



ABORDAGEM BASEADA EM META-HEURÍSTICA PARA CORREÇÃO DE
DESBALANCEAMENTO DE CORRENTE EM BANCO DE CAPACITORES

*METAHEURISTIC-BASED APPROACH FOR CURRENT IMBALANCE CORRECTION IN
CAPACITOR BANKS*

*ENFOQUE METAHEURÍSTICO PARA CORREGIR EL DESEQUILIBRIO DE CORRIENTE EN
BANCOS DE CAPACITORES*

Ivaldo Muniz Galvão¹, Ronaldo Gomes Figueira¹, Fabiana Florian¹

e5126088

<https://doi.org/10.47820/recima21.v5i12.6088>

PUBLICADO: 12/2024

RESUMO

Os bancos de capacitores são essenciais para a estabilidade e regulação de potência reativa em sistemas elétricos de alta tensão, mas sofrem com desbalanceamentos de corrente, causando sobrecargas e comprometendo a operação. Para mitigar esse problema, foi desenvolvida uma aplicação interativa baseada em uma meta-heurística de otimização, capaz de realizar permutações controladas de capacitores dentro das restrições físicas e operacionais. A solução reduziu significativamente a corrente de desbalanceamento, alcançando os limites desejados com eficiência e agilidade, tornando-se uma ferramenta prática para manutenção e uso em campo.

PALAVRAS-CHAVE: Banco de capacitores. Desbalanceamento. Otimização. Sistema de transmissão. HVDC. Meta-heurística.

ABSTRACT

Capacitor banks play a vital role in maintaining system stability and regulating reactive power in high-voltage electrical systems, but often face current imbalance issues, leading to overloads and compromising system operation. To address this problem, an interactive application based on an optimization metaheuristic was developed, capable of performing controlled capacitor swaps while adhering to physical and operational constraints. The solution significantly reduced the current imbalance, achieving the desired limits with efficiency and agility, making it a practical tool for maintenance and field use.

KEYWORDS: Capacitor bank. Imbalance. Optimization. Transmission system. HVDC. Metaheuristic.

RESUMEN

Los bancos de capacitores son esenciales para la estabilidad y regulación de la potencia reactiva en sistemas eléctricos de alta tensión, pero sufren desequilibrios de corriente que causan sobrecargas y comprometen la operación. Para mitigar este problema, se desarrolló una aplicación interactiva basada en una metaheurística de optimización, capaz de realizar permutaciones controladas dentro de las restricciones físicas y operativas. La solución redujo significativamente la corriente de desequilibrio, alcanzando los límites deseados con eficiencia y rapidez, convirtiéndose en una herramienta práctica para mantenimiento y uso en campo.

PALABRAS CLAVE: Banco de capacitores. Desequilibrio. Optimización. Sistema de transmisión. HVDC. Metaheurística.

INTRODUÇÃO

A principal matriz energética no Brasil é baseada na geração hidráulica, porém, o avanço da tecnologia e a viabilidade econômica dos painéis solares e turbinas eólicas, que também são fontes

¹ Associação São Bento de ensino: Araraquara, São Paulo, BR.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ABORDAGEM BASEADA EM META-HEURÍSTICA PARA CORREÇÃO DE DESBALANCEAMENTO DE CORRENTE EM BANCO DE CAPACITORES
Ivaldo Muniz Galvão, Ronaldo Gomes Figueira, Fabiana Florian

de energias renováveis, estão ganhando bastante espaço no Sistema Interligado Nacional (SIN), contribuindo para o meio ambiente e aumentando a matriz energética (Merlin, 2018).

O Brasil, por possuir uma grande dimensão territorial, necessita da implantação de estratégias eficazes na transmissão de energia, pois as grandes usinas de geração geralmente estão distantes dos centros de cargas (Merlin, 2018). Portanto, existe uma busca constante por opções que minimizem as perdas no processo de transmissão de energia elétrica em grandes distâncias. A alternativa que está sendo aplicada e expandida para atenuar perdas nestas aplicações é a Transmissão em Corrente Contínua em Alta Tensão (HVDC, *High Voltage Direct Current*) (Sato, 2013).

O SIN, ao longo dos anos, o país vem enfrentando demandas pertinentes ao desenvolvimento tecnológico e industrial, principalmente na região Sudeste onde se encontra a maior concentração de consumo de cargas. A maior porcentagem do SIN é composta pela transmissão de energia elétrica em Corrente Alternada em Alta Tensão (HVCA), entretanto, a partir da década de 70 houve um grande investimento na indústria do Brasil por parte do capital internacional e com surto de crescimento da demanda por energia elétrica nas regiões Sul e Sudeste (Cavalcanti, 1986). Em razão disso, o governo brasileiro precisou investir em grandes projetos de geração e transmissão de energia e um dos principais projetos foi a construção da hidrelétrica de Itaipu que deu início com o Tratado de Itaipu, em 26 de abril de 1973, quando foi criada a empresa Itaipu Binacional para construção da Usina Hidrelétrica (UHE) de mesmo nome, dando início à primeira transmissão em sistema HVDC do Brasil (Campos; Brandão, 2023). Em 2007, deu-se início a liberação do licenciamento do projeto das usinas do Rio Madeira com a construção da UHE Santo Antônio, seguida da Hidrelétrica de Jirau (2008) (Amorim *et al.*, 2008). Todos esses projetos têm em comum bancos de capacitores que são essenciais para a transmissão de energia elétrica

Embora bancos de capacitores desempenhem papéis cruciais tanto em sistemas HVCA quanto em HVDC, suas funções, configurações e desafios diferem em função das características específicas de corrente alternada (CA) e corrente contínua (CC) (Oyedokun; Folly, 2011). No caso de sistemas HVDC, destacam-se os bancos de capacitores do tipo *shunt* e os filtros de harmônicos. Os capacitores *shunt* têm como principal objetivo atender à demanda por potência reativa no sistema CA, enquanto os filtros de harmônicos cumprem dupla função: fornecer potência reativa e mitigar distorções harmônicas, essenciais à conversão da transmissão CC em CA.

Apesar da importância dos bancos de capacitores para a estabilidade e eficiência dos sistemas elétricos, esses componentes enfrentam desafios críticos, como o desbalanceamento de corrente. Esse problema, frequentemente causado por fatores operacionais e estruturais, pode levar a sobrecargas, perdas de eficiência e comprometimento da confiabilidade do sistema. No contexto dos sistemas HVDC, onde o equilíbrio é fundamental para o desempenho do sistema, o desbalanceamento em bancos de capacitores exige soluções práticas e tecnológicas para mitigar seus efeitos adversos e garantir a operação segura e eficiente.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ABORDAGEM BASEADA EM META-HEURÍSTICA PARA CORREÇÃO DE DESBALANCEAMENTO
DE CORRENTE EM BANCO DE CAPACITORES
Ivaldo Muniz Galvão, Ronaldo Gomes Figueira, Fabiana Florian

No entanto, os capacitores têm vida útil limitada em razão de sua estrutura física. A perda de capacitância ocorre gradualmente devido ao envelhecimento natural dos materiais dielétricos, como polipropileno, e aos estresses dielétricos resultantes de sobretensões e harmônicas. A queima de elementos capacitivos internos altera a capacitância total e pode desencadear desbalanceamento de correntes entre fases, prejudicando a sensibilidade das proteções (Vaciloto Filho, 2020). A perda de capacitância é consequência de fatores como descargas parciais, surtos de manobras e distorções harmônicas, que deterioram o dielétrico e proporciona o desbalanço do banco capacitor (Ferreira; Lima; Brito, 2004).

O desbalanceamento de um banco de capacitores, por sua vez, geralmente é causado por fatores como a queima de elementos capacitivos ou discrepâncias entre capacitâncias das fases, o que gera uma redistribuição de tensões e correntes, podendo levar a falhas em cascata. Esse desequilíbrio é agravado por distorções harmônicas, que introduzem componentes adicionais nas correntes de neutro, podendo gerar consequências significativas tanto para a operação do sistema elétrico quanto para os equipamentos, tais como a elevação de correntes em ramos específicos, a redução da vida útil dos capacitores, interferência no sistema elétrico e prejuízos financeiros.

Trabalhos como os de Favaro e Ferrarezi (2016), contribuem para o tema central do artigo, mas abordam metodologias distintas: Favaro e Ferrarezi utilizam uma abordagem estatística combinada com simulações para redistribuir unidades capacitivas, enquanto Vaciloto Filho concentra-se em como fatores externos e ajustes na proteção influenciam o balanceamento dos bancos de capacitores. Vaciloto Filho, 2020 e Queles, Resende e Manso (2016) definiram diferentes protocolos e meta-heurísticas para mitigar a questão de desbalanceamento em bancos de capacitores. Este trabalho, por sua vez, propõe também uma meta-heurística mais simples e automática, baseada no protocolo permutação de capacitores para a correção de desbalanço dos bancos, adotado por uma grande empresa do setor elétrico, que visa minimizar as discrepâncias de capacitâncias e correntes, além de aliviar o tempo de análise e trabalho.

A motivação para a realização deste trabalho surgiu da necessidade de desenvolver uma ferramenta computacional que facilitasse a análise e a correção do desbalanceamento de corrente nos bancos de capacitores da estação conversora da subestação Araraquara 2. Essa subestação conta com sete bancos de capacitores instalados, sendo três do tipo *shunt* e quatro integrados aos filtros de harmônicos.

O processo de correção do desbalanceamento começa com a coleta dos dados de capacitância dos capacitores, realizada por meio do instrumento CB2000 diretamente nos terminais dos componentes, que possuem um peso de 90 kg cada. Em seguida, esses dados são transferidos para uma planilha no Excel, onde são analisados. Durante essa etapa, são comparadas as capacitâncias maiores e menores entre os ramos e as pernas do banco, permitindo identificar os ajustes necessários para a equalização das capacitâncias. Após a análise, as permutas necessárias são implementadas em campo para corrigir os desbalanceamentos detectados.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ABORDAGEM BASEADA EM META-HEURÍSTICA PARA CORREÇÃO DE DESBALANCEAMENTO
DE CORRENTE EM BANCO DE CAPACITORES
Ivaldo Muniz Galvão, Ronaldo Gomes Figueira, Fabiana Florian

Com a utilização dessa ferramenta um dos principais objetivos foi mitigar os riscos de acidentes que a equipe é exposta durante as atividades de permutas das unidades capacitivas ou mesmo na sua substituição, pois os bancos de capacitores estão montados em uma estrutura chamada *rack* que chegam a medir mais de 7m de altura. Conforme a análise que é feita pela planilha ocorreu situações de realizar a permuta de um capacitor que estava numa posição bastante elevada. Como objetivo específico busca-se a redução do tempo na intervenção no equipamento, visto que a ferramenta irá facilitar o entendimento e permitirá realizar a atividade com mais segurança.

APRESENTAÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES

Os bancos de capacitores são projetados sob medida podendo sua ligação ser em combinações de paralelo/série para atender a uma gama completa de necessidades de aplicações, tais como: Em filtros de harmônicos, pois servirá para compensação de reativos em sistema de transmissão em corrente contínua (Agarwal; Singh, 2014), tensão do sistema, correção do fator de potência, estratégia de proteção e soluções de sistema. Os bancos são formados por um conjunto de células capacitivas instaladas em grandes estruturas chamadas *racks*.

Esses dispositivos são usados principalmente para corrigir o fator de potência, melhorar a eficiência energética e reduzir custos operacionais em sistemas de distribuição de energia elétrica (Jatti Júnior, 2021). Em sistemas industriais e comerciais, os bancos de capacitores são comumente usados para compensar a energia reativa gerada por cargas indutivas, como motores elétricos, transformadores, entre outros dispositivos. Isso ajuda a equilibrar a relação entre a energia ativa (que realiza trabalho) e a energia reativa (que não realiza trabalho útil, mas é necessária para operar certos equipamentos), garantindo um melhor desempenho do sistema elétrico.

Os bancos de capacitores desempenham funções distintas em sistemas HVCA e em HVDC, devido às características específicas de cada tecnologia. Nos sistemas HVCA, os bancos de capacitores são projetados para atender demandas relacionadas à transmissão e distribuição de energia elétrica. Eles desempenham um papel crucial na correção do fator de potência, mitigando os efeitos do consumo de potência reativa por cargas indutivas e melhorando a eficiência energética. A Figura 1 representa um banco de capacitor em série. Além disso, eles compensam as linhas de transmissão, reduzindo quedas de tensão provocadas por potência reativa e aumentando a capacidade de transmissão de potência ativa, na prática é como a linha tivesse uma redução de comprimento com a compensação das perdas e com isso haverá um aumento do fluxo de potência a ser transmitido pela linha.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ABORDAGEM BASEADA EM META-HEURÍSTICA PARA CORREÇÃO DE DESBALANCEAMENTO
DE CORRENTE EM BANCO DE CAPACITORES
Ivaldo Muniz Galvão, Ronaldo Gomes Figueira, Fabiana Florian



Figura 1 – Exemplo de banco de capacitores série
Fonte: Próprio autor.

Adicionalmente, esses dispositivos estabilizam a tensão do sistema, minimizando flutuações causadas por variações de carga. Em termos de configurações, são utilizados capacitores *shunt*, conectados em paralelo para fornecimento local de potência reativa, e capacitores série, instalados em série com as linhas de transmissão para compensação de reatâncias indutivas. No entanto, a operação em HVCA apresenta desafios como riscos de sobretensões devido a ressonâncias, necessidade de proteção contra surtos e a correção de desbalanços de corrente entre fases.

Nos sistemas HVDC, os bancos de capacitores assumem um papel predominantemente associado ao suporte para conversores eletrônicos e à redução de distorções harmônicas. Eles são fundamentais para a filtragem de harmônicos gerados pelos conversores HVDC, contribuindo para a qualidade da energia. Também fornecem potência reativa necessária à operação dos conversores, estabilizam a tensão no barramento CC e suavizam flutuações de carga, garantindo a estabilidade do sistema.

As configurações mais comuns incluem capacitores *shunt* associados a filtros para compensação reativa e mitigação de harmônicos, capacitores série integrados a circuitos ressonantes em filtros harmônicos, e capacitores no barramento CC para estabilização de tensão e armazenamento temporário de energia. Entretanto, os sistemas HVDC enfrentam desafios adicionais, como maior impacto de harmônicos devido à operação dos conversores e a necessidade de sistemas de proteção mais robustos para lidar com as altas tensões envolvidas.

O Quadro 1 apresenta um resumo comparativo das funções, configurações e desafios dos bancos de capacitores em sistemas HVCA e HVDC, destacando suas aplicações específicas e os requisitos técnicos de cada tecnologia.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ABORDAGEM BASEADA EM META-HEURÍSTICA PARA CORREÇÃO DE DESBALANCEAMENTO DE CORRENTE EM BANCO DE CAPACITORES
Ivaldo Muniz Galvão, Ronaldo Gomes Figueira, Fabiana Florian

Quadro 1 – Comparação entre Bancos de Capacitores em Sistemas HVCA e HVDC

Aspecto	HVCA	HVDC
Funções Principais	- Correção do fator de potência - Compensação de linhas de transmissão - Estabilização de tensão - Aumento da capacidade de transmissão	- Filtragem harmônica - Fornecimento de potência reativa - Estabilização do barramento CC - Proteção contra flutuações de carga
Configurações Comuns	- Capacitores Shunt - Capacitores Série	- Capacitores Shunt - Capacitores Série - Capacitores no Barramento CC
Desafios	- Sobretensões causadas por ressonâncias - Proteção contra surtos de tensão - Correção de desbalanço entre fases	- Impacto de harmônicos dos conversores - Necessidade de proteção robusta - Correção de desbalanço entre fases

Fonte: Próprio autor.

Os sistemas de banco de capacitores de sistemas HVDC são estruturados de maneira hierárquica, partindo da Unidade Capacitiva (UC), ou capacitor, seguido pelos segmentos de ramos, pernas e *racks*.

COMPOSIÇÃO E CARACTERÍSTICAS

Os sistemas de banco de capacitores de sistemas HVDC são estruturados de maneira hierárquica, partindo da Unidade Capacitiva (UC), ou capacitor, seguido pelos segmentos de ramos, pernas e *racks*. Esses segmentos estão ilustrados na Figura 2.



Figura 2 – Exemplo de banco de capacitores de um sistema de transmissão HVDC

Fonte: Próprio autor.

São definidos como: a) Unidade Capacitiva, também conhecida como célula capacitiva ou capacitor, é um dispositivo de armazenamento de carga. A propriedade que mede a eficiência de um capacitor em armazenar cargas é a capacitância, e esta é expressa pela equação 1.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ABORDAGEM BASEADA EM META-HEURÍSTICA PARA CORREÇÃO DE DESBALANCEAMENTO
DE CORRENTE EM BANCO DE CAPACITORES
Ivaldo Muniz Galvão, Ronaldo Gomes Figueira, Fabiana Florian

$$C = \frac{Q}{U}$$

Equação 1

Sendo C a capacitância em Farad (F), Q a carga elétrica em Coulombs (C) e U a tensão elétrica em Volts (V).

b) Ramo: um ramo representa um par de colunas de células capacitivas, que por sua vez estão ligadas em série; c) Perna: um par de ramos forma uma perna; d) *Rack*: estrutura semelhante a uma prateleira, na qual os capacitores são armazenados e organizados topologicamente como Ponte-H. Cada *rack* é composto por duas pernas; e) Fase: neste trabalho, o sistema de banco de capacitores observado é do tipo topológico estrela aterrada Ponte-H, distribuído em 3 fases, como mostrado na Figura 3.

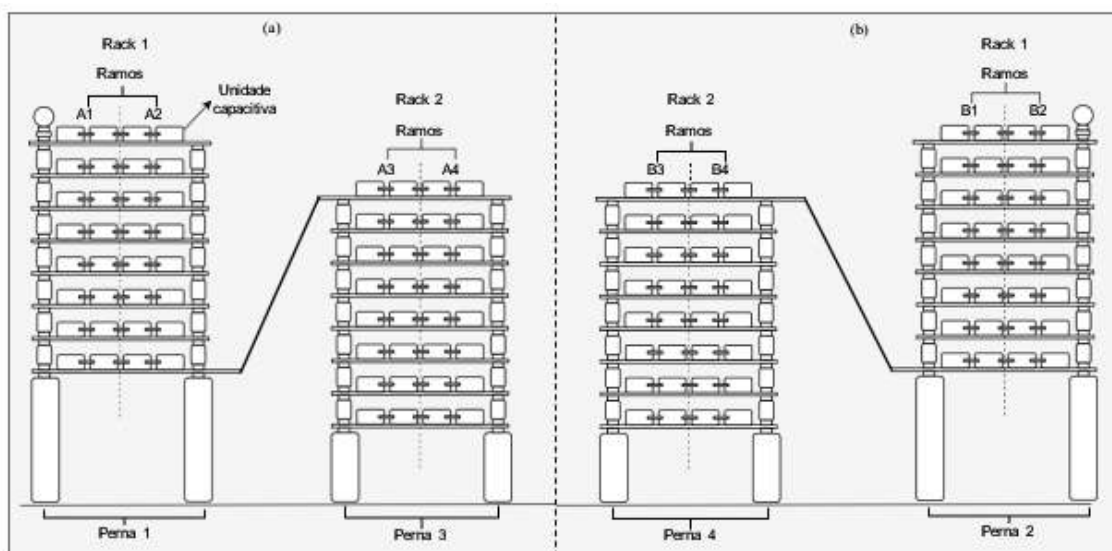


Figura 3 – Representação do sistema de banco capacitores, com as segmentações hierárquicas em: unidade capacitiva, ramos, pernas e racks. A parte (a) apresenta a seção frontal do par de racks e (b) a seção posterior.

Fonte: Próprio autor.

MEDIDAS E PARÂMETROS DOS BANCOS DE CAPACITORES

Para o bom funcionamento do sistema, os bancos de capacitores dependem de parâmetros bem ajustados, e essas medidas são definidas como segue:

Capacitâncias

Ramo: Seja o conjunto de ramos $T = \{A_1, A_2, A_3, A_4, B_1, B_2, B_3, B_4\}$. A capacitância equivalente de um ramo t , denotada por C_t , é dada pela associação em série das capacitâncias dos filtros que o compõem:



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ABORDAGEM BASEADA EM META-HEURÍSTICA PARA CORREÇÃO DE DESBALANCEAMENTO
DE CORRENTE EM BANCO DE CAPACITORES
Ivaldo Muniz Galvão, Ronaldo Gomes Figueira, Fabiana Florian

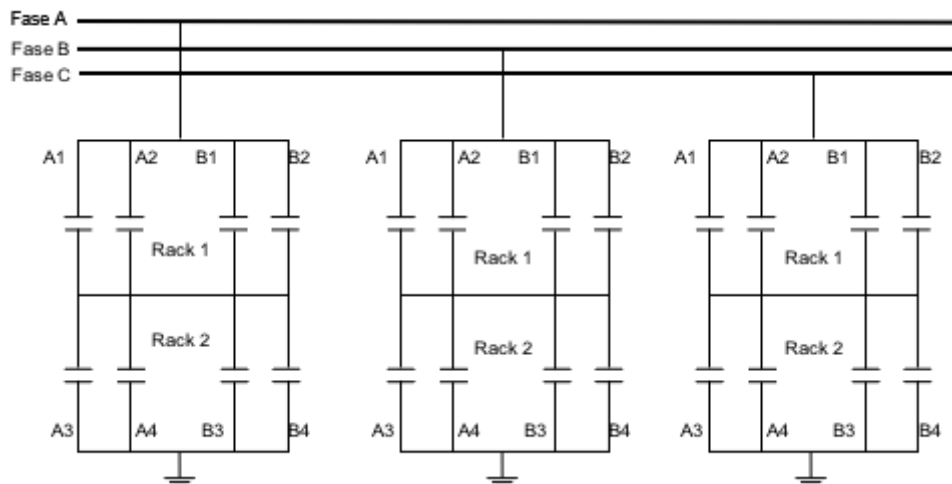


Figura 4 – Representação topológica dos bancos de capacitores no tipo estrela aterrada Ponte-H

Fonte: Próprio autor.

$$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{C_t^{(1)}} + \frac{1}{C_t^{(2)}} + \frac{1}{C_t^{(3)}} + \dots + \frac{1}{C_t^{(n)}} \quad \text{Equação 2}$$

onde $C_t^{(1)}, C_t^{(2)}, C_t^{(3)}, \dots, C_t^{(n)}$ são as capacitâncias dos n capacitores presentes no ramo t .

Perna: Seja o conjunto de pernas $\{P_1, P_2, P_3, P_4\}$. Cada perna é composta por um par de ramos, conforme a seguinte configuração:

$$P_1 = \{A_1, A_2\}, \quad P_2 = \{B_1, B_2\}, \quad P_3 = \{A_3, A_4\}, \quad P_4 = \{B_3, B_4\}. \quad \text{Equação 3}$$

A capacitância equivalente de cada perna, denotada por C_{Pi} , é dada pela associação em paralelo das capacitâncias dos ramos que a compõem:

$$C_{P1} = C_{A1} + C_{A2}, \quad C_{P2} = C_{B1} + C_{B2}, \quad C_{P3} = C_{A3} + C_{A4}, \quad C_{P4} = C_{B3} + C_{B4} \quad \text{Equação 4}$$

Rack: Seja o conjunto de racks $\{R_1, R_2\}$. Cada rack é composto por um par de pernas, conforme a seguinte configuração:

$$R_1 = \{P_1, P_2\}, \quad R_2 = \{P_3, P_4\}. \quad \text{Equação 5}$$

A capacitância equivalente de cada rack, denotada por C_{Ri} , é dada pela associação em paralelo das capacitâncias das pernas que o compõem:

$$C_{R1} = C_{P1} + C_{P2}, \quad C_{R2} = C_{P3} + C_{P4}. \quad \text{Equação 6}$$



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ABORDAGEM BASEADA EM META-HEURÍSTICA PARA CORREÇÃO DE DESBALANCEAMENTO
DE CORRENTE EM BANCO DE CAPACITORES
Ivaldo Muniz Galvão, Ronaldo Gomes Figueira, Fabiana Florian

Fase: A capacitância equivalente da fase, denotada por C_{Fi} , é dada pela associação em série das capacitâncias dos *rack*:

$$C_{F_i} = \frac{C_{R_1} \cdot C_{R_2}}{C_{R_1} + C_{R_2}} \quad \text{Equação 7}$$

Para $i \in \{A, B, C\}$.

CÁLCULO DAS REATÂNCIAS CAPACITIVAS

As reatâncias capacitivas são calculadas a partir da frequência de operação do sistema e da capacitância equivalente de cada segmento do sistema. A equação que descreve a reatância capacitiva é dada por:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad \text{Equação 8}$$

onde f é a frequência de operação do sistema, C é a capacitância equivalente do segmento do sistema e X_c é a reatância capacitiva.

Ramo: A reatância capacitiva do ramo t , denotada por X_{ct} , é dada por:

$$X_{ct_i} = \frac{1}{2\pi f C_{t_i} \phi} \quad \text{Equação 9}$$

para $i \in \{A_1, A_2, A_3, A_4, B_1, B_2, B_3, B_4\}$ e $\phi = 1 \times 10^{-6}$ é uma constante de ajuste.

Perna: A reatância capacitiva equivalente de cada perna P_j , denotada por X_{cP} , é a reatância equivalente da associação em paralelo das reatâncias dos ramos que a compõem:

$$X_{cP_j} = \frac{X_{ct}^{(1)} \cdot X_{ct}^{(2)}}{X_{ct}^{(1)} + X_{ct}^{(2)}} \quad \text{Equação 10}$$

para $j \in \{1, 2, 3, 4\}$, onde $X_{ct}^{(1)}$ e $X_{ct}^{(2)}$ são as respectivas reatâncias capacitivas do 1º e 2º ramo compõem a perna P_j .

Rack: reatância capacitiva equivalente de cada *rack* R_k , denotada por X_{cR} , é a reatância equivalente da associação em paralelo das reatâncias das pernas que o compõem:

$$X_{cR_k} = \frac{X_{cP}^{(1)} \cdot X_{cP}^{(2)}}{X_{cP}^{(1)} + X_{cP}^{(2)}} \quad \text{Equação 11}$$

para $k \in \{1, 2\}$, onde $X_{cP}^{(1)}$ e $X_{cP}^{(2)}$ são as respectivas reatâncias capacitivas da 1ª e 2ª perna que compõem R_k .



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ABORDAGEM BASEADA EM META-HEURÍSTICA PARA CORREÇÃO DE DESBALANCEAMENTO
DE CORRENTE EM BANCO DE CAPACITORES
Ivaldo Muniz Galvão, Ronaldo Gomes Figueira, Fabiana Florian

Fase: A reatância capacitiva equivalente da fase, denotada por X_{cF} , é a reatância equivalente da associação em série das reatâncias dos *racks*:

$$X_{cF} = X_{cR1} + X_{cR2} \quad \text{Equação 12}$$

CÁLCULO DAS TENSÕES E CORRENTES

A tensão nominal do sistema é denotada por V_{nom} em (kV). A tensão de fase, denotada por V_{fase} , é dada por:

$$V_{fase} = \frac{V_{nom}}{\sqrt{3}} \quad \text{Equação 13}$$

A corrente de fase, denotada por I_{fase} , é dada por:

$$I_{fase} = \frac{V_{fase}}{X_{cF}} \quad \text{Equação 14}$$

A tensão de *rack* R_k , denotada por V_{Rk} , é dada pelo produto da corrente de fase pela reatância capacitiva do *rack*:

$$V_{Rk} = I_{fase} \times X_{cRk} \quad \text{Equação 15}$$

A corrente de perna P_i no *rack* R_k , denotada por I_{P_i} , é dada pela razão entre a tensão de *rack* e a reatância capacitiva da perna:

$$I_{P_i} = \frac{V_{Rk}}{X_{cP_i}} \quad \text{Equação 16}$$

para $i \in \{1, 2, 3, 4\}$

Corrente de Desbalanceamento - Considerando a relação entre as correntes de perna:

$$I_{P1} = I_{P3} \text{ e } I_{P2} = I_{P4} \quad \text{Equação 17}$$

a corrente de desbalanceamento, denotada por I_{desb} , é dada pela diferença entre as correntes de perna:

$$I_{desb} = |I_{P3} - I_{P1}| = |I_{P4} - I_{P2}| \quad \text{Equação 18}$$



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ABORDAGEM BASEADA EM META-HEURÍSTICA PARA CORREÇÃO DE DESBALANCEAMENTO
DE CORRENTE EM BANCO DE CAPACITORES
Ivaldo Muniz Galvão, Ronaldo Gomes Figueira, Fabiana Florian

DESBALANCEAMENTO DE BANCO DE CAPACITORES

Conforme concluem Panda e Pachpund (2022), as principais causas do desbalanceamento em bancos de capacitores, são:

a) Desequilíbrio intrínseco: Mesmo em bancos saudáveis, os capacitores podem ter diferenças nas suas capacitâncias devido a variações de fabricação, causando um desbalanceamento natural.

b) Falhas em unidades individuais: Capacitores com defeitos internos ou perda de dielétrico podem alterar o balanceamento geral do banco.

c) Sobretensões transitórias: Oscilações de tensão durante manobras de energização ou devido à presença de harmônicos podem causar falhas e exacerbar o desbalanceamento. Além disso quando ocorre desbalanceamento a redistribuição de tensões pode levar à elevação da tensão sobre os capacitores remanescentes. Isso pode ultrapassar os limites de projeto (geralmente 110% da tensão nominal), causando degradação acelerada do dielétrico, falhas internas ou queima dos capacitores.

d) Condições ambientais adversas: Fatores como alta temperatura, umidade ou poluição podem degradar os capacitores mais rapidamente, afetando o equilíbrio. Correntes desbalanceadas causam aquecimento desigual nos capacitores, conexões e elementos de proteção, elevando o risco de falhas térmicas e arcos elétricos

e) Projetos inadequados: Configurações mal projetadas ou implementações que não consideram níveis adequados de proteção contra falhas podem agravar o desbalanceamento. Em uma configuração H, isso pode resultar em sobrecargas localizadas em um ou mais braços da ponte, aumentando a probabilidade de falhas nos capacitores e seus elementos de proteção.

FATORES DE UM BANCO DE CAPACITORES DESBALANCEADO

Redução da vida útil: As condições de operação desbalanceadas geram estresse térmico e elétrico adicional, reduzindo a vida útil dos capacitores e dos componentes auxiliares, como fusíveis e relés.

Interferência no sistema elétrico: O desbalanceamento pode gerar correntes harmônicas e de sequência negativa, que afetam a qualidade da energia no sistema. A presença de correntes harmônicas pode interferir em outros equipamentos sensíveis conectados à rede.

Falhas nos sistemas de proteção: Em uma ponte H, o desbalanceamento pode enganar relés de proteção configurados para condições balanceadas, levando a falsos disparos ou, inversamente, à falha em detectar falhas críticas.

Perda de potência reativa: O desbalanceamento reduz a eficiência do banco de capacitores em fornecer potência reativa ao sistema, comprometendo o fator de potência e a regulação de tensão. Pode ser necessário compensar essa perda com a entrada de outros bancos de capacitores ou geradores de potência reativa, aumentando os custos operacionais.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ABORDAGEM BASEADA EM META-HEURÍSTICA PARA CORREÇÃO DE DESBALANCEAMENTO
DE CORRENTE EM BANCO DE CAPACITORES
Ivaldo Muniz Galvão, Ronaldo Gomes Figueira, Fabiana Florian

ESTUDOS CORRELATOS

Favaro e Ferrarezi (2016) utilizaram uma metodologia combinando estatística e simulações para balancear bancos de capacitores de forma eficiente e segura. Primeiramente, as capacitâncias das unidades foram analisadas por meio de cálculos de média e desvio padrão, utilizando também planilhas eletrônicas para otimizar a distribuição das unidades capacitivas nos laços e fases do banco. Em seguida, realizadas simulações com o *software* QUCS SPICE que avalia o comportamento do banco balanceado, permitindo os ajustes no posicionamento das unidades para minimizar correntes de desbalanço. O processo foi iterativo, ajustando os valores até alcançar um desvio padrão reduzido entre os laços, garantindo a sensibilidade das proteções e otimizando o desempenho do sistema. Esse tipo de método pode ser facilmente aplicado em diversas tipologias de bancos de capacitores.

A proposta feita por Vaciloto Filho (2020) descreveu uma metodologia visando mitigar interferências no sistema de proteção de bancos de capacitores, combinando análises teóricas, experimentais e ferramentas de simulação para investigar os fatores que impactam o balanceamento e a proteção desses equipamentos. Abordou a influência de variáveis externas, como sombreamento heterogêneo e temperatura, sobre a Capacitância das Unidades Capacitivas (UCs). Tal abordagem inclui:

a) Caracterização dos fatores externos: identificando como a incidência solar, a temperatura ambiente e a disposição física das UCs afetam a capacitância. Modelos matemáticos e medições experimentais foram usados para descrever as variações dielétricas do filme de polipropileno e do óleo isolante, principais componentes internos das UCs;

b) Simulações e medições experimentais: realizaram simulações para analisar o impacto de fatores como sombreamento e temperaturas heterogêneas nos bancos de capacitores, e paralelamente, medições laboratoriais com câmaras térmicas para validar teoricamente a variação da capacitância em função da temperatura;

c) Proposta de metodologias de mitigação: Através do ajuste no posicionamento das UCs e no balanceamento das capacitâncias, a metodologia visou minimizar as correntes de desbalanço e evitar que fenômenos como a compensação do desbalanço ocultassem falhas. Além disso, foram discutidas adaptações nas configurações protetivas, como o uso de dupla estrela isolada e lógica adicional para monitorar variações de corrente;

d) Resultados e validação: A metodologia é validada com ensaios que demonstraram uma redução significativa nos desequilíbrios de corrente e uma maior confiabilidade na atuação do sistema de proteção. Foi desenvolvido um aplicativo para correção da capacitância baseada na temperatura, auxiliando operadores na manutenção e ajuste em campo. A metodologia destacou-se por integrar análises práticas e teóricas, abordando de forma abrangente os desafios de balanceamento e proteção em bancos de capacitores, enquanto ofereceu ferramentas e soluções para melhorar a confiabilidade e eficiência operacional desses sistemas.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ABORDAGEM BASEADA EM META-HEURÍSTICA PARA CORREÇÃO DE DESBALANCEAMENTO DE CORRENTE EM BANCO DE CAPACITORES
Ivaldo Muniz Galvão, Ronaldo Gomes Figueira, Fabiana Florian

Pothisarn, Lertwanitrot e Ngaopitakkul (2020) propuseram uma metodologia baseada em diagramas de fase e análise de correntes desbalanceadas para detectar e localizar falhas internas em bancos de capacitores de alta tensão. Utilizando simulações no *software* PSCAD e experimentos em escala reduzida. O método avalia a magnitude e o argumento das correntes trifásicas para identificar a posição exata de falhas. Os resultados demonstram alta precisão na localização de falhas em sistemas complexos, com desempenho superior aos métodos tradicionais, como o padrão da *Electricity Generating Authority of Thailand* (EGAT). Essa abordagem reduz o tempo e os custos associados à manutenção, destacando-se como uma solução robusta para a proteção de bancos de capacitores em sistemas elétricos.

Pothisarn, Lertwanitrot e Ngaopitakkul (2023) apresentaram uma abordagem para diferenciar falhas internas em bancos de capacitores de 115 kV e falhas externas em linhas de transmissão, utilizando a Transformada Wavelet Discreta (DWT) para análise de tensões e correntes desbalanceadas. A metodologia envolveu simulações no *software Power Systems Computer-Aided Design* (PSCAD) para modelar diferentes cenários de falha e validar o algoritmo proposto com dados reais de subestações. Os resultados demonstraram uma precisão de 100% na classificação de falhas e redução significativa no tempo de detecção, oferecendo uma solução mais eficiente e confiável em comparação aos métodos tradicionais, como o padrão EGAT, destacando-se na proteção de sistemas de energia de alta tensão.

A síntese desses trabalhos está exposta no quadro 1, trazendo uma comparação das metodologias utilizadas.

Quadro 2 – Comparação de metodologias utilizadas

Aspecto	(Favaro; Ferrarezi, 2016).	(FILHO <i>et al.</i> , 2020)	(Lertwanitrot; Ngaopitakkul, 2020)	(Pothisarn; Lertwanitrot; Ngaopitakkul, 2023)
Tipo de Método	Estatístico.	Modelo Matemático e Experimental	Simulações com Diagramas de Fase	Transformada Wavelet Discreta (DWT)
Objetivo Principal	Balancear bancos de capacitores minimizando correntes desbalanceadas.	Mitigar efeitos de sombreamento e temperatura na capacitância e proteção.	Localizar falhas internas em bancos de capacitores.	Diferenciar falhas internas e externas em bancos de capacitores.
Ferramenta Principal	Estatística aplicada a capacitâncias (média e desvio padrão).	Modelos matemáticos para variações dielétricas e análise térmica.	Diagramas de fase para analisar correntes desbalanceadas.	Transformada Wavelet Discreta (DWT) para sinais de corrente e tensão.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ABORDAGEM BASEADA EM META-HEURÍSTICA PARA CORREÇÃO DE DESBALANCEAMENTO DE CORRENTE EM BANCO DE CAPACITORES
Ivaldo Muniz Galvão, Ronaldo Gomes Figueira, Fabiana Florian

Simulações	QUCS SPICE para validar comportamento balanceado/desbalanceado.	Simulações térmicas e medições laboratoriais para variações capacitivas.	PSCAD simulando falhas internas em 115 kV.	PSCAD para sinais de falha e validação com dados reais.
Parâmetros Analisados	Redução do desvio padrão entre laços de capacitores.	Variações de capacitância devido a fatores ambientais.	Correntes desbalanceadas para identificar falhas internas.	Coeficientes de DWT para diferenciar falhas internas e externas.
Validação	Simulações comparadas a planilhas de desbalanceamento.	Dados experimentais e ajustes em configurações térmicas.	Resultados simulados comparados com práticas de campo.	Validação com dados reais de subestações.

Fonte: Próprio autor.

MÉTODO

Este trabalho apresenta um sistema automatizado para o balanceamento de bancos de capacitores em sistemas de distribuição de energia elétrica, utilizando uma meta-heurística para otimização. As etapas metodológicas do projeto são divididas em coleta e preparação dos dados, pré-processamento, otimização e desenvolvimento da aplicação.

Base de dados

A base de dados utilizada neste estudo consiste em medições de capacitância e informações estruturais dos bancos de capacitores. Os dados são fundamentais para compreender o estado atual do sistema e realizar a otimização necessária.

Coleta

A coleta das capacitâncias é realizada com a utilização do instrumento de medição de capacitância portátil (ABB CB2000) projetado para inspeção e manutenção de bancos de capacitores, o que possibilita o seu uso em campo, como mostrado na Figura 4. Ele permite medições rápidas sem desconectar componentes, exibindo os resultados em uma tela LCD. Sua principal funcionalidade é medir capacitâncias sem a necessidade de desconexões internas nos bancos de capacitores, otimizando o tempo. Após as medições, os dados são transferidos para uma planilha onde será realizada uma análise mais detalhada de cada capacitância.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ABORDAGEM BASEADA EM META-HEURÍSTICA PARA CORREÇÃO DE DESBALANCEAMENTO
DE CORRENTE EM BANCO DE CAPACITORES
Ivaldo Muniz Galvão, Ronaldo Gomes Figueira, Fabiana Florian



Figura 5 – Coleta das capacitâncias para análise com o leitor ABB CB2000
Fonte: Próprio autor.

Pré-processamento

O pré-processamento dos dados é uma etapa fundamental que visa preparar as informações brutas para serem utilizadas na otimização. Essa etapa visa normalizar os dados, corrigindo possíveis inconsistências, ajustar os valores de capacitância e identificar capacitores não conformes para manutenção ou substituição. A representação do fluxo de pré-processamento está ilustrada pela Figura 6.

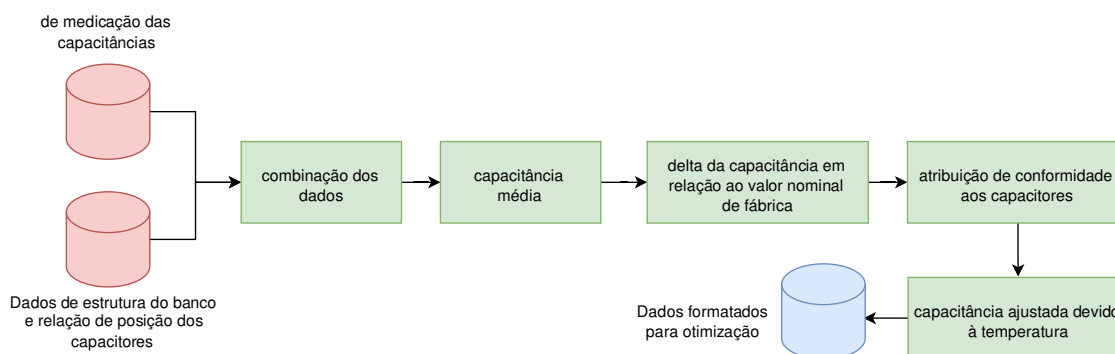


Figura 6 – Fluxo da tarefa de pré-processamento dos dados
Fonte: Próprio autor.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ABORDAGEM BASEADA EM META-HEURÍSTICA PARA CORREÇÃO DE DESBALANCEAMENTO
DE CORRENTE EM BANCO DE CAPACITORES
Ivaldo Muniz Galvão, Ronaldo Gomes Figueira, Fabiana Florian

Inicialmente, os dados brutos provenientes das medições de capacitância em campo e das informações estruturais do banco de capacitores são carregados. As medições de campo contêm os valores de capacitância medidos para cada capacitor, juntamente com informações como número de série, data, hora e temperatura no momento da medição. O arquivo de estrutura do banco inclui o mapeamento dos capacitores para seus respectivos ramos, pernas e *racks*. Em seguida, essas duas fontes são combinadas para que todas as colunas de interesse sejam tratadas, resultando em um conjunto de dados unificados que contêm tanto as características elétricas dos capacitores quanto sua posição física no sistema.

Para cada capacitor, calcula-se a capacitância média a partir das três medições realizadas. Este valor médio fornece uma estimativa mais precisa da capacitância real, minimizando possíveis erros ou variações nas medições individuais.

Posteriormente, é calculado o delta de capacitância em relação ao valor nominal especificado pelo fabricante. Este delta representa a variação percentual entre a capacitância medida e a capacitância nominal, permitindo identificar capacitores que possam estar fora das especificações técnicas ou sofrendo degradação, sendo que o delta permitido pelas especificações do fabricante é de $\pm 5\%$.

A capacitância medida em campo é ajustada considerando a temperatura no momento da medição, conforme a Equação 19. Utiliza-se um coeficiente de temperatura α para corrigir o valor da capacitância, normalizando-o para uma temperatura de referência especificada pelo fabricante, que é de 24°C . Este ajuste é crucial, pois a capacitância é influenciada pela temperatura ambiente, e a comparação direta dos valores sem este ajuste poderia levar a interpretações equivocadas.

$$\tilde{C} = \frac{C_{medida}}{(1 + \alpha \times (Temp_{medida} - Temp_{preferencia}))} \quad \text{Equação 19}$$

Após o ajuste térmico, verifica-se a conformidade de cada capacitor. Estabelecem-se limites aceitáveis para a capacitância ajustada, e os capacitores cujos valores estão dentro desses limites são classificados como Conformes (C), enquanto os demais são classificados como Não Conformes (NC). Esta classificação auxilia na identificação de componentes que necessitam de manutenção ou substituição. A Equação 20 representa esse cálculo.

$$\text{Conformidade} = \begin{cases} \text{Conforme (C)} & \text{se } \tilde{C} \in (C_{min}, C_{max}) \\ \text{Não Conforme (NC)} & \text{se } \tilde{C} \notin (C_{min}, C_{max}) \end{cases} \quad \text{Equação 20}$$



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ABORDAGEM BASEADA EM META-HEURÍSTICA PARA CORREÇÃO DE DESBALANCEAMENTO
DE CORRENTE EM BANCO DE CAPACITORES
Ivaldo Muniz Galvão, Ronaldo Gomes Figueira, Fabiana Florian

Sendo:

$$C_{min} = C_{nominal} \times (1 - \Delta_{tol})$$

e

$$C_{min} = C_{nominal} \times (1 - \Delta_{tol})$$

Com $\Delta_{tol} = \pm 5\%$.

Finalmente, os dados tratados são salvos em formato tabular para que estejam prontos para passarem pela etapa de otimização dos bancos dos capacitores, que realizará o balanceamento do banco.

Correção do desbalanceamento

A etapa de otimização visa balancear o banco de capacitores minimizando a corrente de desbalanceamento I_{desb} e o número de permutações necessárias, respeitando as restrições físicas e operacionais do sistema.

Formulação Matemática do Problema

Para representar o problema de otimização de forma matemática, define-se:

Conjuntos e Variáveis

Seja $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ o conjunto de capacitores, onde n é o número total de capacitores.

Seja $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ o conjunto de posições físicas disponíveis para os capacitores.

Cada capacitor c_i possui uma capacitância ajustada C_i .

Os capacitores são organizados em ramos, pernas e *racks*. Denotamos:

T como o conjunto de ramos, $T = \{A_1, A_2, A_3, A_4, B_1, B_2, B_3, B_4\}$..

P como o conjunto de pernas, $P = \{P_1, P_2, P_3, P_4\}$

R como o conjunto de racks, $R = \{R_1, R_2\}$

Define-se uma função de atribuição $\phi : C \rightarrow P$ que mapeia cada capacitor à sua posição.

Parâmetros e Constantes

C_{F_nom} : capacitância nominal de fase, especificada pelo fabricante.

V_{nom} : tensão nominal do sistema.

Δ_{tol_fase} : tolerância de diferença de capacitância de fase e capacitância de fase nominal, especificada pelo fabricante.

Δ_{tol_pernas} : tolerância de diferença de capacitância entre pernas dada pela heurística sobre o problema.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ABORDAGEM BASEADA EM META-HEURÍSTICA PARA CORREÇÃO DE DESBALANCEAMENTO
DE CORRENTE EM BANCO DE CAPACITORES
Ivaldo Muniz Galvão, Ronaldo Gomes Figueira, Fabiana Florian

I_{desb} : corrente de desbalanceamento.

I_{desb_alarme} : corrente de desbalanceamento de alarme, o máximo permitido pelas especificações.

m : número máximo de permutações permitidas.

$I_{desb_desejada}$: corrente de desbalanceamento desejável, que é o máximo valor de corrente de desbalanço buscado pela otimização que satisfaça $I_{desb_alarme} > I_{desb_desejada} \geq 0$.

Objetivo

Minimizar a corrente de desbalanceamento I_{desb} e o número de permutações realizadas, respeitando as restrições operacionais.

Restrições

a) Igualdade de capacitâncias entre pernas de um mesmo *rack*:

Para cada *rack* $R_k \in R$, a diferença de capacitância entre as pernas $P_{j_1}, P_{j_2} \in R_k$ deve satisfazer:

$$|\tilde{C}_{P_{j_1}} - \tilde{C}_{P_{j_2}}| \leq \Delta_{tol_pernas}$$

Equação 21

onde $\tilde{C}_{P_j} = C_{P_j}$ é a capacitância equivalente ajustada da perna P_j .

b) Capacitância de fase:

A capacitância de fase não deve ser maior que a capacitância de fase nominal especificada pelo fabricante. Isto é, deve-se manter dentro da tolerância.

Equação 22

$$C_{F_nom} \leq C_{Fi} \leq C_{F_nom} \times (1 + \Delta_{tol_fase})$$

Para $i \in \{A, B, C\}$.

c) Corrente de desbalanceamento:

A corrente de desbalanceamento após a otimização deve satisfazer:

$$I_{desb} < I_{desb_alarme}$$



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ABORDAGEM BASEADA EM META-HEURÍSTICA PARA CORREÇÃO DE DESBALANCEAMENTO
DE CORRENTE EM BANCO DE CAPACITORES
Ivaldo Muniz Galvão, Ronaldo Gomes Figueira, Fabiana Florian

No entanto, a otimização busca alcançar a corrente de desbalanço desejada, com valor definido próximo de 0. Assim, é desejável que:

d) Limite de permutações:

$$I_{desb_desejada} \ll I_{desb_alarme}$$

O número total de permutações N_{perm} deve satisfazer:

e) Permutações únicas:

$$N_{perm} \leq m$$

Cada capacitor $c_i \in C$ pode ser permutado no máximo uma vez.

Meta-heurística do otimizador

A escolha dos capacitores C_{min} e C_{max} é realizada de forma a maximizar a redução da corrente de desbalanceamento I_{desb} a cada iteração. Além disso, a restrição de que cada capacitor pode ser permutado no máximo uma vez assegura que o algoritmo não entre em ciclos, limitando assim o esforço físico necessário para a operação. O algoritmo termina quando não é mais possível reduzir o I_{desb} ou quando o número máximo de permutações permitidas é alcançado.

Ao final do processo de otimização, espera-se a redução da corrente de desbalanceamento I_{desb} dentro da tolerância estabelecida, o mínimo número de permutações necessárias, $N_{perm} \leq m$, a atualização do mapeamento ϕ com as novas posições dos capacitores, o registro das permutações realizadas, incluindo detalhes como posições originais, ramos, pernas e *racks* envolvidos, e a reavaliação e atualização dos parâmetros elétricos do sistema (capacitâncias, reatâncias, tensões e correntes) após a otimização.

Com base na formulação descrita o pseudo-algoritmo do otimizador pode ser representado assim:

Algoritmo 1 - Pseudo-algoritmo do Otimizador de Banco de Capacitores

Require: Conjunto de capacitores $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$, função de atribuição inicial $\phi : C \rightarrow P$, parâmetros do sistema sistema $(\Delta_{tol_fase}, I_{desb_alarme}, I_{desb_desejada}, m, C_{F_nominal}, C_F)$

Ensure: Função de atribuição otimizada ϕ^* , registro de permutações, parâmetros elétricos atualizados

1: Calcular a corrente de desbalanceamento inicial $I(0)$ desb usando ϕ



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ABORDAGEM BASEADA EM META-HEURÍSTICA PARA CORREÇÃO DE DESBALANCEAMENTO
DE CORRENTE EM BANCO DE CAPACITORES
Ivaldo Muniz Galvão, Ronaldo Gomes Figueira, Fabiana Florian

```

2: if  $I_{desb(0)} < I_{desb\_alarme}$  and  $C_{F\_nominal} \leq C_F \leq C_{F\_nominal} \times (1 + \Delta_{tol\_fase})$  then
3:     O sistema está balanceado; definir  $\phi^* = \phi$  e terminar o algoritmo
4: else
5:     Inicializar contador de permutações  $N_{perm} \leftarrow 0$ 
6:     Inicializar conjunto de capacitores permutados  $C_{perm} \leftarrow \emptyset$ 
7:     while  $I_{desb} > I_{desb\_desejada}$  and  $N_{perm} < m$  do
8:         for cada par de pernas opostas ( $P_j, P_k$ ) no mesmo rack R do
9:             Selecionar  $c_{min} \in (C \setminus C_{perm})$  em  $P_j$  com menor  $\tilde{C}_i$ 
10:            Selecionar  $c_{max} \in (C \setminus C_{perm})$  em  $P_k$  com maior  $\tilde{C}_i$ 
11:            Realizar permutação:  $\phi(c_{min}) \leftrightarrow \phi(c_{max})$ 
12:            Recalcular  $I_{desb}$  usando a nova atribuição  $\phi$ 
13:            if  $I_{desb}$  reduziu then
14:                Registrar a permutação  $(c_{min}, c_{max})$ 
15:                Atualizar  $N_{perm} \leftarrow N_{perm} + 1$ 
16:                Atualizar  $C_{perm} \leftarrow C_{perm} \cup \{c_{min}, c_{max}\}$ 
17:            else
18:                Reverter permutação:  $\phi(c_{min})$  e  $\phi(c_{max})$  voltam às posições
19:                Interromper o algoritmo; não há melhoria adicional
20:            end if
21:        end for
22:    end while
23:    Definir  $\phi^* = \phi$ 
24: end if
25: Calcular parâmetros elétricos atualizados usando  $\phi^*$ 
26: Retornar  $\phi^*$ , registro de permutações, parâmetros elétricos atualizados

```

O Algoritmo 1 apresenta algumas limitações, como: não permitir a troca de posições entre diferentes *racks*, reduzindo o espaço de possibilidades; não considerar os níveis de altura física das posições dos capacitores, o que pode acarretar eventuais trocas entre posições que são fisicamente distantes, dificultando a troca na prática, devido ao grande peso das unidades e empenho operacional.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ABORDAGEM BASEADA EM META-HEURÍSTICA PARA CORREÇÃO DE DESBALANCEAMENTO
DE CORRENTE EM BANCO DE CAPACITORES
Ivaldo Muniz Galvão, Ronaldo Gomes Figueira, Fabiana Florian

Aplicação Automática

Para implementar o sistema proposto, uma aplicação do tipo *WebApp* foi desenvolvida em Python, aproveitando a robustez e flexibilidade da linguagem para manipulação de dados e para criação de Interface de Usuário (UI) que facilite a execução do algoritmo.

A aplicação é composta por duas principais classes, de nomes:

1) Pré Processamento Banco Capacitores: Responsável por carregar, limpar e preparar os dados para a otimização;

2) Otimizador Banco Capacitores: Implementa a meta-heurística de otimização, calculando os parâmetros elétricos e realizando as permutações necessárias.

E a manipulação de dados e cálculos numéricos foram desenvolvidas com o uso das bibliotecas *Pandas* e *Numpy*.

Para facilitar a utilização da ferramenta por profissionais da área, a UI foi desenvolvida utilizando o *framework Streamlit*, como mostrado na Figura 7. Esta interface permite que sejam carregados os arquivos de dados e configurações iniciais de forma intuitiva, além de possibilitar a seleção dos parâmetros de otimização, como o *rack* a ser otimizado, bem como o número máximo de otimizações. Ao final do processamento, a aplicação permite a visualização dos resultados de otimização sobre os parâmetros do sistema, incluindo tabelas, além de ser possível salvar os dados pós-otimização para análise e implementação das permutações em campo.



Figura 7 – Tela do *WebApp* para otimização do balanço de banco de capacitores
Fonte: Próprio autor.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ABORDAGEM BASEADA EM META-HEURÍSTICA PARA CORREÇÃO DE DESBALANCEAMENTO DE CORRENTE EM BANCO DE CAPACITORES
Ivaldo Muniz Galvão, Ronaldo Gomes Figueira, Fabiana Florian

RESULTADOS

O presente estudo implementou um sistema de otimização para o ajuste do desbalanceamento de corrente em bancos de capacitores utilizados em sistemas de distribuição de alta tensão. Os dados utilizados na experimentação foram coletados a partir de um estudo de campo sobre a saúde dos bancos de capacitores de uma estação de distribuição HVDC em Araraquara-SP, e então aproveitados para a implementação da prova de conceito da aplicação proposta. As configurações iniciais do sistema de otimização, detalhadas na Tabela 1, incluíram as constantes e restrições operacionais essenciais para a execução do experimento.

Tabela 1 – Constantes e Restrições do Sistema

Símbolo	Definição	Valor Usado
CF_{nom}	Capacitância nominal de fase, especificada pelo fabricante	3.24 μF
C_{cap_nom}	Capacitância nominal do capacitor	24.3 μF
V_{nom}	Tensão nominal do sistema	530 kV
I_{desb_alarme}	Corrente de desbalanceamento de alarme	0.17 A
$I_{desb_desejada}$	Corrente de desbalanceamento desejada alarme	1×10^{-3}
f	Frequência do sistema	60 Hz
T_{ref}	Temperatura de referência	20°C
Δ_{tol_fase}	Tolerância de diferença de capacitância de fase	5%
Δ_{tol_pernas}	Tolerância de diferença de capacitância entre pernas	1×10^{-3}
m	número máximo de permutações	5

Fonte: Próprio autor.

Após a etapa de pré-processamento, os valores do estado inicial do sistema foram registrados na Tabela 2. A corrente de desbalanceamento inicial foi de $I_{desb} = 0.22$ A, valor que excede o limite de alarme estipulado em $I_{desb_alarme} = 0.17$ A. Dessa forma, conclui-se que o sistema estava desbalanceado. Analisando mais detalhadamente, observa-se que o rack (R1) apresenta pernas com valores de capacitância distintos, especificamente 3.082 μF e 3.089 μF , e a diferença entre essas duas capacitâncias supera a tolerância $\Delta_{tol_pernas} = 1 \times 10^{-3}$, revelando outra evidência de um banco de capacitores desbalanceado. Diante dessa constatação, decidiu-se otimizar o rack R1 para corrigir o desbalanceamento.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ABORDAGEM BASEADA EM META-HEURÍSTICA PARA CORREÇÃO DE DESBALANCEAMENTO
DE CORRENTE EM BANCO DE CAPACITORES
Ivaldo Muniz Galvão, Ronaldo Gomes Figueira, Fabiana Florian

Tabela 2 – Valores de Capacitância do Sistema Antes da Otimização

Fase (μF)	Rack	Cap. Rack (μF)	Perna	Cap. Perna (μF)	Ramo	Cap. Ramo (μF)
3.291	R1	6.172	P1	3.082	A1	1.543
					A2	1.539
			P2	3.089	B1	1.545
					B2	1.544
	R2	7.052	P3	3.525	A3	1.765
					A4	1.762
			P4	3.527	B3	1.767
					B4	1.760

Fonte: Próprio autor.

O processo de otimização foi conduzido conforme descrito no Algoritmo 1, respeitando o limite máximo de $m = 5$ permutações. Durante a execução, foram realizadas 3 permutações, como mostrado na Tabela 3, resultando em uma redução significativa da corrente de desbalanceamento a cada permutação, alcançando finalmente $I_{desb} = 0.0067$ A na terceira permutação, representando uma queda de aproximadamente 97% em relação ao valor inicial. Este valor está abaixo do limite de alarme (I_{desb_alarme}) e próximo da corrente de desbalanceamento desejada ($I_{desb_desejada}$), indicando que o sistema foi efetivamente balanceado com um número de permutações inferior ao máximo permitido.

Tabela 3 – Permutações realizadas durante a otimização

Permutação	Ramo Origem	Posição Origem	Ramo Destino	Posição Destino	Corrente de Desbalanço (A)
1	A1	15	B1	107	0.1355
2	A1	8	B1	117	0.0622
3	A1	16	B1	93	0.0067

Fonte: Próprio autor.

A Figura 8 mostra o efeito de decaimento da corrente de desbalanço em relação às permutações realizadas, evidenciando novamente o resultado esperado de minimização desse atributo que serve como indicador de desbalanceamento do sistema.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR

ISSN 2675-6218

ABORDAGEM BASEADA EM META-HEURÍSTICA PARA CORREÇÃO DE DESBALANCEAMENTO DE CORRENTE EM BANCO DE CAPACITORES
Ivaldo Muniz Galvão, Ronaldo Gomes Figueira, Fabiana Florian



Figura 8 – Gráfico do decaimento da corrente de desbalanço em relação à quantidade de permutações realizadas
Fonte: Próprio autor.

Os valores do sistema após a otimização estão apresentados na Tabela 4. Verifica-se que as capacitâncias das pernas no *rack* R1 tornaram-se iguais, atendendo à restrição de Δ_{tol_pernas} . Além disso, a capacitância de fase permanece dentro do intervalo estipulado por $C_{F_nominal} \leq CF \leq C_{F_nominal} \times (1 + \Delta_{tol_fase})$, conforme demonstrado na tabela.

Tabela 4 – Valores de Capacitância do Sistema Após a Otimização

Fase (μF)	Rack	Cap. Rack (μF)	Perna	Cap. Perna (μF)	Ramo	Cap. Ramo (μF)
3.291	R1	6.172	P1	3.086	A1	1.547
					A2	1.539
			P2	3.086	B1	1.541
					B2	1.544
	R2	7.052	P3	3.525	A3	1.765
					A4	1.762
			P4	3.527	B3	1.766
					B4	1.760

Fonte: Próprio autor.

Adicionalmente, a aplicação interativa desenvolvida proporcionou facilidade de uso e rapidez no processamento, com tempos inferiores a 5 segundos para a realização da otimização. Como exemplificado na Figura 9, a aplicação oferece uma visualização sintetizada das especificações do



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ABORDAGEM BASEADA EM META-HEURÍSTICA PARA CORREÇÃO DE DESBALANCEAMENTO DE CORRENTE EM BANCO DE CAPACITORES
Ivaldo Muniz Galvão, Ronaldo Gomes Figueira, Fabiana Florian

banco de capacitores que está sendo analisado, além de permitir o salvamento dos dados otimizados em um arquivo tabular. Essa conveniência operacional alivia significativamente o esforço manual na análise do sistema após a coleta de dados de campo. Consequentemente, logo após a coleta de dados, eles podem ser rapidamente carregados em um computador portátil e processados diretamente no local, permitindo intervenções imediatas e aprimorando a manutenção preventiva e corretiva dos bancos.

Em suma, a abordagem meta-heurística não apenas demonstrou eficácia técnica na redução do desbalanceamento de corrente, mas também ofereceu vantagens operacionais significativas, tornando-a uma solução viável e eficiente para a gestão de bancos de capacitores em sistemas de alta tensão.



Figura 9 – Telas do *WebApp* que exibem o status do sistema anterior à otimização de balanceamento (a) e posterior (b), com detalhes das permutações de capacitores realizadas
Fonte: Próprio autor.

CONSIDERAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

O trabalho apresentou uma solução automatizada para o balanceamento de bancos de capacitores em sistemas de distribuição de alta tensão, com o objetivo de corrigir desbalanceamentos de corrente que comprometem a operação eficiente e segura desses sistemas. A implementação do sistema de otimização utilizou uma meta-heurística baseada em permutações de capacitores, respeitando as restrições operacionais e físicas do sistema. Além disso, a aplicação foi desenvolvida para ser interativa, permitindo uma análise rápida e simplificada dos dados coletados.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ABORDAGEM BASEADA EM META-HEURÍSTICA PARA CORREÇÃO DE DESBALANCEAMENTO DE CORRENTE EM BANCO DE CAPACITORES
Ivaldo Muniz Galvão, Ronaldo Gomes Figueira, Fabiana Florian

Os resultados demonstraram a eficácia do sistema, alcançando uma significativa redução da corrente de desbalanceamento (I_{desb}) em 97%, com apenas três permutações, dentro do limite estabelecido de quantidade máxima de permutações. O sistema otimizou os valores de capacitância das pernas e *racks*, respeitando as tolerâncias especificadas e mantendo a configuração nominal exigida pelo fabricante. Esses resultados evidenciam o potencial da solução proposta em mitigar os efeitos do desbalanceamento, como sobrecargas e degradação dos componentes. Adicionalmente, a aplicação desenvolvida proporciona vantagens práticas e operacionais. A possibilidade de processar os dados diretamente em campo, com tempos de execução inferiores a 5 segundos, elimina a necessidade de análises manuais extensas e reduz o tempo para a manutenção preventiva e corretiva. Essa agilidade permite intervenções rápidas e melhora a confiabilidade e a eficiência dos sistemas de alta tensão.

Portanto, a abordagem proposta destaca-se como uma ferramenta viável e eficiente para o gerenciamento de bancos de capacitores, unindo simplicidade operacional e robustez técnica. Como próximos passos, a solução pode ser expandida para incluir o critério de restrição de troca de capacitores que estejam em níveis de altura distantes, permitindo uma maior segurança na operação. Além disso, o algoritmo poderá considerar a troca de capacitores entre *racks*, expandindo assim o escopo e possibilidades de otimização.

REFERÊNCIAS

- AGARWAL, R.; SINGH, S. Harmonic mitigation in voltage source converters based HVDC system using 12-pulse ac-dc converters. *In: ANNUAL IEEE INDIA CONFERENCE (INDI- CON)*. 2014. Pune, Índia, 2014. **Proceeding** [...] Pune, Índia: IEEE, 2014. p. 1–6. Disponível em: doi: 10.1109/INDICON.2014.7030590 Acesso em: 27 nov. 2024.
- AMORIM, S. N.; OLIVEIRA, A. J.; VEIGA, J. P. C.; ONUKI, J. **O licenciamento ambiental para hidrelétricas do rio madeira**: Santo Antônio e Jirau. 2024. Artigo (Estudo de Caso) - Escola Nacional de Administração Pública (ENAP), 2008. Disponível em: <https://repositorio.enap.gov.br/handle/1/294> Acesso em: 26 set. 2024.
- BRASIL. **Projeto de usina hidrelétrica de Belo Monte - fatos e dados**. Brasília: Ministério de Minas e Energia; Empresa de Pesquisa Energética [EPE], 2011. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/> Acesso em: 26 set. 2024.
- CAMPOS, P. H. P.; BRANDÃO, R. V. M. A construção da usina hidrelétrica de Itaipu durante a ditadura: Violações de direitos e favorecimento a grandes grupos econômicos. **Projeto História: Revista do Programa de Estudos Pós-Graduados de História**, Campinas, v. 77, p. 7–34, 2023.
- CAVALCANTI, J. C. A central hidrelétrica de Itaipu. **Revista do Serviço Público**, Brasília, ano 43, v.114, n. especial, p. 27-30, 1986.
- FAVARO, S.; FERRAREZI, R. Balanceamento de bancos de capacitores - método estatístico. *In: BRAZILIAN TECHNOLOGY SYMPOSIUM*, 6., Campinas, SP. 2016. **Anais** [...]. Campinas, SP, Unicamp, 2016. Disponível em: <https://cv.fee.unicamp.br/images/BTSym-16/proceedings/PA09-16-edited.pdf> Acesso em: 26 set. 2024.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ABORDAGEM BASEADA EM META-HEURÍSTICA PARA CORREÇÃO DE DESBALANCEAMENTO DE CORRENTE EM BANCO DE CAPACITORES
Ivaldo Muniz Galvão, Ronaldo Gomes Figueira, Fabiana Florian

FERREIRA, H. L.; LIMA, M. R. M.; BRITO, M. E. Manutenção preditiva de bancos de capacitores com base no monitoramento da corrente de desequilíbrio de neutro. *In*: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA- SENDI. 16., Brasília, DF, 2004. **Anais** [...] Brasília: Companhia Energética de Brasília (CEB); Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica (ABRADEE), 2004. Disponível em: <https://abramanoficial.org.br/uploads/96.pdf> Acesso em: 26 set. 2024.

JATTI JUNIOR, M. **Compensação reativa através de bancos de capacitores chaveados automaticamente**. Orientador: Dionízio Paschoareli Júnior. 2021. 84f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2021.

LERTWANITROT, P.; NGAOPITAKKUL, A. Discriminating between capacitor bank faults and external faults for an unbalanced current protection relay using dwt. **IEEE Access**, London, v. 8, p. 180022–180044, 2020. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:222297170> Acesso em: 26 set. 2024.

MERLIN, V. **Linhas de transmissão de energia elétrica no Brasil**. [S. l.: s. n.], 2018. Disponível em: <https://curtociuitoeletrividade.com.br/as-linhas-de-transmissao-de-energia-eletrica-no-brasil/> Acesso em: 26 set. 2024.

OYEDOKUN, D.; FOLLY, K. A. Network transient responses to varying hvac line length along a hvdc transmission corridor. *In*: IEEE Africon '11, 2011. Victoria Falls, Zambia. **Proceeding** [...]. Zambia: IEEE, 2011, p. 1-6. Disponível em: doi: 10.1109/AFRCON.2011.6072157 Acesso em: 26 set. 2024.

PANDA, N. R.; PACHPUND, S. Capacitor bank balancing: Causes and practical levels of unbalance. **IEEE Industry Applications Magazine**, London, v. 28, n. 4, p. 12–19, 2022.

POTHISARN, C.; LERTWANITROT, P.; NGAOPITAKKUL, A. A phase diagram approach to the detection and location of faulty capacitor units in A 115-kV capacitor bank based on unbalanced current arguments. **Heliyon**, London, v. 9, n. 3, p. e14589, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844023017966> Acesso em: 26 set. 2024.

QUELES, A. F.; RESENDE, L. C.; MANSO, L. A. F. Metaheurística para balanceamento de bancos de capacitores de alta tensão. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS. 6., Natal. RN. 2016. **Anais** [...]. Natal: UFRN, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/305201032_Metaheuristica_para_balanceamento_de_bancos_de_capacitores_de_alta_tensao Acesso em: 26 set. 2024.

SATO, A. K. C. **Transmissão de potência em corrente contínua e em corrente alternada**: estudo comparativo. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado - Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013.

VACIOTO FILHO, E. M. **Metodologias para mitigação de interferências no sistema de proteção de banco de capacitores de média e alta tensão**. Orientador: Luiz Eduardo Borges da Silva. 2020. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2020.