resultados com o uso dessas técnicas têm se mostrado eficientes, além de serem utilizados também para redução de perdas técnicas no alimentador.

Em (Senini et al. 2005) é explorada a técnica de balanceamento a partir do chaveamento de bancos de capacitores conectados entre as fases dos alimentadores, modificando a impedância equivalente do circuito, incrementando ou reduzindo uma carga reativa em série, com o intuito de equilibrar as impedâncias nas 3 fases.

Outras técnicas de balanceamento também incluem a aplicação de medidores inteligentes que podem monitorar em tempo real as correntes do alimentador e realizar o chaveamento entre as fases através de um sistema de controle (Alhmoud et al. 2021). Esse tipo de solução possui a vantagem de ser dinâmico, adaptando-se ao perfil de consumo de energia durante o dia e de forma sazonal. Essa solução, contudo, possui um custo elevado, o que limita a sua aplicação em sistemas de distribuição mais simples, e não é comumente utilizado pelas concessionárias de energia do Brasil.

O diferencial deste trabalho é demonstrar um caso real de um alimentador de média tensão do sistema de distribuição do estado do Amapá, que possui um índice de desequilíbrio de corrente elevado, devido a presença de grandes ramais monofásicos (MRTs) em áreas rurais.

Este é um grande desafio para a concessionária de energia do estado e outras regiões do Brasil, pois é um problema pertinente em diversos alimentadores devido à complexidade para prever e planejar a distribuição das cargas nas fases do circuito adequadamente.

Este trabalho investiga o problema e propõe uma solução de rebalanceamento das fases, com o intuito de reduzir a corrente no neutro do alimentador.

2. Desenvolvimento

Um sistema monofilar com retorno por terra, também chamado de MRT, é uma configuração na qual a corrente elétrica flui através de um único condutor, utilizando a terra como o seu caminho de retorno (Song et al. 2017). Esse tipo de aplicação é caracterizado pela sua simplicidade e eficácia na distribuição de energia elétrica em áreas, principalmente, rurais (Bakkabulindi et al. 2012).

Com o grande número de MRTs presentes em alimentadores trifásicos, se torna cada vez mais difícil atingir o balanceamento ideal das cargas, especialmente em alimentadores muito longos que fornecem energia para uma grande quantidade de clientes, além disso, devido à diferença do padrão de uso de energia dos clientes rurais em relação aos clientes urbanos, os MRTs podem ter seus picos de carga em horários diferentes (Hosseinzadeh et al. 2004).

A Figura 1 mostra a representação geográfica da rede de média tensão do alimentador utilizado no estudo de caso. Este alimentador é, atualmente, o que possui a maior extensão de rede no sistema de distribuição do estado, com uma extensão total de 1218 km de rede MT.

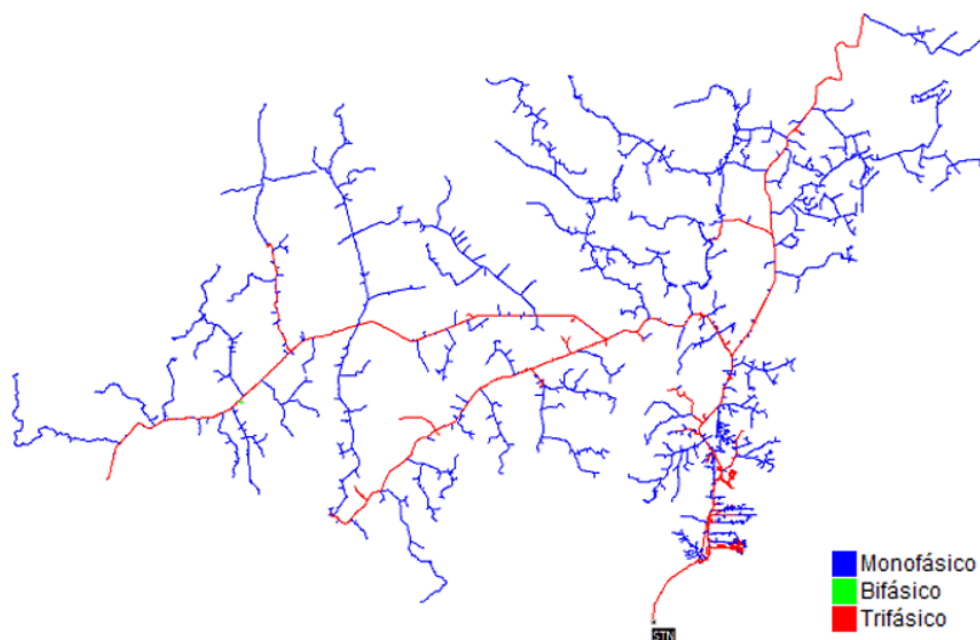


Figura 1 - Alimentador do estado do Amapá com diversos MRTs.

Nota-se uma grande quantidade de ramais monofásicos, representados em azul, que contribuem para um grande desequilíbrio de corrente, e consequentemente uma corrente elevada no neutro. Medições das correntes na saída do alimentador, apontaram uma alta taxa de desequilíbrio, conforme mostra o gráfico da Figura 2.

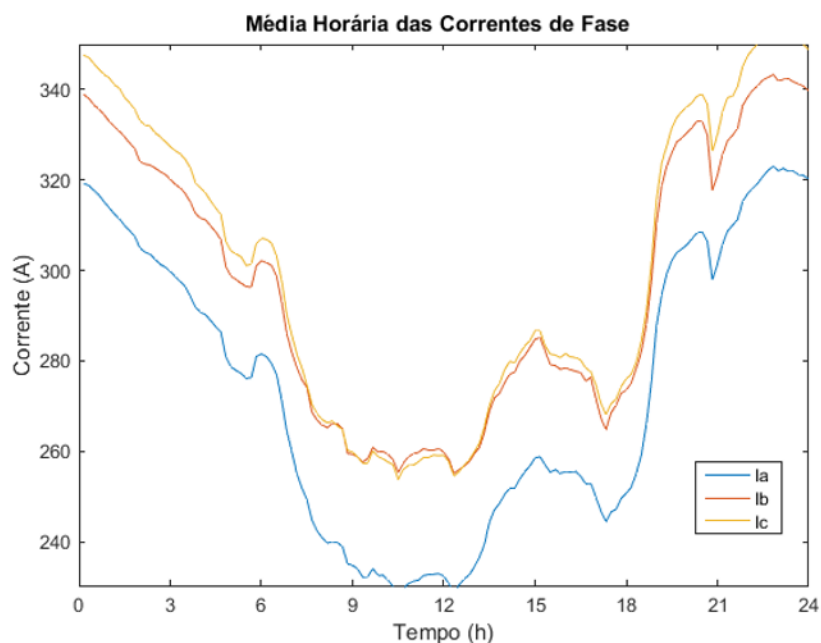


Figura 2 - Curva média horária das correntes nas fases do alimentador.

Devido ao desbalanço das correntes, o alimentador possui uma elevada corrente no neutro, na qual é mostrada a curva média na Figura 3, e na Figura 4 o maior registro observado da corrente, com o valor máximo de 41,6 A e com uma taxa de desequilíbrio de 7,09%.

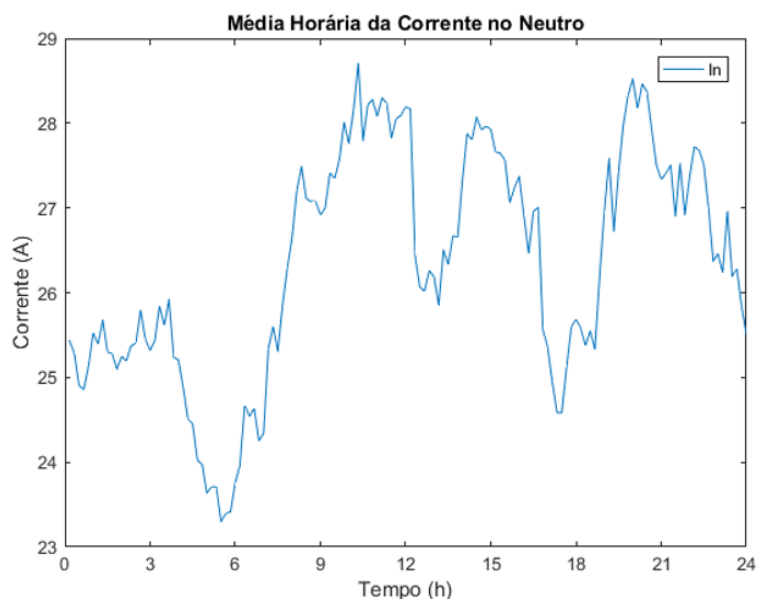


Figura 3 - Curva média horária da corrente no neutro do alimentador.

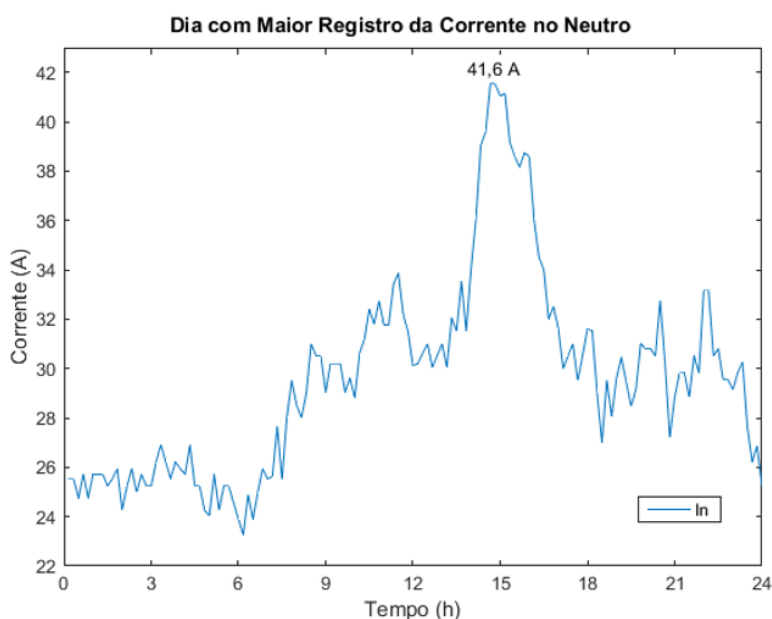


Figura 4 -Dia no qual foi registrado a maior corrente no neutro do alimentador.

Devido ao nível de corrente, o ajuste de proteção para sobrecorrente no neutro 51N do relé, é de 60A, conforme a Figura 5. O pick-up de 0,5 refere-se a corrente lida no secundário do TC pelo relé, ao multiplicar pela RTC de 120, chega-se ao valor de 60A.

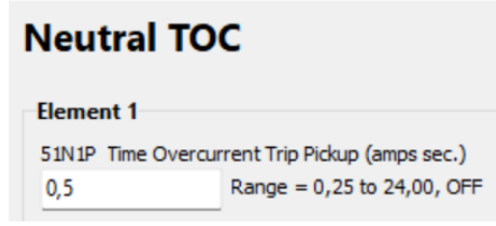


Figura 5 - Ajuste da corrente de pick-up da função 51N do relé.

Com esse ajuste elevado, o sistema fica vulnerável em casos de falta fase-terra, na qual a corrente de falta no neutro aterrado é inferior a 60A. Dessa forma, o sistema de proteção não é sensibilizado e a falta não é detectada.

2.1. Balanceamento de Fases com Algoritmo Genético

Dentre as técnicas de otimização, os algoritmos genéticos (AG) têm emergido como uma solução eficiente para o rebalanceamento das fases. O AG é baseado no processo de evolução genética de Darwin, utilizando conceitos de seleção natural, recombinação e mutação (Kay et al. 2024). O uso de AG é vantajoso em problemas onde é necessária uma grande quantidade de análise combinatória para determinar as soluções ótimas (Gwachha et al. 2023).

Para aplicar o algoritmo genético, é necessário modelar o problema e identificar a função objetivo a ser otimizada, no contexto de balanceamento de alimentadores, é necessário minimizar a diferença das cargas entre as fases do alimentador, o que consequentemente produz uma perda mínima de energia (Suleiman et al. 2022). O cálculo da perda total em um alimentador trifásico em cada fase, é dada por (10) (Kay et al. 2024).

$$P_{perdas} = \sum_{\phi=1}^n R_{\phi} \frac{P_{\phi}^2 + Q_{\phi}^2}{V_{\phi}^2} \quad (10)$$

Onde P e Q são as potências ativa e reativa, respectivamente, V a tensão do alimentador e R a resistência da linha de média tensão. Ao desenvolver a expressão (10), obtém-se (11).

$$\sum_{\phi=1}^n R_{\phi} \frac{V_{\phi}^2 I_{\phi}^2 \cos^2 \varphi + V_{\phi}^2 I_{\phi}^2 \sin^2 \varphi}{V_{\phi}^2} = \sum_{\phi=1}^n R_{\phi} I_{\phi}^2 \quad (11)$$

Portanto, é possível escrever a equação (10) conforme (12), que será usada com a função objetivo a ser minimizada pelo algoritmo. O valor da resistência pode ser considerado igual entre as 3 fases do alimentador.

$$P_{perdas} = RI_a^2 + RI_b^2 + RI_c^2 \quad (12)$$

Com a função objetivo, é preciso também definir as restrições para que a solução ótima esteja dentro de um intervalo pré-estabelecido, como por exemplo, dentro dos níveis adequados de tensão ou abaixo de um valor máximo para o índice de desequilíbrio (Kay et al. 2024).

Para uma restrição para D , onde D_{max} , é aplicado o multiplicador de Lagrange para otimizar a função objetivo. (Suleiman et al. 2022). Que é definido conforme (13).

$$\mathcal{L}(I_a, I_b, I_c, \lambda) = R(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2) + \lambda(D_{max} - D) \quad (13)$$

A partir de (13), obtém-se um sistema de equações através das derivadas parciais em relação as variáveis da função Lagrangiana, conforme (14). O algoritmo encontrará os valores ótimos das correntes que satisfaçam as equações.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial I_a} &= 2RI_a + \lambda \frac{\partial D}{\partial I_a} = 0 \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial I_b} &= 2RI_b + \lambda \frac{\partial D}{\partial I_b} = 0 \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial I_c} &= 2RI_c + \lambda \frac{\partial D}{\partial I_c} = 0 \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda} &= D_{max} - D = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

O parâmetro λ funciona como um fator de ajuste de sensibilidade da função objetivo em relação a restrição, um λ elevado trará mais rigor na busca de soluções que atendem a restrição, ao passo que um λ menor resultará em soluções mais flexíveis.

Para implementar o AG, é necessário possuir a corrente total nas fases do alimentador e as correntes nas derivações monofásicas definindo as fases nas quais estão conectadas. O algoritmo então realizará uma série de combinações alterando a fase de conexão das derivações e calculando as correntes finais totais do alimentador, até que o equilíbrio seja atingido. As equações em (15) representam o cálculo das correntes finais após a redistribuição das cargas.

$$\begin{aligned} I_a^{final} &= I_a^{inicial} + \sum_{i=1}^n (\delta_{a_i}^{final} - \delta_{a_i}^{inicial}) I_i \\ I_b^{final} &= I_b^{inicial} + \sum_{i=1}^n (\delta_{b_i}^{final} - \delta_{b_i}^{inicial}) I_i \\ I_c^{final} &= I_c^{inicial} + \sum_{i=1}^n (\delta_{c_i}^{final} - \delta_{c_i}^{inicial}) I_i \end{aligned} \quad (15)$$

Onde $\delta_{inicial}$ representa o estado de conexão das cargas nas fases inicialmente, sendo igual a 1 caso esteja conectado e igual a 0 caso esteja desconectado, similarmente para δ_{final} . Caso uma carga seja alterada de uma fase à outra, a fase que a receberá somará a corrente da carga com a corrente inicial, enquanto que a fase que "doará" a carga, irá subtrai-la da sua corrente inicial. Dessa forma, garante que as cargas sejam apenas transferidas de uma fase a outra, sem que sejam inseridas novas cargas ou excluídas da simulação.

O algoritmo genético iniciará com uma população de soluções, na qual cada solução é uma possível combinação das cargas para o cálculo da corrente final. Durante o processamento do algoritmo, são utilizados conceitos como:

•

Seleção natural: As soluções encontradas com maior aptidão são selecionadas para reprodução, no contexto utilizado, seriam as soluções com menor desbalanceamento entre as fases.

- Cruzamento (Crossover): As soluções que foram selecionadas são recombinadas para gerar soluções novas (filhos) e expandir a busca pela solução ótima (Boroujeni et al. 2016). Neste operador, é definida a taxa de cruzamento que é uma proporção entre o número de filhos produzidos em cada geração pelo valor da geração atual (Ildarabadi et al. 2023).
- Mutação: São inseridas pequenas mudanças em algumas soluções para obter maior diversidade e evitar a convergência prematura, sendo capaz de encontrar o valor ótimo global (Gwachha et al. 2023). A taxa de mutação é expressa uma porcentagem do conjunto de genes (parte constituinte de uma solução) de cada geração (Ildarabadi et al. 2023).

O critério de parada do algoritmo é definido com base nas restrições impostas, como um índice de desbalanço máximo aceitável, o algoritmo irá recalculer o índice para cada solução e irá aplicar uma “penalidade” quando este exceder o valor máximo, o objetivo da penalidade é convergir o algoritmo para soluções viáveis, cada solução que excede esse limite tem a sua aptidão reduzida, diminuindo a probabilidade de realizar o crossover nas próximas gerações. O fluxograma do funcionamento do algoritmo é representado na Figura 6.

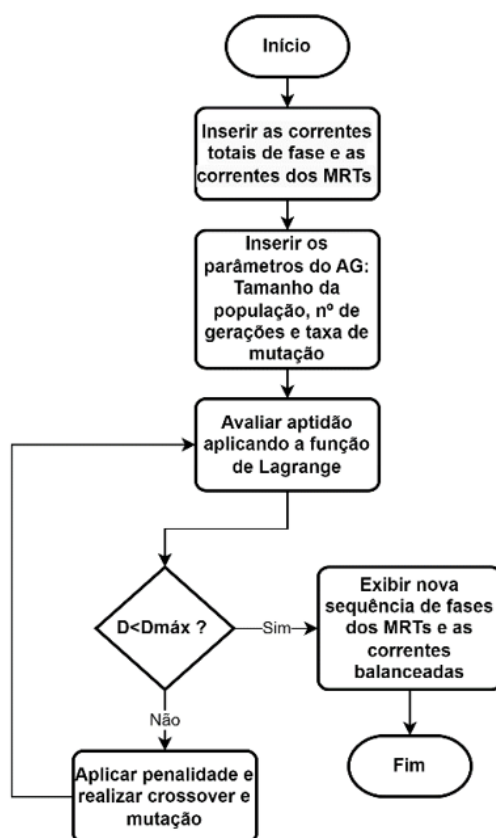


Figura 6 – Fluxograma da aplicação do algoritmo genético.

2.3. Metodologia

Como objeto de estudo, foi utilizado o alimentador visto na Figura 1, que compreende a região metropolitana do Amapá, o alimentador fornece energia à região de Santana e Macapá.

Com auxílio do software INTERPLAN, é possível calcular as impedâncias dos trechos e verificar as barras com as menores correntes de curto-circuito. Na Figura 7 é exibido em traçado laranja o caminho até o ponto

do circuito na qual há a menor corrente de falta monofásica, em seguida são exibidas as suas impedâncias em componentes simétricas na Figura 8.

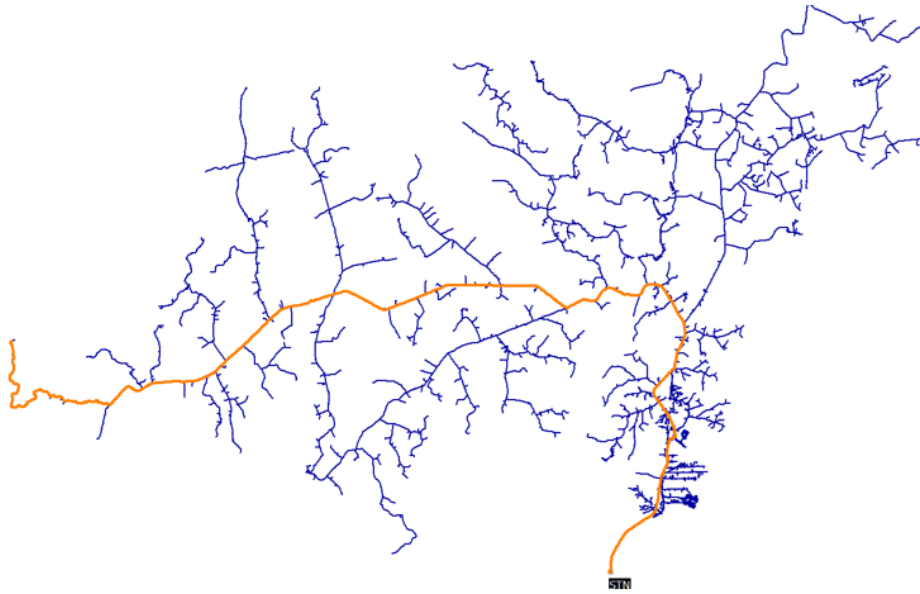


Figura 7 -Caminho até a barra com menor nível de curto circuito fase-terra do alimentador.

| Impedâncias | |
|-------------|--------|
| Z0 (ohm) | 260,17 |
| Z0 (ang) | 66,12 |
| Z1 (ohm) | 93,79 |
| Z1 (ang) | 34,68 |

Figura 8 - Impedâncias em componentes simétricas do trecho referido.

Em um sistema radial de distribuição, a corrente de falta monofásica é dada por (16). Onde E é a tensão nominal do sistema, Z_0 e Z_1 as impedâncias de sequência zero e positiva, respectivamente, e Z_f a impedância de aterramento, comumente definida como 40 Ω .

$$I_{cc1\phi-t} = \frac{3E}{Z_0 + 2Z_1 + 3Z_f} \quad (16)$$

Ao realizar o cálculo da corrente de falta monofásica considerando as impedâncias do trecho da Figura 7 e um curto-circuito franco, é encontrado o valor aproximado de 55A, que fica abaixo do valor de pick-up de neutro do relé. Se for considerado o valor genérico para Z_f de 40 Ω , chega-se ao resultado de aproximadamente 46A. É visto em (Dagenhart 1999) que estudos mostraram que a impedância de aterramento pode ser ainda maior que 40 Ω , especialmente em faltas onde há o contato do condutor à terra. Portanto, a corrente de curto circuito tende a ser ainda menor.

Com o intuito de reduzir o desequilíbrio entre as correntes, foi implementado o algoritmo genético para redistribuir os ramais monofásicos entre as fases. Com o auxílio do *software* INTERPLAN, foi realizado

o cálculo do fluxo de potência no alimentador, ao final do processo foi possível extrair um relatório dos carregamentos em cada trecho do circuito.

Com este relatório, foi possível identificar os trechos monofásicos do alimentador e a fase na qual estão conectados. As Tabelas 1, 2 e 3 exibem as derivações MRTs, referentes as fases “A”, “B” e “C”, respectivamente. Os trechos são identificados por um código ID que pode ser consultado no *software* indicando a sua localização.

Tabela 1 - Ramais monofásicos conectados na fase A.

| ID Trecho | Comp. (m) | I (A) | Fase |
|-----------|-----------|-------|------|
| 15092147 | 102 | 5,511 | A |
| 15099609 | 86 | 2,871 | A |
| 15097334 | 6 | 2,249 | A |
| 15097798 | 164 | 2,899 | A |
| 15097570 | 4 | 3,348 | A |
| 15098226 | 216 | 4,227 | A |
| 15096892 | 8,08 | 2,279 | A |
| 15097479 | 103 | 2,616 | A |
| 15098094 | 55 | 2,376 | A |
| 15097190 | 115 | 2,154 | A |
| 15092611 | 69 | 4,502 | A |
| 15102894 | 89 | 3,755 | A |
| 15091792 | 77 | 1,833 | A |
| 15092744 | 53,31 | 2,874 | A |

Tabela 2 - Ramais monofásicos conectados na fase B.

| ID Trecho | Comp. (m) | I (A) | Fase |
|-----------|-----------|-------|------|
| 15091854 | 143 | 4,87 | B |
| 15092249 | 141 | 4,216 | B |
| 15113222 | 156 | 2,266 | B |
| 15112704 | 29 | 4,915 | B |
| 15088553 | 200 | 1,971 | B |
| 15099312 | 115 | 10,06 | B |

Tabela 3 - Ramais monofásicos conectados na fase C.

| ID Trecho | Comp. (m) | I (A) | Fase |
|-----------|-----------|--------|------|
| 15102684 | 83,56 | 9,443 | C |
| 15091487 | 150,23 | 13,862 | C |
| 15092410 | 41 | 4,659 | C |
| 15087106 | 63 | 10,635 | C |

De posse desses dados, foi implementado o algoritmo genético no MATLAB para redistribuir as fases das tabelas acima. Dentro os parâmetros do algoritmo, foi definido o tamanho da população igual a 100, o número de gerações igual a 500 e a taxa de mutação de 20%. O script segue o fluxograma apresentado na Figura 6.

Foram extraídas as medições das correntes totais do alimentador, considerando a corrente média por patamar horário de carregamento durante o dia, definindo os patamares da seguinte forma:

- Leve: entre 01:00h e 08:00h.
- Média: entre 09:00h e 16:00h e entre 23:00h e 00:00h.
- Pesada: entre 17:00h e 22:00h.
- Máxima: maior corrente medida.

Para cada patamar foi executado o algoritmo, mantendo fixa a melhor configuração final dos MRTs, também foi calculado a corrente no neutro antes e após o balanceamento. Os resultados são discutidos no tópico seguinte.

2.3. Resultados e Discussões

Ao final da execução, houve uma melhora significativa no equilíbrio de corrente, as Tabelas 4 e 5 mostram as correntes antes e após o balanceamento.

Tabela 4 - Correntes nas fases e no neutro antes do balanceamento.

| Patamar | I_a (A) | I_b (A) | I_c (A) | I_N (A) |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Leve | 231,20 | 267,58 | 268,13 | 36,67 |
| Média | 268,41 | 299,95 | 305,14 | 34,43 |
| Pesada | 294,39 | 326,21 | 333,40 | 35,94 |
| Máxima | 308,51 | 341,35 | 348,57 | 36,98 |

Tabela 5 - Correntes nas fases e no neutro após o balanceamento.

| Patamar | I_a (A) | I_b (A) | I_c (A) | I_N (A) |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Leve | 255,59 | 255,68 | 255,65 | 0,08 |
| Média | 291,21 | 291,18 | 291,08 | 0,11 |
| Pesada | 317,99 | 317,95 | 318,06 | 0,09 |
| Máxima | 332,80 | 332,76 | 332,87 | 0,10 |

Como mostrado na Tabela 4, o cenário antes do balanceamento havia uma diferença significativa entre as correntes de fase e consequentemente uma corrente elevada de neutro. O cenário após o balanceamento na Tabela 5 se mostrou eficiente e quase perfeito, com uma corrente de neutro muito próxima de zero, porém é importante destacar que os valores visualizados estão fixos para um determinado instante de tempo, os valores reais podem apresentar variações ao longo do dia, de acordo com a alteração das curvas de demanda dos consumidores, portanto, seria necessário um monitoramento das medições deste alimentador para garantir que o balanceamento permaneça eficaz em diferentes horários.

A Tabela 6 mostra as novas fases dos ramais monofásicos após a execução do script, através do código ID é possível identificar a localização dos trechos e executar as mudanças de fase manualmente ao longo do alimentador. Com um balanceamento satisfatório alcançado e uma corrente de neutro reduzida, é possível então executar um novo estudo de proteção com a possibilidade de redução do pick-up de sobrecorrente de neutro, protegendo todas as barras do alimentador.

Tabela 6 - Nova distribuição dos ramais monofásicos após a simulação.

| ID Trecho | Comp. (m) | I (A) | Fase Antes | Fase Depois |
|-----------|-----------|--------|------------|-------------|
| 15092147 | 102 | 5,511 | A | A |
| 15099609 | 86 | 2,871 | A | A |
| 15097334 | 6 | 2,249 | A | A |
| 15097798 | 164 | 2,899 | A | C |
| 15097570 | 4 | 3,348 | A | C |
| 15098226 | 216 | 4,227 | A | B |
| 15096892 | 8,08 | 2,279 | A | A |
| 15097479 | 103 | 2,616 | A | A |
| 15098094 | 55 | 2,376 | A | C |
| 15097190 | 115 | 2,154 | A | A |
| 15092611 | 69 | 4,502 | A | A |
| 15102894 | 89 | 3,755 | A | A |
| 15091792 | 77 | 1,833 | A | A |
| 15092744 | 53,31 | 2,874 | A | B |
| 15091854 | 143 | 4,87 | B | A |
| 15092249 | 141 | 4,216 | B | C |
| 15113222 | 156 | 2,266 | B | A |
| 15112704 | 29 | 4,915 | B | A |
| 15088553 | 200 | 1,971 | B | B |
| 15099312 | 115 | 10,06 | B | C |
| 15102684 | 83,56 | 9,443 | C | A |
| 15091487 | 150,23 | 13,862 | C | A |
| 15092410 | 41 | 4,659 | C | A |
| 15087106 | 63 | 10,635 | C | B |

3. Conclusão

Este trabalho demonstrou a aplicação do algoritmo genético (AG) para balanceamento de fases em um alimentador real, mostrando como resultado uma redução significativa da corrente de neutro.

Além de obter uma maior sensibilidade no relé de neutro para detecção de FAIs, um sistema balanceado oferece diversos benefícios. Entre eles destaca-se a redução de perdas técnicas no sistema, devido uma corrente menor no neutro, o que melhora a eficiência energética do alimentador. Adicionalmente, o balanceamento também prolonga a vida útil dos equipamentos ao reduzir estresses adicionais causados por uma corrente elevada no neutro. O balanceamento também contribui para tensões mais uniformes entre as fases, mantendo uma operação mais estável, com menor flutuação de tensão. Isso não apenas atende às normas regulatórias que definem limites para a taxa de desequilíbrio na rede, mas também garante um desempenho melhor e mais confiável do sistema elétrico.

Embora os resultados tenham sido satisfatórios, a aplicação do AG apresenta algumas limitações, pois o algoritmo utiliza dados estáticos e não considera a variação de carga ao longo do dia. Além disso a complexidade computacional aumenta se for considerado um alimentador com maior número de MRTs, e dessa forma o algoritmo pode não garantir a solução ótima global, pois dependendo dos parâmetros

utilizados (população, geração e mutação), o AG pode convergir prematuramente ficando preso em uma solução subótima sem continuar explorando soluções melhores no espaço de busca.

Após a implementação das mudanças de fase dos ramais em campo, é essencial verificar novamente as medições reais das correntes nas fases e no neutro com o intuito de atestar a veracidade dos resultados obtidos nas simulações.

Para trabalhos futuros, sugere-se a comparação de outros métodos de otimização, como algoritmos de enxame de partículas ou redes neurais, com o intuito de explorar novas perspectivas e melhorar ainda mais a eficiência do balanceamento de fases.

4. Referências bibliográficas

- Aljohani, A. and Habiballah, I. High-impedance fault diagnosis:A review. *Energies*, 2020 vol. 13, no. 23.
- Alhmoud, L.; Nawafleh, Q.; Marji, W. Three-Phase Feeder Load Balancing Based Optimized Neural Network Using Smart Meters. *Symmetry* 2021, 13, 2195.
- Boroujeni, S. T., Mardaneh, M. Hashemi, Z. A Dynamic and Heuristic Phase Balancing Method for LV Feeders. *Applied Computational Intelligence and So&Computing*, 2016.
- Dagenhart, J. The 40-ohm ground fault phenomenon. *Rural Electric Power Conference (Cat. No. 99CH36302)*, 1999, Indianapolis, IN, USA. pp. C4/1-C4/3.
- G. Bakkabulindi, M. R. Hesamzadeh, M. Amelin and I. P. Da Silva. Planning algorithm for Single Wire Earth Return distribution networks. *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, USA, 2012*, 2012, pp. 1-7.
- Ghaderi, A., Mohammadpour, H. A., Ginn, H. L. and Shin, Y. High-Impedance Fault Detection in the Distribution Network Using the Time-Frequency-Based Algorithm. in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 3, 2015, pp. 1260-1268.
- Gwachha, R., Malla, T. B., Bhattarai, Y. Gautam, R. Distribution Network Reconfiguration Using Genetic Algorithm For Loss Reduction: A Case Study Of Katunje Feeder, Bhaktapur. *JScE*. 2023, vol. 10.
- Hamatwi, E., Imoru, O., Kanime, M. M. and Kanelombe, H. S. A. Comparative Analysis of High Impedance Fault Detection Techniques on Distribution Networks. in *IEEE Access*, vol. 11, 2023 pp. 25817-25834.
- Hosseinzadeh, N., Wolfs, P., Senini, S., Seyoum, D., Turner, J. and Loveday, A. A proposal to investigate the problems of three-phase distribution feeders supplying power to SWER systems. in Saha, T. (ed), *Australasian Universities Power Engineering Conference AUPEC*. 2004, pp. Paper 99. Brisbane, Queensland: University of Queensland.
- Ildarabadi, R., Nikkhah, M. H., Lofti, H., Zadehbagheri, M., Sutikno, T. Ternary genetic algorithm for load dynamic balancing in low voltage three-phase 400 V networks. *International Journal of Applied Power Engineering (IJAPE)*. vol. 12, no. 4, 2023, pp. 441-450.
-

- Jin, X., Zhao, J., Sun, Y., Li, K. and Zhang, B. Distribution network reconfiguration for load balancing using binary particle swarm optimization. 2004 International Conference on Power System Technology, Singapore. vol.1, 2004, pp. 507-510.
- Kay, S., Vai, V., Eng, S. Optimal feeder routing and phase balancing for an unbalanced distribution system: a case study in Cambodia. International Journal of Applied Power Engineering (IJAPE). vol. 13, no. 1, 2023, pp. 138-151.
 - Lin, C.-H., Ku, T.-T., Li, C.-S. and Chen, C.-S. Optimal Phase Balancing in Electricity Distribution Feeders Using Mixed-Integer Linear Programming. *Sustainability*, 2023.
 - SEL. SEL-651-R: Advanced Recloser Control Instruction Manual. Schweitzer Engineering Laboratories, 2023.
 - SEL. SEL-751: Feeder Protection Relay Instruction Manual. Schweitzer Engineering Laboratories, 2024.
 - Senini, S., Hosseinzadeh, N., Seyoum, D., Wolfs, P., Loveday, A and Turner, J. Low cost solutions for balancing three phase feeders to SWER systems. 2005, CQUniversity. Conference contribution.
 - Song, R., Lu, S., Sirojan, T., Phung, B. T., Ambikairajah, E. Power Quality Monitoring of Single-Wire-Earth-Return Distribution Feeders. 2017 International Conference on High Voltage Engineering and Power System, 2017.
 - Sulaiman, M., Tawafan, A. H., Ibrahim, Z. High Impedance Fault Detection On Power Distribution Feeder. International Review on Modelling and Simulations (I.R.E.M.O.S). vol. 5, no. 5, 2012.
 - Suleiman, A. A., Shobowale, K. O., Ter, K. P., Sunday, Y. S., Otokiti, R., Bonet, M. S., Maafan, A. M. Feeder Load Balancing Using Genetic Algorithms and Artificial Neural Network. *Mekatronika*. vol. 4. Issue 1, 2022, pp. 20-29.
 - Sushama, M., Das, G. T. R., Laxmi, A. J. Detection Of High-Impedance Faults In Transmission Lines Using Wavelet Transform. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2009, vol. 4, no. 3.
 - Hou, D. Detection of High-Impedance Faults in Power Distribution Systems. 6th Annual Clemson University Power Systems Conference. Clemson, South Carolina, 2007.