

The image features a graphic design with a blue diagonal line that starts from the bottom left and extends towards the top right. A horizontal blue band intersects this diagonal line. The word "ENGENHARIA" is written in white, uppercase letters within this band.

ENGENHARIA

Prof. Eng. Alexandre Dezem Bertozzi, Esp.

AULA 1

PESQUISA OPERACIONAL

Introdução à Pesquisa Operacional (PO)

1 – INTRODUÇÃO À PESQUISA OPERACIONAL

1.1 Origem da pesquisa operacional

O termo *pesquisa operacional* é uma tradução (brasileira) direta do termo em inglês *operational research*, que em Portugal foi traduzido por *investigação operacional* e nos países de língua hispânica, por *investigación operativa*. O surgimento deste termo está ligado à invenção do radar na Inglaterra em 1934. Dois anos depois, o ministério britânico da Aviação criou a Estação de Pesquisa Manor Bawdsey, em Suffolk, para estudar como a tecnologia do radar poderia ser utilizada para interceptar aviões inimigos. O termo pesquisa operacional é atribuído ao superintendente da estação A. P. Rowe, que, em 1938, coordenava equipes para examinar a eficiência de técnicas de operações advindas de experimentos com interceptação de radar. Em 1941, foi inaugurada a Seção de Pesquisa Operacional do Comando da Força Aérea de Combate, com equipes envolvidas em problemas de operações de guerra, como manutenção e inspeção de aviões, escolha do tipo de avião para uma missão e melhoria na probabilidade de destruição de submarinos. Outros problemas incluíam controle de artilharia antiaérea e dimensionamento de comboios de frota. A análise científica do uso operacional de recursos militares de maneira sistemática foi iniciada na Segunda Guerra Mundial.

Após o final da guerra, a pesquisa operacional evoluiu rapidamente na Inglaterra e nos Estados Unidos. Em 1947, foi implantado o projeto SCOOP (Scientific Computatum of Optimal Progmms) no Pentágono, com o objetivo de apoiar decisões de operações na força aérea americana. O projeto continha um grupo de pesquisa coordenado pelo economista Marshall Wood e pelo matemático George Dantzig. Durante esse projeto, Dantzig desenvolveu, formalizou e testou o método simplex para resolver problemas de programação linear (otimização linear). Esses desenvolvimentos se basearam em trabalhos precursores, notadamente do matemático russo Leonid Kantorovich, e o termo programação linear foi sugerido a Dantzig pelo economista T. C. Koopmans (tanto Koopmans quanto Kantorovich ganharam posteriormente o prêmio Nobel de economia de 1975, pelas contribuições à teoria de alocação ótima de recursos).

Em 1952, foi fundada a sociedade científica americana de pesquisa operacional (ORSA - Operations Research Society of American e, em 1953, a sociedade inglesa de pesquisa operacional (ORS - Operational Research Society) e a americana de ciências de administração (ILMS - The Institute of Management Sciences). Em 1957, foi realizada a primeira conferência internacional de pesquisa operacional em Oxford, na Inglaterra. Nessa conferência, foi possível constatar claramente os focos diferentes nos trabalhos apresentados pelos cientistas ingleses e pelos cientistas americanos. Os trabalhos dos ingleses enfatizaram estudos de caso ou problemas específicos, enquanto os trabalhos dos americanos abordavam modelos e métodos matemáticos (metodologias) em diversos temas, tais como teoria de estoques, substituição de equipamentos, teoria de filas, programação (scheduling) de tarefas em máquinas, teoria de jogos, fluxos em redes e otimização linear.

A partir do início da década de 1950 até o final da década de 1960, a pesquisa operacional foi aplicada em uma variedade de problemas oriundos dos setores público e privado. Em um levantamento feito em 1953 com 160 organizações da Grã-Bretanha, 45 responderam que possuíam um departamento de pesquisa operacional, ou pelo menos uma pessoa nessa atividade. Exemplos de aplicações envolviam diversos setores industriais e financeiros, como: mineração, metalúrgico, construção civil e militar, têxtil, farmacêutico, bancário e transportes. Em 1967, foram identificados 766 grupos de pesquisa operacional, dos quais 553 estavam envolvidos no setor industrial ou em serviços financeiros. Exemplos de aplicações no setor público envolviam coleta de lixo, transporte e polícia, entre outros. Desde então, a pesquisa operacional tem sido aplicada às mais diversas áreas de produção e logística, incluindo indústrias de alimentação, automóveis, aviação, computadores, eletrônica, metalurgia, mineração, mísseis, móveis, papel, petróleo, telecomunicações, transportes; além de organizações de serviço (públicas e privadas), como: bancos e seguradoras, hospitais, bibliotecas, sistemas judiciais, agências de viagens e turismo, energia, esportes, trânsito, agências de governo (federais, estaduais e municipais) etc.

Do ponto de vista educacional, na década de 1960, a pesquisa operacional era estudada apenas em cursos de pós-graduação, mas, a partir da década de 1970, passou a ser objeto também de cursos de graduação. Inicialmente, foram apresentadas diversas definições para Pesquisa Operacional, segundo Dantzig em seu livro Linear Programming and Extensions (1963) é uma classificação dos problemas de otimização, além da seguinte definição do problema de programação: "construir um enunciado de ações a serem executadas, os instantes da execução, suas quantidades (chamado programa ou schedule), que permite que um sistema evolua de um dado estado a um objetivo definido". Na língua inglesa, schedule e program são sinônimos e, no contexto da época, a meta era programar atividades de sistemas complexos. Isso gerou a área de programação matemática, em que a programação linear é um caso particular de otimização de funções lineares sujeito a restrições lineares.

A pesquisa operacional iniciou-se no Brasil basicamente na década de 1960. O primeiro simpósio brasileiro de pesquisa operacional foi realizado em 1968 no ITA, em São José dos Campos, SP. Em seguida, foi fundada a SOBRAPO (Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional), que publica o periódico científico Pesquisa Operacional.

1.2 Definição de pesquisa operacional

Uma definição de pesquisa operacional foi proposta na primeira página do periódico inglês Operational Research Quarterly em 1967, que, de forma resumida, consiste no desenvolvimento de métodos científicos de sistemas complexos, com a finalidade de prever e comparar estratégias ou decisões alternativas. O objetivo é dar suporte à definição de políticas e determinação de ações de forma científica. Para alguns autores, pesquisa operacional significa “abordagem científica para tomada de decisões, que procura determinar como melhor projetar e operar um sistema, usualmente sob condições que requerem a alocação de recursos escassos.” A sociedade europeia EURO define pesquisa operacional como uma abordagem científica para a solução de problemas no gerenciamento de sistemas complexos. De forma sucinta, podemos dizer que pesquisa operacional é um enfoque científico sobre a tomada de decisões. A denominação pesquisa operacional é comumente motivo de críticas e reflexões, pois não revela a abrangência da área e pode dar a falsa impressão de estar limitada à análise de operações. Alguns autores sugerem outras denominações preferíveis, por exemplo, análise de decisões, mas o termo pesquisa operacional é bastante difundido no âmbito das engenharias (em particular, da engenharia de produção), ciências de administração, ciências de computação, economia, estatística e matemática, entre outros, de modo que, apesar das limitações, preferimos adotar este termo.

Mais recentemente, a pesquisa operacional também tem sido chamada de ciência e tecnologia de decisão. O componente científico está relacionado às ideias e aos processos para articular e modelar problemas de decisão, determinando os objetivos do tomador de decisão e as restrições sob as quais se deve operar. Também está relacionado a métodos matemáticos para otimizar sistemas numéricos que resultam quando se usam dados nos modelos. O componente tecnológico está relacionado a ferramentas de software e hardware para coletar e comunicar dados, e organizar esses dados, usando-os para gerar e otimizar modelos e reportar resultados, ou seja, a pesquisa operacional está se tornando um importante elemento nas metodologias de tecnologia da informação. A sociedade americana INFORMS atualmente define pesquisa operacional e ciências de administração como disciplinas profissionais que tratam da aplicação da tecnologia da informação para a tomada de decisões.

1.3 RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS COM MODELOS MATEMÁTICOS

Se fazer ciência é a capacidade de observar e descrever fenômenos naturais, sociais, econômicos, entre outros, a matemática tem uma importância fundamental na descrição desses fenômenos. A partir da observação de fenômenos, processos ou sistemas, que podem ser físicos, químicos, biológicos, econômicos, buscam-se leis que os regem. Essas leis, se passíveis de serem descritas por relações matemáticas, dão origem aos modelos matemáticos. O termo modelo neste texto é usado como objeto abstrato, que procura imitar as principais características de um objeto real para fins de representar o objeto real.

Em geral, para formular um modelo matemático, simplificações razoáveis do sistema ou problema real precisam ser consideradas (em diferentes níveis) e a validação do modelo depende de a solução do modelo matemático ser coerente com o contexto original. Com isso, o modelo matemático é uma representação simplificada (abstração) do problema real. Ele deve ser suficientemente detalhado para captar os elementos essenciais do problema, mas suficientemente tratável por métodos de resolução. O diagrama da

Figura 1.1 ilustra um processo simplificado da abordagem de solução de um problema usando a modelagem matemática¹ⁱ.

A formulação (modelagem) define as variáveis e as relações matemáticas para descrever o comportamento relevante do sistema ou problema real. A dedução (análise) aplica técnicas matemáticas e tecnologia para resolver o modelo matemático e visualizar quais conclusões ele sugere. A interpretação (inferência) argumenta que as conclusões retiradas do modelo têm significado suficiente para inferir conclusões ou decisões para o problema real. Frequentemente, uma avaliação (julgamento) dessas conclusões ou decisões inferidas mostra que elas não são adequadas e que a definição do problema e sua modelagem matemática precisam de revisão e, então, o ciclo é repetido. Exemplos de modelos matemáticos são os modelos de programação matemática (otimização matemática), como: programação linear (otimização linear), programação linear inteira (otimização discreta), programação em redes (otimização em redes) e programação não-linear (otimização não-linear). Outros exemplos são modelos de teoria de filas para estudar a congestão em sistemas e determinar medidas de avaliação de desempenho e políticas ótimas de operação.

A pesquisa operacional e, em particular, a programação matemática tratam de problemas de decisão e faz uso de modelos matemáticos que procuram representar (em certo sentido, imitar) o problema real. Variáveis (incógnitas) são definidas e relações matemáticas entre essas variáveis são estabelecidas de forma a descrever o comportamento do sistema. O modelo matemático é resolvido (isto é, são determinados valores para as incógnitas, produzindo soluções, que dependem de dados do problema) e o passo seguinte consiste na validação do modelo, isto é, verificar se as soluções obtidas pela resolução do modelo matemático, para diversas situações alternativas (por exemplo, alterando-se dados do problema como demandas, custos etc.) são compatíveis com a realidade, conforme evidenciado na Figura 1.1. A solução do modelo apóia o processo de tomada de decisões, mas em geral diversos outros fatores pouco tangíveis, não quantificáveis, também devem ser levados em consideração para a decisão final (por exemplo, soluções que não levem

em conta o comportamento humano podem falhar). Convém salientar que modelos não substituem tomadores de decisão.

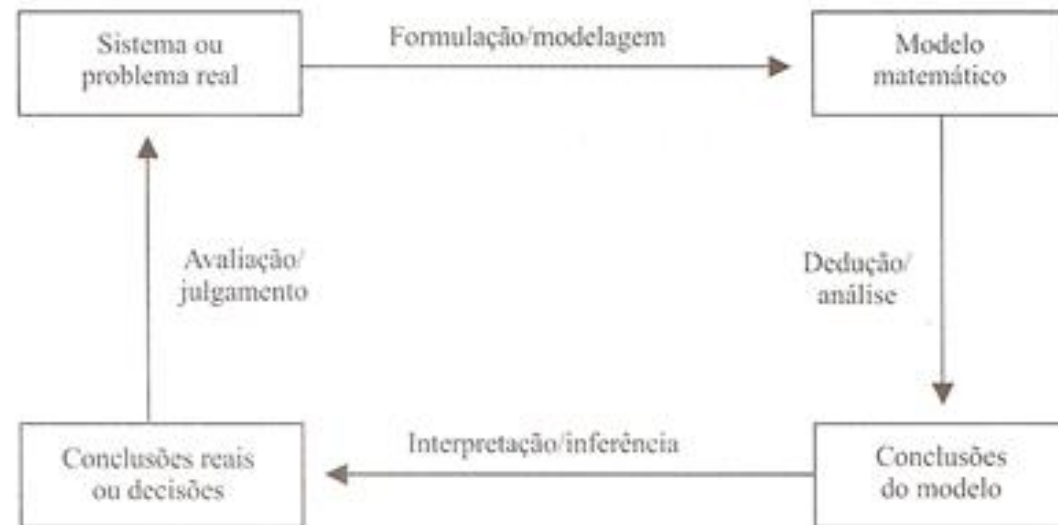


Figura 1.1 Processo de modelagem.

Alguns autores sugerem que pesquisa operacional é tanto "ciência" quanto "arte": ciência por causa das técnicas matemáticas envolvidas (objetivo), arte porque o sucesso de todas as fases que precedem e sucedem a solução do modelo matemático depende muito da criatividade e experiência do pessoal de pesquisa operacional (subjetivo). A abordagem de resolução de um problema por meio de pesquisa operacional envolve várias fases baseadas no diagrama da Figura 1.1: (i) definição do problema; (ii) construção do modelo; (iii) solução do modelo; (iv) validação do modelo; e (v) implementação da solução.

A fase (i) define o escopo do problema em estudo. A fase (ii) traduz a fase (i) em relações matemáticas ou lógicas de simulação, ou uma combinação delas. A fase (iii) utiliza métodos de solução e algoritmos² conhecidos para resolver o modelo da fase (ii). A fase (iv) verifica se o modelo proposto representa apropriadamente o problema, ou seja, se o modelo prediz adequadamente o comportamento do sistema. A qualidade da solução de um modelo depende da precisão com que este modelo representa o problema. Um modelo mais preciso, mesmo que resolvido de forma aproximada, pode ser bem mais útil do que um modelo menos preciso resolvido de forma exata. A qualidade da solução do modelo também depende da qualidade dos dados de entrada do modelo; a conhecida expressão inglesa garbage in, garbage out (entra lixo, sai lixo) sintetiza isso. Finalmente, a fase (v) preocupa-se com a implementação da solução na prática, traduzindo os resultados do modelo em decisões.

Obviamente, um modelo matemático nem sempre é formulado de uma só vez e podemos ter ciclos entre as fases (i)-(v) para revisão do modelo. Equívocos não são incomuns, mesmo para os mais experientes modeladores. Algumas vezes a análise da solução do modelo é suficiente para evidenciar suas inconsistências e, então, reformulamos o modelo; outras vezes, somente após a operação do modelo na prática é que somos capazes de detectar falhas e, então, repetimos todo o ciclo.

Com o aprimoramento dos métodos de solução dos modelos e o desenvolvimento tecnológico dos computadores e da informática (principalmente a partir dos anos 80, com a popularização dos microcomputadores), tem sido possível resolver modelos de pesquisa operacional cada vez mais complexos, outrora intratáveis. O leitor poderá se questionar sobre a necessidade do estudo desses métodos diante das facilidades do uso direto dos diversos softwares comerciais já existentes, baseados nas técnicas de pesquisa operacional. Entretanto, nem sempre nos deparamos com problemas de aplicação direta nesses aplicativos computacionais, sendo necessário um certo domínio da teoria em que se baseia o método. Mesmo com a facilidade do uso desses aplicativos, o desconhecimento da abrangência e das limitações do aplicativo inibe seu uso ou pode conduzir a um uso equivocado. Embora não seja necessário entender a eletrônica de uma máquina de calcular para se fazer bom uso dela, nem ser conhecedor da teoria dos números, qual seria a importância de uma máquina de calcular para uma pessoa sem noção das operações aritméticas e de como operá-la?

1.4 EXEMPLO ILUSTRATIVO DE MODELAGEM MATEMÁTICA

Sistema MRP: O sistema computacional MRP II (Manufacturing Resource Planning) é amplamente usado para o planejamento e controle de sistemas de manufatura. Este sistema é uma versão expandida do sistema MRP (Material Requirements Planning) e inclui finanças, contabilidade e outros aspectos comerciais. O MRP é usado para determinar quanto e quando produzir ou comprar componentes e matérias-primas para produzir itens finais. Na Figura 1.2, mostra-se uma estrutura em forma de árvore dos itens componentes 4,5,6, 7 e 8, usados para produzir os itens finais 1,2 e 3. Esta árvore possui

quatro níveis: o nível 1 corresponde aos itens finais 1, 2 e 3; o nível 2 está associado aos componentes 4 e 5; o nível 3 ao componente 6; e o nível 4 aos componentes 7 e 8.

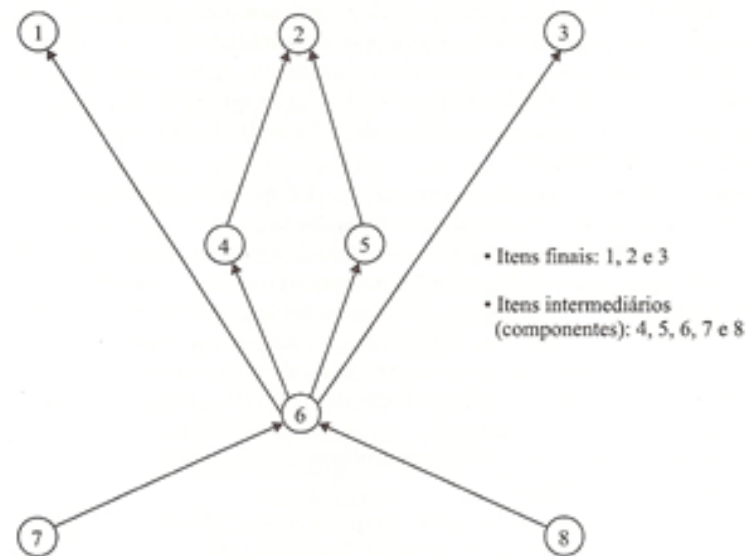


Figura 1.2 Estrutura de itens finais e componentes.

De modo geral, a lógica do sistema MRP é composta de duas fases interativas, descritas a seguir a partir da Figura 1.2:

Fase I: Suponha que a demanda externa dos itens finais seja conhecida ao longo de um horizonte de planejamento³ de T períodos, e que um lote de um item componente esteja disponível no mesmo período em que foi encomendado, para facilitar a explicação. Calcula-se, então, o tamanho dos lotes dos itens finais em cada período do horizonte de planejamento que geram demandas internas dos componentes 4 e 5 do nível 2. Prosseguindo desta forma, calcula-se o tamanho dos lotes dos componentes 6 no nível 3 e o tamanho dos lotes dos componentes 7 e 8 no nível 4 em cada período ao longo do horizonte de planejamento. O cálculo dos tamanhos dos lotes de todos os itens ignora restrições de capacidade, tais como horas de trabalho e horas de máquinas disponíveis.

Fase II: Calcula-se a capacidade utilizada para a produção dos lotes de cada item em cada período. Se essa capacidade for maior que a capacidade disponível em um ou mais períodos, retorna-se à fase I e alteram-se os planos de produção, isto é, os tamanhos dos lotes dos itens finais e itens componentes ao longo do horizonte de planejamento. Esse procedimento iterativo entre as duas fases prossegue até que se ache uma solução que respeite a capacidade disponível. Esse procedimento pode consumir muito tempo computacional ou, ainda, pode não encontrar uma solução que atenda as restrições de capacidade.

SUMÁRIO

- Origens
- A natureza
- O impacto
- Principais sociedades

INTRODUÇÃO

A PO apoia o processo de tomada de decisão

Tomar decisões é uma tarefa básica da gestão

Cabe ao decisor:

- **Identificar e definir o problema**
- **Formular objetivo(s)**
- **Analisar limitações**
- **Avaliar alternativas e escolher a melhor**

PO: Modelagem e tomada de decisão em sistemas reais, determinísticos ou probabilísticos, relativos à necessidade de alocação de recursos escassos.

O processo de decisão pode ter abordagens:

- **Qualitativa**
 - Problemas simples
 - Baseado na experiência do decisor
- **Quantitativa**
 - Problemas complexos
 - Ótica científica

ORIGENS

Revolução industrial

- Crescimento das organizações = Complexidade dos problemas

Início das atividades

- Problemas estratégicos e táticos na Segunda Guerra Mundial

FATORES CHAVES PARA O CRESCIMENTO DA PO

- Readaptação do parque industrial
- Desenvolvimento e aperfeiçoamento de técnicas de PO
- Melhorias em hardware e software operacional

A PO propõe uma abordagem científica, baseada na Observação, Formulação do problema, e Construção do modelo científico (matemático ou de simulação)

A NATUREZA

- É aplicada a problemas de condução e coordenação de operações ou atividades na organização.
- Utilizada por Governos e suas agências, indústrias, e empresas comerciais e de serviço.
- Adota um enfoque sistêmico.
- Busca a solução “ótima”.

Metodologia de trabalho em equipe:

Engenharia, computação, economia, estatística, administração, matemática..

O IMPACTO

É crescente na administração das empresas, tendo aumentado o número e a variedade de suas aplicações.

- **Programação linear:** mix de produção, mistura de matérias-primas, modelos de equilíbrio econômico, carteiras de investimentos, roteamento de veículos, jogos entre empresas;
- **Modelos em redes:** rotas econômicas de transporte, distribuição e transporte de bens, alocação de pessoal, monitoramento de projetos;

O IMPACTO

- **Teoria das filas:** congestionamento de tráfego, operações de hospitais, dimensionamento de equipes de serviço;
- **Outras técnicas de PO:** programação dinâmica, simulação, programação inteira, programação não-linear, teoria de estoques, programação por metas, programação multi-objetivo.

PRINCIPAIS SOCIEDADES

- **INFORMS – The Institute for Operations Research and the Management Sciences (1995)**
- **EURO - European Operational Research Society**
- **IFORS - International Federation of Operational Research Societies**
- **SOBRAPO - Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional (1968)**
- **ABEPRO – Associação Brasileira de Engenharia de Produção**

PERIÓDICOS LIGADOS À PO

- Interfaces
- Management Science
- Operations Research
- Revista de Pesquisa Operacional (SOBRAPO)
- Gestão da Produção (ABEPRO)
- Produção
- Investigación Operativa (ALIO)

PORTANTO

- PO é uma ciência aplicada formada por um conjunto de técnicas que visam a determinação das melhores condições de aproveitamento de recursos escassos.
- Apoiada por processamento computacional.
- Principais técnicas de PO: Programação Linear, Simulação, Programação em Redes, Programação Inteira, Programação Dinâmica, Teoria de Filas, Teoria de Estoques, Programação Não-linear, Teoria de Jogos, entre outras.