EVENTO ON-LINE
ConBRepro
XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
02 a 04 de dezembro de 2026
Inovação e Transformação Digital como Estratégia Competitiva nas Engenharias

Um Modelo de Programação Linear Inteira Mista para Alocação de Pedidos a Fornecedores com Capacidade Flexível e Penalização Progressiva por Sobrecarga

Marcos Vinícius Ferreira Baratieri
CPGEI - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil
Daniele Pretolani
Dep. of Sciences and Method for Engineering - Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, Itália
Leandro Magatão
CPGEI - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil

Resumo: A alocação de pedidos a fornecedores exige considerar simultaneamente o desempenho de entrega, a localização e a capacidade de atendimento. Este artigo apresenta um modelo de programação linear inteira mista (PLIM) para distribuir novos pedidos entre fornecedores, minimizando uma soma ponderada da taxa histórica de atraso, da penalidade por faixa de distância, da utilização da capacidade e da sobrecarga progressiva. A capacidade é uma referência derivada do volume histórico de pedidos e pode ser ultrapassada mediante penalização. O estudo utiliza 113 fornecedores com registros contínuos entre junho e agosto de 2022 e compara três cenários de carga inicial e demanda adicional: 80% + 1.000 pedidos, 90% + 500 pedidos e 90% + 1.000 pedidos. As soluções obtidas apresentam, respectivamente, 304, 169 e 500 pedidos acima da capacidade de referência. Nos dois primeiros cenários, a folga inicial total excedia a demanda adicional; no terceiro, 490 pedidos de excesso eram inevitáveis considerando toda a base. Os resultados evidenciam como a formulação troca folga disponível em fornecedores menos atrativos por sobrecarga em outros fornecedores, segundo os pesos adotados.

Palavras-chave: Seleção de Fornecedores, Alocação de Pedidos, Programação Linear Inteira Mista, Sobrecarga, Análise de Cenários.

A Mixed-Integer Linear Programming Model for Supplier Order Allocation under Flexible Capacity and Progressive Overload Penalties

Abstract: Allocating orders to suppliers requires the simultaneous consideration of delivery performance, location, and service capacity. This paper presents a mixed-integer linear programming (MILP) model for assigning new orders to suppliers by minimizing a weighted combination of historical delay rates, distance-band penalties, capacity utilization, and progressive overload penalties. Capacity is a reference derived from historical order volume and may be exceeded at a cost. The study considers 113 suppliers with continuous records from June to August 2022 and compares three initial-load and additional-demand scenarios: 80% plus 1,000 orders, 90% plus 500 orders, and 90% plus 1,000 orders. The solutions obtained yield 304, 169, and 500 excess orders, respectively. In the first two scenarios, aggregate available capacity exceeds new demand; in the third, at least 490 excess orders are unavoidable in aggregate. The

results show how the model can prefer overloading selected suppliers while capacity remains available elsewhere, depending on the chosen weights.

Keywords: Supplier Selection, Order Allocation, Mixed-Integer Linear Programming, Overload, Scenario Analysis.

1. Introdução

A seleção de fornecedores envolve critérios que podem apontar para decisões distintas. Um fornecedor próximo pode apresentar uma carga elevada; outro, mais distante, pode dispor de folga para receber pedidos. Nesse contexto, a decisão precisa estabelecer não apenas quais fornecedores utilizar, mas também quantos pedidos atribuir a cada um. Diferentes formas de combinar critérios de seleção e dimensionar lote de compra aparecem em revisões e estudos sobre custo total, hierarquização de alternativas e apoio multicritério à decisão (BHUTTA; HUQ, 2002; CHAN, 2003; AISSAOUI; HAOUARI; HASSINI, 2007; HO; XU; DEY, 2010).

A literatura também examina avaliações em ambientes *fuzzy*, risco de suprimentos e critérios ligados ao desempenho e à sustentabilidade dos fornecedores (CHEN; LIN; HUANG, 2006; KULL; TALLURI, 2008; GOVINDAN et al., 2015; GIDIAGBA; TARTIBU; OKWU, 2025). Outros estudos abordam a decisão em grupo e a integração entre métodos multicritério e otimização matemática, como a combinação de AHP (*Analytic Hierarchy Process*) e Programação Linear proposta pioneiramente por Ghodsypour e O'Brien (1998), ou junções de AHP e TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*), conforme Kar (2012) e Safavi, Sadeghi Bigham e Zahedi-Seresht (2025). A aplicação conjunta de AHP e PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*) é discutida por Macharis et al. (2004). Esses trabalhos oferecem contexto para o uso de múltiplos critérios; a formulação e os pesos específicos empregados neste estudo são descritos adiante e tais métodos podem ser utilizados futuramente para um desenvolvimento mais aprofundado do trabalho.

Há uma diferença entre comparar fornecedores e definir uma distribuição de pedidos. Uma avaliação multicritério pode ordenar ou classificar alternativas, mas, para atender uma demanda adicional, também é preciso determinar quantas unidades serão encaminhadas a cada uma. A escolha de um fornecedor altera sua carga final e, portanto, a atratividade de alocações adicionais quando existe penalidade de sobrecarga. A programação matemática permite representar essa interdependência por meio de variáveis de atribuição e restrições de atendimento. O presente artigo adota essa estrutura, utilizando indicadores de desempenho e localização como coeficientes da decisão de alocar pedidos.

O problema estudado tem uma característica operacional importante: o número que representa capacidade não é usado como proibição absoluta. Em situações reais, uma referência de ocupação pode sinalizar condição desejável sem descrever um máximo físico incontornável. Por isso, distinguir capacidade de referência, carga inicial, carga final e excesso é essencial para interpretar a solução. O modelo admite que um fornecedor receba demanda acima da referência, mas eleva o custo dessa escolha progressivamente. Os resultados precisam ser lidos como respostas a essa definição matemática, não como instruções diretas para ultrapassar capacidades físicas comprovadas.

Este trabalho examina a seguinte pergunta: como alocar novos pedidos entre fornecedores com diferentes níveis de atraso, distância e ocupação, atendendo integralmente à demanda e controlando a sobrecarga? Para respondê-la, propõe-se uma

formulação de programação inteira mista na qual cada pedido é atribuído a um fornecedor e o excesso em relação à capacidade de referência recebe penalidade crescente. Três cenários permitem observar o efeito da carga inicial e da demanda sobre a alocação.

A contribuição do artigo é reunir, em uma formulação verificável, a atribuição integral dos pedidos, o uso de uma capacidade de referência penalizável e a comparação entre excesso decorrente da escolha do modelo e excesso inevitável pela insuficiência de folga disponível no conjunto de fornecedores. A análise se concentra no comportamento da formulação e dos cenários estudados; não estabelece que os pesos empregados representem uma preferência empresarial validada.

Os três cenários foram escolhidos porque apresentam diferentes relações entre demanda e folga. Dois deles permitem identificar excesso produzido pela escolha de fornecedores, pois a capacidade de referência remanescente é suficiente na base como um todo. O terceiro mostra o que acontece quando a demanda excede a folga total. Essa distinção oferece um critério de leitura para os resultados: a ocorrência de sobrecarga, por si só, não informa se a rede de fornecedores carecia de folga total ou se o modelo preferiu certos fornecedores.

O texto está organizado em cinco seções. Após esta introdução, descrevem-se a base de dados e os cenários (Seção 2). A Seção 3 apresenta as variáveis, a função objetivo e as restrições. Na Seção 4, analisam-se os resultados registrados nas simulações. A Seção 5 apresenta as conclusões e os limites da interpretação.

2. Dados e construção dos cenários

O estudo parte de registros de uma empresa de manufatura relativos a junho, julho e agosto de 2022. De uma base inicial superior a 300 fornecedores, foram mantidos os 113 que apresentavam registros nos três meses e haviam recebido e entregue pelo menos um pedido em cada mês. Identificadores genéricos substituem os nomes dos fornecedores. Os dados utilizados nos cenários analisados não foram alterados nem aleatorizados.

Para cada fornecedor, a capacidade de referência foi definida como a soma dos pedidos recebidos no período considerado, tratando os pedidos como simultâneos para fins da simulação. Esse número é uma referência de modelagem baseada no volume observado, e não uma medição independente da capacidade produtiva máxima. A taxa de atraso corresponde à proporção de pedidos entregues com atraso entre todos os pedidos feitos ao fornecedor. A distância foi calculada a partir dos endereços comerciais dos fornecedores em relação a Curitiba, adotada como ponto de referência.

Para tornar a influência da distância discreta, atribuiu-se uma penalidade a cada faixa: até 200 km, 1; acima de 200 até 500 km, 2; acima de 500 até 1.000 km, 4; acima de 1.000 até 5.000 km, 8; acima de 5.000 até 10.000 km, 16; acima de 10.000 km, 32. Cada limite superior pertence à faixa indicada; por exemplo, um fornecedor a exatamente 200 km recebe penalidade 1. Essas penalidades são escolhas do modelo e não estimativas de custo monetário de transporte. A Tabela 1 apresenta as faixas e as penalidades correspondentes.

Tabela 1 – Penalidade atribuída às faixas de distância

Distância do fornecedor até Curitiba	Penalidade
Até 200 km	1
Mais de 200 até 500 km	2
Mais de 500 até 1.000 km	4
Mais de 1.000 até 5.000 km	8
Mais de 5.000 até 10.000 km	16

Fonte: Autoria própria

O uso de faixas oferece uma leitura operacional da proximidade: fornecedores em uma mesma faixa recebem a mesma penalidade, enquanto a passagem para uma faixa posterior eleva discretamente o custo de lhes atribuir pedidos. O crescimento em base dois faz com que deslocamentos entre faixas mais distantes tenham efeito mais pronunciado. Contudo, os valores 1, 2, 4, 8, 16 e 32 não decorrem de uma estimativa empírica do frete; são parâmetros definidos na formulação e precisam ser interpretados dentro da função objetivo. Abordagens multicritério também podem combinar atributos quantitativos e categorias de avaliação, embora empreguem mecanismos de agregação distintos (CHAN, 2003; CHEN; LIN; HUANG, 2006).

Em cada cenário, a carga inicial de um fornecedor é o arredondamento para cima de 80% ou 90% de sua capacidade de referência. Acrescentam-se 500 ou 1.000 pedidos unitários, todos a alocar. A Tabela 2 mostra as três combinações analisadas. A carga inicial percentual e a demanda adicional são condições simuladas, distintas das medidas históricas atribuídas aos fornecedores.

Tabela 2 – Condições dos cenários analisados

Cenário	Carga inicial por fornecedor	Novos pedidos
A	80% da capacidade de referência	1.000
B	90% da capacidade de referência	500
C	90% da capacidade de referência	1.000

Fonte: Autoria própria

O arredondamento é necessário porque a carga é expressa em pedidos indivisíveis. A mesma regra é aplicada a todos os fornecedores de uma instância. Portanto, o percentual nominal não é necessariamente igual à razão entre a soma das cargas iniciais arredondadas e a soma das capacidades: o arredondamento individual pode elevar ligeiramente essa razão. A folga inicial total é calculada depois do arredondamento, de modo que o limite total empregado na análise dos resultados corresponde efetivamente às cargas usadas pelo modelo.

3. Modelo de alocação

Sejam F o conjunto de fornecedores e P o conjunto de novos pedidos. Para cada fornecedor f, CAP_f denota a capacidade de referência, DEL_f sua taxa histórica de atraso, DIS_f sua distância em quilômetros e $PenDist_f$ a penalidade da faixa de distância. O parâmetro α representa a fração de carga inicial no cenário e $D = |P|$ a demanda adicional. A carga inicial é $L_f^0 = \lceil \alpha CAP_f \rceil$.

A variável inteira não negativa q_f indica quantos novos pedidos o fornecedor recebe. A variável binária x_{pf} indica se o pedido p lhe foi atribuído, e y_f indica se o fornecedor recebeu pelo menos um novo pedido. A representação por pedido foi mantida para permitir extensões com atributos individuais, dessa forma, as alocações de pedidos a cada fornecedor ficam melhor representadas nos arquivos de saída do modelo. As variáveis não negativas e_f^L, e_f^M e e_f^F distribuem o excesso entre as faixas leve, média e forte. A carga final é $L_f = L_f^0 + q_f$, e a utilização é $U_f = L_f / CAP_f$.

O modelo minimiza:

$$(\min) z = \sum_{f \in F} \left(w_{DEL} DEL_f q_f + w_{DIS} PenDist_f q_f + w_{UTI} U_f + w_L e_f^L + w_M e_f^M + w_F e_f^F \right).$$

Nas instâncias examinadas, $w_{DEL} = w_{DIS} = w_{UTI} = 1$ e $(w_L, w_M, w_F) = (1{,}5{,}10)$. A quantidade de fornecedores utilizados é contabilizada nos resultados, mas não recebe penalização na função objetivo. Os valores dos pesos definem uma escala de comparação própria desta análise; sua sensibilidade ainda precisa ser examinada.

Os pesos w da função objetivo permitem ajustar a importância atribuída a cada parcela. Neste experimento, os pesos de atraso, distância e utilização foram fixados no mesmo valor, 1, para manter uma configuração comum aos três cenários e comparar as mudanças de carga inicial e demanda sem pressupor uma preferência empresarial ainda não calibrada. Os pesos das faixas de sobrecarga são 1 para “leve”, 5 para “média” e 10 para “forte”, de modo a penalizar progressivamente os excessos maiores. A igualdade numérica entre os três primeiros pesos não implica influência igual sobre a solução, pois as parcelas têm escalas distintas. Examinar outros valores exigirá uma análise de sensibilidade.

As principais restrições são:

$$\sum_{f \in F} x_{pf} = 1 \quad (\forall p \in P), \qquad q_f = \sum_{p \in P} x_{pf} \quad (\forall f \in F), \qquad \sum_{f \in F} q_f = D.$$

O vínculo $y_f \leq q_f \leq D y_f$ identifica os fornecedores utilizados. Para representar a sobrecarga, impõem-se $e_f^L \leq 0{,}10 CAP_f$, $e_f^M \leq 0{,}10 CAP_f$ e $e_f^L + e_f^M + e_f^F \geq L_f - CAP_f$. Os domínios das variáveis são $x_{pf}, y_f \in \{0{,}1\}$, $q_f \in \mathbb{Z}+$ e e_f^L, e_f^M, $e_f^F \geq 0$. Como as penalidades são positivas e crescentes, uma solução ótima preenche primeiro a faixa leve, depois a média e, por fim, a forte, quando houver excesso. Não se impõe um limite superior rígido à carga final. O código também ordena os índices dos fornecedores atribuídos aos pedidos unitários para reduzir soluções simétricas sem alterar as quantidades atribuídas a cada fornecedor. São restrições de quebra de simetria, que não alteram o conjunto de soluções válidas, nem tampouco a otimalidade da solução, mas contribuem para o processo de busca. Existe, também, uma restrição para quebra de simetria $\sum_{f \in F} x_{pf} <= \sum_{f \in F} x_{(p+1)f}$, que ordena pedidos equivalentes para reduzir soluções simétricas. Por exemplo, o primeiro pedido ser alocado ao fornecedor 001, e o segundo para o fornecedor 002 é numericamente diferente do seu contrário, e o modelo assume apenas uma dessas soluções como ótima.

A formulação foi implementada em OPL (*Optimization Programming Language*) e resolvida com o *solver* CPLEX, imerso no ambiente de modelagem e resolução IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio*. Um mesmo arquivo de modelo recebeu dados de cenário separados, contendo o percentual de carga inicial, a demanda, os pesos e as informações dos 113 fornecedores. As instâncias foram resolvidas com o IBM ILOG CPLEX 22.1.1, em um computador com processador Intel Core i5 (1.60GHz) e 8 Gb de memória RAM. Todas as instâncias atingiram a otimalidade (*gap* zero), com tempo máximo de 13 segundos.

3.1 Interpretação da função objetivo

Os termos de atraso e distância incidem sobre cada novo pedido atribuído: para um dado fornecedor, sua contribuição cresce linearmente com q_f. O termo de utilização é calculado para cada fornecedor a partir da carga final dividida pela capacidade de referência. Como a carga inicial é fixa em um cenário, o efeito marginal desse termo sobre a alocação de um pedido ao fornecedor f é proporcional a $1/CAP_f$. Assim, sua escala e interpretação

diferem das parcelas de atraso e distância; manter os coeficientes numéricos iguais a um não significa que os critérios exerçam influência igual na solução.

A parcela de excesso representa a consequência de ultrapassar a capacidade de referência. A primeira faixa admite até 10% dessa capacidade, a segunda mais 10%, e a terceira reúne qualquer excesso adicional. O coeficiente cinco da faixa média e o coeficiente dez da faixa forte fazem com que o modelo procure evitar excessos maiores, sem proibi-los. Como CAP_f é inteiro e as parcelas de excesso são contínuas, a fronteira de cada faixa pode corresponder a uma fração de pedido na contabilização da penalidade. Já q_f, a quantidade efetiva de pedidos atribuídos, permanece inteira. A Tabela 3 sintetiza os limites e os pesos de cada parcela do excesso.

Tabela 3 – Faixas e pesos da penalização por sobrecarga

Faixa de excesso acima da capacidade de referência	Peso
Até 10% da capacidade	1
Mais de 10% até 20% da capacidade	5
Acima de 20% da capacidade	10

Fonte: Autoria própria

3.2 Atendimento e identificação dos fornecedores

As variáveis x_{pf} identificam o destinatário de cada pedido individual. Sua soma por pedido igual a um impede tanto a falta de atendimento quanto a atribuição simultânea do mesmo pedido a dois fornecedores. A igualdade entre q_f e a soma das atribuições individuais garante que os relatórios agregados por fornecedor coincidam com a alocação de cada pedido. Por consequência, a igualdade $\sum_f q_f = D$ explicita uma condição já implicada pelas duas primeiras relações, servindo também como verificação da demanda total atendida.

A variável y_f informa se houve atribuição de pelo menos um novo pedido ao fornecedor. Os vínculos com q_f tornam essa identificação exata quando $D > 0$. Como não há penalidade associada a y_f na função objetivo empregada, o número de fornecedores usados é um indicador observado após a otimização, e não uma meta independente de concentração ou diversificação da base.

Pode-se interpretar a função objetivo como a soma de custos modelados da alocação, expressos em unidades abstratas. As parcelas não compartilham, por si mesmas, uma unidade monetária: a taxa de atraso é uma proporção, a penalidade de distância é um número discreto, a utilização é uma razão, e o excesso é uma quantidade de pedidos dividida entre faixas. Os pesos estabelecem como essas parcelas competem. Por esse motivo, o valor absoluto de Z não deve ser apresentado como despesa financeira. Para a leitura operacional deste estudo, importam sobretudo os pedidos destinados a cada fornecedor, as faixas de distância alcançadas e a sobrecarga observada.

O índice de cada pedido representa uma unidade de demanda sem atributos próprios no modelo. A restrição adicional de ordenação reduz a troca de rótulos entre pedidos indistinguíveis, pois duas soluções que apenas permutam os índices dos pedidos

correspondem à mesma quantidade total atribuída a cada fornecedor. Essa escolha computacional não cria prioridade de atendimento entre pedidos.

4. Resultados e discussão

A folga inicial é a soma de $CAP_f - L_f^0$ entre os fornecedores. O excesso mínimo necessário é $\max(0, D - \text{folga inicial})$; o excesso além desse mínimo é uma escolha produzida pelos critérios e pesos do modelo. Essa conta para o conjunto de fornecedores não afirma que cada fornecedor individual esteja apto a absorver qualquer pedido.

Nos três casos, a capacidade de referência total é 5.627 pedidos. O arredondamento individual da carga inicial resulta em 4.548 pedidos no cenário de 80% (A) e 5.117 nos cenários de 90% (B e C). As diferenças para a capacidade total, 1.079 e 510 pedidos, são as respectivas folgas totais antes da chegada da demanda adicional. A comparação usa a mesma base de fornecedores e o mesmo conjunto de coeficientes da função objetivo; as condições que variam entre as instâncias são a carga inicial percentual e a demanda.

O indicador “fornecedores utilizados” conta aqueles que receberam pelo menos um dos novos pedidos; não informa quantos já possuíam pedidos na carga inicial. Por sua vez, “fornecedores com excesso” conta os que terminaram com carga final acima da capacidade de referência. A maior utilização individual é o maior valor da razão entre carga final e capacidade entre os 113 fornecedores. Esses indicadores descrevem aspectos diferentes da solução: uma alocação pode acionar muitos fornecedores e ainda concentrar parte relevante do volume em poucos deles. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 4 – Síntese da alocação e do excesso nos três cenários

Indicador	Cenário A (80% + 1.000)	Cenário B (90% + 500)	Cenário C (90% + 1.000)
Folga inicial total	1.079	510	510
Fornecedores utilizados	65	63	107
Fornecedores com excesso	52	18	99
Excesso observado	304	169	500
Maior utilização individual	111,11%	111,11%	113,33%

Fonte: Autoria própria

No cenário de 80% de carga inicial e 1.000 novos pedidos, a folga total inicial supera a demanda em 79 pedidos. Mesmo assim, a solução registra 304 pedidos acima da capacidade de referência, distribuídos por 52 fornecedores. A alocação emprega 65 fornecedores e fica concentrada nas duas faixas de até 500 km: 342 pedidos em fornecedores de até 200 km e 658 na faixa seguinte. A existência de folga total mostra que o excesso é compatível com a preferência, definida pela função objetivo, por fornecedores de menor penalidade conjunta.

O fornecedor identificado como Fornecedor 001 recebeu 239 novos pedidos, tornando-se o maior destinatário neste cenário. Sua carga passou de 639 para 878 pedidos, com utilização de 110,03% e excesso de 80 pedidos. Essa observação ilustra a possibilidade de concentrar um volume expressivo em um fornecedor com características favorecidas pelos critérios, ainda que outros fornecedores conservem folga. Os dez fornecedores com maior quantidade de pedidos incluem outros casos de carga final próxima a 110% da capacidade de referência. Esses exemplos descrevem a solução encontrada, sem permitir inferir a capacidade produtiva efetiva de cada empresa.

Com 90% de carga inicial e 500 novos pedidos, a folga total ainda supera a demanda, desta vez por apenas 10 pedidos. A solução utiliza 63 fornecedores e registra 169 pedidos em excesso, dos quais 114 se concentram em fornecedores situados até 200 km. Também aqui o excesso não é imposto pela folga total disponível: resulta da combinação dos critérios e das penalidades adotadas.

O Fornecedor 001 volta a receber a maior parcela, 159 pedidos, alcançando a mesma carga final de 878 pedidos observada no cenário anterior. Seu excesso é novamente de 80 pedidos, pois a carga inicial mais alta é compensada por uma atribuição adicional menor. No total, 226 dos 500 pedidos foram atribuídos à faixa de até 200 km e 274 à faixa de mais de 200 até 500 km. A diferença entre a folga inicial total de 510 pedidos e a demanda de 500 mostra que uma distribuição sem excesso seria matematicamente possível quanto ao total, mas teria valor diferente na função objetivo sob os parâmetros adotados.

No cenário de maior pressão, com 90% de carga inicial e 1.000 novos pedidos, faltam 490 unidades de folga disponível para absorver a nova demanda sem excesso. A solução apresenta 500 pedidos em excesso, apenas 10 acima desse limite mínimo necessário. São utilizados 107 fornecedores, incluindo 42 na faixa de 500 a 1.000 km, que recebem 304 pedidos. A ampliação da base utilizada e da distância alcançada acompanha o aumento de demanda sob a mesma condição de carga inicial de 90%.

Além dos 304 pedidos na faixa de 500 a 1.000 km, são atribuídos 229 pedidos a fornecedores até 200 km e 467 à faixa de mais de 200 até 500 km. Dos 107 fornecedores utilizados, 99 terminam acima da capacidade de referência. A maior utilização individual chega a 113,33%, valor superior ao máximo registrado nos outros dois cenários. O resultado sugere que, sob uma maior pressão da demanda, a penalização progressiva distribui parte do excesso pela base e aciona fornecedores de uma faixa de distância adicional. A extensão exata desse efeito depende da estrutura dos dados e dos pesos.

4.1 Comparação da natureza do excesso

A decomposição do excesso ajuda a evitar uma leitura equivocada da sobrecarga. No cenário A, os 304 pedidos excedentes poderiam, considerando a base como um todo, ser acomodados em fornecedores que terminaram abaixo de sua capacidade de referência, porque a demanda é inferior à folga inicial total. No cenário B, o mesmo raciocínio aplica-se aos 169 pedidos excedentes. A expressão “além do mínimo” quantifica exatamente esse desvio em relação ao limite inferior calculado para a base, mas não o classifica como erro: o modelo foi construído para admitir excesso quando a economia nos demais termos compensa a penalidade correspondente.

A estrutura de custos marginais ajuda a explicar esse comportamento. Atribuir um pedido ao fornecedor f acrescenta à função objetivo aproximadamente $DEL_f + PenDist_f + 1/CAP_f$, além do peso da faixa de excesso, quando houver. A taxa de atraso está entre 0 e 1, e o termo de utilização é relativamente pequeno para a maior parte das capacidades da base. Assim, a penalidade de distância, que varia de 1 a 32, tende a dominar a decisão. Um pedido enviado a um fornecedor da segunda faixa com excesso leve custa cerca de 2 + 1 = 3. O mesmo pedido, enviado sem excesso a um fornecedor da terceira faixa, custa cerca de 4. Como a diferença entre taxas de atraso é sempre menor que 1, ela dificilmente inverte essa comparação. Na primeira faixa, o excesso leve (1 + 1 = 2) empata com a segunda faixa sem excesso (2), e o desempate fica a cargo do atraso e da utilização. Já o excesso na faixa média custa cerca de 2 + 5 = 7, e a terceira faixa passa a ser preferível. Isso explica por que, nos cenários A e B, o modelo aceita excesso leve em fornecedores próximos em vez de usar a folga de fornecedores mais distantes, e por que

a utilização máxima fica próxima de 110%. No cenário C, esgotada a margem de excesso leve nas duas primeiras faixas, a terceira faixa passa a ser acionada.

A diferença entre excesso observado e excesso mínimo necessário é uma medida descritiva do resultado, não um componente isolado da função objetivo. Dois cenários podem registrar o mesmo número de pedidos excedentes e ainda apresentar situações operacionais distintas se diferirem a distribuição entre fornecedores, o nível de excesso de cada um e a localização daqueles utilizados. Por isso, a análise combina indicadores globais e exemplos por fornecedor. No relatório de base, a maior utilização individual permanece pouco acima de 110% nos dois cenários de menor pressão, enquanto o cenário de maior demanda atinge 113,33%. Os valores de 111,11% e 113,33% decorrem de fornecedores com capacidade de referência relativamente pequena. Como CAP_f é inteiro e as faixas de excesso são contínuas, o limite de 10% pode corresponder a uma fração de pedido. Com CAP_f= 9, por exemplo, um único pedido excedente leva a utilização a 10/9 = 111,11%. Com CAP_f= 15, dois pedidos excedentes levam a 17/15 = 113,33%. A penalização progressiva limita o incentivo a concentrar todo o excesso em poucas alternativas, embora não imponha um teto rígido.

No cenário C, a falta de 490 posições na folga total torna ao menos 490 pedidos excedentes inevitáveis. A diferença entre os 500 observados e os 490 inevitáveis é de dez pedidos. Portanto, 98% do excesso observado corresponde ao mínimo imposto pela relação entre demanda e folga, enquanto 2% está além desse mínimo. Essas proporções descrevem o volume de pedidos acima da referência e não a porcentagem de fornecedores sobrecarregados.

4.2 Distância e expansão da base

Nos cenários A e B, toda a demanda é absorvida por fornecedores localizados nas duas primeiras faixas de distância. A passagem de 500 para 1.000 novos pedidos mantendo 90% de carga inicial altera essa distribuição: a terceira faixa passa a receber 304 pedidos, e o número de fornecedores usados sobe de 63 para 107. Isso permite observar, dentro dos cenários examinados, uma ampliação simultânea da base e da distância alcançada. Não se pode atribuir toda essa mudança apenas à distância, pois a função objetivo combina também atraso, utilização e excesso. A Tabela 5 apresenta a distribuição dos pedidos e dos fornecedores utilizados por faixa de distância nos três cenários.

Tabela 5 – Pedidos e fornecedores utilizados por faixa de distância

Faixa de distância	Indicador	Cenário A (80% + 1.000)	Cenário B (90% + 500)	Cenário C (90% + 1.000)
Até 200 km	Pedidos	342	226	229
	Fornecedores	6	6	6
Mais de 200 até 500 km	Pedidos	658	274	467
	Fornecedores	59	57	59
Mais de 500 até 1.000 km	Pedidos	0	0	304
	Fornecedores	0	0	42

Fonte: Autoria própria

O fato de fornecedores mais distantes não serem utilizados nos dois primeiros cenários decorre da solução com estes dados e parâmetros. Não há restrição que proíba atribuir-lhes pedidos. De igual modo, a terceira faixa ser utilizada no cenário C não significa que

suas empresas tenham, em geral, pior qualidade ou atraso: o termo de distância é apenas um dos componentes de avaliação.

A comparação por faixa também mostra que a quantidade de pedidos por fornecedor varia entre as situações. Na primeira faixa, os mesmos seis fornecedores recebem 342 pedidos no cenário A, 226 no B e 229 no C. O aumento de demanda entre B e C é absorvido principalmente pelas faixas seguintes. A leitura conjunta da Tabela 5 e do excesso total sugere que o modelo preserva a utilização dos fornecedores mais próximos, mas precisa ampliar o conjunto de destinatários quando cresce a pressão sobre a base. Trata-se de uma descrição dos resultados dessas instâncias, cuja generalização exigiria outras bases ou testes de sensibilidade.

Esses resultados distinguem duas situações. Nos cenários A e B, havia folga total suficiente, mas a função objetivo tornou mais vantajoso aceitar sobrecarga em determinados fornecedores. No cenário C, quase todo o excesso observado decorre da insuficiência de folga no conjunto de fornecedores. Essa interpretação depende dos valores atribuídos às penalidades de distância, atraso e excesso; alterações nesses pesos podem modificar tanto a quantidade quanto a distribuição da sobrecarga. Em formulações clássicas de alocação de pedidos, como a proposta por Ghodsypour e O'Brien (1998) e revisada por Aissaoui, Haouari e Hassini (2007), a capacidade do fornecedor aparece como restrição rígida. A penalização progressiva adotada aqui permite distinguir o excesso escolhido pelo modelo daquele imposto pela falta de folga, o que não seria observável com restrições rígidas.

5. Conclusões e limitações

Este artigo abordou a alocação de novos pedidos entre fornecedores com o objetivo de atender integralmente à demanda, considerando atraso, distância e utilização da capacidade sem proibir a sobrecarga. Para isso, formulou-se um modelo de programação inteira mista com penalidades progressivas e analisaram-se três cenários com 113 fornecedores, resolvidos em OPL/CPLEX. As soluções registraram 304, 169 e 500 pedidos acima da capacidade de referência, respectivamente. Nos dois primeiros cenários, havia folga total suficiente, mas o modelo preferiu concentrar parte dos pedidos em determinados fornecedores; no terceiro, ao menos 490 pedidos excedentes eram inevitáveis. O aumento da demanda também ampliou a utilização de fornecedores mais distantes.

A contribuição do estudo é explicitar, na leitura dos resultados, a diferença entre a sobrecarga que decorre das preferências expressas na função objetivo e aquela exigida pela falta de folga na base. Essa distinção ajuda a interpretar a alocação obtida e o efeito das penalidades adotadas. A capacidade de referência, contudo, foi derivada do volume histórico e não mede diretamente a capacidade produtiva real. As penalidades de distância representam escolhas do modelo, não valores de frete; os pesos não passaram por análise de sensibilidade exaustiva, e as conclusões se restringem aos três cenários examinados.

Como continuidade, recomenda-se testar a sensibilidade dos resultados aos pesos e às faixas de penalidade e comparar, sobre a mesma base de fornecedores, a formulação atual com uma abordagem multiobjetivo que separe distância e risco de atraso. Essas análises poderão indicar em que medida a sobrecarga e a escolha de fornecedores distantes dependem das preferências definidas no modelo.

Agradecimentos

Ao CNPq, processos 313560/2023-4 e 200478/2026-5.

Referências

AISSAOUI, N.; HAOUARI, M.; HASSINI, E. Supplier selection and order lot sizing modeling: a review. Computers & Operations Research, v. 34, n. 12, p. 3516-3540, 2007.

BHUTTA, K. S.; HUQ, F. Supplier selection problem: a comparison of the total cost of ownership and analytic hierarchy process approaches. *Supply Chain Management: An International Journal*, v. 7, n. 3, p. 126-135, 2002.

CHAN, F. T. S. Interactive selection model for supplier selection process: an analytical hierarchy process approach. *International Journal of Production Research*, v. 41, n. 15, p. 3549-3579, 2003.

CHEN, C. T.; LIN, C. T.; HUANG, S. F. A fuzzy approach for supplier evaluation and selection in supply chain management. *International Journal of Production Economics*, v. 102, n. 2, p. 289-301, 2006.

GHODSYPOUR, S. H.; O'BRIEN, C. A decision support system for supplier selection using an integrated analytic hierarchy process and linear programming. International Journal of Production Economics, v. 56-57, p. 199-212, 1998.

GIDIAGBA, J. O.; TARTIBU, L. K.; OKWU, M. O. A systematic review of machine learning applications in sustainable supplier selection. Decision Analytics Journal, v. 14, 100547, 2025.

GOVINDAN, K.; RAJENDRAN, S.; SARKIS, J.; MURUGESAN, P. Multi criteria decision making approaches for green supplier evaluation and selection: a literature review. *Journal of Cleaner Production*, v. 98, p. 66-83, 2015.

HO, W.; XU, X.; DEY, P. K. Multi-criteria decision-making approaches for supplier evaluation and selection: a literature review. *European Journal of Operational Research*, v. 202, n. 1, p. 16-24, 2010.

KAR, A. K. A model for group decision support for supplier selection. *XVI Annual International Conference of Society of Operations Management*, IIT Delhi, 16, 2012.

KULL, T. J.; TALLURI, S. A supply risk reduction model using integrated multicriteria decision making. *IEEE Transactions on Engineering Management*, v. 55, n. 3, p. 409-419, 2008.

MACHARIS, C.; SPRINGAEL, J.; DE BRUCKER, K.; VERBEKE, A. PROMETHEE and AHP: The design of operational synergies in multicriteria analysis. Strengthening PROMETHEE with ideas of AHP. *European Journal of Operational Research*, v. 153, n. 2, p. 307-317, 2004.

SAFAVI, A.; SADEGHI BIGHAM, B.; ZAHEDI-SERESHT, M. Supplier selection utilizing AHP and TOPSIS in a fuzzy environment based on KPIs. *Contemporary Mathematics*, v. 6, n. 1, p. 574-593, 2025.