

Definição do Problema de Seleção Ótima de Pedidos em Waves como CSP

Introdução

O problema da seleção ótima de pedidos em waves representa um desafio logístico crucial para operações de e-commerce e gestão de armazéns. No contexto do Mercado Livre, a eficiência na coleta de itens para pedidos impacta diretamente o tempo de processamento e, conseqüentemente, a satisfação do cliente.

Este trabalho aborda a otimização do processo de seleção de pedidos através da modelagem como um Problema de Satisfação de Restrições (CSP). O objetivo é identificar subconjuntos ideais de pedidos (waves) que maximizem a produtividade da coleta, medida pela relação entre o número de itens coletados e o número de corredores visitados.

1. Variáveis de Decisão

Para cada pedido $o \in O$:

- X_o : variável binária
 - $X_o = 1$ se o pedido o é selecionado para a wave
 - $X_o = 0$ caso contrário

Para cada corredor $a \in A$:

- Y_a : variável binária
 - $Y_a = 1$ se o corredor a é visitado
 - $Y_a = 0$ caso contrário

2. Domínios

- Para todas as variáveis X_o : $\text{Dom}(X_o) = \{0, 1\}$

- Para todas as variáveis Y_a : $\text{Dom}(Y_a) = \{0, 1\}$

3. Restrições

3.1. Restrição de Limite Inferior (LB)

O número total de unidades de itens nos pedidos selecionados deve ser pelo menos LB

3.2. Restrição de Limite Superior (UB)

O número total de unidades de itens nos pedidos selecionados não deve exceder UB

3.3. Restrição de Disponibilidade de Itens

Para cada item i , o número total de unidades solicitadas deve ser menor ou igual ao disponível:

3.4. Restrição de Seleção de Corredores

Um corredor deve ser selecionado se contém pelo menos um item necessário:

4. Função Objetivo

Maximizar o número médio de itens coletados por corredor visitado:

5. Modelo Matemático Completo

Maximizar: $\sum(o \in O) \sum(i \in I_o) u_{oi} * X_o / \sum(a \in A) Y_a$

Sujeito a: $\sum(o \in O) \sum(i \in I_o) u_{oi} * X_o \geq LB$

$\sum(o \in O) \sum(i \in I_o) u_{oi} * X_o \leq UB$

$\sum(o \in O) u_{oi} * X_o \leq \sum(a \in A) u_{ai} * Y_a$, para todo $i \in I$

Se existe $o \in O$, $i \in I_o$ tal que $X_o = 1$, $u_{oi} > 0$, $u_{ai} > 0$, então $Y_a = 1$

$X_o \in \{0, 1\}$, para todo $o \in O$

$Y_a \in \{0, 1\}$, para todo $a \in A$

Implementação da Solução em Python

Utilização do Framework CSP do AIMA

A implementação do problema de seleção ótima de pedidos em waves foi realizada utilizando o framework CSP (Constraint Satisfaction Problem) .

Para isso, criei uma classe `Selecao_Pedidos_CSP` que herda da classe CSP do AIMA.

Coloquei alguns arquivos do aima na raiz para facilitar a importação.

Implementação das Restrições

O framework CSP do AIMA requer a implementação de uma função de restrições que verifica a consistência entre pares de variáveis. Um desafio particular deste problema foi adaptar restrições globais (como os limites LB e UB) para este formato

Resolver o CSP

Para resolver o problema, utilizei as funções de busca e heurísticas do AIMA.

Desafios na Implementação

Um dos principais desafios na implementação foi adaptar as restrições globais do problema ao formato de restrições binárias exigido pelo framework CSP do AIMA. Especificamente:

1. As restrições de limite inferior (LB) e superior (UB) naturalmente envolvem todas as variáveis de pedidos
2. A restrição de disponibilidade de itens envolve múltiplas variáveis de pedidos e corredores

Para contornar estas limitações, implementei verificações adicionais na solução final para garantir que todas as restrições fossem satisfeitas.

Parte 3: Testes e Validação

Testes com o Exemplo Fornecido

Para validar a implementação, foram realizados testes com o exemplo fornecido no problema. Inicialmente, validei manualmente as waves sugeridas no enunciado:

Wave	Pedidos	Corredores	Total Unidades	Valor Objetivo
1	[0, 4]	[0, 1]	5	2.5
2	[0, 2, 3]	[1, 3, 4]	12	4.0
3	[0, 1, 2, 4]	[1, 3]	10	5.0

Em seguida, executei o algoritmo CSP para encontrar uma solução ótima:

Solução encontrada:

- Pedidos selecionados: (1, 2)
- Corredores selecionados: [4]
- Valor objetivo: 5.0

Comparação de Diferentes Waves

A solução encontrou uma configuração diferente das waves do exemplo, mas com valor objetivo equivalente à melhor wave manual:

Solução	Pedidos	Corredores	Total Unidades	Valor Objetivo
Manual Wave 3	[0, 1, 2, 4]	[1, 3]	10	5.0
CSP	[1, 2]	[4]	5	5.0

A solução do CSP é particularmente interessante por utilizar apenas um corredor, maximizando a eficiência de coleta.

Análise em Diferentes Cenários

Para testar a robustez do algoritmo, desenvolvi um cenário adicional com uma distribuição diferente de itens, onde um corredor central contém todos os itens necessários:

Cenário	Combinações Testadas	Waves Viáveis	Tempo (s)	Valor Objetivo
Original	31	~16	0.0015	5.0
Concentrado	31	~20	0.0012	6.0

No cenário concentrado, como esperado, o algoritmo preferiu utilizar o corredor central, conseguindo um valor objetivo ainda maior por minimizar o número de corredores visitados.

Análise e Discussão dos Resultados

Eficácia do CSP para o Problema

A modelagem do problema como CSP mostrou-se extremamente eficaz. O algoritmo conseguiu encontrar soluções ótimas que maximizam o valor objetivo (itens coletados por corredor) em todos os cenários testados.

A abordagem de CSP permitiu uma representação natural das variáveis de decisão (quais pedidos selecionar e quais corredores visitar) e das restrições do problema (limites de unidades, disponibilidade de itens).

Comportamento em Diferentes Cenários

O comportamento do algoritmo foi consistente com o esperado:

1. **Cenário Original:** Identificou uma solução diferente das waves do exemplo, mas igualmente ótima, demonstrando a existência de múltiplas soluções com o mesmo valor objetivo.
2. **Cenário Concentrado:** Preferiu utilizar o corredor que continha todos os itens, minimizando o número de corredores visitados enquanto maximizava a quantidade de pedidos atendidos.

Limitações e Possíveis Melhorias

Embora a implementação tenha sido bem-sucedida, identificamos algumas limitações e oportunidades de melhoria:

1. **Adaptação ao Framework AIMA:** O framework CSP do AIMA é projetado principalmente para restrições binárias (entre duas variáveis), o que exigiu adaptações para as restrições globais do problema.
2. **Escalabilidade:** Para instâncias muito grandes (muitos pedidos e corredores), o espaço de busca cresceria exponencialmente, exigindo técnicas adicionais de otimização.
3. **Otimização Multi-objetivo:** A implementação atual foca apenas na maximização do número médio de itens por corredor. Em cenários reais, outros fatores como urgência de pedidos ou distâncias entre corredores poderiam ser considerados.

Conclusão

A implementação CSP para o problema da seleção ótima de pedidos em waves demonstrou ser uma abordagem adequada e eficiente. O algoritmo foi capaz de encontrar soluções ótimas nos cenários testados, com tempo de execução satisfatório.

A utilização do framework CSP do AIMA proporcionou uma base sólida para a implementação, embora com alguns desafios na adaptação das restrições específicas do problema. Para aplicações em larga escala, técnicas adicionais de otimização seriam necessárias, mas a abordagem fundamental permanece robusta e aplicável.