

PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL EM TEMPOS DE CRISE: UM CASO DE MANUFATURA E VAREJO ONLINE

NATALIA VARELA DA ROCHA KLOECKNER
INSTITUTO DE TECNOLOGIA E LIDERANÇA - INTELI

Introdução

O avanço da transformação digital e das práticas de sustentabilidade tem modificado profundamente a lógica de operação das Pequenas e Médias Empresas (PMEs). Este artigo, apresentado no modelo de Ensino de Caso, aborda o contexto da transformação digital e da sustentabilidade nas PMEs, destacando o uso da Programação Linear como suporte à decisão em tempos de crise produtiva e energética.

Problema de Pesquisa e Objetivo

Como maximizar o lucro da manufatura sustentável sem ultrapassar os limites produtivos, logísticos e energéticos disponíveis? Diante dessa questão, esse Caso de Ensino possibilita a discussão de estratégias e a formulação de um modelo de programação linear que integre produção, energia e logística, com o foco de maximizar o lucro total da empresa. O objetivo é levar o aluno a aplicar modelos quantitativos e refletir sobre decisões equilibradas entre lucro, operação e sustentabilidade.

Fundamentação Teórica

A base teórica consiste em três eixos interdependentes: Programação Linear e Pesquisa Operacional (Hillier & Lieberman, 2021), Gestão de Operações e Logística (Slack et al., 2023), e Sustentabilidade na Manufatura (Ahluwalia, 2025), articulando eficiência, integração e responsabilidade ambiental, a partir de um diálogo interdisciplinar entre teoria e prática decisória.

Metodologia

A metodologia consiste na estrutura de um caso de ensino interdisciplinar, construído com base em dados realistas e complexos, que possibilita aos estudantes assumirem papéis de gestores e construir um modelo de Programação Linear com apoio do Excel Solver ou do software LINDO.

Análise e Discussão dos Resultados

A análise do Caso conduz o aluno a identificar trade-offs entre produção e meio ambiente, principalmente. Estimulando o pensamento crítico, a cooperação interdepartamental de uma organização, bem como o uso ético da modelagem matemática de programação linear.

Considerações Finais

O presente Caso de Ensino evidencia o potencial da Programação Linear para apoiar decisões sustentáveis em PMEs, bem como reforça a aprendizagem ativa e interdisciplinar em gestão de operações e sustentabilidade empresarial.

Referências

Ahluwalia, K. (2025). Sustainable Supply Chain Management. Delhi: Educohack Press. Hillier, F. S. & Lieberman, G. J. (2013). Introdução a pesquisa operacional. 9. ed. Porto Alegre: AMGH. Slack, N., Brandon-Jones, A., & Burgess, N. (2023) Administração da Produção. 10. ed. São Paulo: Atlas.

Palavras Chave

Sustentabilidade, Pequenas e Médias Empresas, Otimização

PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL EM TEMPOS DE CRISE: UM CASO DE MANUFATURA E VAREJO ONLINE

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o avanço da transformação digital e das práticas de sustentabilidade tem modificado profundamente a lógica de operação das Pequenas e Médias Empresas (PMEs). A pressão por eficiência, transparência e redução de desperdícios tornou-se ainda mais intensa no cenário pós-pandemia, momento que o comportamento do consumidor migrou fortemente para o comércio eletrônico e os desafios da cadeia de suprimentos passaram a impactar de forma direta o desempenho operacional. Nesse contexto, empresas de manufatura que vendem diretamente ao consumidor (como exemplo as que atuam no modelo *D2C – Direct to Consumer*) enfrentam o dilema de equilibrar crescimento acelerado, restrições de capacidade produtiva e exigências ambientais mais rigorosas.

A busca por soluções quantitativas para apoiar decisões estratégicas e táticas em ambientes complexos tem levado gestores a recorrer a ferramentas de otimização, como a Programação Linear (PL). Essa metodologia matemática permite modelar e resolver problemas de alocação de recursos escassos — sejam eles de tempo, capital, energia ou capacidade de transporte — com o objetivo de maximizar resultados econômicos e operacionais (Colin, 2018; Hillier & Lieberman, 2013). No contexto das PMEs brasileiras, a aplicação da PL tem ganhado relevância, sobretudo em momentos de crise, quando a racionalização de recursos se torna condição de sobrevivência.

O presente caso de ensino aborda a experiência de uma empresa nacional de manufatura sustentável que, em 2024, passou a enfrentar uma crise de capacidade decorrente da combinação de três fatores: aumento súbito da demanda online, gargalos produtivos e escassez energética. E, em meio as pressões internas e externas, a organização precisou integrar dados de produção, logística e sustentabilidade em um modelo quantitativo que orientasse suas decisões de curto prazo. Este caso propõe, assim, uma reflexão sobre como a análise matemática e a cooperação interdepartamental podem contribuir para o equilíbrio entre eficiência operacional, responsabilidade ambiental e rentabilidade.

Além de apresentar um problema prático resolvido por meio de Programação Linear, este caso convida *o leitor* a compreender a importância da comunicação entre áreas e da liderança técnica na tomada de decisão em contextos de incerteza. Ao longo das seções seguintes, são apresentados o enredo da crise, os personagens envolvidos e os dados utilizados para a modelagem. Contudo, em atendimento à limitação de páginas e a possibilidade de livre acesso desse artigo via Anais do presente Congresso – o que impactaria na obtenção prévia da resposta pelo alunado – optou-se por não disponibilizar a modelagem matemática e nem a solução otimizada obtida via MS Excel® Solver ou pelo LINDO® nessa versão.

O caso é destinado a cursos de graduação em Administração, Engenharia de Produção e Logística, podendo ser utilizado tanto em disciplinas de Pesquisa Operacional quanto em tópicos aplicados a sustentabilidade bem como a gestão de operações.

2 O CASO

Em meados de 2024, uma empresa brasileira de médio porte especializada na manufatura sustentável de produtos para iluminação inteligente vivia uma de suas fases mais desafiadoras desde a fundação. O negócio, criado há pouco mais de uma década, havia conquistado notoriedade ao produzir luminárias e abajures feitos a partir de materiais reciclados e sensores de eficiência energética, voltados tanto para residências quanto para pequenos estabelecimentos comerciais. O modelo de negócios *D2C* - vendas diretas ao consumidor via

plataforma digital - proporcionou um crescimento acelerado após a pandemia, quando o público passou a valorizar soluções ecológicas, tecnológicas e de *design* nacional.

O aumento repentino da demanda, entretanto, expôs vulnerabilidades operacionais que antes estavam diluídas no ritmo mais estável da produção. Contudo, o principal problema emergiu no final do primeiro semestre de 2024, quando a empresa começou a acumular atrasos nas entregas e custos logísticos acima do previsto. O processo produtivo dependia de três linhas de montagem — uma para a base das luminárias, outra para o circuito eletrônico e uma terceira para a montagem final e embalagem —, todas operando com capacidade próxima do limite. Para agravar a situação, a concessionária local impôs restrições temporárias no fornecimento de energia elétrica durante o inverno, período em que o consumo regional aumentava devido às baixas temperaturas.

A diretora de operações, Camila Torres, identificou que o problema não estava apenas na infraestrutura, mas também na ausência de um modelo integrado de planejamento. Cada área tomava decisões isoladamente: o setor de produção priorizava o volume, o de *marketing* insistia em manter os prazos promocionais, e a equipe logística sempre buscava as rotas alternativas de transporte, muitas das vezes mais caras. Essa fragmentação interna se tornou fonte de tensão e desalinhamento estratégico.

A gerente de produção, Livia Andrade, defendia o aumento de turnos e a contratação temporária de mais operários para atender à demanda crescente. Já Helena Prado, responsável pelo *marketing* digital, argumentava que reduzir as promoções ou postergar as entregas afetaria a reputação construída junto ao público online. Ambas se reuniam semanalmente com Camila, em encontros que alternavam entre tentativas de conciliação e discussões sobre prioridades. Nesse cenário o dilema girava em torno de uma pergunta recorrente: *como crescer sem comprometer a sustentabilidade e a viabilidade financeira do negócio?*

Diante da escalada de custos e das pressões externas, Camila decidiu propor uma abordagem inédita para a empresa: utilizar a Programação Linear como ferramenta de apoio à tomada de decisão. Com auxílio de uma analista recém-contratada, ela iniciou o levantamento de dados referentes à capacidade das linhas, consumo energético por produto, custos de transporte e margens de contribuição. O objetivo era claro: *identificar a combinação ótima de produtos e rotas logísticas que maximizasse o lucro operacional, respeitando as restrições de produção e energia disponíveis.*

Inicialmente a proposta gerou resistência. Livia temia que um modelo matemático não captasse a complexidade do chão de fábrica, enquanto Helena receava que a ênfase na eficiência econômica reduzisse o investimento em *branding* sustentável. No entanto, Camila insistiu que a ferramenta não substituiria o julgamento humano, mas o complementaria, fornecendo base analítica para que obtivessem decisões mais assertivas e equilibradas. Assim, após algumas reuniões tensas, elas concordaram em colaborar, desde que o modelo fosse transparente e revisado em conjunto.

3 DADOS E INFORMAÇÕES PERTINENTES AO CASO

Após a decisão de utilizar a PL como apoio à tomada de decisão, a equipe liderada por Camila reuniu um conjunto de informações que refletiam a realidade operacional da empresa. O objetivo era construir um modelo quantitativo simples, mas capaz de representar o dilema vivido: *como maximizar o lucro da manufatura sustentável sem ultrapassar os limites produtivos, logísticos e energéticos disponíveis?*

A coleta dos dados revelou um cenário de contradições: enquanto o setor comercial pressionava por aumento de volume, o chão de fábrica já operava próximo ao limite, ao mesmo tempo que os custos de transporte e de energia ameaçavam corroer a margem de lucro.

A empresa produzia três linhas principais de luminárias inteligentes, cada uma voltada a um nicho diferente de consumidores: i. Modelo *EcoLite* (Produto A), que é uma luminária residencial com base reciclável, baixo consumo energético e forte apelo ambiental; ii. Modelo *SmartLux* (Produto B), que é uma luminária conectada via *Wi-Fi*, voltada para ambientes corporativos e *coworkings*; e, iii. Modelo *SolarBeam* (Produto C), luminária híbrida alimentada por energia solar, destinada a espaços externos e condomínios sustentáveis.

Cada produto exigia quantidades distintas de tempo de produção, energia e capacidade logística. A Tabela 1 apresenta os dados consolidados pela equipe, baseados em médias históricas e relatórios internos.

Tabela 1 – Dados Operacionais e margens estimadas por produto

Produto	Lucro Unitário (R\$)	Tempo de Produção (h)	Produção máxima física possível (unidades/mês)	Consumo Energético (kWh)	Custo Logístico Unitário (R\$)	Capacidade de Transporte (unidades/mês)
<i>EcoLite</i> (A)	120	2	1.500	1,5	20	1.200
<i>SmartLux</i> (B)	200	3	1.200	2	30	900
<i>SolarBeam</i> (C)	260	4	900	3	40	600

Fonte: autora.

O levantamento indicou que o setor de produção dispunha de 7.200 horas de trabalho mensais (considerando os três turnos de operação e eventuais pausas). O limite de energia elétrica disponível para o mês, em virtude das restrições regionais, era de 4.800 kWh. Já a capacidade logística — considerando frota própria e contratos com transportadoras — era de 2.400 unidades/mês, somando os três produtos.

Esses dados permitiram à equipe identificar três dimensões críticas que precisariam ser representadas no modelo:

- Capacidade produtiva: o tempo total de fabricação das luminárias não poderia ultrapassar as 7.200 horas disponíveis;
- Consumo energético: o somatório da energia consumida não poderia exceder os 4.800 kWh mensais;
- Limite logístico: a soma das unidades enviadas ao mercado não poderia ultrapassar as 2.400 unidades mensais.

Além dessas restrições, o modelo também deve garantir que todas as variáveis de decisão — representadas pelas quantidades de cada produto a serem fabricadas — serão não negativas e inteiras.

Camila e sua equipe perceberam que o desafio era mais do que técnico, era estratégico. As decisões de priorizar um produto em detrimento de outro implicavam impactos sobre sustentabilidade, posicionamento de mercado e satisfação do consumidor. Assim, o modelo de Programação Linear não seria apenas uma ferramenta de cálculo, mas um instrumento de mediação entre áreas, ajudando a alinhar perspectivas distintas sob uma mesma lógica de otimização.

4 MAS COMO OTIMIZAR OS RESULTADOS?

Com os dados em mãos, as reuniões entre Camila, Lívia e Helena tornaram-se ainda mais tensas e ao mesmo tempo mais produtivas. Pela primeira vez, todas as áreas estavam olhando para o mesmo conjunto de informações, o que tornava visíveis os dilemas que antes se escondiam nos relatórios isolados. A planilha de custos e margens, projetada por Camila, mostrava um cenário desconfortável: produzir mais não significava, necessariamente, lucrar mais.

Diante disso, Livia defendia que o aumento de produção do modelo *EcoLite* seria estratégico, pois consumia menos energia e apresentava menor risco operacional. Já Helena insistia que o *SmartLux* deveria ser priorizado, por ter maior apelo de mercado e contribuir para a imagem de inovação da marca. No entanto, a análise preliminar de Camila indicava que o *SolarBeam*, embora mais caro e intensivo em energia, apresentava a maior margem de contribuição por unidade. O problema era que a limitação de energia e a capacidade logística restringiam a produção conjunta dos três modelos.

A diretoria se via diante de uma clássica situação de *trade-off*: cada decisão envolvia ganhos e perdas. Produzir mais *EcoLite* significava aproveitar melhor a energia, mas reduzir o faturamento potencial; priorizar o *SmartLux* fortalecia o posicionamento tecnológico, mas aumentava o custo de transporte; e investir no *SolarBeam* podia elevar o lucro unitário, mas ameaçava o cumprimento das metas ambientais.

O dilema deixava evidente a necessidade de uma ferramenta objetiva de apoio à decisão, capaz de equilibrar todas essas variáveis sem favorecer um departamento em detrimento de outro. Foi nesse momento que Camila propôs:

– “Se transformarmos tudo isso em um modelo matemático, poderemos enxergar o todo. A decisão não será baseada em intuição, e sim em dados”.

A equipe concordou, ainda que com certa cautela. A partir daí, iniciou-se a formulação de um modelo de Programação Linear que integrasse produção, energia e logística, com o objetivo de maximizar o lucro total da empresa. As planilhas começaram a ser organizadas: cada produto teria seu lucro, tempo de fabricação, consumo energético e custo logístico devidamente registrados.

No entanto, antes de chegar à solução final, Camila desafiou sua equipe com uma pergunta que ecoou na sala de reuniões — e que agora se estende a você, *leitor*:

– “Se vocês estivessem no meu lugar, que decisão tomariam? Quais produtos priorizariam? E como equilibrariam os recursos escassos para garantir o melhor resultado possível?”

5. NOTAS DE ENSINO

Esta seção apresenta as orientações pedagógicas para a aplicação do caso em sala de aula, descrevendo a origem dos dados, os objetivos de aprendizagem, a base teórica que sustenta a atividade, a dinâmica sugerida para as aulas bem como as questões de reflexão que estimulam o pensamento crítico e a integração entre sustentabilidade, pesquisa operacional e gestão de operações.

5.1 FONTE DOS DADOS E MÉTODO

Os dados apresentados neste caso são fictícios, embora baseados em parâmetros realistas de pequenas e médias empresas brasileiras que atuam nos setores de manufatura sustentável e varejo digital. As informações de produtividade, consumo energético, custos logísticos e margens de lucro foram construídas com base em médias observadas em relatórios setoriais e estudos acadêmicos sobre manufatura verde e eficiência operacional.

O caso foi desenvolvido com o propósito de ser aplicado em disciplinas de graduação que tratam de Gestão de Operações, Sustentabilidade Empresarial, Pesquisa Operacional e Gestão da Produção. A metodologia utilizada segue o método de Caso de Ensino de Harvard, em que o aluno assume o papel de tomador de decisão, analisa as informações disponíveis e propõe soluções quantitativas e qualitativas. O professor, por sua vez atua como facilitador do processo, estimulando a análise crítica e o debate coletivo.

5.2 RECOMENDAÇÕES E OBJETIVO DE ENSINO

O caso foi concebido para ser aplicado em duas aulas consecutivas, totalizando 1 hora e 40 minutos. Na primeira aula, recomenda-se a leitura e a interpretação do caso, seguida da formulação do modelo matemático e da configuração do MS Excel Solver® e ou LINDO®. Na segunda aula, os grupos devem comparar suas soluções, discutir as diferenças e refletir sobre os aspectos sustentáveis e estratégicos das decisões tomadas.

Neste âmbito, os objetivos de ensino que se apresentam são: desenvolver a capacidade de formular modelos de Programação Linear a partir de dados e restrições empresariais; aplicar ferramentas quantitativas – como exemplo o Solver do Excel® ou LINDO® – para maximizar os resultados sob restrições de recursos; estimular o pensamento sistêmico e sustentável na tomada de decisão; fomentar a integração entre áreas organizacionais e a análise crítica de conflitos de interesse internos; e, promover o aprendizado ativo por meio da análise de um problema que espelha a realidade.

5.3 BASE TEÓRICA PARA DISCUSSÃO

A fundamentação teórica do caso apoia-se em três eixos interdependentes: a) Programação Linear e Pesquisa Operacional como ferramenta matemática para a alocação ótima de recursos e da análise de sensibilidade (Hillier & Lieberman, 2021; Taha, 2017; Winston, 2022); b) Gestão de Operações e Logística com o foco em capacidade produtiva, gargalos, planejamento e integração interdepartamental (Chopra & Meindl, 2021; Slack et al., 2023); c) Sustentabilidade na Manufatura, propiciando articular eficiência energética, inovação tecnológica e responsabilidade socioambiental na indústria 4.0 (Ahluwalia, 2025; Baumber, 2022; Khan et al., 2021; Pereira et al., 2021).

Essas bases teóricas permitirão que o docente promova um diálogo interdisciplinar entre otimização quantitativa e gestão sustentável, destacando o valor da modelagem como instrumento de racionalidade e colaboração organizacional.

5.4 SUGESTÃO DE DINÂMICA PARA APLICAÇÃO DO CASO DE ENSINO EM SALA DE AULA

Para a aplicação do presente caso estima-se uma carga horária total de 1h40, distribuída em duas aulas sequenciais de 50 minutos cada.

Na primeira aula, o professor deve iniciar com uma leitura orientada de cerca de dez minutos, apresentando aos alunos o contexto do caso, a situação de crise enfrentada e a estrutura geral dos dados fornecidos. Em seguida, durante quinze minutos, os estudantes — organizados em grupos — devem identificar as variáveis e restrições que compõem o problema, reconhecendo os elementos essenciais para a construção do modelo matemático. Nos quinze minutos subsequentes, cada grupo deverá elaborar a função objetivo e as restrições de Programação Linear correspondentes, discutindo internamente suas hipóteses e justificativas. Para encerrar a primeira parte, o professor deverá dedicar dez minutos à configuração inicial do Solver do Excel®, demonstrando os principais parâmetros e orientando a interface básica do *software*. Ou deverá fazer esta demonstração no LINDO®, ou em ambos. Logo, frisa-se, que este caso exige conhecimentos prévios dos alunos em relação aos referidos *softwares*.

Na segunda aula, também de cinquenta minutos, os grupos deverão apresentar suas soluções iniciais durante os quinze minutos iniciais, expondo a combinação de produtos e de recursos que considerarem mais adequada. A partir dessas apresentações, o professor conduzirá uma discussão coletiva de aproximadamente vinte minutos, comparando os resultados entre os grupos e promovendo o debate sobre as limitações energéticas, logísticas e de sustentabilidade

evidenciadas nas decisões. Por fim, nos quinze minutos finais, deverá ser realizado o encerramento e a reflexão, momento em que o professor apresentará a solução de referência – não descrita nesta versão por causa da limitação de páginas – e conduzirá o fechamento conceitual, relacionando os resultados obtidos às teorias de otimização e sustentabilidade abordadas.

Para aprofundar o debate em sala, recomenda-se que o professor utilize perguntas que estimulem a análise crítica, a integração interdisciplinar e o raciocínio ético, tais como as seguintes questões: Quais seriam os impactos estratégicos e de imagem caso a empresa priorizasse apenas o produto mais rentável? Como o modelo de Programação Linear ajudará a equilibrar decisões de produção, marketing e logística? A restrição energética poderia ser transformada em vantagem competitiva? De que forma? O que muda se a empresa decidir investir em energia solar própria? Como a limitação logística reflete os desafios do *e-commerce* sustentável no Brasil? O modelo apresentado é suficiente para lidar com a complexidade do problema? Quais fatores intangíveis ficaram de fora da análise matemática? Que tipo de liderança é necessária para transformar o uso de dados em cultura organizacional?

Tais questionamentos possibilitarão que o caso seja explorado sob diferentes perspectivas — técnica, estratégica e ética — promovendo uma aprendizagem ativa e reflexiva.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo, que segue o modelo de Caso de Ensino, evidenciou como a Programação Linear pode ser aplicada de forma prática na gestão de operações, permitindo equilibrar objetivos econômicos, produtivos e ambientais em contextos de restrição de recursos. A análise requerida integra produção, marketing e logística, exigindo não apenas diálogo, mas também instrumentos quantitativos que tornem visíveis os impactos de cada decisão sobre o desempenho global da organização. Além disso, a solução alcançada com a modelagem e solução — um lucro máximo de R\$402.000 dentro dos limites energéticos e logísticos — demonstrará aos alunos que a racionalização de recursos pode coexistir com os princípios de sustentabilidade quando acompanhada por uma gestão colaborativa e orientada por dados.

Sob a perspectiva pedagógica, o caso aproxima os estudantes da realidade das pequenas e médias empresas brasileiras, incentivando o desenvolvimento de competências analíticas, sistêmicas e éticas. Para tanto, ao propor que o aluno vivencie o papel da gestora diante de um dilema realista, o exercício promove o aprendizado ativo e interdisciplinar, integrando os conceitos de Pesquisa Operacional, Sustentabilidade e Gestão de Operações. Desta forma, o caso reforça que o uso de modelos matemáticos não se limita ao cálculo, mas constitui uma ferramenta estratégica para decisões responsáveis, colaborativas e alinhadas às demandas da indústria sustentável contemporânea.

REFERÊNCIAS

- Ahluwalia, K. (2025). *Sustainable Supply Chain Management*. Delhi: Educohack Press.
- Baumber, A. (2022). Transforming sustainability education through transdisciplinary practice. *Environment, Development and Sustainability*, 24(7), 7622-7639.
- Chopra, S., & Meindl, P. (2021) *Supply Chain Management: strategy, planning, and operation*. 8.ed. Pearson.
- Colin, E. C. (2018). *Pesquisa operacional: 170 aplicações em estratégia, finanças, logística, produção, marketing e vendas*. (2a ed.). São Paulo: Atlas.
- Hillier, F. S. & Lieberman, G. J. (2013). *Introdução a pesquisa operacional*. 9. ed. Porto Alegre: AMGH.

- Khan, I. S., Ahmad, M. O., & Majava, J. (2021). Industry 4.0 and sustainable development: A systematic mapping of triple bottom line, circular economy and sustainable business models perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126655. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126655>
- Pereira, M. A. V., Moreira, M. A., Martins, C. M., & da Costa de Moura, B. V. (2021). Gestão Socioambiental em Pequenas e Médias Empresas. *Revista De Gestão - RGSA*, 15, e02731. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v15i2.2731>
- Slack, N., Brandon-Jones, A., & Burgess, N. (2023) *Administração da Produção*. 10. ed. São Paulo: Atlas.
- Taha, h. A. (2017) *Pesquisa operacional: uma introdução*. 10. Ed. São Paulo: Pearson.
- Winston, W. L. (2022) *Operations Research: applications and algorithms*. 4. ed. Boston: Cengage Learning.