

PLANEJAMENTO DE VENDAS E OPERAÇÕES BASEADO EM OTIMIZAÇÃO NA PRODUÇÃO DE BIOPRÓTESES CARDÍACAS: ESTUDO DE CASO EM UMA INDÚSTRIA DA SAÚDE¹

Ana Luiza V. A. Vasconcelos^a, Lígia de Castro B. Soares^b, João Flávio de F. Almeida^{c*}

^a Departamento de Engenharia Industrial, Usiminas (Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais)
Av. Pedro Linhares Gomes, 5431, Ipatinga, MG, Brasil. CEP: 35160-900

^b Departamento de Transformação e Gestão Corporativa, Localiza & CO.
Av. Bernardo de Vasconcelos, 377, Belo Horizonte, MG, Brasil. CEP: 31150-900

^c Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, MG, Brasil. CEP: 31270-901

Recebido 20/06/2025, aceito 18/01/2026

RESUMO

Este estudo investiga o Planejamento de Vendas e Operações (S&OP) em uma indústria de dispositivos médicos, área ainda pouco explorada na literatura de planejamento integrado na saúde. Além do baixo uso de modelos analíticos, a pesquisa identificou lacunas relacionadas ao desalinhamento entre áreas, marcado por dados dispersos, estoques excessivos e baixa coordenação tática. Valida-se, portanto, uma abordagem flexível de otimização que conecte a estratégia corporativa às operações, ampliando a capacidade analítica e decisória da empresa. Por meio de um estudo de caso, o método modela toda a cadeia de suprimentos, incluindo fornecedores, produção, capacidade, demanda e transporte, permitindo simular cenários como variações de demanda, balanceamento produtivo e expansão do fornecimento. Os resultados indicam maior eficiência operacional, uso mais equilibrado da capacidade, identificação de gargalos e melhoria financeira, incluindo aumento de 14% na margem de contribuição. A abordagem proposta fortalece o S&OP e eleva a maturidade do planejamento integrado na saúde.

Palavras-chave: Planejamento de vendas e operações, Indústria da saúde, Otimização da cadeia de suprimentos.

ABSTRACT

This study examines Sales and Operations Planning (S&OP) in a medical device company, a topic that remains understudied in the field of integrated healthcare planning. The research identified gaps caused by cross-functional misalignment, dispersed data, excess inventory, and weak tactical coordination, as well as the limited use of analytical models. We validate a flexible optimization approach that links corporate strategy to operations, consequently expanding the firm's analytical and decision-making capacity. Evaluating case study, we modeled their full supply chain, including suppliers, production, demand, and transportation. This enables scenario simulations, such as variations in demand, balancing production, and expanding the supply. The results demonstrate increased operational efficiency, balanced capacity utilization, identification of bottlenecks, and financial gains, including a 14% increase in contribution margin. This approach strengthens S&OP and raises the maturity level of integrated planning in healthcare.

Keywords: Sales and operations planning, Healthcare industry, Supply chain optimization.

* Autor para correspondência. E-mail: joao.flavio@dep.ufmg.br
DOI: <https://doi.org/10.4322/PODes.2026.002>

1. Introdução

O aumento do interesse pelo Planejamento de Vendas e Operações ou S&OP (do inglês, *Sales and Operations Planning*), tem ocorrido nos últimos anos como estratégia de empresas sobressaírem os concorrentes em uma aposta na integração do planejamento de suas atividades. O método permite equilibrar demanda e oferta pelo alinhamento integrado de planos para apoiar as decisões (Lapide, 2004; Thomé et al., 2012) e tem sido aplicado em diversas organizações, inclusive empresas de produção de itens hospitalares e a área de saúde, de forma geral. Por meio de um estudo de caso, esta pesquisa avalia uma empresa de dispositivos médicos situada em Contagem, Minas Gerais, propondo um planejamento de otimização para apoiar o seu S&OP.

Sob o aspecto metodológico, este estudo propõe e valida um modelo quantitativo de otimização integrado ao processo de S&OP. O modelo conecta decisões estratégicas, táticas e operacionais em um único arcabouço analítico, adequado às especificidades da indústria da saúde. A formulação incorpora simultaneamente demanda, produção e suprimentos para avaliar as capacidades produtivas e restrições regulatórias. Também permite simular múltiplos cenários de negócio, como variações de demanda, ajustes de gargalos produtivos e limitações de fornecimento. A abordagem amplia a robustez do planejamento ao oferecer uma ferramenta flexível para análise de trade-offs, avaliação de alternativas operacionais. Assim, fornece suporte a decisões interfuncionais e contribui para reduzir a lacuna metodológica no setor de dispositivos médicos, onde modelos de pesquisa operacional ainda são pouco explorados.

A empresa analisada nesta pesquisa é do ramo de saúde, particularmente, de manufatura de dispositivos médicos implantáveis (DMIs). Dispositivos, ou tecidos, são inseridos no corpo ou sob a pele do paciente, em sua maioria com o objetivo de substituir um membro ou uma parte do organismo. Outros dispositivos liberam medicação, monitoram funções corporais ou dão suporte a tecidos e órgãos, como, por exemplo, stents cardíacos, marca-passos, cardio-desfibriladores, próteses e órteses, placas e parafusos. Localizada em Minas Gerais, Brasil, a indústria de médio porte possui 200 funcionários, opera há mais de 40 anos, desenvolveu um portfólio variado de produtos biotecnológicos e atua no desenvolvimento e prototipagem de novos produtos, com foco em biopróteses para o coração, na manufatura e na comercialização, conforme normas de operação e sob certificações ISO. Os produtos são exportados para vários países. As biopróteses para o coração são compostas por material biológico de origem animal, podendo ser bovino ou porcino e, por vezes, com material não sintético acoplado. Os produtos confeccionados são delicados e sensíveis. Sua produção é predominantemente manual, ou seja, existem poucas máquinas, e por isso, a organização segue rigorosas políticas de limpeza, higiene e paramentação em suas instalações, principalmente dentro da área de produção.

O setor de produção de itens hospitalares foi particularmente afetado durante a pandemia. Neste período, a empresa enfrentou um grande desafio, quanto a necessidade de equilibrar a capacidade produtiva com as variações de demanda do mercado, devido à suspensão de cirurgias eletivas. Para manter-se ativa e mais competitiva, a empresa revisita e reestrutura seu processo de Planejamento de Vendas e Operações.

Os desalinhamentos funcionais identificados foram os tradicionais conflitos interfuncionais, com dados dispersos em planilhas eletrônicas dessincronizadas, como visto em Shapiro (1977), pela falta de um plano único. Como consequência, são manufaturados produtos em volume muito superior à demanda, sendo mantidos altos níveis de estoques e estabelecidos altos valores para o estoque de segurança. Por não haver um planejamento do nivelamento da produção, como forma de ganhar flexibilidade diante das variações inesperadas nos pedidos recebidos, a empresa não consegue atender aos pedidos dos clientes de forma satisfatória, e o ritmo de produção é caracterizado pela alternância entre ociosidade e uso total da capacidade produtiva, o que requer o aprofundamento de pesquisas no setor.

Este estudo fundamenta-se na literatura de S&OP enquanto mecanismo central de alinhamento tático entre planos de demanda, operações e finanças (Thomé et al., 2012; Lapide, 2004). Embora amplamente consolidado em setores industriais, evidências mostram que sua aplicação na

saúde permanece limitada, com baixo uso de métodos analíticos e de otimização para apoiar decisões integradas (Mesquita, 2001; Hansen et al., 2023). Pesquisas recentes demonstram o potencial do S&OP para elevar previsibilidade, coordenação interfuncional e desempenho operacional em hospitais, indústrias farmacêuticas e cadeias biomédicas (Keal e Hebert, 2010; Alvekrans et al., 2016; Cardoso, 2019). Contudo, tais estudos são pontuais e carecem de modelagens abrangentes que integrem decisões de suprimento, capacidade de produção e distribuição. Ao posicionar-se nessa lacuna, este trabalho avança o estado da arte, sendo (i) o primeiro modelo matemático de S&OP otimizado aplicado especificamente a dispositivos médicos implantáveis de tecido animal (biopróteses cardíacas); (ii) avança em relação a Almeida et al. (2018) ao incorporar restrições reais do setor saúde que não existiam no modelo original (refugo elevado, gargalo de esterilização, matéria-prima biológica perecível, produção quase totalmente manual); (iii) supera os trabalhos anteriores na saúde (Keal e Hebert, 2010; Alvekrans et al., 2016; Cardoso, 2019) por apresentar um modelo linear inteiro misto resolvido na otimalidade, com impacto financeiro mensurado, abrindo caminho para futuras extensões naturais, como balanceamento detalhado de linhas manuais, inclusão explícita de lead-time de quarentena/esterilização, seleção de fornecedores com critérios de qualidade regulatória, ou seja, um contexto ainda pouco explorado.

Dentre as seções subsequentes desta pesquisa, a Seção 2 descreve a fundamentação teórica sobre S&OP e suas aplicações na saúde. A Seção 3 descreve o modelo matemático utilizado. A Seção 4 discute os resultados do estudo de caso a partir dos dados levantados. Por fim, a Seção 5, apresenta as considerações finais, limitações do trabalho e direções de pesquisas futuras.

2. Revisão da Literatura

O S&OP concilia as perspectivas de *alinhamento vertical, ou intra-funcional*, que se refere à configuração de estratégias, objetivos, planos de ação por vários níveis de uma função da organização, e o *alinhamento horizontal, ou inter-funcional*, que faz o balanceamento de decisões entre as funções de mesmo nível hierárquico de alto-escalão na empresa. Assim, o S&OP articula diversos planos dentro da organização, situando-se no nível tático da hierarquia de planejamento, na medida em que realiza a conexão dos planos estratégicos e de operações Thomé et al. (2012).

O processo de S&OP reúne os planos de vendas, *marketing*, desenvolvimento, produção, suprimento e financeiro em um conjunto integrado de planos do negócio. É realizado pelo menos uma vez por mês e é revisado pela gestão em nível agregado (família de produtos).”Essa periodicidade é importante, porque “executado adequadamente, o processo de planejamento de vendas e operações vincula os planos estratégicos do negócio com sua execução e revisa as medidas de desempenho para melhoria contínua”. Cox e Blackstone (2002)

A metodologia é realizada pelo menos uma vez por mês e é revisada pela gestão considerando dados agregados, como família de produtos (Cox e Blackstone, 2002) tendo dois lados: um *hard*, consistindo em procedimentos formais, cronogramas, dados e desempenho, e outro *soft*, consistindo em uma cultura comum, compromisso, confiança e colaboração (Tuomikangas e Kaipia, 2014). O método pode ser descrito em entrada, processos e saída.

As *entradas* do S&OP correspondem aos planos (ou rascunho dos planos) de diferentes áreas, como demanda, vendas e produção, compras, suprimentos, distribuição e finanças. São apresentados uma previsão de demanda, normalmente embasada em métodos estatísticos a fim de preservar sua imparcialidade, e rascunhos dos planos de oferta. Também são consideradas restrições relativas à capacidade de produção, transporte e restrições orçamentárias.

Os *processos* incluem *reuniões periódicas*, *sistemas de informação* e o *planejamento*. Os executivos empoderam os participantes para tomarem decisões sobre seus respectivos setores, baseando-se em conhecimentos, experiência e nas interações com outros membros. De forma geral, adotam-se três reuniões. A primeira reunião estabelece um plano de previsão de demanda irrestrita. A segunda define um alinhamento do plano de oferta com o plano de demanda restrito.

A terceira reunião é realizada para refinar os planos de oferta e demanda, incluindo os planos de marketing e vendas, de operações e finanças. Os planos são implementados em sistemas de TI (softwares), porém, nos estágios iniciais, é melhor utilizar planilhas simples e focar a maioria do esforço em fortalecer o processo formal de S&OP. Quando o processo se torna maduro, recomenda-se o uso de modelos mais sofisticados vinculados a painéis integrados para apoio às reuniões de S&OP (Grimson e Pyke, 2007). Os modelos são desenvolvidos e customizados a ambientes de produção *make-to-stock* (Almeida et al., 2022), *make-to-order* (Lalmazloumian et al., 2016), ou *engineer-to-order* (Carvalho et al., 2015, 2016a). O planejamento é acompanhado por métricas, como níveis de estoque, previsão de demanda e de pedido, fluxo de caixa, tempo de abastecimento, capacidade de produção, utilização de recursos, a produtividade, pontualidade e confiabilidade de entrega, atrasos e nível de serviço aos clientes.

As *saídas* do método são o melhor atendimento da demanda, redução de estoques e minimização de custos operacionais pela integração dos planos de marketing, vendas e operações (Lapide, 2004; Thomé et al., 2012).

As empresas podem avaliar a qualidade do seu S&OP em níveis de maturidade baseando-se em parâmetros que servem como referência para localizarem o estágio em que se encontram e as etapas que devem percorrer para melhorarem o processo de S&OP. Os estágios de maturidade do S&OP das empresas variam do nível mais embrionário até o mais avançado, como, por exemplo, os estágios marginal, rudimentar, clássico e ideal (Grimson e Pyke, 2007; Thomé et al., 2012; Vereecke et al., 2018). Em geral, o primeiro passo de identificação do nível de maturidade de uma empresa consiste na avaliação do processo de S&OP *as-is*, isto é, como ele ocorre no momento presente, para em seguida compará-lo ao processo ideal, a fim de identificar oportunidades de melhoria. Depois é preciso desenvolver um *roadmap* para definir em que momento cada iniciativa será realizada, considerando-se o custo/benefício das mudanças no processo e das tecnologias a serem implementadas (Lapide, 2005). As empresas que se envolveram na implantação de um processo de S&OP ultrapassaram o desempenho daquelas que não o utilizam, ou o adotam apenas parcialmente (Lapide, 2004; Oliva e Watson, 2011; Arola, 2024). Os mecanismos de redes e comunicação criados entre setores e funções se mostraram relevantes, promovendo o alinhamento interno dentre os diversos indicadores de desempenho.

Nesse sentido, modelos, como o desenvolvido em Almeida et al. (2018), contribuem para aumentar a flexibilidade da organização em toda a cadeia de suprimentos considerando planos de negócios com objetivos conflitantes. O estudo faz uma análise do *trade-off* entre variabilidade da demanda e níveis de serviço para diferentes cenários de oferta, produção e distribuição. A flexibilidade de oferta examina a estratégia de comprar o produto acabado diretamente do fornecedor. A flexibilidade de fabricação, no caso, corresponde à redução de custos fixos de máquinas e horas extras em uma das plantas industriais e aumento da produção na outra. A flexibilidade de distribuição avalia uma redução no custo logístico para um dos modais e um aumento no nível de estoque de segurança nos centros de distribuição. Os resultados mostram um conflito entre a variabilidade da demanda e o nível de serviço. O principal benefício da aplicação do modelo, quando comparado a outras abordagens, é demonstrar o impacto das mudanças de cada elemento no lucro esperado, proporcionando uma visão holística aos gestores, ao considerar a cadeia de suprimentos como um todo. Assim, a abordagem adotada é utilizada como referência para o estudo de caso desta pesquisa, por proporcionar agilidade na elaboração de um plano unificado e na análise de cenários e para a tomada de decisões estratégicas em caso de imprevistos.

Embora o S&OP seja amplamente adotado em diversos setores industriais, como em Wang et al. (2012); Ivert e Jonsson (2014); Ivert et al. (2015); Carvalho et al. (2016b); Almeida (2015); Almeida e Conceição (2021); Almeida et al. (2022); Fakhry et al. (2024), e analisado em revisões de literatura, como em Kalla et al. (2025); Fakhry et al. (2025), sua aplicação no campo da saúde permanece notadamente limitada. Mesquita (2001) e Hansen et al. (2023) apontam que modelos analíticos de pesquisa operacional e estatística são pouco explorados no planejamento da produção de organizações do setor saúde, incluindo a indústria farmacêutica. Uma revisão recente

sobre planejamento integrado em hospitais utilizando métodos de Pesquisa Operacional e Ciências de Decisão reforça essa lacuna (Rachuba et al., 2024). Apesar disso, as pesquisas demonstram o potencial do S&OP na área. Ramberg e Elsnitz (2023) propõe modelos para diagnosticar a maturidade do planejamento integrado em organizações de saúde. Keal e Hebert (2010) aplicaram o conceito no gerenciamento de bancos de sangue na América do Norte e no Reino Unido, alcançando maior cooperação operacional, previsões mais precisas e elevação dos níveis de serviço. No setor hospitalar filantrópico, Çökelez (1996) desenvolveu um modelo de otimização S&OP que aumentou a consciência de custos, promoveu eficiência operacional e integrou produção e marketing, sugerindo inclusive a fabricação interna de produtos médicos para redução de custos e melhoria da qualidade. Outra aplicação relevante ocorreu em um grande hospital universitário sueco, onde o S&OP equilibrou a capacidade de múltiplos recursos com a demanda flutuante (Alvekrans et al., 2016). No Brasil, Cardoso (2019) destacam que a adaptação do S&OP a serviços hospitalares é altamente promissora, especialmente em hospitais universitários, com ganhos esperados como maior nível de atendimento ao paciente, melhor equilíbrio entre recursos alocados e ocupação da capacidade instalada, e maior comprometimento das equipes em decisões táticas. Mais recentemente, Djojopoespito (2025) aplicaram o S&OP na indústria de vacinas, obtendo maior coordenação entre linhas de produção, suprimentos e gestão da demanda, além de redução significativa de paradas de máquinas. Esses casos, embora ainda isolados, evidenciam que o S&OP pode desempenhar papel estratégico na elevação da eficiência, da coordenação interfuncional e da qualidade assistencial no ecossistema da saúde.

Apesar dos avanços citados, nenhum trabalho anterior apresentou um modelo matemático de otimização aplicado à produção de dispositivos médicos implantáveis de tecido biológico. A Tabela 1 posiciona o presente estudo em relação aos principais trabalhos quantitativos de S&OP no setor saúde e correlatos, destacando suas contribuições e lacunas preenchidas.

Tabela 1: Resumo da literatura de abordagens por S&OP aplicados à saúde

Referência	Contexto	Restrições	Análise frente ao artigo proposto
Çökelez (1996)	Hospital filantrópico	Orçamento limitado	Uma das primeiras tentativas; modelo muito simplificado.
Keal e Hebert (2010)	Bancos de sangue (UK, USA)	Validade curta, sazonalidade	Primeiro S&OP na saúde, mas sem otimização matemática.
Alvekrans et al. (2016)	Hospital universitário (Suécia)	Capacidade compartilhada	Viabilidade prática do S&OP, porém sem modelo formal de otimização.
Almeida et al. (2018)	Indústria multi-plantas	Flexibilidade de suprimento, manufatura e logística	Modelo-base (genérico). Não trata refugo biológico nem gargalos regulados de esterilização.
Cardoso (2019)	Hospitais universitários (Brasil)	Incerteza alta, regulação pública	Única referência brasileira anterior; apenas qualitativa.
Djojopoespito (2025)	Indústria de vacinas	Lotes mínimos, setups de limpeza	Mais próximo (biológico), mas não usa otimização. Processo automatizado.
Este estudo	Biopróteses cardíacas (DMIs)	Refugo biológico alto, esterilização, montagem manual, fornecedores limitados	MILP tático para DMIs de tecido biológico.

Fonte: Elaborada pelos autores.

3. Método e Análise de Dados

O modelo proposto considera os principais aspectos envolvidos na cadeia de suprimentos, incluindo resultados financeiros e operacionais, conferindo-lhe flexibilidade diante de diferentes cenários. Para representar a empresa analisada, descrevemos os elementos de sua cadeia de suprimentos, como fornecedores, clientes e modais de transporte, produtos, como matéria-prima

e produto acabado, processos de produção e estoque, assim como parâmetros financeiros, como preço de venda e custos.

A empresa do ramo de saúde analisada manufatura DMIs. Esses dispositivos, ou tecidos, são inseridos dentro do corpo ou sob a pele do paciente, para substituir um membro ou uma parte do organismo. Outros liberam gradativamente medicação, monitoram funções corporais ou proveem suporte a tecidos e órgãos. Stents, marca-passos, cardiodesfibriladores, próteses e órteses, placas e parafusos são alguns exemplos. A companhia foca na produção de biopróteses para o coração, que são compostas por material biológico de origem animal, podendo ser bovino ou porcino e, por vezes, possuem um material não sintético acoplado. Por serem produtos diretamente relacionados à saúde de seres humanos e fabricados com o objetivo de serem implantados, a empresa segue rigorosas políticas de higiene e paramentação em suas instalações, principalmente dentro da área de produção. Os produtos são exportados para vários países.

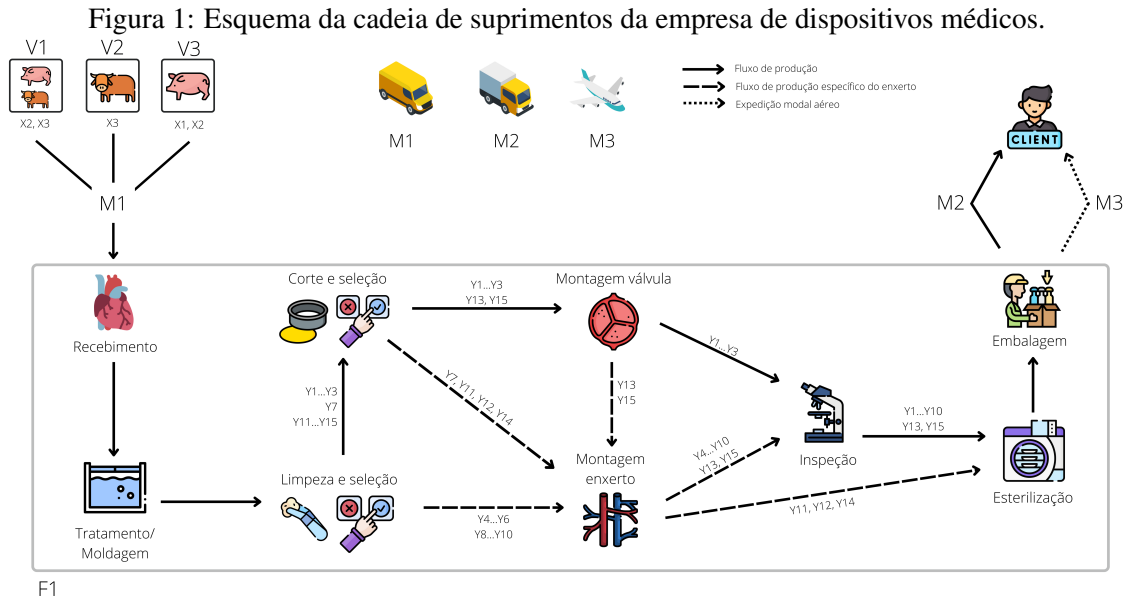
Os clientes são, em sua maioria, hospitais das redes públicas e privadas, que são compradores fixos da empresa. Para garantir os insumos necessários à operação, a empresa utiliza os modais rodoviário e aéreo. Os modais envolvidos na logística de envio dos produtos acabados aos clientes estão fragmentados em 45% aéreo e 55% rodoviário. O meio de transporte é escolhido e pago pelos clientes, sendo de responsabilidade da empresa entrar em contato com o fornecedor do modal, contratá-lo e garantir que o envio será realizado dentro do prazo estipulado, o que implica uma capacidade de transporte infinita de produtos acabados, visto que não ocorre limitação da quantidade de produtos que podem ser entregues por modal.

Não há armazéns e centros de distribuição, de modo que a fábrica é a única instalação em que os produtos são armazenados e retirados para envio. Para o recebimento da matéria-prima na unidade fabril, o transporte utilizado é o rodoviário. Considera-se que a matéria-prima principal é o material biológico adquirido dos frigoríficos e que o transporte desse material é realizado exclusivamente por uma van própria da empresa de DMIs.

Considerando o volume de material adquirido, a empresa possui cinco principais fornecedores de matéria-prima biológica. Como estratégia de agregação dos dados, considera-se que estes fornecedores podem ser agrupados em três classes, de acordo com o tipo de material ofertado. Analogamente, a matéria-prima foi agregada considerando os principais insumos biológicos adquiridos. Os produtos apresentam uma estratégia de agregação diferente. As válvulas foram agregadas pelos três modelos, desconsiderando as variações mitral ou aórtica. Os enxertos, por sua vez, não foram agregados, por possuírem muitas particularidades, sendo considerados individualmente.

Assim, seja V o conjunto de fornecedores, F_1 representando a fábrica, C , o conjunto de clientes. Estes conjuntos podem ser agrupados em um conjunto maior L , que representa, portanto, as localizações dos elementos da cadeia de suprimentos. Seja M o conjunto de modais de transporte adotado, X , o conjunto de matérias-primas, Y , o conjunto de produtos acabados, e P , um conjunto genérico de produtos, ou seja, $P = X \cup Y$. Ademais, seja R_f o conjunto de recursos da fábrica, L_{VF} o conjunto de links fornecedores-fábricas, L_{FC} o conjunto de links fábricas-consumidores e L_K o superconjunto de links, ou seja, $L_K = L_{VF} \cup L_{FC}$. Os modais são representados por $M_1...M_3$. Os produtos são armazenados na indústria, e de lá retirados para envio. Por fim, seja T os períodos do horizonte de planejamento.

Como estratégia de agregação dos dados, considera-se que fornecedores podem ser agrupados em três classes ($V_1...V_3$), de acordo com o tipo de material ofertado. Analogamente, a matéria-prima foi agregada em $X_1...X_3$ considerando os principais insumos biológicos adquiridos. Os produtos apresentam uma estratégia de agregação diferente em $Y_1...Y_{15}$. As válvulas foram agregadas pelos três modelos, desconsiderando as variações mitral ou aórtica. Os enxertos, por sua vez, não foram agregados, por possuírem muitas particularidades, sendo considerados individualmente. A Figura 1 ilustra a cadeia de suprimentos da empresa.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Produtos: O principal material biológico utilizado para produção de biopróteses é o pericárdio, uma membrana resistente que envolve o coração de bois ou porcos, neste caso. As válvulas são compostas por pericárdios unidos a uma parte sintética, denominada *stent*, que pode ser feito de diferentes materiais, como nitinol ou até mesmo plástico. Os *patches*, por sua vez, consistem apenas em tiras de pericárdio. O pericárdio é obtido por meio da compra em frigoríficos e chega até a fábrica em lotes de tamanhos variados, dependendo da quantidade de animais abatidos. Este material chega fresco, sob condições adequadas de temperatura e armazenamento, e precisa ter seu processamento iniciado rapidamente. Pelo fato da matéria-prima principal de origem biológica, há muitas variações em suas características e parâmetros de qualidade e, como consequência, ocorrem muitos refugos ao longo das etapas de produção. Portanto, considera-se que os principais componentes são as válvulas porcinas, o pericárdio porcino e o pericárdio bovino. A matéria-prima é utilizada para a manufatura de 15 produtos, sendo eles 3 válvulas ($Y_1...Y_3$) e 12 enxertos ($Y_4...Y_{15}$).

Fornecedores: Os produtos acabados são exclusivos da empresa, com projetos e processos próprios. Nos fornecedores adquire-se somente a matéria-prima. A disponibilidade de materiais foi definida com base no registro histórico fornecido pela empresa, no qual constam as quantidades adquiridas de cada fornecedor, tendo como recorte o ano de 2021. Considerando a compra de quantidades próximas do máximo da capacidade dos fornecedores, a disponibilidade de material para cada fornecedor foi assumida como a maior quantidade adquirida no ano para cada material. A lista de materiais para cada produto foi atualizada com as taxas de aproveitamento dos materiais em cada processo. Assim, foram identificados os componentes e as quantidades necessárias para a manufatura dos produtos. No entanto, o volume de material descartado é grande, devido à própria característica biológica dos componentes, obtidos a partir de animais abatidos.

Produção e estoque: A produção é caracterizada como *make-to-stock*, uma vez que ocorre com base em previsões de vendas, que determinam quais e quantos produtos devem ser produzidos para estoques. Há nove principais etapas que compõem o processo de fabricação: recebimento (RCB), tratamento/moldagem (TRT), limpeza (LPZ), corte e seleção (CES), montagem de válvula (MOV), montagem de enxerto (MOE), inspeção (INS), esterilização (EST), e embalagem (EMB), como mostra a Figura 1. Os produtos possuem diferentes rotas, mas todos passam inicialmente

pelo RCB, seguida das etapas de TRT e LPZ. A empresa tem adotado uma política de estoque de segurança equivalente a dois meses de produção, estabelecida com base no tempo de atravessamento do produto, que engloba o momento de chegada da matéria-prima, seu período de limpeza e tratamento, o tempo despendido para corte e seleção do material, a confecção manual da válvula ou enxerto, sua inspeção e esterilização e, por fim, seu período de quarentena para posterior envio ao cliente.

Demanda: A empresa estudada possui um registro histórico de vendas que se inicia em 2012, permitindo a análise de variações de demanda ao longo de pelos menos dez anos. Assim, obteve-se a média desses valores ao longo dos períodos para, assim, projetar um cenário de demanda factível para os anos subsequentes.

Preços e custos: O nível de maturidade S&OP da empresa ainda é embrionário, assim, os cálculos de custos ainda precisam de refinamento. O custo do transporte de produtos acabados é pago pelos clientes. Este último depende do custo unitário de produção de cada produto acabado, fornecidos pela empresa. Assim, o custo variável de produção abrange o custo da mão de obra direta e dos insumos necessários à produção de cada produto, como soluções, agulhas, fios e embalagens. Para determinar o custo da capacidade excedida, foi considerado que, para a ativação da capacidade extra de cada recurso, são envolvidas horas extras de trabalho das operadoras. De posse dessas informações, definimos os seguintes parâmetros e variáveis do modelo.

D_{tpc} : Demanda do cliente c pelo produto p no período t ;

RW_{ry} : Se o recurso r faz parte do produto y ;

EF_{rt} : Eficiência do recurso r no tempo t ;

TL_{pt} : Tamanho do lote do produto p no tempo t ;

LM_{xy} : Lista de materiais, i.e., a quantidade de x para produzir y ;

MC_{rp} : Capacidade do recurso r para produzir o produto acabado p ;

HD_t : Horas disponíveis em cada período t ;

NP_r : Número de pessoas em cada recurso r ;

PM_{rt} : Manutenção preventiva no recurso r e período t ;

RP_r : Rendimento (percentual) do processo r ;

CX_{rt} : Capacidade extra (em horas) do processo r ;

DM_{lpt} : Disponibilidade do produto p pelo fornecedor l no período t ;

EI_{lp} : Estoque inicial do produto p na localidade l ;

ES_{lpt} : Estoque de segurança do produto p na localidade l no período t ;

MS_{lpt} : Estoque máximo do produto p na localidade l no período t ;

CI_t : Capacidade de entrada de material no período t ;

CO_t : Capacidade de saída de produto acabado no período t ;

PV_p : Preço de venda do produto acabado p ;

TX_p : Taxa aplicada ao produto p ao ser vendido;

$R_p = PV_p - (1 - TX_p)$: Receita do produto p ao ser vendido;

CV_y : Custo variável de produção do produto acabado y ;

EX_r : Custo de utilizar a capacidade extra do recurso r ;

CS_p : Custo unitário de estoque do produto p ;

CA_{lx} : Custo de aquisição da matéria-prima x na localidade l ;

CT_{mli} : Capacidade do modal m de transportar produto de l para li ;

LC_{mli} : Custo do modal m transportar produto de l para li .

Adotamos as seguintes variáveis:

$ap_{pt} \in \mathbb{Z}^+$: Produção do produto p no período t ;

$rel_{pt} \in \mathbb{Z}^+$: Compra do componente p no local l no período t ;

$y_{rt} \in \{0, 1\}$: 1, Se o recurso r é ativado no período t , 0 caso contrário.

ar_{rpt} : Produção do produto p no recurso r no período t ;

bp_{pt} : Consumo do produto p no período t ;

sp_{lpt} : Nível de estoque do produto p no local l no período t ;

de_{lpt} : Demanda entregue do produto p no local l no período t ;

cc_{rt} : Capacidade utilizada do recurso r no período t ;

$ce_{rt} \in \{0, 1\}$: Ativação, ou não da capacidade extra do recurso r no período t ;

dn_{lpt} : Demanda não entregue do produto p no local l no período t ;

tx_{mpt}^{li} : Quantidade transportada do produto p de l para li pelo modal m no período t .

O objetivo (1) consiste em maximizar a margem de contribuição, i.e., receitas menos os custos variáveis. A receita é proveniente das demandas atendidas e entregues, deduzindo-se impostos ou taxas. Os custos envolvidos são os custos logísticos, custos variáveis de produção, custo de aquisição, que se refere ao custo de compra de cada matéria-prima e cada produto acabado por intermédio de um fornecedor, custo de ativação de uma capacidade extra, como em casos em que a carga horária habitual não é suficiente para atender a demanda e é financeiramente viável utilizar horas extras e custo de estoque, i.e., o custo de manter a matéria-prima e os produtos em estoque, que considera o custo unitário de armazenar cada produto, multiplicado pelo nível de estoque de cada produto.

$$\begin{aligned} \max \sum_{l \in C} \sum_{p \in Y} \sum_{t \in T} R_p de_{lpt} - \sum_{m \in M} \sum_{li \in LK} \sum_{p \in Y} \sum_{t \in T} LC_{mli} tx_{mpt}^{li} - \sum_{p \in Y} \sum_{t \in T} CV_p ap_{pt} \\ \sum_{l \in V} \sum_{p \in X} \sum_{t \in T} CA_{lp} rel_{lpt} - \sum_{r \in R_l} \sum_{t \in T} EX_r ce_{rt} CX_{rt} - \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} CS_p sp_{pt} \end{aligned} \quad (1)$$

A restrição (2) restringe a compra de matéria-prima à disponibilidade dos fornecedores em fornecer cada matéria-prima ou produto em cada período. No entanto, o modelo considera a existência de materiais em estoque, ou seja, um estoque inicial $sp_{lp} = EI_{lp} \quad \forall l \in L, p \in P$ para o período

$t = 1$. A restrição (3) garante que o estoque de matérias-primas e produtos acabados devem considerar os níveis de segurança dos estoques, mas atendendo a limitação de capacidade de armazenar os produtos na fábrica.

$$TL_{lp}re_{lpt} \leq DM_{lpt} \quad \forall l \in L, p \in P, t \in T \quad (2)$$

$$ES_{lpt} \leq spl_{lpt} \leq MS_{lpt} \quad \forall l \in L, p \in P, t \in T \quad (3)$$

A restrição (4) determina os fluxos de materiais nos períodos, considerando a quantidade transportada de produtos e matéria-prima, bem como as quantidades produzidas e adquiridas, o saldo em estoque, a demanda atendida e a quantidade consumida desta matéria-prima. As restrições (5) restringem as taxas de entrada e saída de matéria-prima e produtos acabados, respectivamente, de forma a respeitar a limitação de capacidade de transporte para entrada e saída.

$$\sum_{m \in M} \sum_{li \in LK} tx_{mpt}^{lil} + TL_{lp}ap_{pt} + spl_{lpt-1} + TL_{lp}re_{lpt} = \sum_{m \in M} \sum_{li \in LK} tx_{mpt}^{lli} + de_{lpt} + spl_{lpt} \quad \forall l \in L, p \in P, t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{li \in LK} \sum_{p \in Y} tx_{mpt}^{lil} \leq \min(CI_t, CO_t) \quad \forall t \in T \quad (5)$$

A restrição (6) determina quanto da capacidade de produção é utilizada, limitada à capacidade de produção. Essa limitação é definida pelas horas disponíveis totais de operação da fábrica, considerando que, para cada recurso, há um tempo determinado de horas para operar e que a capacidade extra pode ser utilizada. A restrição (7) faz com que a capacidade extra de um recurso não possa ser utilizada, caso esse recurso não seja ativado. A restrição (8) calcula quanto de matéria-prima será utilizado considerando a lista de materiais, o tamanho do lote de produção e a quantidade a ser produzida.

$$\sum_{p \in Y} \frac{ar_{rpt}RW_{rp}}{MC_{rp}} \leq ((HD_tNP_r - PM_{rt})(EF_{rt}RP_r))y_{rt} + ce_{rt}CX_{rt} \quad \forall r \in R_f, t \in T \quad (6)$$

$$ce_{rt} \leq y_{rt} \quad \forall r \in R_f, t \in T \quad (7)$$

$$bp_{p_i t} = \sum_{p \in Y} LM_{p_i p} TL_{lp} ap_{pt} \quad \forall p_i \in X, t \in T \quad (8)$$

A restrição (9) restringe a taxa de transporte de materiais à capacidade de transporte de cada modal e a restrição (10) calcula quanto da demanda não será entregue, a partir da demanda do mercado e da demanda atendida. As variáveis são não-negativas, exceto $ap_{pt}, re_{lpt} \in \mathbb{Z}^+, \forall l \in L, p \in P, t \in T$ e $y_{rt} \in \{0, 1\}, \forall r \in R_f, t \in T$. Adicionalmente, as variáveis de compras, produção, transporte, e entrega são restritas ao valor zero para domínios onde não podem operar, e.g., não pode haver compra de matéria-prima no cliente, assim, a variável de compra no cliente assume valor zero.

$$\sum_{p \in P} tx_{mpt}^{lli} \leq CT_{mlli} \quad \forall m \in M, l, li \in LK, t \in T \quad (9)$$

$$de_{lpt} = D_{tpl} - dn_{lpt} \quad \forall l \in C, \forall p \in Y, t \in T \quad (10)$$

A complexidade do modelo aumenta conforme o nível de detalhamento dos conjuntos de dados. Dessa forma, foi utilizada uma estratégia de agregação dos dados, a fim de facilitar seu tratamento e a modelagem do problema.

4. Resultados e Discussão

4.1. Configuração Experimental

O modelo foi implementado em GMPL e resolvido com o solver GLPK 5.0 em um computador Intel Core™ i7 1,80 GHz e 8 GB de RAM. O horizonte de planejamento abrange 12 meses (janeiro a dezembro de 2022), com agregação mensal. Todos os cenários foram resolvidos até otimalidade em menos de 30 segundos. Foram utilizados os dados reais da empresa relativos a 2021–2022, incluindo: (i) Demanda histórica de 2012–2021 (base para o cenário base); (ii) Capacidade real de cada etapa produtiva (9 etapas, 52 colaboradoras); (iii) Taxas de aproveitamento por etapa (refugo médio de aproximadamente 85–90 % no material biológico); (iv) Disponibilidade histórica dos três grupos de fornecedores de pericárdio; (v) Custos unitários reais (matéria-prima, mão de obra direta e indireta, horas extras, estoque); (vi) Preços de venda vigentes em 2022. Além do cenário com os dados reais, foram analisados mais três cenários:

Cenário 1: Variação de demanda de –40% a +40%;

Cenário 2: Balanceamento da capacidade de montagem de enxertos e válvulas;

Cenário 3: Duplicação da capacidade de fornecimento de cada tipo de matéria-prima.

4.2. Resultados Obtidos

Os resultados representam, portanto, uma cadeia de suprimentos com uma planta industrial, três grupos de fornecedores, três classes de matéria-prima (válvula porcina, pericárdio porcino e pericárdio bovino), 52 funcionárias no processo de produção e 15 produtos acabados, sendo os três primeiros válvulas e os demais enxertos. Como resultado financeiro do modelo executado a partir dos dados fornecidos pela empresa, obteve-se uma receita de R\$9.597.185,00, representando uma possibilidade de aumento de 25% em relação à receita, da qual foram subtraídos os custos logísticos, custos variáveis, custos de compras, custos de hora extra e custos de estoques. Dessa forma, a margem de contribuição totalizou R\$7.518.408,25, indicando que a companhia pode melhorar seu resultado em 14%. Os valores são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados do modelo no cenário base

Resultados financeiros (R\$ mil)		Resultados operacionais (unid.)	
Receita:	9.597,19	Compra:	38.911
Custo logístico:	3,13	Produção:	1.931
Custo variável de produção:	1.770,88	Estoque:	11.224
Custo compras:	80,29	Produção nas máquinas:	17.379
Custo horas extras:	0,00	Capacidade(%):	22,89
Custo estoques:	224,48	Entrega:	3.133
Margem de contribuição:	7.518,41	Não-entrega:	3.479

Fonte: Elaborada pelos autores.

No plano resultante, houve compra de matéria-prima em todos os períodos, sendo o total de 38.911 unidades equivalentes ao que é transportado e consumido, uma vez que o material biológico não pode ser estocado. A produção foi equilibrada ao longo do ano, totalizando 1.931 unidades, e o estoque foi mantido em grande volume: 11.224 unidades. A capacidade das etapas de recebimento, tratamento e limpeza é alta, devido ao baixo nível de complexidade operacional, o que faz com que cada tarefa seja realizada em um curto período. Como resultado, a utilização

da capacidade de seus recursos é baixa. A capacidade média utilizada dos recursos é equivalente a 22,89%. A demanda entregue é equivalente à quantidade de produto acabado transportado, 3.133 unidades. Há uma demanda não atendida, sobretudo do produto Y_{14} (enxerto para reparos cardíacos), porém os resultados indicam que não é financeiramente vantajoso utilizar horas extras para aumentar o volume de produção deste produto.

Diante destas e de outras possíveis alterações, o modelo de otimização do S&OP é a ferramenta indicada para realizar análise de cenários (Fruytier e Jensson, 2023). Assim, considera-se necessário que a empresa tenha recursos, flexibilidade e condições de planejamento para lidar com cenários variados. Para entender como seria o desempenho da companhia sob outras condições, além do cenário base, foram analisados 3 diferentes cenários, quais sejam: variação de demanda, balanceamento da capacidade de produção dos processos de montagem e expansão da capacidade de fornecimento de matéria-prima pelos fornecedores, em comparação com o cenário base, elaborado a partir dos dados reais fornecidos pelo setor de planejamento da produção.

Cenário 1: Alterações na demanda. O histórico de vendas da empresa indica que a demanda do mercado sofre oscilações naturais. Os clientes realizam pedidos com diferentes frequências e requerem diferentes quantidades de produtos. Assim, analisamos os resultados da variação percentual de -40% até 40% demanda. Os resultados indicam uma variação da margem de contribuição de R\$ 5 a 9 milhões, proporcional ao aumento da demanda. Analogamente, os resultados operacionais mostram que a demanda não-entregue também aumenta conforme o crescimento da demanda por cada produto, conforme as Tabelas 3 e 4. Percebeu-se também a alta ocupação de recursos, o que indica a existência de processos gargalos, como o de esterilização (EST) e montagem de enxertos (MOE), apresentados na Figura 2 e discutidos em seguida.

Tabela 3: Resultado financeiro conforme variação da demanda

Demanda	Receita (R\$ mil)	Custo logístico (R\$ mil)	Custo variável (R\$ mil)	Custo compras (R\$ mil)	Custo horas extras (R\$ mil)	Custo estoques (R\$ mil)	Custo fixo (R\$ mil)	Lucro operacional (R\$ mil)
-40%	7.084,72	3,31	1.535,49	73,32	0	268,50	8197,09	5204,10
-30%	7.893,17	2,86	1.580,62	78,50	0	253,28	8197,09	5977,91
-20%	8.414,53	2,95	1.636,01	79,33	0	244,60	8197,09	6451,64
-10%	8.987,66	3,03	1.698,83	79,62	0	231,12	8197,09	6975,07
Base	9.597,18	3,13	1.770,88	80,29	0	224,48	8197,09	7518,41
+10%	10.194,36	3,24	1.860	80,97	0,52	217,88	8197,09	8031,74
+20%	10.696,72	3,31	1.904,10	81,42	0,97	208,60	8197,09	8498,32
+30%	11.082,80	3,36	1.955,48	82,95	10,16	203,76	8197,09	8827,09
+40%	11.523,60	3,43	2.028,13	83,56	31,17	201,56	8197,09	9175,74

Fonte: Elaborada pelos autores.

Ao analisar o percentual da capacidade ocupada de cada recurso em cada período, identifica-se que a esterilização (EST) é um processo gargalo. No cenário base, a média anual da utilização da capacidade desse recurso foi de 88,81% e em 5 dos 12 meses do ano, a utilização foi próxima, senão igual, a 100%, como visto na Figura 2.

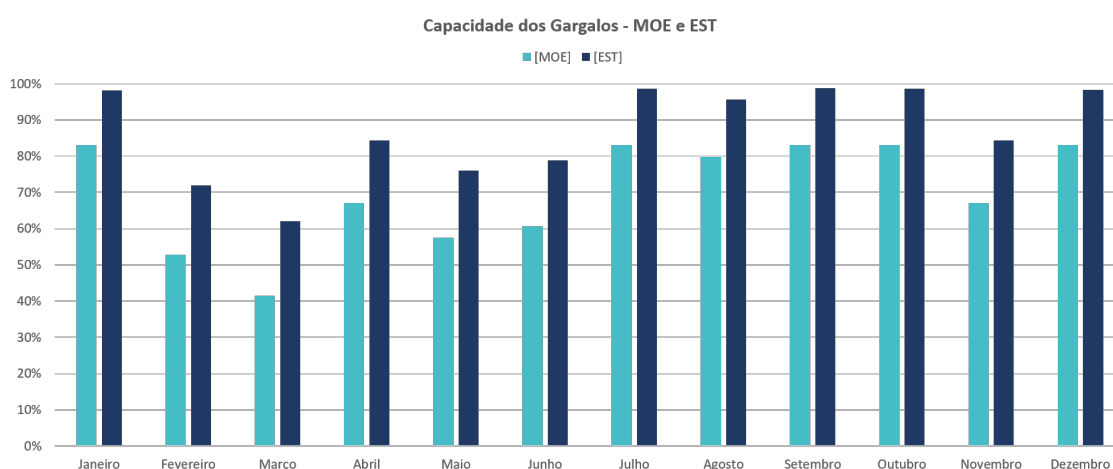
Observou-se também que em um cenário de aumento de 30% demanda, a utilização da capacidade da esterilização é total. Assim, aumentando a capacidade desse processo em 25%, que viabilizou uma margem de contribuição maior a partir do aumento de 30% da demanda, apontando uma direção de investimento no cenário de aumento de demanda. Uma análise adicional em cenários de redução de demanda apontou uma quantidade significativa de demanda não atendida do produto Y_{14} (enxerto para reparos cardíacos). Entretanto, com o aumento de 26% no preço desse produto, o resultado muda, com a demanda não atendida reduzida a zero. Por essa razão, conclui-se que a empresa deve considerar uma mudança no preço do produto Y_{14} .

Tabela 4: Resultado operacional conforme variação da demanda

Demanda	Compra (unid.)	Produção (unid.)	Estoque (unid.)	Produção máquinas (unid.)	Capacidade utilizada (%)	Capacidade extra (horas)	Transporte produtos acabados (unid.)	Demanda não entregue (unid.)
-40%	36.510	2.353	13.425	21.177	16	0	3.311	673
-30%	37.978	1.817	12.664	16.353	18	0	2.859	1.773
-20%	38.291	1.844	12.230	16.596	20	0	2.950	2.342
-10%	38.585	1.880	11.556	16.920	21	0	3.034	2.906
Base	38.911	1.931	11.224	17.379	23	0	3.133	3.479
+10%	39.274	2.003	10.894	18.027	25	0	3.244	4.028
+20%	39.753	2.036	10.430	18.324	26	0	3.306	4.614
+30%	40.710	2.080	10.188	18.720	27	1	3.360	5.232
+40%	41.407	2.147	10.078	19.323	28	4	3.433	5.795

Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 2: Uso da capacidade da montagem de enxertos (MOE) e da esterilização (EST).

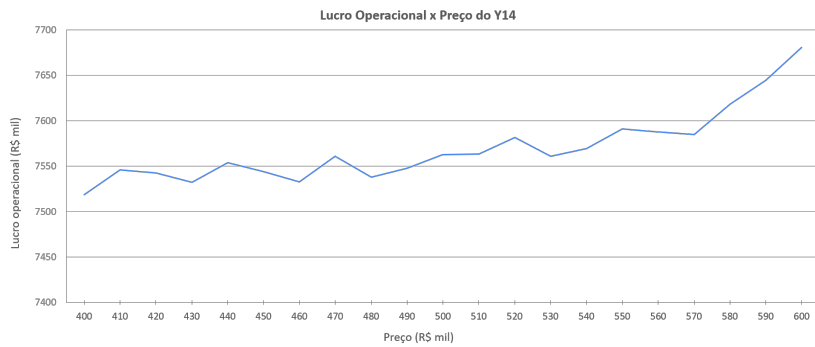


Fonte: Elaborada pelos autores.

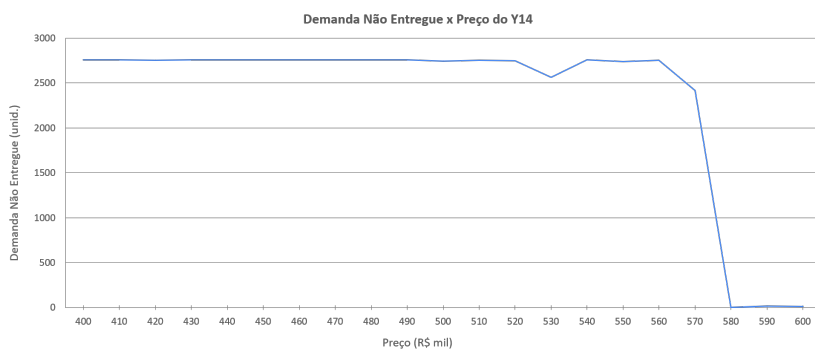
Ao testar diferentes preços para o produto, considerando o cenário base de demanda, verifica-se que, a partir de um aumento de 45% no preço, a demanda não-atendida reduz abruptamente (de 2417 unidades não entregues, reduz para 2 unidades). O lucro operacional apresenta uma tendência crescente, à medida que o preço aumenta, mas é mais significativo no aumento de 45%, como visto nas Figuras 4a e 4b mostram essas variações. A estratégia, no entanto, deve considerar a transigência dos clientes e do mercado em geral, pois a decisão precisa estar compatível com o mercado e ser viável para os clientes.

Cenário 2: Balanceamento da capacidade de montagem. A etapa de montagem de enxertos também foi identificada como um gargalo do processo de produção, principalmente diante do aumento progressivo da demanda. Assumindo a hipótese simplificadora de que todas as montadoras teriam a mesma capacidade de produção, ajustou-se o MC_{rp} para uma capacidade uniforme em que todas as montadoras fossem capazes de montar três produtos por dia, em média. Assim, a utilização da capacidade da montagem de válvulas foi reduzida de 70,15% para 7,09% e a capacidade utilizada de montagem de enxertos aumentou de 4,35% para 20,37%. Embora o resultado financeiro não seja tão superior, a multifuncionalidade oferece um maior equilíbrio para as capacidades dos processos de MOV e MOE, de válvulas e enxertos, respectivamente, como pode ser visto na Figura 4. O problema de balanceamento de linha de montagem é objeto de estudo da literatura científica e representa uma possibilidade de aprofundamento desta investigação

Figura 3: As estratégias (a) e (b) devem considerar que a mudança de preço precisa estar compatível com o mercado e ser viável para os clientes.



(a) Lucro operacional e variação de preço do produto Y_{14} .

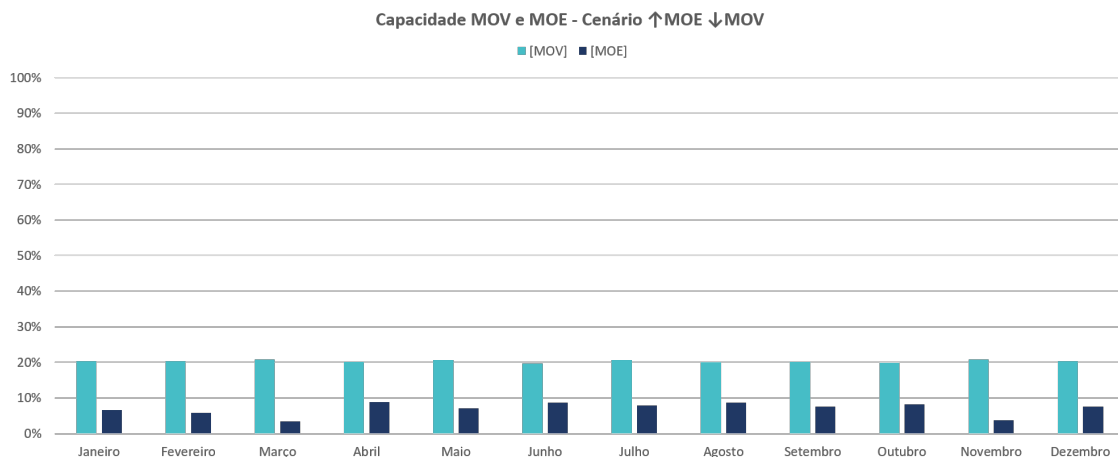


(b) Demanda não-entregue e variação de preço do produto Y_{14} .

Fonte: Elaborada pelos autores.

Boysen et al. (2008); Grzechca e Foulds (2015); Boysen et al. (2022). O estudo de balanceamento de linhas de produção compreende a distribuição das tarefas necessárias à fabricação de algum produto ao considerar as estações de trabalho envolvidas no processo. Sugere-se, portanto, que sejam realizados treinamentos no trabalho com as equipes de montagem, dos produtos mais simples aos mais complexos, até que todas as montadoras estejam capacitadas para a produção de todo o portfólio de produtos.

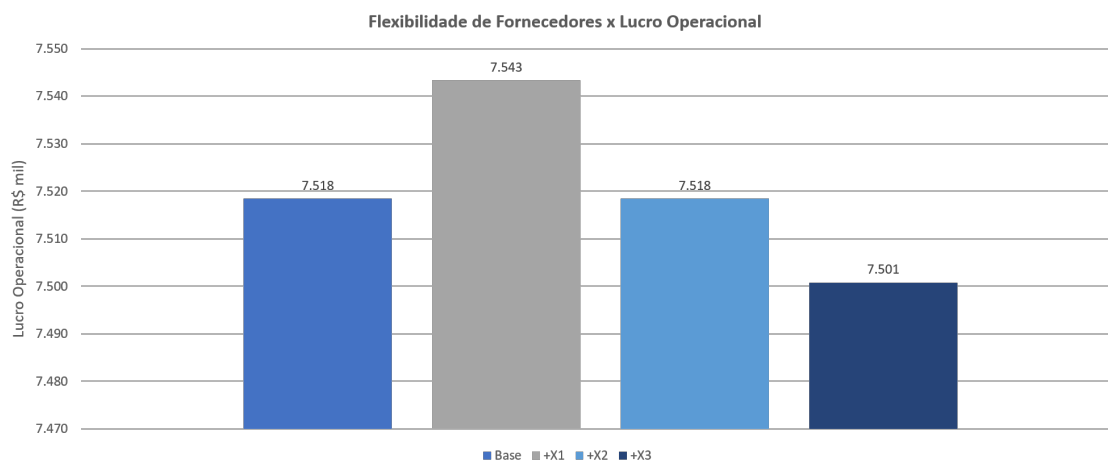
Figura 4: Balanceamento das capacidades de produção de MOE e MOV



Fonte: Elaborada pelos autores.

Cenário 3: Expansão da capacidade dos fornecedores. Outro ponto relevante trazido pelas partes interessadas da empresa foi a análise da expansão da capacidade dos fornecedores atuais, a fim de compreender se a empresa obteria benefícios em aumentar a disponibilidade de alguma matéria-prima. Assim, duplicamos o volume ofertado por tipo de matéria-prima, considerando que um único fornecedor seria responsável por disponibilizar essa nova oferta. Observa-se que a margem de contribuição é quase R\$ 25 mil superior ao segundo melhor resultado financeiro, como visto na Figura 5. No que diz respeito ao resultado operacional, também seriam entregues mais unidades de produtos acabados aos clientes. A Tabela 5 mostra que a expansão da capacidade do Fornecedor X_1 impacta o negócio de forma mais significativa.

Figura 5: Margem de contribuição após duplicação da capacidade dos fornecedores



Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 5: Resultado operacional conforme expansão da capacidade dos fornecedores

Fornecedores	Compra (unid.)	Produção (unid.)	Estoque (unid.)	Produção máquinas (unid.)	Capacidade utilizada (%)	Capacidade extra (horas)	Transporte produtos acabados (unid.)	Demanda não entregue (unid.)
Base	38.911	1.931	11.224	17.379	23%	0	3.133	3.479
+ X_1	38.923	1.945	11.163	17.505	23%	0	3.147	3.465
+ X_2	38.911	1.931	11.224	17.379	23%	0	3.133	3.479
+ X_3	38.873	1.938	11.530	17.442	23%	0	3.140	3.472

Fonte: Elaborada pelos autores.

Essa análise pode ser expandida enquanto se considera a contratação de outros fornecedores com qualidade semelhante, mas preços diferentes. O uso da otimização para escolha de fornecedores viabiliza baixas taxas de transporte e altos níveis de serviço, representando, assim, mais uma possibilidade para estudos futuros.

4.3. Análise e Discussão dos Resultados

Ao analisar os resultados, observa-se gargalos estruturais que limitam simultaneamente o atendimento da demanda e a geração de margem. O processo de esterilização, EST, configura a principal restrição, operando com utilização média de 88,8% e atingindo saturação em diversos períodos. Essa condição explica por que um aumento relativamente pequeno de capacidade (25%) possibilita absorver demanda adicional (+30%) e elevar a margem em mais de R\$ 300 mil/ano, indicando tratar-se de um recurso crítico cuja expansão pontual é mais eficiente que ampliações sistêmicas.

A Montagem de Enxertos, MOE, por sua vez, apresenta um gargalo de natureza organizaci-

onal, decorrente da forte concentração de tarefas em poucas operadoras especializadas. Embora a ocupação média seja baixa no cenário base, essa dependência assimétrica reduz a flexibilidade operacional e impede o uso integral da capacidade disponível. Por consequência, a resposta da margem à variação de demanda é quase linear até cerca de +40%, mas, acima de +30%, a esterilização volta a ser o fator limitante do sistema.

O teste de balanceamento de linha demonstra que intervenções voltadas à polivalência das equipes ampliam a robustez operacional sem alterar significativamente o desempenho econômico. Ao treinar todas as montadoras para produzir válvulas e enxertos, a utilização da MOE aumenta de 4,4% para 20,4%, ao passo que a montagem de válvulas passa a operar com ampla folga. Apesar do impacto financeiro marginal (+0,2%), a maior flexibilidade frente a picos e ausências representa ganho estratégico relevante.

No que se refere ao suprimento, a duplicação da oferta de pericárdio do fornecedor X_1 gera o maior acréscimo de margem (R\$ 25 mil/ano), sinalizando que a disponibilidade de insumos ainda constitui um limitador importante, diante de altas taxas de refugo. Assim, a expansão de capacidade interna só é plenamente efetiva quando acompanhada de maior oferta de matéria-prima.

Por fim, a análise de política de preços mostra que ajustes econômicos podem corrigir distorções de alocação. O produto Y_{14} , com elevada demanda reprimida (2.417 unidades), torna-se economicamente viável com um reajuste de 45%, eliminando quase toda a demanda não atendida e incrementando a margem em R\$ 680 mil/ano. Tal resultado indica que a rentabilidade anterior comprometia decisões produtivas e restringia a captura de receita potencial.

Em síntese, os resultados destacam que restrições de capacidade crítica, qualificação multi funcional da mão de obra, disponibilidade de insumos e alinhamento de preços são determinantes para o desempenho global. Intervenções específicas e bem direcionadas podem gerar ganhos substanciais tanto econômicos quanto operacionais.

4.4. Aspectos Gerenciais e Recomendações Práticas

Os resultados permitem formular um conjunto de recomendações priorizadas para a alta direção. Em primeiro lugar, recomenda-se o aumento imediato de 25% na capacidade de esterilização, cujo retorno estimado situa-se entre 8 e 12 meses devido ao maior atendimento da demanda. Em paralelo, a adoção de um programa de multifuncionalidade nas montadoras, por meio de treinamento cruzado entre válvulas e enxertos. A estratégia possui baixo custo e elevado impacto na flexibilidade operacional. Recomenda-se um teste de mercado, com a revisão do preço do produto Y_{14} , via um aumento entre 40% e 50%. A abordagem é financeiramente vantajosa, elevando a margem sem perda de volume. Recomenda-se também negociar com o fornecedor X_1 a garantia de volume adicional, idealmente por meio de um contrato de longo prazo. De maneira complementar, recomenda-se a criação de um *dashboard* mensal de S&OP, com KPIs como margem projetada, utilização da esterilização, refugo real versus planejado e demanda não atendida por produto, que contribuirá para maior disciplina analítica durante as reuniões de S&OP. Por fim, sugere-se treinamento e investimento na equipe de gestores, pois contribui para a evolução da maturidade do processo de S&OP, migrando do estágio “rudimentar” para o “clássico” em 18 a 24 meses, mediante reuniões executivas mensais e adoção de um plano único integrado. A implementação conjunta das quatro primeiras recomendações apresenta potencial de elevar a margem de contribuição em mais de 30% frente ao desempenho atual, reforçando o S&OP como instrumento central de gestão na cadeia de biopróteses cardíacas.

5. Conclusão

O S&OP contribui para uma maior compreensão dos processos logísticos, maior alinhamento em decisões e para o aumento da lucratividade de indústrias do ramo da saúde. O presente estudo de caso descreveu as características do planejamento, da produção e das vendas de uma empresa de dispositivos médicos, assim como a aplicação do S&OP otimizado à mesma, com

objetivos estabelecidos na Introdução sendo plenamente alcançados, ou seja: (i) foi proposto e validado um modelo quantitativo de otimização integrado ao processo de S&OP em uma indústria de dispositivos médicos implantáveis de tecido biológico; (ii) o modelo articulou simultaneamente decisões de suprimento, produção, capacidade e demanda em um único arcabouço analítico; (iii) foram simulados múltiplos cenários realistas; e (iv) obteve-se impacto financeiro mensurável, com aumento de 14 pontos percentuais na margem de contribuição anual da empresa.

Os resultados mostraram a forma mais lucrativa de uso dos recursos da empresa diante de oscilações de demanda, da capacidade de produção e da capacidade de fornecimento, além de apontar os processos que requerem investimento e aqueles que devem ser melhor balanceados.

Embora os dados agregados atendam a modelagem de forma satisfatória, uma limitação da pesquisa consiste na sua acurácia, tendo em vista que as informações foram obtidas de forma descentralizada, em diversas planilhas eletrônicas que dificultaram o levantamento de dados. Para o processo de S&OP, sugere-se o desenvolvimento de painéis com indicadores que permitam uma visão holística de toda a cadeia de suprimentos. Notou-se, ainda, que empresa precisa avançar nos níveis de maturidade em S&OP, de modo que todos os setores envolvidos na cadeia de suprimentos compartilhem informações e, juntos, elaborem o plano integrado.

Como oportunidade de estudos futuros, sugere-se explorar a otimização do balanceamento das operações deste estudo de caso com maior profundidade, a partir da descrição das tarefas realizadas em cada estação de trabalho e da análise detalhada dos processos de produção, que podem levar ao melhor balanceamento do tempo de linha, em que tarefas podem ser redistribuídas ou agrupadas, visando melhor uso da capacidade de produção disponível. Esta direção de pesquisa pode ser complementada com a integração do método proposto à simulação (Abay et al., 2024) viabilizando uma análise mais aprofundada do balanceamento da capacidade dos processos, para além das montagens de válvula e de enxerto, uma vez que há outros recursos passíveis de serem otimizados. Outra direção consiste em aplicar a otimização na seleção de fornecedores, aplicando, por exemplo, análise envoltória de dados, para avaliação de indicadores de interesse da empresa.

Agradecimentos. Os autores agradecem o apoio da Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional (SOBRAPO), e o apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte à pesquisa.

Referências

Abay, Y., Kaihara, T., e Kokuryo, D. A discrete-event simulation study of multi-objective Sales and Operation Planning under demand uncertainty: A case of the ethiopian automotive industry. *International Journal of Automation Technology*, v. 18, n. 1, p. 135–145, 2024.

Almeida, J., Conceição, S. V., Pinto, L. R., Oliveira, B., e Rodrigues, L. F. Optimal sales and operations planning for integrated steel industries. *Annals of Operations Research*, v. 315, n. 2, p. 773–790, 2022.

Almeida, J. a. F. d. F. *Otimização do planejamento tático da cadeia de suprimentos: formulações e métodos*. Tese de doutorado Universidade Federal de Minas Gerais, <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUBD-9WXFCB>, 2015.

Almeida, J. F. d. F. e Conceição, S. V. A decomposition approach for the two-stage stochastic supply network planning in light of the rolling horizon practice. *Pesquisa Operacional*, v. 41, n. spe, p. e234451, 2021.

Almeida, J. F. d. F., Conceição, S. V., Pinto, L. R., de Camargo, R. S., e Júnior, G. d. M. Flexibility evaluation of multiechelon supply chains. *PloS one*, v. 13, n. 3, p. e0194050, 2018.

Alvekrans, A.-L., Lantz, B., Rosén, P., Siljemyr, L., e Snugg, J. From knowledge to decision—a case study of Sales and Operations Planning in health care. *Production Planning & Control*, v. 27, n. 12, p. 1019–1026, 2016.

Arola, S. *Enhancing Sales and Operations Planning through Integrated Business Planning: What is Integrated Business Planning and how does it help businesses?* Master thesis. Arcada University of Applied Sciences, , 2024.

Boysen, N., Fliedner, M., e Scholl, A. Assembly line balancing: Which model to use when? *International journal of production economics*, v. 111, n. 2, p. 509–528, 2008.

Boysen, N., Schulze, P., e Scholl, A. Assembly line balancing: What happened in the last fifteen years? *European Journal of Operational Research*, v. 301, n. 3, p. 797–814, 2022.

Cardoso, W. Study of the feasibility of adaptation of the business process Sales and Operations Planning (S&OP) in a university hospital. *Journal of Innovation and Healthcare Management*, v. 2, p. 1–23, 2019.

Carvalho, A. N., Oliveira, F., e Scavarda, L. F. Tactical capacity planning in a real-world eto industry case: An action research. *International Journal of Production Economics*, v. 167, p. 187–203, 2015.

Carvalho, A. N., Oliveira, F., e Scavarda, L. F. Tactical capacity planning in a real-world eto industry case: A robust optimization approach. *International Journal of Production Economics*, v. 180, p. 158–171, 2016a.

Carvalho, A. N., Oliveira, F., e Scavarda, L. F. Tactical capacity planning in a real-world eto industry case: A robust optimization approach. *International Journal of Production Economics*, v. 180, p. 158–171, 2016b.

Çökelez, S. An optimization approach to production and workforce planning at health care equipment manufacturing facilities: A marketing/production interface. *Journal of Hospital Marketing*, v. 10, n. 2, p. 77–83, 1996.

Cox, J. F. e Blackstone, J. H. *The Association for Operations Management (APICS) dictionary*. United States: APICS Educational Society for Resource Management, 2002.

Djojopoespito, S. Supply planning optimization under uncertainties in vaccine manufacturer. *Journal of World Science*, v. 4, n. 8, p. 1035–1043, 2025.

Fakhry, D., Oger, R., Lauras, M., e Pellegrin, V. A financialized model for a risk-focused sales and operations planning. *IFAC-PapersOnLine*, v. 58, n. 19, p. 1114–1119, 2024.

Fakhry, D., Oger, R., Lauras, M., e Pellegrin, V. Managing uncertainties within sales and operations planning (s&op): a systematic literature review. In: *Supply Chain Forum: An International Journal*. Taylor & Francis, 2025. p. 1–18.

Fruytier, P.-A. M. e Jenson, P. Increasing lobster processing margins through scenario linear programming. *International Transactions in Operational Research*, v. 30, n. 4, p. 1986–1999, 2023.

Grimson, J. A. e Pyke, D. F. Sales and Operations Planning: an exploratory study and framework. *The International Journal of Logistics Management*, v. , 2007.

Grzechca, W. e Foulds, L. The assembly line balancing problem with task splitting: A case study. *IFAC-PapersOnLine*, v. 48, n. 3, p. 2002–2008, 2015.

- Hansen, Z. N. L., Andreu, C. M., Khan, O., Haug, A., Hvam, L., e Hansen, N. E. Identification of key drivers for improving inventory management in pharmaceutical supply chains. *Production Engineering*, v. 17, n. 5, p. 763–772, 2023.
- Ivert, L. K., Dukovska-Popovska, I., Kaipia, R., Fredriksson, A., Dreyer, H. C., Johansson, M. I., Chabada, L., Damgaard, C. M., e Tuomikangas, N. Sales and operations planning: responding to the needs of industrial food producers. *Production planning & control*, v. 26, n. 4, p. 280–295, 2015.
- Ivert, L. K. e Jonsson, P. When should advanced planning and scheduling systems be used in sales and operations planning? *International Journal of Operations & Production Management*, v. 34, n. 10, p. 1338–1362, 2014.
- Kalla, C., Scavarda, L. F., e Hellingrath, B. Integrating supply chain risk management activities into sales and operations planning. *Review of Managerial Science*, v. 19, n. 2, p. 467–497, 2025.
- Keal, D. A. e Hebert, P. Benefits to blood banks of a Sales and Operations Planning. *Transfusion*, v. 50, n. 12pt2, p. 2785–2787, 2010.
- Lalmazloumian, M., Wong, K. Y., Govindan, K., e Kannan, D. A robust optimization model for agile and build-to-order supply chain planning under uncertainties. *Annals of Operations Research*, v. 240, p. 435–470, 2016.
- Lapide, L. Sales and Operations Planning part i: the process. *The Journal of business forecasting*, v. 23, n. 3, p. 17–19, 2004.
- Lapide, L. Sales and Operations Planning part iii: a diagnostic model. *The Journal of Business Forecasting*, v. 24, n. 1, p. 13–16, 2005.
- Mesquita, M. A. *Análise de modelos e práticas de planejamento e programação da produção: um estudo de caso na indústria farmacêutica*. Recuperado em 20/11/2025 Tese de doutorado Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo <http://www.teses.usp.br>, 2001.
- Oliva, R. e Watson, N. Cross-functional alignment in supply chain planning: A case study of Sales and Operations Planning. *Journal of Operations Management*, v. 29, n. 5, p. 434–448, 2011.
- Rachuba, S., Reuter-Oppermann, M., e Thielen, C. Integrated planning in hospitals: a review. *OR Spectrum*, v. p. 1–54, 2024.
- Ramberg, F. e Elsnitz, F. *Healthcare Production Control Maturity Model: Maturity Model Development for Assessing the Maturity of Production Control at Healthcare Departments*. PhD thesis. Faculty of Engineering of Lund University, , 2023.
- Shapiro, B. P. Can marketing and manufacturing co-exist? *Harvard Business Review*, v. 55, n. 5, p. 104, 1977.
- Thomé, A. M. T., Scavarda, L. F., Fernandez, N. S., e Scavarda, A. J. Sales and Operations Planning: A research synthesis. *International Journal of Production Economics*, v. 138, n. 1, p. 1–13, 2012.
- Tuomikangas, N. e Kaipia, R. A coordination framework for sales and operations planning (S&OP): Synthesis from the literature. *International Journal of Production Economics*, v. 154, p. 243–262, 2014.
- Vereecke, A., Vanderheyden, K., Baecke, P., e Van Steendam, T. Mind the gap—assessing maturity of demand planning, a cornerstone of S&OP. *International Journal of Operations & Production Management*, v. , 2018.

Wang, J.-Z., Hsieh, S.-T., e Hsu, P.-Y. Advanced sales and operations planning framework in a company supply chain. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, v. 25, n. 3, p. 248–262, 2012.