

15º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2024

ALOCAÇÃO OTIMIZADA DE UNIDADES FUNCIONAIS EM CONJUNTOS DE MANOBRA DE BAIXA TENSÃO

ERICK M. PAES¹, RODRIGO F. G. SAU²

¹ Cursando Técnico em Eletroeletrônica Integrado ao Ensino Médio, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Campus Sorocaba, erick.paes@aluno.ifsp.edu.br

² Docente do IFSP, Campus Sorocaba, rodrigo.sau@ifsp.edu.br

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.04.04.06-1 - Instalações Elétricas Prediais e Industriais

RESUMO: Este trabalho apresenta um estudo comparativo de algoritmos de otimização combinatória aplicados à alocação de unidades funcionais em conjuntos de manobra de baixa tensão. Na literatura de otimização, este tipo de problema é classificado como um "problema de empacotamento", no qual itens pequenos são alocados em recipientes grandes, conforme os critérios de cada algoritmo, e visando alocar todos os itens na menor quantidade possível de recipientes. Neste trabalho, os itens representam as unidades funcionais (partidas de motores, disjuntores etc.), enquanto os recipientes representam as colunas dos conjuntos de manobra (seções verticais onde as unidades funcionais são montadas). Foram testados os algoritmos de empacotamento: *Best-Fit*, *First-Fit* e *Bin-Completion*, e os resultados dos testes foram comparados usando três critérios: a quantidade de colunas usadas, a quantidade de colunas completamente preenchidas com unidades funcionais e, por fim, o espaço desperdiçado. Verificou-se que, dentre os algoritmos testados, e considerando a amostra estudada, o algoritmo *Best-Fit* obteve o melhor desempenho. Por isso, foi testada uma versão alternativa desse algoritmo, adaptada ao problema estudado, que pode refinar os resultados do *Best-Fit* nesta aplicação.

PALAVRAS-CHAVE: Empacotamento-Unidimensional; Algoritmos de Otimização Combinatória; Conjuntos de Manobra de Baixa Tensão.

OPTIMAL ALLOCATION OF FUNCIONAL UNITS IN LOW VOLTAGE SWITCHGEAR

ABSTRACT: This work presents a comparative study of combinatorial optimization algorithms applied to the allocation of functional units in low-voltage switchgear. In the optimization literature, this type of problem is classified as a "bin-packing problem", in which small items are allocated in large bins according to the criteria of each algorithm, with the aim of allocating all items in as few bins as possible. In this work, the items represent functional units (motor starters, circuit breakers, etc.), while bins represent the columns of the switchgear (vertical sections where the functional units are assembled). The packaging algorithms tested are: Best-Fit, First-Fit and Bin-Completion and the results of these tests were compared using three criteria: the number of columns used, the number of columns totally filled with functional units and, finally, the wasted space. It was found that, among the tested algorithms and considering the sample studied, the Best-Fit algorithm presented the best performance. Therefore, an alternative version of this algorithm was tested and adapted to the problem studied, which may refine the results of Best Fit in this application.

KEYWORDS: One-Dimensional Bin-Packaging; Combinatorial Optimization Algorithms; Low Voltage Switchgear.

INTRODUÇÃO

Este artigo trata de possíveis soluções para um problema ligado a instalações elétricas, mais especificamente painéis elétricos de baixa tensão (conjuntos de manobra). O objetivo é estudar

algoritmos que possam proporcionar soluções otimizadas, capazes de alocar as unidades funcionais de um conjunto (funções de manobra) na menor quantidade possível de colunas (seções verticais dos conjuntos onde as unidades funcionais são montadas), visando reduzir os custos de fabricação e o espaço físico necessário para a instalação desses painéis. Para alcançar esse objetivo, alguns algoritmos de otimização combinatória foram testados e comparados.

Em instalações industriais ou prediais de grande porte, onde há diversos equipamentos de elevada potência, é necessário que esses equipamentos sejam ligados à rede elétrica de maneira segura. Os conjuntos de manobra abrigam as proteções dos circuitos que alimentam esses equipamentos, que são, por exemplo, disjuntores e partidas de motores. Neste trabalho são tratados especificamente de dois tipos de conjuntos de manobra, projetados segundo a NBR IEC 61.439-1/2: os CCMs (Centros de Controle de Motores) e os CDCs (Centros de Distribuição de Carga). Os CCMs incluem as partidas de motores, unidades funcionais destinadas à proteção e manobra de motores. Para essa finalidade, suas unidades funcionais incluem dispositivos de proteção como disjuntores, fusíveis e relés de sobrecarga, além de contadores. Os CDCs são normalmente o ponto de origem de distribuição elétrica de baixa tensão, a jusante do transformador (COSTA, 2014), e incluem principalmente disjuntores, mas também dispositivos auxiliares, tais como os relacionados a medição (multimedidores, transformadores de corrente, etc.).

O foco deste estudo está na alocação de unidades funcionais em conjuntos de manobra utilizando o menor número possível de colunas, porém dependendo das posições das unidades funcionais no conjunto, a quantidade necessária de colunas pode variar. Do ponto de vista computacional, esta aplicação faz parte de uma classe de problemas de otimização combinatória conhecida como problema do empacotamento. Nesse problema há objetos pequenos (itens) a serem alocados em um ou mais objetos grandes (recipientes), e o objetivo é alocar os itens na menor quantidade possível de recipientes (Miyazawa, 2007).

Os algoritmos do problema do empacotamento podem ser utilizados em aplicações uni, bi ou tridimensionais. Por exemplo, considerando a necessidade de transporte de caixas usando um caminhão, as caixas (itens) seriam carregadas na carroceria do caminhão (recipiente). Nesse caso teríamos um problema bidimensional, visto que a carroceria é uma área (admitindo que a altura não seja uma restrição). A aplicação deste trabalho é unidimensional, pois as unidades funcionais têm somente uma dimensão variável, a altura. No problema unidimensional, os itens a serem alocados possuem uma única variável, sendo que o valor dessa variável não pode ultrapassar a do recipiente (Mendes, 2013). Para ilustrar, na Figura 1 há quatro unidades funcionais (itens), alocadas nas duas colunas (recipientes). O resultado é a vista frontal do conjunto de manobra.

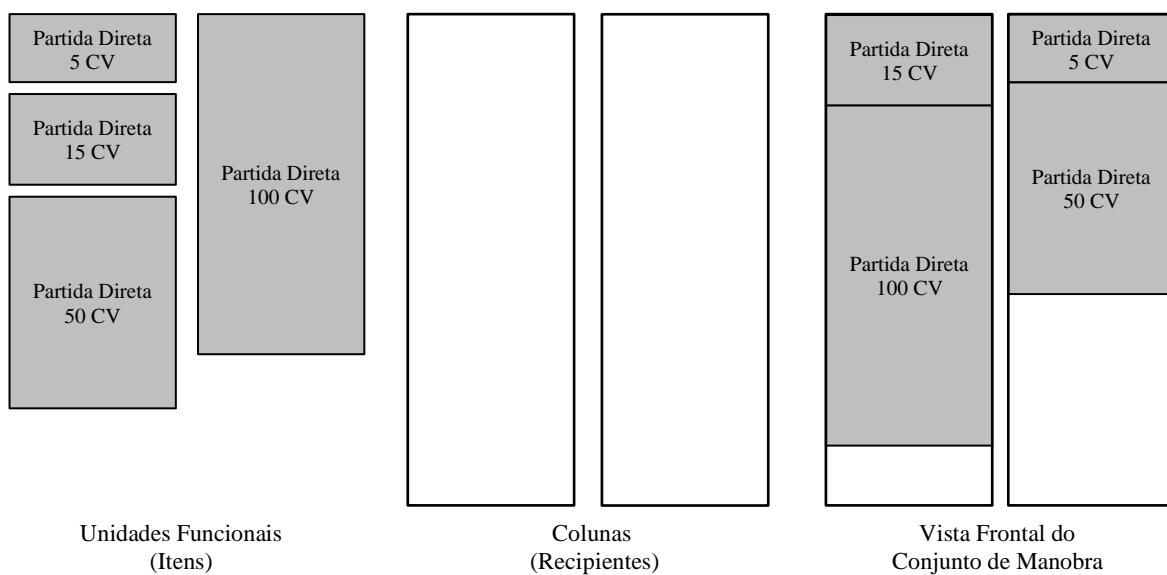


FIGURA 1 – Exemplo da aplicação do problema do empacotamento.

OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é encontrar algoritmos que permitam alocar as unidades funcionais de um conjunto de manobra na menor quantidade possível de colunas (seções verticais onde as unidades são alocadas). A minimização do número de colunas permite reduzir o custo de fabricação e o espaço físico necessário para a instalação do conjunto. Para atingir este objetivo, foram testados e comparados alguns algoritmos de otimização combinatória, avaliando sua eficiência na alocação das unidades funcionais.

METODOLOGIA

Com o intuito de realizar a comparação dos algoritmos de otimização, foi desenvolvida uma ferramenta computacional, apelidada de Gerador de Painéis Elétricos (GPE), cuja função é gerar a vista frontal de um conjunto a partir das unidades funcionais especificadas (entrada). Um exemplo de uma entrada seria um CCM composto por um disjuntor de 800 A, quatro partidas diretas de 5 CV e quatro partidas diretas de 15 CV, como apresentado na Figura 2 (página de inserção das unidades funcionais). Ao receber a entrada, o site a armazena em uma variável, exibindo um menu de seleção, onde é possível escolher qual algoritmo executar e, enfim, mostrar a vista frontal do conjunto usando o algoritmo selecionado (Figura 3).

The screenshot shows a user interface for entering functional unit data. On the left, a 'Tabela Dinâmica' (Dynamic Table) is displayed with the following fields:

- Fabricante: ABB (selected in a dropdown)
- Unidade Funcional: Partida Direta (selected in a dropdown)
- Potência (CV): 15 (selected in a dropdown)
- Quantidade: 4 (selected in a dropdown)

At the bottom of this section are two buttons: 'Adicionar UF' (Add UF) and 'Cadastrar Painel' (Register Panel).

On the right, a table lists the entered data:

| Unidade Funcional | Altura | Valor | Quantidade | Remover Linha |
|-------------------|--------|-------|------------|--------------------------|
| Disjuntor CCM | 1800 | 800 A | 1 | <button>Remover</button> |
| Partida Direta | 150 | 5 CV | 4 | <button>Remover</button> |
| Partida Direta | 300 | 15 CV | 4 | <button>Remover</button> |

FIGURA 2 – Página inicial do gerador de painéis elétricos.

The screenshot shows a dropdown menu for selecting an algorithm:

Selezione o Algoritmo Desejado

Best-Fit

Below the dropdown, a list of functional units is shown, grouped under a 'Disjuntor CCM 800 A' header:

- Partida Direta 5 CV
- Partida Direta 15 CV

At the bottom left, the text 'Total de Colunas: 2' is displayed.

FIGURA 3 – Resultado de uma simulação usando o gerador de painéis elétricos.

Os algoritmos implementados neste trabalho são: *Best-Fit* (BF) e suas variações (Wikipedia, 2024) e *Bin-Completion* (BC). O *Best-Fit* é um algoritmo que tem por objetivo alocar cada unidade funcional i , das n unidades da entrada S , nas colunas de capacidade C . A cada iteração, a unidade funcional é alocada na coluna mais ocupada, desde que ainda haja espaço suficiente. As variações do BF são o BFI, com ordenação crescente (*increasing*), e o BFD, com ordenação decrescente (*decreasing*). O BC é um algoritmo que tenta preencher a capacidade total C da coluna usando todas as unidades funcionais disponíveis, para depois passar para a próxima coluna (SCHREIBER, 2013).

Além dos algoritmos apresentados, foi testada uma melhoria feita no BFD, em que este algoritmo realiza um cálculo de número mínimo de colunas necessárias (limite inferior, L) e, caso a solução encontrada não chegue a esse número, são testadas combinações aleatórias das unidades funcionais. Mas nem todas as unidades funcionais são usadas no sorteio, para diminuir a quantidade possível de combinações. O algoritmo inicia com o BFD, e as unidades funcionais alocadas em colunas totalmente preenchidas são mantidas. As demais são ordenadas de maneira aleatória e alocadas até que o limite L seja atingido ou um número máximo de iterações seja ultrapassado.

O limite inferior representa a quantidade mínima de colunas necessária para alocar todas as unidades funcionais de um certo conjunto. O limite inferior L_1 (Equação 1), que é mínimo possível teórico, soma todos os n elementos da entrada S (altura das unidades funcionais e suas quantidades), e divide pela capacidade C (altura livre de uma coluna), tendo seu resultado arredondado para cima. De forma alternativa, L_2 (Equação 2) adiciona uma capacidade desperdiçada w (não utilizada) à soma de todos os elementos, antes de dividir pela capacidade da coluna e arredondar para cima (SCHREIBER, 2013). A capacidade desperdiçada w é calculada da seguinte forma: enquanto houver unidades funcionais na entrada S , remover a sua maior unidade funcional e calcular capacidade restante de uma coluna $r = C - \max(S)$. Depois, remover de S todos as unidades menores ou iguais a r e armazenar a sua soma. Se essa soma for menor ou igual a r , adicione a soma subtraída de r a w e, se for maior que r , passe para coluna seguinte guardando o valor da soma.

$$L_1 = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^n S_i \quad (1)$$

$$L_2 = \frac{1}{C} \left(w + \sum_{i=1}^n S_i \right) \quad (2)$$

Como comparação, foram propostos três critérios. O primeiro, e mais importante, é a quantidade de colunas, que deve ser a menor possível. O segundo considera o número de colunas totalmente preenchidas, isto é, onde não há sobra de espaço. Por fim, o último critério é o de perda de espaço, que considera as sobras de espaço menores do que a menor unidade funcional (150 mm nos casos testados) e que, por isso, não podem ser aproveitadas.

Apesar de não impactar diretamente na comparação dos algoritmos, a ferramenta computacional desenvolvida inclui a possibilidade de mudar a posição das unidades funcionais após alocação e geração da vista frontal. Dessa forma, se o usuário desejar, ele poderá mudar algumas unidades funcionais de acordo com sua necessidade. Por exemplo, uma unidade funcional da primeira coluna pode ser trocada por outra da terceira coluna.

RESULTADOS OBTIDOS

Foram realizados testes envolvendo dez CCMs com unidades funcionais para alimentadores (disjuntores), partidas diretas, inversores (conversores) de frequência e *soft-starters*. Os testes também incluem dez CDCs, com um disjuntor de entrada e diversos alimentadores. A Tabela 1 mostra o limite inferior (L) e os três critérios de comparação adotados: a quantidade de colunas usadas, as colunas completamente preenchidas e a quantidade de módulos desperdiçados (cada módulo tem 50 mm).

TABELA 1 – Resultados dos testes realizados nos vinte conjuntos.

| Algoritmo | CCM | | | | CDC | | | |
|---------------------------|----------|----------------|----------------|------------------|----------|----------------|----------------|------------------|
| | <i>L</i> | Colunas Usadas | Colunas Cheias | Módulos Desperd. | <i>L</i> | Colunas Usadas | Colunas Cheias | Módulos Desperd. |
| Best-Fit (BF) | 105 | 109 | 73 | 2 | 29 | 29 | 10 | 5 |
| Best-Fit Increasing (BFI) | | 110 | 73 | 2 | | 29 | 11 | 3 |
| Best-Fit Decreasing (BFD) | | 106 | 87 | 3 | | 29 | 11 | 3 |
| Best-Fit Melhor. (BFDm) | | 105 | 92 | 1 | | 29 | 16 | 2 |
| Bin-Completion (BC) | | 109 | 72 | 2 | | 29 | 11 | 4 |

Considerando o critério de menor número de colunas, podemos ver que o algoritmo que realiza ordenação crescente (BFI) tem o pior resultado para os CCMs (não houve diferença para os CDCs). Os algoritmos que não realizam ordenação (BF e BC) têm desempenhos médios, e os algoritmos com ordenação decrescente (BFDm e BFD) apresentaram os melhores resultados. Apesar de não estar na tabela, foi inicialmente testado o algoritmo *First-Fit*, porém os resultados foram iguais aos do BF nos casos testados. O gráfico da Figura 4 mostra uma comparação dos outros dois critérios: colunas cheias e módulos desperdiçados.

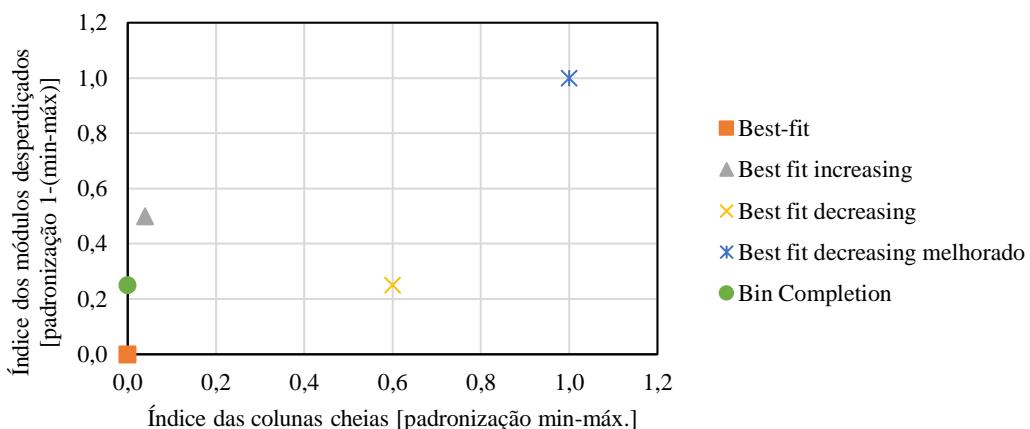


FIGURA 4 – Gráfico de comparação dos algoritmos incluindo os vinte conjuntos testados (os eixos usam a padronização min-máx.).

Notar na Figura 4 que os eixos estão padronizados na faixa de 0 a 1 (normalização min-máx.). Mais precisamente, o eixo horizontal está usando a normalização min-máx., enquanto o eixo vertical apresenta 1-normalização, visto que é considerado melhor o algoritmo com menos espaço desperdiçado. Portanto, os algoritmos com os melhores índices estão à direita e acima, e aqueles com os piores resultados, aparecem próximos da origem. Embora o algoritmo BFD tenha sido classificado como o segundo melhor no preenchimento das colunas, ele apresenta mais módulos desperdiçados que o BFI. Ao contrário, o BFI apresenta menos perdas, mas não preenche a mesma quantidade de colunas. O algoritmo BFD melhorado (BFDm) apresentou o melhor desempenho, sendo quase 26% melhor que o pior algoritmo (BFI), no quesito colunas cheias e, ao mesmo tempo, tendo uma redução de 4,5% do número de colunas usadas.

Uma observação importante é que o BFDm, por usar sorteio nas ordenações, exige uma carga computacional maior. Além disso, pode ocorrer de o algoritmo não encontrar uma solução ótima (com a mesma quantidade de colunas que o limite *L*), ainda que ela exista, visto que o algoritmo não testa todas as possibilidades. Entretanto, mesmo no maior caso testado, um CCM com 27 colunas e 89 unidades funcionais, e considerando o número máximo de iterações igual a mil, o tempo de processamento é menor que 1 segundo usando um computador pessoal. E nos casos testados, o limite inferior *L* foi encontrado.

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma aplicação prática do problema do empacotamento na alocação de unidades funcionais em conjuntos de manobras de baixa tensão. Foi possível fazer a comparação de algoritmos de otimização através da ferramenta computacional desenvolvida (GPE) e foi verificado que, para os casos estudados, o BFD apresentou os melhores resultados. Além do algoritmo padrão, foi testada uma versão do BFD adaptada ao problema (BFDm), que permitiu um pequeno ganho para a aplicação deste estudo, apesar de ter uma carga computacional maior. Entretanto, nos casos testados, baseados em conjuntos reais, o tempo de processamento foi desprezível.

Como perspectivas futura, estão sendo estudadas algumas restrições físicas para esse problema, como exemplo, conjuntos de manobra que tenham mais de uma entrada, necessitando que certas unidades funcionais sejam alocadas em colunas específicas.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

R.F.G.S contribuiu apresentando as referências bibliográficas a serem estudadas e também os casos (conjuntos) testados. E.M.P desenvolveu o GPE e realizou todos os testes para a elaboração da tabela de resultados. Os dois autores contribuíram para a revisão do trabalho e aprovaram a versão apresentada.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal de São Paulo pelo apoio e suporte financeiro para o desenvolvimento deste projeto de pesquisa.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR IEC 61439-1: Conjuntos de manobra e comando de baixa tensão. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

COSTA, L. F. Conjuntos de manobra e controle de potência, Capítulo VII, Filosofias Construtivas. O Setor Elétrico, 2014. Disponível em: <https://www.osetoreletroico.com.br/capitulo-vii-filosofias-construtivas>.

MENDES, D. S. F. A. Problema do Empacotamento. XXI Congresso de Iniciação Científica da Unicamp, 2013, Campinas

MIYAZAWA, F. K. E. C. X. Algoritmos para Problemas de Empacotamento. XXVII Congresso da SBC, Rio de Janeiro, 2007.

SCHREIBER, E. L. K. R. E. *Improved Bin Completion for Optimal Bin Packing and Number Partitioning*. Twenty-Third International Joint Conference on Artificial Intelligence, Beijing, 2013.

Wikipedia. *Bin packing problem*. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Bin_packing_problem. Acesso em 20 de agosto de 2024.