

## **PESQUISA OPERACIONAL**

*"Existem duas maneiras de aumentar a eficiência de uma loja, empresa, ou indústria. Uma delas requer a melhoria tecnológica, isto é, atualização dos equipamentos, mudança no processo tecnológico, descoberta de novos e melhores tipos de matéria prima. A outra maneira, até hoje muito menos utilizada, envolve melhorias na organização do planejamento e da produção. Isto é, melhorias no processo de distribuição do trabalho entre as máquinas da empresa, distribuição de matéria prima, combustível, entre outros fatores."*  
(Kantarovich, 1939 in Dantzig, 1963) *apud* Andrade *et al.* (2005)

### **1 – Sinopse Histórica**

Durante a Segunda Guerra Mundial, um grupo de cientistas foi convocado na Inglaterra para estudar problemas de estratégia e de tática associados com a defesa do país. O objetivo era decidir sobre a utilização mais eficaz de recursos militares limitados. A convocação deste grupo marcou a primeira atividade formal da Pesquisa Operacional (PO) Montevechi (2000) Lisboa (2002).

Ainda segundo Lisboa (2002), apesar de ser creditada à Inglaterra a origem da PO, sua propagação deve-se principalmente à equipe de cientistas liderada por George B. Dantzig, dos Estados Unidos, convocada durante a Segunda Guerra Mundial. O resultado deste esforço de pesquisa, concluído em 1947, foi a obtenção do *Método Simplex*. De acordo com Bouyssou (2002), em 1950 foi lançada a primeira edição de estudos de PO no mundo, publicação trimestral denominada *Jornal da Sociedade de Pesquisa Operacional*.

O primeiro contato entre universidade e empresa para aplicação da PO foi o da PUC-RJ com as empresas SOCIL e Anhanguera, para o desenvolvimento de programas de minimização de custo de rações para animais, através de Programação Linear. Mas, os principais setores a empregar essa técnica foram os de siderurgia (CSN, Cia. Vale do Rio Doce), eletricidade (Cia Nacional de Energia Elétrica), transportes (FRONAPE), petróleo (PETROBRÁS, ESSO) e telecomunicações, além de grandes projetos e obras estatais. Em função disso, foi criada, em 1968, a Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional (SOBRAPO) Agosti (2003).

### **2 – A Pesquisa Operacional**

Há várias definições de PO. Andrade (2000) destaca que é uma metodologia administrativa que agrega, em sua teoria, a economia, matemática, estatística e informática. Pode ter aplicabilidade na área gerencial, na obtenção de uma solução ótima por uma visão sistêmica, por intermédio de métodos estatísticos e matemáticos e na construção de modelos e algoritmos computacionais.

De acordo com Montevechi (2000), PO é a preparação científica das decisões, visando a modificação do binômio "Experiência - Intuição" pela "Informação - Racionalidade". Destacando-se o termo "decisão", Agosti (2003) considera-o como um curso de ação, escolhido como o meio mais efetivo para obtenção dos objetivos procurados, ou seja, para resolver o problema detectado.

A PO aplica outras disciplinas científicas na concepção, no planejamento ou na operação de modelos para atingir os seus objetivos. Ela insere objetividade e racionalidade aos processos de tomada de decisão, sem desconsiderar as questões subjetivas que caracterizam os problemas reais. Utiliza técnicas relacionadas aos campos da programação matemática, da teoria dos grafos e dos conceitos, modelos e técnicas probabilísticas.

As principais áreas da PO são:

- Programação Matemática (Programação: Planejamento de Atividades – Matemática: representação por modelo matemático):
  - Linear;
  - Não-linear;
  - Inteira.
- Modelos de Redes:
  - Transportes;
  - Designação;
  - Redes.
- Sistemas Inteligentes (Inteligência Artificial):
  - Redes Neurais;
  - Lógica Fuzzy;
  - Sistemas Especialistas.
- Teoria das Filas;
- Modelos de Simulação;
- Programação Dinâmica.

Em um estudo de PO ocorrem, normalmente, as seguintes fases (Montevecchi, 2000):

1. Formulação (ou definição) do problema: consiste em estudar o sistema e estabelecer, de uma maneira, bem definida o problema a ser considerado. Para isto, vários elementos devem ser determinados: os objetivos a atingir, as restrições que devem ser consideradas, o inter-relacionamento entre o setor a ser estudado e outros, as possíveis linhas de ação alternativas etc.;

2. Construção do modelo matemático: um modelo deve especificar as expressões quantitativas para o objetivo e as restrições do problema em termos de suas variáveis de decisão. Existem vários tipos básicos de modelo que serão vistos mais adiante. Antes da construção de um modelo matemático deve-se responder a 4 perguntas:

- 1) Qual é a medida de efetividade do objetivo? Isto é, como será expressa a solução do problema (em reais economizados, unidades vendidas, itens produzidos etc.)
- 2) Quais são os fatores sob controle (variáveis controladas ou de decisão)?  
Variáveis controladas: são variáveis que estão sob o controle da administração. Por exemplo, numa programação de produção, a variável de decisão é a quantidade a ser produzida num período.
- 3) Quais são os fatores não controlados (as variáveis não controladas)?  
Variáveis não controladas: são variáveis que têm seus valores atribuídos por sistema fora do controle da administração. Por exemplo, o custo de produção, a demanda de produtos e o preço de mercado.
- 4) Quais são as relações entre estes fatores e os objetivos? Isto é, esta relação pode ser expressa em forma de relações matemáticas que constituirão um modelo do problema?

3. Obtenção de uma solução a partir do modelo: para modelos matemáticos é dito que a Solução Ótima. Para modelos de simulação ou heurísticos obtém-se soluções aproximadas do sistema.

4. Teste do modelo e avaliação da solução obtida: o critério indicado para julgar a validade de um modelo deve prever, ou não, os efeitos relativos às alternativas, com suficiente precisão, de maneira a permitir uma satisfatória decisão.

5. Estabelecimento de controle sobre a solução: sempre que uma solução e a estratégia para uma ação futura são aplicadas repetidamente, esta solução deve ser mantida sob controle. Isto é feito

identificando-se os parâmetros críticos, determinando-se estatisticamente as variações relevantes nesses parâmetros e finalmente ajustando a solução, e conseqüente, a linha de ação, sempre que uma variação é observada.

6. Implantação da solução: deve-se assegurar que a solução é corretamente transformada em um procedimento operacional, como também, necessita-se corrigir qualquer imperfeição descoberta na solução.

Goldbarg *et al.*(2000) destacam que o processo de modelagem depende do espírito crítico do analista, mas resumem que essa modelagem serve para determinar a alocação de recursos limitados (ou restritos) e que podem ser disputados por atividades (ou eventos) alternativas. Eles sugerem ainda que, mesmo que a qualidade da análise dependa da visão do analista, propõe-se, como forma de auxílio a seguinte seqüência para a modelagem de problemas de programação matemática:

- a) Tradução das condições do problema:
  - a.1) definição das variáveis controláveis (de decisão ou controle) e não-controláveis (externa ou de estado);
  - a.2) elaboração da função-objetivo e do critério de otimização;
  - a.3) Formalização das restrições do modelo.
  
- b) Construção do modelo:
  - b.1) elaboração da estrutura de entrada e saída de informações;
  - b.2) determinação das fórmulas de inter-relação;
  - b.3) entendimento dos horizontes de tempo.
  
- c) Análise:
  - c.1) análise da sensibilidade da solução;
  - c.2) levantamento da precisão dos dados;
  - c.3) avaliação da estabilidade computacional;
  - c.4) levantamento de outras especificações para o modelo.
  
- d) Implementação dos resultados.

### 3 – Problemas de Decisão

Hoje em dia os gestores deparam-se, a todo o momento, com problemas que, na grande maioria das vezes, necessitam ser resolvidos o mais rápido possível. Neste ambiente competitivo, esses problemas reais devem ser analisados baseando-se em metodologias que permitam vislumbrar as vantagens, desvantagens, ou seja, as suas características essenciais, de forma que o tomador da decisão possa comparar as alternativas e decidir pela opção que julgar mais adequada.

Gomes *et al.* (2002) salienta que a palavra “decisão” é formada por “de”, que em latim significa parar, extrair, interromper, que se antepõe à palavra “caedere”, que representa o verbo “cortar”. Considerando o conjunto, “decisão” refere-se a “parar de cortar” ou “deixar fluir”.

O mesmo autor destaca que “decidir” pode ser definido como o processo de colher informações, atribuir importância a elas, posteriormente buscar possíveis alternativas de solução e, depois, fazer a escolha entre as opções disponíveis.

Existem pelo menos dois atores envolvidos no processo decisório: o analista e o tomador da decisão. O primeiro é o responsável pela análise do problema, estruturando-o e identificando todas

as interfaces com o sistema problemático. O segundo é o responsável pelo processo decisório, assumindo as responsabilidades pela alternativa escolhida.

Cabe, neste momento, definirem algumas questões concernentes a sistemas. Segundo Honigbaum (1993) um sistema é um conjunto de componentes interligados, com vistas a realizar um fim comum.

Já a definição do Prof. Chinol *apud* Honigbaum (1993) ressalta a importância da análise das influências entre os componentes de um sistema: “um sistema é um conjunto de elementos dotados de uma organização e sujeitos, por essa razão, a interações mútuas.

Pereira (2004) unifica em uma definição de sistema os conceitos importantes de outros autores e inclui a necessidade da análise conjunta dos controles dos componentes: “sistema é um conjunto determinado de elementos ou componentes discretos, interconectados ou em interação dinâmica, organizados e agenciados em função de um objetivo, fazendo o referido conjunto, objeto de um controle.”

Um sistema pode ser entendido também como um conjunto de elementos interdependentes e interagentes inseridos em um ambiente; um grupo de unidades combinadas que formam um todo organizado e cujo resultado é maior do que o resultado que as unidades poderiam ter se funcionassem independentemente.

Pontes (1991) destaca que pode haver definições de sistema de acordo com a área de análise. Ele cita Pereira (1988) que define sistema no campo da engenharia como um sistema técnico: “alguma coisa capaz de pôr em execução um processo operacional, onde alguma coisa é operada para produzir alguma coisa”.

Considera-se ambiente ou meio ambiente tudo que não está incorporado à estrutura intrínseca do sistema.

A figura 1 a seguir expõe resumidamente, como é constituído um sistema, os seus componentes e como está inserido no meio ambiente.

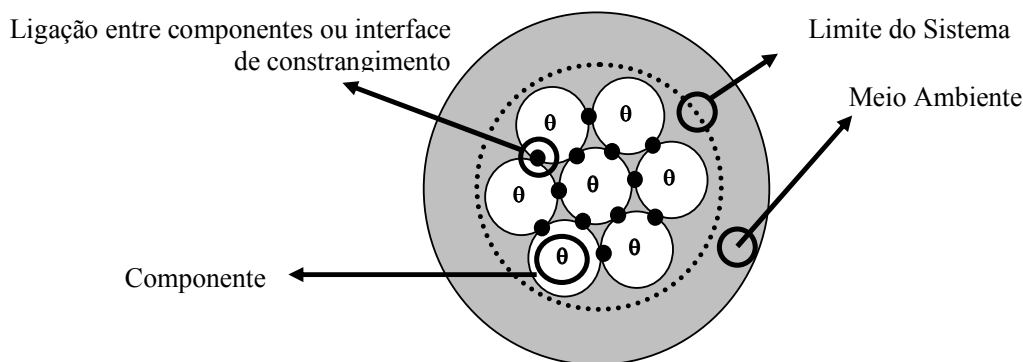


Figura 1 - Representação simbólica de um sistema. Fonte: Sucena *et al.* (2005).

Agosti (2003) salienta que os elementos de um problema de decisão são:

- As alternativas: São as possíveis soluções do problema.
- Os estados da natureza: São as ocorrências futuras que podem influir sobre as alternativas, fazendo com que elas possam apresentar mais de um resultado.
- Os resultados: São as conseqüências das alternativas. Uma alternativa pode ter mais de um resultado. É preciso selecionar os resultados relevantes para o problema em questão.

As alternativas disponíveis para o tomador de decisão são resultado da avaliação de fatos que compõem um problema, que por intermédio de métodos de organização, transformam-se em informações. Esses passos, quando executados em seqüência lógica, redundarão em conhecimento, que quando acumulados em uma base de dados, servirão para subsidiar outras decisões no futuro. A figura 2 apresenta cada etapa dessa seqüência até a obtenção do potencial competitivo empresarial.

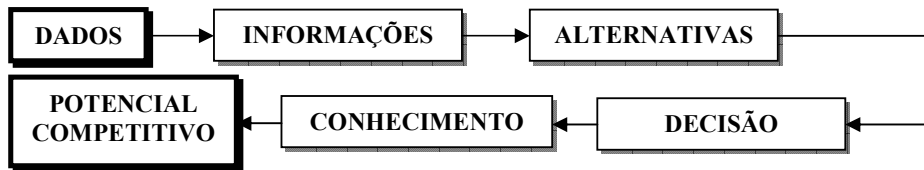


Figura 2 – Passos para a obtenção do potencial competitivo em uma organização

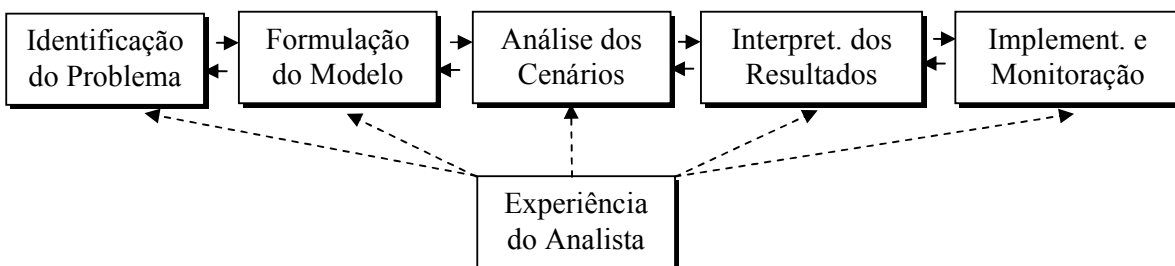
Lachtermacher (2004) relata que no processo de tomada de decisão deve-se considerar, em conjunto, a intuição do decisor e as informações que determinarão as alternativas disponíveis para a solução do problema. Estas informações são resultado do tratamento de dados que representam um “mini mundo” ou “mundo simbólico”.

A análise do “mini-mundo” auxilia a construção de um modelo que representa um problema real existente, como meio de analisá-lo e compreendê-lo, objetivando apresentar o desempenho que se deseja. Um problema real é um conjunto complexo de variáveis que dita o comportamento deste e que pode ser modelado, para efeito de análise, por uma estrutura simplificada Andrade (2000).

Ainda de acordo com o autor, essas variáveis podem ser categorizadas da seguinte forma:

- De decisão: definidas pelo analista como fornecedoras das informações que assistem à decisão;
- Controlável ou endógena: é o resultado do processamento do modelo;
- Não-controláveis ou exógenas: são valores externos ao modelo que representam as hipóteses assumidas ou as condições que devam ser respeitadas pelo modelo.

O processo de solução de um problema passa pela construção do modelo que o represente. Lachtermacher (2004) expõe este processo com cinco etapas: identificação do problema, formulação do modelo, análise dos cenários, interpretação dos resultados e implementação e monitoração. Cada uma das etapas se liga à subsequente. A posterior retroalimenta a anterior para reavaliação da fase executada. A experiência do analista se encaixa aos dados enviados na retroalimentação, promovendo a melhoria do modelo. Este diagrama pode ser mais bem entendido observando-se a figura 3.



← - Avaliação da etapa

Figura 3 – Etapas para a solução de problemas. Fonte: Adaptado de Lachtermacher (2004).

De acordo com Andrade (2000), a fase “identificação do problema” passa por três aspectos principais:

- Descrição dos objetivos do estudo que auxiliará a solução do problema;
- Caracterização das alternativas disponíveis que balizarão a decisão;
- Identificação das limitações, restrições e exigências que influenciam o problema.

Na fase “formulação do modelo” é o momento da escolha da técnica mais apropriada para descrever matematicamente o problema. Também nessa fase o analista procura entender como é o problema real para poder “traduzir” a realidade. A confiabilidade do modelo depende da qualidade da descrição do problema, obtida na primeira etapa, e da percepção do analista quanto aos quesitos e atores envolvidos.

As fases “análise dos cenários” e “interpretação dos resultados” servem para validar o modelo, ou seja, verifica-se se o comportamento do modelo representa o problema real, considerando a inexatidão do processo. Geralmente faz-se isso se utilizando dados reais para verificar-se se há veracidade na reprodução do comportamento do problema.

A “implementação e monitoração” do modelo é o momento da sua utilização operacional, isto é, na prática do dia-a-dia. Necessita-se então que o analista possa acompanhar a implementação e as saídas obtidas após o processamento, para que sejam ajustadas as variáveis que estejam degradando os resultados.

#### 4 – Tipos de Modelo

Um estudo de PO serve para representar uma situação física por intermédio de um modelo. Um modelo de PO pode ser definido como uma representação idealizada de um sistema organizacional. Este sistema pode já ser existente ou pode ainda ser uma ideia a espera de execução. Montevechi (2000)

De acordo com Ackoff (1974) e Goldbarg *et al.* (2000), existem três tipos de modelos que são utilizados na PO:

- Icônicos: representam-se as propriedades dos objetos reais em escalas diferentes. Exemplos: modelos expostos nos planetários do sistema solar (escala reduzida) e modelo de átomo em escala ampliada.
- Analógicos: usam um conjunto de propriedades para representar outro conjunto de propriedades.  
Exemplo: curvas de nível num mapa análogo às elevações reais e representação de um sistema elétrico por um hidráulico.
- Simbólicos: utilizam letras, números ou outros tipos de símbolos para representar as variáveis e as suas relações. Considera-se esse modelo como abstrato. Eles podem ser representados por relações matemáticas que refletem a estrutura do sistema real.

Andrade (2000) destaca que dependendo da forma de abordagem do analista e da natureza da decisão, os modelos podem ser classificados como:

- Conceituais: estruturam as informações e as fases do problema de forma seqüencial e lógica;
- Heurísticos<sup>1</sup>: são utilizados quando a complexidade do problema não possibilita a utilização de relações matemáticas;

---

<sup>1</sup>Heurística: Método de solução de problemas indutivo baseado em regras derivadas do senso comum ou da experiência de um modelo teórico da matemática. Fornece uma base geral para a solução de problemas, contrastando com abordagens estritamente algorítmicas, que nunca variam.

- Simbólicos ou Matemáticos: parte do pressuposto que as variáveis do problema podem ser quantificáveis.

Lachtermacher (2004) distingue três tipos básicos de modelos:

- Físicos: são modelos que apresentam as características físicas do fenômeno ou objeto;
- Análogos: são representações, geralmente gráficas, que representam um fenômeno, tal como mapas e escala de medidores;
- Matemáticos ou simbólicos: onde as grandezas do fenômeno, e as suas relações, são representadas por variáveis de decisão, que na maioria das vezes são quantitativas.

Lisboa (2002) destaca que em um modelo matemático são incluídos três conjuntos principais de elementos:

- As variáveis de decisão e parâmetros: variáveis de decisão são as incógnitas a serem determinadas pela solução do modelo. Parâmetros são valores fixos no problema;
- As restrições: considerações sobre as limitações do sistema, o modelo deve incluir restrições que limitam as variáveis de decisão a seus valores possíveis (ou viáveis);
- A função-objetivo: é uma função matemática que define a qualidade da solução em função das variáveis de decisão.

Andrade (2000) destaca que é mais comum a solução de problemas baseando-se na PO utilizarem modelos matemáticos, que podem ser divididos em modelos de simulação e de otimização (solução analítica).

#### 4.1 – Exemplos de Modelagem

##### **Exemplo 1:**

Uma empresa que produz janelas e portas de polietileno, de alta qualidade, utiliza três seções na sua linha de produção:

- 1) Serralharia: produz estruturas de alumínio;
- 2) Carpintaria: produz estruturas de madeira;
- 3) Montagem: monta as portas e janelas.

Devido à redução drástica dos seus lucros, o diretor de produção decidiu reorganizar o seu sistema fabril, propondo produzir, somente, dois produtos que têm melhor aceitação entre os clientes.

São eles:

- ✓ Produto 1: porta de polietileno com estrutura de alumínio.
- ✓ Produto 2: janela grande de polietileno com estrutura de madeira.

A área de marketing concluiu que a empresa poderá vender qualquer dos dois produtos, considerando a capacidade de produção disponível. Como ambos os produtos partilham a seção de montagem, o gerente solicitou ao Departamento de Planejamento e Controle da Produção a solução deste problema.

O PCP para avaliar o problema, procurou os seguintes dados:

- A) Qual é a capacidade de produção, por minuto, de cada seção a ser utilizada na produção de ambos os produtos?
- B) Qual é a capacidade de produção, por minuto, de cada seção a ser utilizada para produzir uma unidade de cada produto?
- C) Quais são os lucros unitários de cada produto?

Os resultados desses questionamentos estão resumidos na tabela a seguir.

Seção	Produto 1 (porta)	Produto 2 (janela)	Capacidade disponível
Serralheria	1	0	4
Carpintaria	0	2	12
Montagem	3	2	18
Lucro unitário (R\$)	3,00	5,00	

Modelagem:

$X_1$  → Quantidade do produto 1 a se fabricar.

$X_2$  → Quantidade do produto 2 a se fabricar.

Lucro →  $\text{Maximizar } L = 3X_1 + 5X_2$  Função-objetivo  
 sujeito a

Serralheria →  $X_1 \leq 4$   
Carpintaria →  $2X_2 \leq 12$  Restrições de Produção  
Montagem →  $3X_1 + 2X_2 \leq 18$   
 $X_1 \geq 0, X_2 \geq 0$  Restrições Naturais (Produção não-negativa)

**Exemplo 2:** (Adaptado de Nogueira, 2007)

Uma indústria produz dois tipos de produtos, sendo que cada um consome uma certa quantidade de horas para ser produzido em três máquinas. Os tempos estão expostos na tabela a seguir.

Produto / Tempo na Máquina (h)	A	B	C
1	2	1	4
2	2	2	2

O tempo máximo semanal de uso das máquinas é:

Máquina	Tempo por Semana (h)
A	160
B	120
C	280

O lucro obtido por cada produto é:

Produto	Lucro (R\$)
1	1,00
2	1,50

Quanto se deve fabricar de cada produto, de modo que seja obedecida a capacidade operativa das máquinas, com o maior lucro possível?



Modelagem:

$X \rightarrow$  Quantidade do produto 1 a se fabricar.

$Y \rightarrow$  Quantidade do produto 2 a se fabricar.

Função-objetivo (máximo lucro):

$$\text{MAX } R = X + 1,5Y$$

Sujeito a

$$2X + 2Y \leq 160 \rightarrow \text{Restrição de Tempo na Máq.A}$$

$$X + 2Y \leq 120 \rightarrow \text{Restrição de Tempo na Máq.B}$$

$$4X + 2Y \leq 280 \rightarrow \text{Restrição de Tempo na Máq.C}$$

$$X, Y \geq 0 \rightarrow \text{Restrições Naturais (Produção não-negativa)}$$

**Exemplo 3:** (Adaptado de Nogueira, 2007)

Suponha que para construir uma casa popular por mês, uma construtora necessite de 2 pedreiros e 4 serventes. Para construir um apartamento no mesmo intervalo de tempo, a mesma construtora necessita de 3 pedreiros e 8 serventes. A construtora possui um efetivo total de 30 pedreiros e 70 serventes contratados. A construtora obtém um lucro de R\$ 3.000,00 na venda de cada casa popular e de R\$ 5.000,00 na venda de cada apartamento e toda "produção" da construtora é vendida. Qual é a quantidade ótima de casas populares e apartamentos que a construtora deve construir para que está obtenha lucro máximo.

Qtd. de Funcionários / Tipo de Edificação	Casa	Apart.
Pedreiro	2	3
Servente	4	8

Lucro de cada edificação:

	Casa	Apart.
Lucro (R\$)	3.000,00	5.000,00

Disponibilidade da mão-de-obra:

	Disponibilidade
Pedreiro	30
Servente	70

**Modelagem:**

$Q_1 \rightarrow$  quantidade de casas populares construídas;

$Q_2 \rightarrow$  quantidade de apartamentos construídos.

$$\text{MAX } M = 3.000Q_1 + 5.000Q_2$$

Restrições:

$$2Q_1 + 3Q_2 \leq 30 \rightarrow \text{Restrição de Pedreiros}$$

$$4Q_1 + 8Q_2 \leq 70 \rightarrow \text{Restrição de Serventes}$$

$$Q_1, Q_2 \geq 0 \rightarrow \text{Restrições Naturais (Produção não-negativa)}$$

## 4.2 - Modelos de Otimização na Programação Matemática

Conceito intuitivo de Otimizar, segundo Lima Jr. *et al.* (2004):  
 Fiz o melhor que pude...  
 ✓ “melhor” diz respeito à Função-objetivo;  
 ✓ “que pude” refere-se às Restrições à otimização.

Os métodos de otimização, neste caso, são:

### a) Programação Linear

É um caso particular dos modelos de programação matemática, pois as variáveis são contínuas e representam o comportamento do modelo (função-objetivo e restrições) de forma linear.

Os problemas de programação linear não apresentam as seguintes expressões:  $X^n$  (para  $n \neq 1$ ),  $\log_a(X)$  (para qualquer base  $a$ ) e  $a^X$  (para qualquer valor de  $a$ ).

### b) Programação não-linear

Se existe algum tipo de não-linearidade, tanto na função-objetivo quanto nas restrições. Existem as programações matemáticas Côncava, Convexa e Quadrática. É possível transformar os problemas de programação não-linear para linear, melhorando a qualidade do resultado devido à eficiência desses algoritmos.

### c) Programação inteira

Se alguma variável não puder assumir valores contínuos, ficando restrita a valores discretos.

## 5 – Programação Linear

É uma técnica da Pesquisa Operacional utilizada para resolver determinada classe de problemas em que se procura alocar recursos limitados a atividades ou decisões diversas, de maneira ótima (solução ótima). Este tipo de problema aparece frequentemente nos setores de planejamento e operações de indústrias, empresas de transporte, órgãos governamentais etc..

Entende-se por solução ótima àquela, dentre todas as soluções viáveis, que produz o melhor (menor ou maior, dependendo do problema) valor da função-objetivo.

Os três principais grupos de problemas que podem ser resolvidos por Programação Linear são os seguintes:

a) Misturas de ingredientes com composição e preços conhecidos, para atender a determinadas especificações (de composição ou de estoque), a custo mínimo ou lucro máximo. Utilizada para balancear rações para animais, refeições, abastecimento de comunidades ou tropas, utilização parcelada de combustíveis, lubrificantes, fertilizantes e corretivos, defensivos agrícolas, perfumes e cosméticos, ligas metálicas, no auxílio para as indústrias de alimentos etc.

b) Transporte, distribuição ou alocação, em que se procura determinar as quantidades a transportar, segundo as vias alternativas possíveis, a frequência ou períodos de transporte e as especificações quanto a operação levando em conta os custos (fretes, riscos capital empatado, prêmios e multas, embalagem, armazenamento, capacidade dos meios etc.). Entre as áreas de utilização citam-se: abastecimento, distribuição de produtos, transporte de cargas ou pessoas etc..

c) Programas de Produção ou limitação de recursos nos setores agrícolas, industriais ou de serviços, como o seguinte modelo típico: uma empresa oferece várias alternativas de serviços ou pode fabricar ou produzir vários bens; conhecem-se as quantidades de insumos necessários para a

produção de uma unidade do bem ou serviço; conhecem-se as restrições do mercado quanto aos limites inferiores e superiores de produção ou demanda do bem ou serviço; conhecem-se as disponibilidades dos insumos por parte da empresa; conhece-se o valor ou lucro unitário dos bens ou serviços a serem produzidos; deseja-se obter o melhor programa de produção que pode ser: maximizar os lucros, maximizar o volume de produção, maximizar ou minimizar o emprego de determinado insumo, minimizar o tempo ocioso de pessoas ou equipamentos etc..

A representação matemática de um problema de Programação Linear (PL) tem a seguinte forma:

Otimizar a função-objetivo (maximizar ou minimizar):  $Z = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$

Sujeito a (restrições do problema)

$$\left. \begin{array}{l} g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \dots\dots\dots \\ g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{array} \right\} \begin{array}{l} \leq \\ = \\ \geq \end{array} \left\{ \begin{array}{l} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_m \end{array} \right.$$

Sendo:

- $x_j$ : variáveis de decisão para  $j=1,2,\dots,n$ ;
- $b_j$ : quantidade disponível de um determinado recurso para  $j=1,2,\dots,m$ ;
- $n$ : quantidade de variáveis de decisão do modelo de PL;
- $m$ : quantidade de restrições do modelo de PL;
- $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ : função-objetivo do modelo de PL;
- $g_j(x_1, x_2, \dots, x_n)$ : restrições do modelo de PL para  $j=1,2,\dots,m$ .

Conforme citado anteriormente, o termo "linear" significa que todas as funções definidas no modelo matemático que descreve o problema devem ser lineares, isto é, se  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  e cada uma das  $g_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , para  $i$  de 1 até  $m$ , forem funções lineares.

Considerando-se  $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$  e  $g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n$  chega-se a seguinte representação matemática, utilizando-se as restrições, por exemplo, como equações:

---


$$\begin{aligned} & \text{Min ou Max } Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \\ & \text{Sujeito às restrições} \\ & \quad a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1n}X_n = b_1 \\ & \quad a_{12}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2n}X_n = b_2 \\ & \quad \vdots \\ & \quad a_{m1}X_1 + a_{m2}X_2 + \dots + a_{mn}X_n = b_m, \end{aligned}$$

Considerando que  $X_i \geq 0$  para  $i = 1, 2, \dots, n$ .

---

De acordo com Cintra (2007), um problema de programação linear, na forma matricial, tem o seguinte formato:

$$\begin{array}{l} \text{Min } z = cx \\ \text{s.a.} \\ Ax = b \\ x \geq 0 \end{array} \quad \rightarrow \quad A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_m \end{bmatrix} \quad c = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \dots \\ c_n \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix}$$

A matriz  $A$  contém os coeficientes das restrições e é denominada matriz de restrições, o vetor  $b$  contém os coeficientes dos recursos (termos independentes), o vetor  $c$  é formado pelos coeficientes da função-objetivo e  $x$  é o vetor com as variáveis de controle ou decisão.

O modelo do exemplo 1 pode ser representado, na forma matricial, como se segue:

$$\text{Maximizar } L = 3X_1 + 5 X_2$$

s.a.

$$X_1 \leq 4$$

$$2X_2 \leq 12$$

$$3X_1 + 2X_2 \leq 18$$

$$X_1 \geq 0, X_2 \geq 0$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 2 \\ 3 & 2 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 4 \\ 12 \\ 18 \end{bmatrix} \quad c = \begin{bmatrix} 3 \\ 5 \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

**Exercício: Escrever os exemplos de modelagem 2 e 3 na forma de matriz.**

Um problema de programação linear pode ser escrito também na **forma Padrão** seguindo-se a estrutura a seguir:

$$\text{Min ou Max } Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n,$$

Sujeito às restrições

$$a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1n}X_n = b_1$$

$$a_{12}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2n}X_n = b_2$$

⋮

$$a_{m1}X_1 + a_{m2}X_2 + \dots + a_{mn}X_n = b_m,$$

Considerando que  $X_i \geq 0, b_j \geq 0$  para

$i = 1, 2, \dots, n$  e  $j = 1, 2, \dots, m$ .

Pode-se também escrever um problema de PL na **forma Canônica**:

$$\text{Min } Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n,$$

Sujeito às restrições

$$a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1n}X_n \geq b_1$$

$$a_{12}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2n}X_n \geq b_2$$

⋮

$$a_{m1}X_1 + a_{m2}X_2 + \dots + a_{mn}X_n \geq b_m,$$

Considerando que  $X_i \geq 0$  para  $i = 1, 2, \dots, n$ .

$$\text{Max } Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n,$$

Sujeito às restrições

$$a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1n}X_n \leq b_1$$

$$a_{12}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2n}X_n \leq b_2$$

⋮

$$a_{m1}X_1 + a_{m2}X_2 + \dots + a_{mn}X_n \leq b_m,$$

Considerando que  $X_i \geq 0$  para  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Nessas expressões,  $a_{mn}, b_m$  e  $c_n$  são números reais,  $x_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) são as variáveis de decisão do problema,  $n$  é o número de variáveis de decisão,  $m$  é o número de restrições.

A Programação Linear procura os valores de  $x_i$ , quando esses valores existirem, de modo a se atingir o máximo ou o mínimo da função-objetivo.

As restrições indicam as limitações de uma maneira geral, sejam elas físicas, de recursos humanos, monetárias, sócio-econômicas etc..

As constantes  $b_1, b_2, \dots, b_m$  devem ser positivas e representam o nível máximo que se pode atingir para cada um dos recursos.

### 5.1 - Operações para Adequação do Modelo de PL

Após a modelagem de um problema utilizando-se a programação linear, pode-se obter uma estrutura que não esteja adequada. Sendo assim, é viável saber como adequá-la sem perder as propriedades matemáticas do modelo original. As regras para adequação são:

A) Modificação do Critério de Otimização:  $\text{Min } Z = -\text{Max}(-Z)$ , ou seja, deve-se maximizar  $-Z$  e, ao final, tomar o valor ótimo com o sinal trocado.

Exemplo:  $\text{Min } Z = c_1 X_1 + c_2 X_2 + \dots + c_n X_n$  para  $\text{Max } -Z = \text{Max } Z' = -c_1 X_1 - c_2 X_2 - \dots - c_n X_n$

B) Eliminação das Variáveis Livres: para variáveis de decisão sem restrição de não-negatividade (variáveis *irrestritas* ou *livres*), como por exemplo  $X$ , pode-se introduzir duas novas variáveis não-negativas  $X' \geq 0$  e  $X'' \geq 0$  e realizar a substituição de variáveis:  $X = X' - X''$ .

Exemplo:

$$\text{Max } W = 3X_1 + 4X_2$$

Sujeito a

$$5X_1 \leq 15$$

$$3X_2 \geq 3$$

$$X_1 \geq 0 \text{ e } X_2 \text{ livre}$$

$X_2$  não aparece na restrição natural ou de não negatividade, e por isso, é considerada uma variável livre. Faz-se o seguinte:

$$X_2 = X_2' - X_2''$$

Reescrevendo o modelo de PL tem-se:

$$\text{Max } W = 3X_1 + 4X_2' - 4X_2''$$

Sujeito a

$$5X_1 \leq 15$$

$$3X_2' - 3X_2'' \geq 3$$

$$X_1, X_2', X_2'' \geq 0$$

Obs.: Se existirem duas ou mais variáveis livres podem-se substituí-las utilizando-se uma única variável auxiliar.

Exemplo:

$$\text{Max } W = 3X_1 + 4X_2 + 5X_3$$

Sujeito a

$$5X_1 \leq 15$$

$$3X_2 \geq 3$$

$$2X_3 \geq 3$$

$X_1 \geq 0$  e  $X_2, X_3$  livres

$X_2 = X_2' - va$  e  $X_3 = X_3' - va$

Max  $W = 3X_1 + 4(X_2' - va) + 5(X_3' - va)$

Sujeito a

$5X_1 \leq 15$

$3(X_2' - va) \geq 3$

$2(X_3' - va) \geq 3$

$X_1, X_2', X_3', va \geq 0$  e  $X_2, X_3$  livres

C) Restrições em Igualdade: Uma igualdade pode ser convertida em duas inequações da seguinte maneira:

Exemplo:  $a_1 X_1 + a_2 X_2 = b$  para  $a_1 X_1 + a_2 X_2 \leq b$  e  $a_1 X_1 + a_2 X_2 \geq b$

D) Restrições do Tipo  $\geq$ : podem ser convertidas em restrições do tipo  $\leq$  multiplicando-se a inequação por -1.

Exemplo:  $a_1 X_1 + a_2 X_2 \geq b$  para  $-a_1 X_1 - a_2 X_2 \leq -b$

E) Eliminando uma Restrição tipo Inequação (uso dos sinais  $>$ ,  $\geq$ ,  $<$  ou  $\leq$ ):

Para  $<$  ou  $\leq$ :

$a_1 X_1 + a_2 X_2 \leq b$  insere-se uma variável auxiliar (neste caso de folga), ficando  $a_1 X_1 + a_2 X_2 + A_1 \leq b$ , sendo que  $F_1 \geq 0$ .

Para  $>$  ou  $\geq$ :

$a_1 X_1 + a_2 X_2 \geq b$  insere-se uma variável auxiliar (neste caso de excesso), ficando  $a_1 X_1 + a_2 X_2 - A_1 \leq b$ , sendo que  $E_1 \geq 0$ .

Exemplo:

Min  $Z = -4X_1 + 5X_2$

Sujeito a

$X_1 + 2X_2 = 3$

$X_1 - X_2 \geq 5$

$X_1 \geq 0$

A) Max  $Z' = -Z = 4X_1 - 5X_2$

B) Eliminação da variável livre:  $X_2 = X_2' - X_2''$

Substituindo no modelo matemático:

Max  $Z' = -Z = 4X_1 - 5X_2' + 5X_2''$

Sujeito a

$X_1 + 2X_2' - 2X_2'' = 3$

$X_1 - X_2' + X_2'' \geq 5$

$X_1, X_2', X_2'' \geq 0$

C) Transformando a 1ª restrição de igualdade em duas inequações.

$$\text{Max } Z' = -Z = 4X_1 - 5X_2' + 5X_2''$$

Sujeito a

$$X_1 + 2X_2' - 2X_2'' \geq 3$$

$$X_1 + 2X_2' - 2X_2'' \leq 3$$

$$X_1 - X_2' + X_2'' \geq 5$$

$$X_1, X_2', X_2'' \geq 0$$

D) Transformando as restrições de  $\geq$  para  $\leq$ :

$$\text{Max } Z' = -Z = 4X_1 - 5X_2' + 5X_2''$$

Sujeito a

$$-X_1 - 2X_2' + 2X_2'' \leq 3$$

$$X_1 + 2X_2' - 2X_2'' \leq 3$$

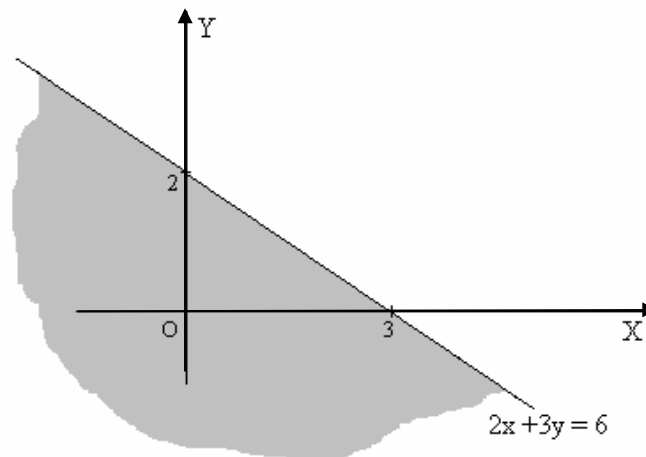
$$-X_1 + X_2' - X_2'' \leq 5$$

$$X_1, X_2', X_2'' \geq 0$$

## 5.2 - Solução Gráfica

A solução gráfica é utilizada para solução de problemas de PL simples com duas variáveis de decisão.

Inicialmente cabe lembrar como é a representação de uma inequação. Uma desigualdade pode ser representada em um plano cartesiano por um semi-plano, conforme figura a seguir que expõe a inequação  $2x + 3y \leq 6$  (Souza *et al.*, s/d).



Exemplo 1 (Adaptado de Souza *et al.*, s/d):

$$\text{Max } Z = 3X_1 + 4X_2$$

Sujeito a

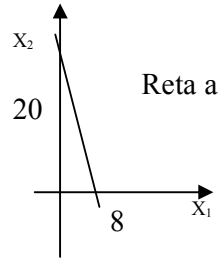
$$2,5X_1 + X_2 \leq 20$$

$$3X_1 + 3X_2 \leq 30$$

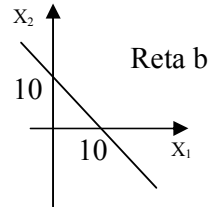
$$X_1 + 2X_2 \leq 16$$

$$X_1 \geq 0, X_2 \geq 0$$

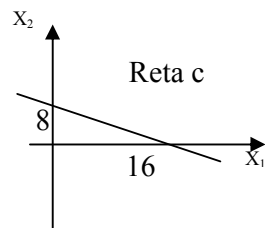
1ª Restrição:  $2,5 X_1 + X_2 = 20 \rightarrow$  para  $X_2 = 0, X_1 = 20/2,5 = 8 \rightarrow$  para  $X_1 = 0, X_2 = 20$



2ª Restrição:  $30 X_1 + 3 X_2 = 30 \rightarrow$  para  $X_2 = 0, X_1 = 30/3 = 10 \rightarrow$  para  $X_1 = 0, X_2 = 10$



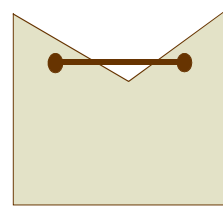
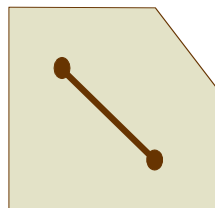
3ª Restrição:  $X_1 + 2 X_2 = 16 \rightarrow$  para  $X_2 = 0, X_1 = 16 \rightarrow$  para  $X_1 = 0, X_2 = 16/2 = 8$



Como as restrições deste problema de PL são dadas em forma de desigualdades, então a solução gráfica do conjunto de restrições será um polígono convexo (não necessariamente fechado) que recebe o nome de Região de Soluções Viáveis (R.S.V.). A solução ótima do problema de programação linear será um dos vértices desse polígono.

Um polígono é convexo se, por intermédio de um segmento de reta formado por dois pontos quaisquer dentro do conjunto convexo ( $R^2$ ), todos os seus infinitos pontos fazem parte deste conjunto.

Exemplos:

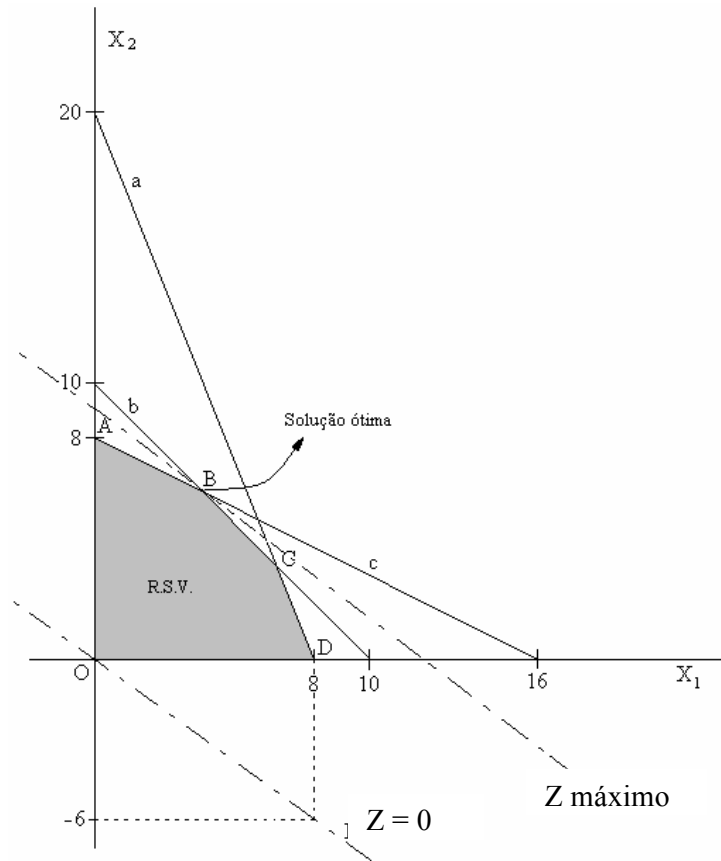


Para este caso de maximização, deve-se encontrar o ponto ótimo. Começa-se traçando a reta que anula a função-objetivo, ou seja, a reta que passa pela origem ( $X_1 = 0, X_2 = 0$  e  $Z = 0$ ) e que corresponde a  $Z = 0$ , representando a situação mais desfavorável; em seguida procura-se o vértice do polígono pelo qual passa a reta paralela à reta traçada anteriormente, ponto esse que deve ser o mais afastado possível (visto que o problema é de maximização).



As equações de reta que representa  $Z = 0$  e as paralelas que se destinam ao vértice mais afastado do polígono convexo são também conhecidas como “equações equipotenciais”.

A solução completa pode ser observada na próxima figura.

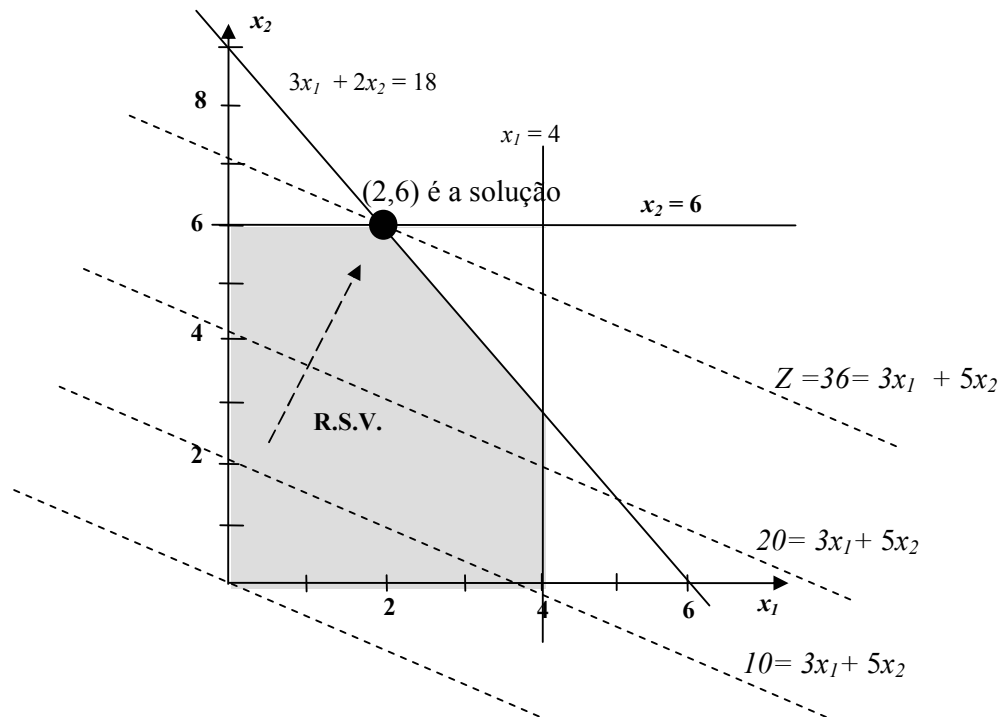


Exemplo 2 da Modelagem (Adaptado de Souza *et al.*, s/d):

$$\begin{aligned} \text{Lucro} &\rightarrow \text{Maximizar } Z = 3X_1 + 5X_2 \\ &\text{sujeito a} \\ \text{Serralheria} &\rightarrow X_1 \leq 4 \\ \text{Carpintaria} &\rightarrow 2X_2 \leq 12 \\ \text{Montagem} &\rightarrow 3X_1 + 2X_2 \leq 18 \\ &X_1 \geq 0, X_2 \geq 0 \end{aligned}$$

- 1) Identificar os valores de  $(X_1, X_2)$  que satisfaçam todas as restrições (região de soluções viáveis).
- 2)  $X_1 \geq 0, X_2 \geq 0$  (restrição natural)  $\Rightarrow$  a solução está no 1º Quadrante.
- 3)  $X_1 \leq 4$  (1ª restrição)  $\Rightarrow$  a solução está à esquerda ou sobre a reta  $X_1 = 4$ .
- 4)  $2X_2 \leq 12$  (2ª restrição)  $\Rightarrow X_2 \leq 6 \Rightarrow$  a solução está abaixo ou sobre a reta  $X_2 = 6$ .
- 5)  $3X_1 + 2X_2 \leq 18$  (3ª restrição)  $\Rightarrow$  a solução está abaixo ou sobre a reta  $3X_1 + 2X_2 = 18$ .
- 6) Traçar a reta  $3X_1 + 5X_2 = 0$  e caminhar com outras, em paralelo, até atingir o último ponto (solução ótima) da RSV.

A próxima figura expõe, de forma gráfica, os passos anteriores.



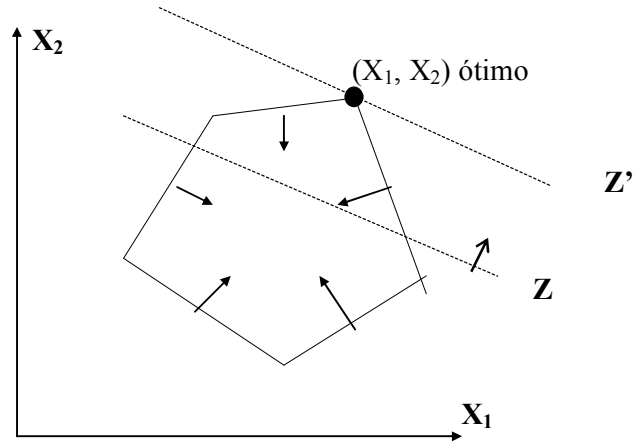
O objetivo da Programação Linear é determinar, entre as soluções viáveis, a que seja “melhor” considerando o resultado da função-objetivo. Se for um problema de minimização, “melhor” representa o menor valor da função-objetivo; se o problema for de maximização, procura-se o maior valor.

Todo problema de Programação Linear parte de alguma hipótese que são assumidas quando se tenta resolvê-los. Quais são (Lachtermacher, 2004):

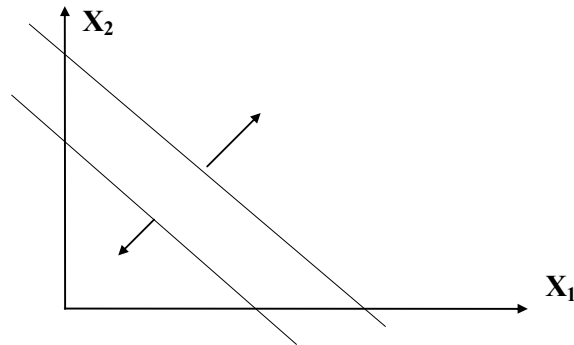
- Proporcionalidade: o valor da função-objetivo é diretamente proporcional ao nível de atividade de cada variável de decisão;
- Aditividade: considera as atividades, representadas pelas variáveis de decisão, do modelo como entidades totalmente independentes, não permitindo que haja interdependência entre as mesmas, isto é, não permitindo a existência de termos cruzados, tanto na função-objetivo como nas restrições;
- Divisibilidade: assume que todas as unidades de atividade possam ser divididas em qualquer nível fracional, isto é, qualquer variável de decisão pode assumir qualquer valor fracionário;
- Certeza: assume que todos os parâmetros do modelo são constantes conhecidas. Em problemas reais, a certeza quase nunca é satisfeita, provocando a necessidade de análise de sensibilidade dos resultados.

Soluções Possíveis

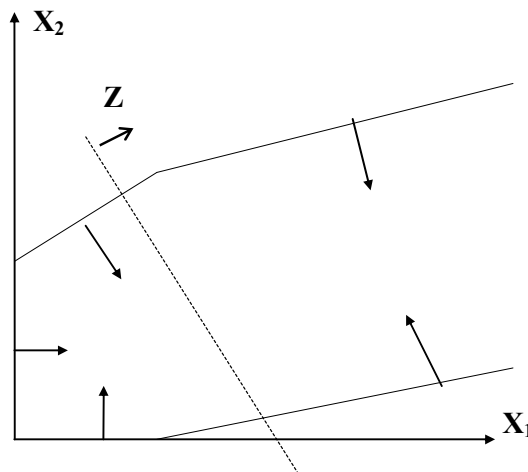
- 1) Solução ótima única e finita: se a solução ótima é finita e única então a solução está em um dos extremos do polígono convexo.



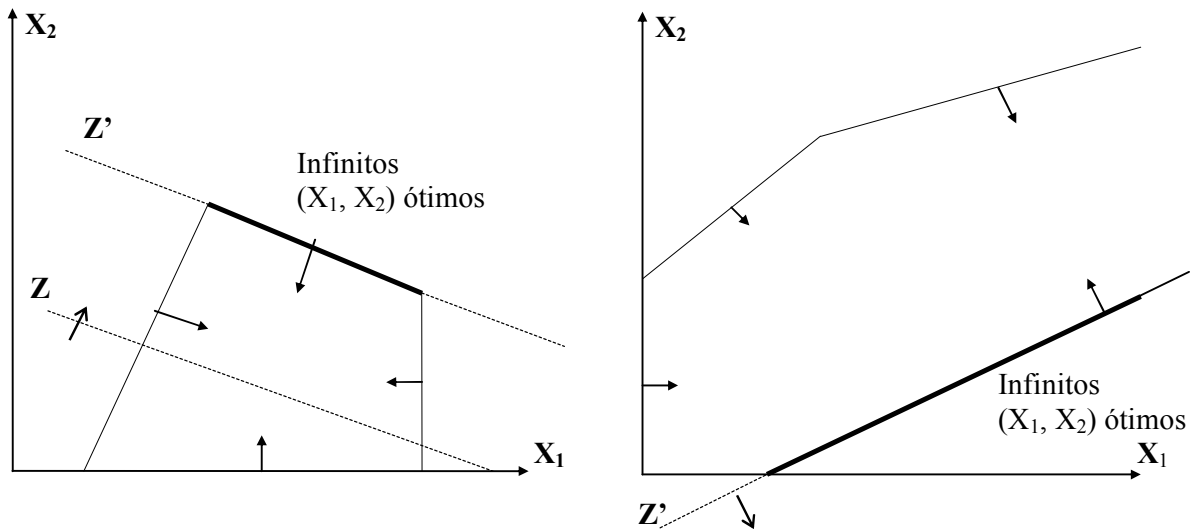
- 2) Não há Solução Viável: quando não se consegue definir uma área que atenda a todas as restrições ao mesmo tempo;



- 3) Solução Ótima Ilimitada: quando a função-objetivo pode crescer indefinidamente, isto é, não há nenhuma restrição que limite o seu crescimento;



- 4) Múltiplas Soluções: quando a função-objetivo recai sobre uma aresta do espaço de solução, isto é, é paralela com uma restrição limitante.



Notar que às vezes uma ou mais restrições não participam da determinação do conjunto de soluções viáveis. Elas são classificadas como redundantes, ou seja, quando há a sua exclusão do conjunto de restrições em um problema de PL, o conjunto das soluções viáveis não se altera.

Existem alguns teoremas que sustentam os estudos sobre programação linear. São eles:

- 1 – O conjunto de todas as soluções viáveis de um modelo de PL é um conjunto convexo.
- 2 - Toda solução compatível básica do sistema linear de um modelo de PL é um ponto extremo do conjunto de soluções viáveis.
- 3 – Se a função-objetivo possui um único ponto ótimo finito, então este é extremo do conjunto convexo de soluções viáveis.
- 4 – Se a função-objetivo assume valor ótimo em mais de um ponto do conjunto de soluções viáveis, então ela assume este valor para pelo menos dois pontos extremos do conjunto convexo e para qualquer combinação convexa desses pontos extremos.

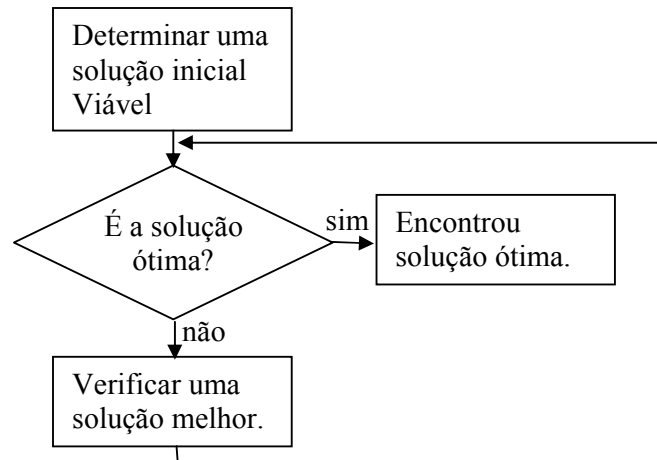
### 5.3 - Método Simplex – Problemas de Maximização (baseado em Lisboa, 2002)

O nome “simplex” está relacionado com o conjunto de restrições lineares que representam geometricamente uma figura chamada simplexo, que é o equivalente aos poliedros no espaço e aos polígonos no plano como citado anteriormente. Esse método pesquisa os vértices do poliedro de restrições.

O método Simplex está fundamentado nos seguintes teoremas:

- O conjunto de todas as soluções viáveis de um modelo de Programação Linear forma um conjunto convexo.
- Toda solução compatível básica do sistema de equações lineares de um modelo de Programação Linear é um ponto extremo do conjunto de soluções viáveis, isto é, do conjunto de convexo de soluções.
- Se a função-objetivo possui um ótimo finito, então pelo menos uma solução ótima é um ponto extremo do conjunto convexo de soluções viáveis.
- Se a função-objetivo assume o ótimo em mais de um ponto extremo do conjunto de soluções viáveis, então ela toma o mesmo valor para qualquer ponto do segmento da reta que une esses pontos extremos.

Resumidamente, o método Simplex é um algoritmo que permite resolver problemas de Programação Linear. A ideia básica do método Simplex consiste em resolver repetidas vezes um sistema de equações lineares para obter uma sucessão de Soluções Básicas Admissíveis, cada uma "melhor" do que a anterior, até se chegar a uma ótima. Esta rotina está representada na figura a seguir.



Solução Básica: considerando-se um conjunto de  $m$  equações linearmente independentes e  $n$  incógnitas, onde  $n > m$ , se define como solução básica a solução para o conjunto de equações em que  $(n - m)$  variáveis são feitas iguais a 0 e as restantes são obtidas da resolução do sistema de equações. (dos Santos, 2003)

Exemplo (dos Santos, 2003):

$$x_1 + x_2 + 3x_3 - x_4 + x_5 = 6$$

$$x_1 + 2x_2 + 2x_3 - x_4 + 2x_5 = 2$$

$$m = 2 \text{ e } n = 5.$$

Cada solução básica terá  $(5-2) = 3$  variáveis iguais a 0 que são denominadas variáveis não-básicas. Por exemplo,  $x_3, x_4$  e  $x_5$ . As outras, ou seja, diferentes de zero, são classificadas como variáveis básicas.

Quando em uma solução básica, pelo menos uma das variáveis básicas é igual a 0, entende-se que essa solução é degenerada. Esta variável é chamada de variável básica degenerada.

A quantidade de soluções básicas em um sistema linear é obtida pela seguinte expressão:

$$\binom{n}{m} = \frac{n!}{m!(n-m)!}$$

Exemplo de solução por tentativas de avaliações das soluções básicas (dos Santos, 2003):

$$\text{Max } Z = 20x_1 + 60x_2$$

s.a.

$$70x_1 + 70x_2 \leq 4900$$

$$90x_1 + 50x_2 \leq 4500$$

$$2x_1 \leq 80$$

$$3x_2 \leq 180$$

$$x_1, x_2 \geq 0$$

$$\frac{6!}{4! 2!} = 15 \text{ soluções básicas}$$

As 15 soluções básicas possíveis estão expostas a seguir:

n°	Não básicas	Básicas	Condição	Z
1	$x_1 = 0 \ x_2 = 0$	$F_1 = 4900 \ F_2 = 4500 \ F_3 = 80 \ F_4 = 180$	Praticável	0
2	$x_1 = 0 \ F_1 = 0$	$x_2 = 70 \ F_2 = 1000 \ F_3 = 80 \ F_4 = -30$	Impraticável	-
3	$x_1 = 0 \ F_2 = 0$	$x_2 = 90 \ F_3 = 80 \ F_4 = -90 \ F_1 = -1400$	Impraticável	-
4	$x_1 = 0 \ F_3 = 0$	$0 = 80$	Impossível	-
5	$x_1 = 0 \ F_4 = 0$	$F_3 = 80 \ x_2 = 60 \ F_1 = 700 \ F_2 = 1500$	Praticável	3600
6	$x_2 = 0 \ F_1 = 0$	$F_3 = -60 \ F_2 = -1800 \ F_4 = 180 \ x_1 = 70$	Impraticável	-
7	$x_2 = 0 \ F_2 = 0$	$F_3 = -20 \ F_1 = 1400 \ x_1 = 50 \ F_4 = 180$	Impraticável	-
8	$x_2 = 0 \ F_3 = 0$	$F_1 = 2100 \ F_2 = 900 \ x_1 = 40 \ F_4 = 180$	Praticável	800
9	$x_2 = 0 \ F_4 = 0$	$0 = 180$	Impossível	-
10	$F_1 = 0 \ F_2 = 0$	$x_1 = 25 \ x_2 = 45 \ F_3 = 30 \ F_4 = 45$	Praticável	3200
11	$F_1 = 0 \ F_3 = 0$	$x_1 = 40 \ x_2 = 30 \ F_2 = -600 \ F_4 = 90$	Impraticável	-
12	$F_1 = 0 \ F_4 = 0$	$x_1 = 10 \ x_2 = 60 \ F_3 = 60 \ F_2 = 600$	Praticável	3800
13	$F_2 = 0 \ F_3 = 0$	$x_1 = 40 \ x_2 = 18 \ F_1 = 840 \ F_4 = 126$	Praticável	1880
14	$F_2 = 0 \ F_4 = 0$	$x_1 = 16.7 \ x_2 = 60 \ F_3 = 46.7 \ F_1 = -466.6$	Impraticável	-
15	$F_3 = 0 \ F_4 = 0$	$x_1 = 40 \ x_2 = 60 \ F_1 = -2100 \ F_2 = -2100$	Impraticável	-

Como o objetivo é a maximização da função objetivo, verifica-se que a solução básica 12 proporciona o maior valor de Z e é, portanto, a solução ótima.

**Este tipo de solução, dependendo do tamanho do modelo, torna-se impraticável.** Por isso, a utilização do algoritmo Simplex facilita a análise pela forma analítica quanto a possibilidade de implementação em programa de computador, automatizando-se o processo.

Sendo assim, entende-se que: (dos Santos, 2003)

- ✓ Se um modelo de Programação linear possui uma única solução ótima, então ela é uma solução básica do sistema de equações lineares formado pelas restrições do modelo acrescidas das suas respectivas variáveis de folga.
- ✓ No caso de termos mais de uma solução ótima, teremos sempre uma quantidade infinita de soluções ótimas, pois serão ótimos todos os pontos que unem 2 vértices (pontos extremos) adjacentes, ou seja, todos os pontos de um dos lados do espaço solução.

Para se trabalhar diretamente com o método Simplex, a representação matemática de um problema de Programação Linear deve ser expressa na forma padrão, ou seja, para um problema de maximização tem-se:

- ✓ Todas as restrições devem ser equações;
- ✓  $B_j \geq 0$  sendo  $j = 1, 2, \dots, m$ ;
- ✓ Todas as variáveis de decisão devem ser não-negativas.

O Simplex está calcado na seguinte propriedade: Se uma solução básica é melhor que as suas adjacentes, então ela é a solução ótima. Por isso, resumidamente, as etapas do método Simplex são os expostos a seguir:

**Etapa 1:** Obter uma solução básica praticável inicial. Esta solução é obtida fazendo-se as variáveis de decisão como variáveis não-básicas, ou seja, iguais a 0. As variáveis básicas serão as variáveis de folga associadas às restrições.

**Etapa 2:** Dada uma solução básica, testar se ela é melhor que suas adjacentes. Se for, ela será a solução ótima.

**Etapa 3:** Se não for, ir para a melhor solução básica adjacente e voltar a etapa 2.

### Simplex Tabular

Para a utilização do método Simplex tabular (maximização), seguem-se os seguintes passos detalhados (adaptado de Andrade, 2000):

- ✓ **Passo 1:** Introduzir as variáveis de folga, uma para cada desigualdade, transformando-as em igualdades, ou seja, em equações lineares. Observar que essas inequações são do tipo UTILIZAÇÃO DO RECURSO  $\leq$  DISPONIBILIDADE. A inserção da variável de folga de RECURSO muda essa inequação para uma equação do tipo UTILIZAÇÃO + FOLGA = DISPONIBILIDADE
- ✓ **Passo 2:** Montar um quadro para os cálculos, colocando os coeficientes de todas as variáveis com os respectivos sinais e, na última linha, incluir os coeficientes da função-objetivo transformada.
- ✓ **Passo 3:** Estabelecer uma solução básica inicial, usualmente atribuindo valor zero às variáveis originais (Variáveis não-Básicas) e achando valores positivos para as variáveis de folga (com Z, formam o conjunto das variáveis básicas).
- ✓ **Passo 4:** Como a próxima variável a entrar na coluna base, escolher a não-básica que oferece, na última linha (a linha Z), a maior contribuição para o aumento da função-objetivo (ou seja, tem o maior valor negativo). Se todas as variáveis que estão fora da coluna base tiverem coeficientes nulos ou positivos nesta linha, a solução atual é ótima. Se alguma dessas variáveis tiver coeficiente nulo, isto significa que ela pode ser introduzida na solução sem aumentar o valor da função-objetivo. Isso quer dizer que temos uma solução ótima, com o mesmo valor da função-objetivo.
- ✓ **Passo 5:** Para escolher a variável que deve deixar a coluna base, deve-se realizar o seguinte procedimento:
  - a) Dividir os elementos da última coluna (termo independente) pelos correspondentes elementos positivos da coluna da variável que vai entrar na coluna base. Caso não haja elemento algum positivo nesta coluna, o processo deve parar, já que a solução seria ilimitada.
  - b) O menor quociente indica a equação cuja respectiva variável básica deverá ser anulada, tornando-se variável não-básica.
- ✓ **Passo 6:** Usando operações válidas com as linhas da matriz, transformar o quadro de cálculos, em um novo, de forma a encontrar a nova solução básica. A coluna da nova variável básica deverá se tornar um vetor identidade, onde o elemento 1 aparece na linha correspondente à variável que está sendo anulada e 0 nas demais.

Para isso, deve-se aplicar o Método de Gauss-Jordam (pivotamento) como se segue:

- a) O elemento pivô deve ser transformado em valor unitário: todos os elementos da atual linha pivô (linha da variável que deixou a base) são divididos pelo valor do pivô. O resultado dos cálculos forma a primeira linha da nova tabela.
- b) As demais linhas devem ser obtidas seguindo-se a expressão a seguir:

$\text{Novo valor} = [\text{linha pivô na tabela nova} \times (\text{coef. da coluna pivô na tabela antiga} \times -1)] + \text{linha antiga a mudar}$
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

- ✓ **Passo 7:** Verificar se a solução obtida na iteração é a ótima. Se for, deve-se parar o processo de análise, senão deve-se retornar ao passo 4 para iniciar outra iteração.

Exemplo 1 (adaptado de Lisboa, 2002):

$$\text{Max } Z = 4x_1 + x_2$$

Sujeito a

$$2x_1 + 3x_2 \leq 12$$

$$2x_1 + x_2 \leq 8$$

$$x_1, x_2 \geq 0$$

**Passo 1:** Introdução das variáveis de folga.

$$2x_1 + 3x_2 + f_1 = 12$$

$$2x_1 + x_2 + f_2 = 8$$

$$x_1, x_2, f_1, f_2 \geq 0$$

**Passo 2:** Montagem do quadro Simplex.

Função-objetivo Transformada:

$$Z = 4x_1 + x_2 + 0 f_1 + 0 f_2 \text{ para } Z - 4x_1 - x_2 - 0 f_1 - 0 f_2 = 0$$

	Variáveis de folga		Termos Independentes		
Base	$x_1$	$x_2$	$f_1$	$f_2$	b
	2	3	1	0	12
	2	1	0	1	8
Z	-4	-1	0	0	0

Coeficientes das Variáveis da Função-objetivo

**Passo 3:** Solução Inicial Básica.

Encontra-se a Solução Inicial Básica para montagem do 1º quadro Simplex assumindo-se as variáveis não-básicas (variáveis de decisão) como zero ( $x_1 = x_2 = 0$ ), chegando-se a  $f_1 = 12; f_2 = 8$  e  $Z = 0$ .

Variáveis não-Básicas:  $x_1$  e  $x_2$  ( $=0$ )

Variáveis Básicas:  $f_1$  e  $f_2$  ( $\neq 0$ )

	Variáveis de folga		Termos Independentes		
Base	$x_1$	$x_2$	$f_1$	$f_2$	b
$f_1$	2	3	1	0	12
$f_2$	2	1	0	1	8
Z	-4	-1	0	0	0

Verifica-se que o resultado de Z não é o mais otimizado ( $Z = 0$ ), e sendo assim, necessita-se encontrar uma solução ótima.

Lembrando então, para ratificar se essa é a solução ótima, observa-se o quadro, especificamente as variáveis não-básicas (fora da base) na linha Z:



- 1) Se todos os valores forem positivos ou nulos, a solução é ótima e única;
- 2) Se aparecerem valores positivos e alguns nulos, a solução é ótima, mas não única, pois as variáveis com valores nulos indicam que elas podem ser introduzidas na base sem aumentar o valor da função-objetivo; resumindo, indica que existe outra solução ótima com o mesmo valor da função-objetivo;
- 3) Se aparecer algum valor negativo a solução não é a ótima, devendo-se passar para o próximo passo.

**Passo 4:** Encontrar a variável não-básica a se tornar positiva. Ela entrará na coluna base.

Qual a variável que, saindo da coluna base, aumentaria mais rapidamente o valor da função-objetivo?

Quanto à variável não-básica a se tornar positiva (que responda a pergunta anterior), deverá ser naquela solução:

- 1) igual a zero;
- 2) ter coeficiente menor ou igual a zero na linha Z;
- 3) possuir na sua coluna pelo menos um coeficiente positivo.

Sendo assim, escolhe-se a variável não-básica que contém o coeficiente mais negativo na linha Z. Neste caso,  $x_1$ .

**Passo 5:** Encontrar a variável básica que será anulada. Sairá da coluna base.

Para se definir a variável básica ( $f_1$  ou  $f_2$ ) a ser anulada, deve-se calcular o quociente entre o seu termo independente e o valor da coluna da variável que entrou ( $x_1$ ), escolhendo a que tiver menor valor não negativo. Neste caso, escolhe-se  $f_2$ .

$$\text{Para } f_1: 12 / 2 = 6$$

$$\text{Para } f_2: 8 / 2 = 4$$

**Passo 6:** Transformação do quadro.

A linha de  $f_2$  deve refletir agora o valor de  $x_1$

Base	$x_1$	$x_2$	$f_1$	$f_2$	b
$f_1$	2	3	1	0	12
$f_2$	2	1	0	1	8
Z	-4	-1	0	0	0

Diagrama de anotações:  
 - Passo 4: aponta para a coluna  $x_1$ .  
 - Coluna Pivô: aponta para a coluna  $x_1$ .  
 - Passo 5: aponta para a linha  $f_2$ .  
 - Pivô: aponta para o elemento 2 na interseção da linha  $f_2$  e coluna  $x_1$ .  
 - Linha Pivô: aponta para a linha  $f_2$ .

No novo quadro cada elemento da linha pivô deve ser dividido pelo pivô.

Base	$x_1$	$x_2$	$f_1$	$f_2$	b
$f_1$	2	3	1	0	12
$x_1$	$2/2 = 1$	$1/2$	0	$1/2$	$8/2 = 4$
Z	-4	-1	0	0	0

Para anular o coeficiente da linha pivô, transformando-se a coluna pivô em um vetor identidade, devem-se anular os elementos desta coluna. Faz-se:

$$\text{Novo valor} = [\text{linha pivô na tabela nova} \times (\text{coef. da coluna pivô na tabela antiga} \times -1)] + \text{linha antiga a mudar}$$

Ou seja:

$$\text{Novo valor} = [\text{nova linha } x_1 \times (\text{antiga coluna } x_1 \text{ na linha a mudar} \times -1)] + \text{antiga linha } f_1$$

Para a 1ª linha ( $f_1$ ), multiplica-se a nova linha ( $x_1$ ) por -2 (verificar que o coeficiente a se anular é 2) e somando-se à linha antiga ( $f_1$ ), resultando na seguinte tabela:

Base	$x_1$	$x_2$	$f_1$	$f_2$	b
$f_1$	$[1 (-2)] + 2$ = 0	$[1/2 (-2)] + 3$ = 2	$[0 (-2)] + 1$ = 1	$[1/2 (-2)] + 0$ = -1	$[4 (-2)] + 12$ = 4
$x_1$	1	1/2	0	1/2	4
Z	-4	-1	0	0	0

Para a última linha (Z), deve-se proceder da mesma forma, ou seja, multiplicando-se a nova linha ( $x_1$ ) por 4 (verificar que o coeficiente a se anular é -4) e somando-se à linha antiga (Z), resultando na seguinte tabela:

Base	$x_1$	$x_2$	$f_1$	$f_2$	b
$f_1$	0	2	1	-1	4
$x_1$	1	1/2	0	1/2	4
Z	$[1 (4)] + (-4)$ = 0	$[1/2 (4)] + (-1)$ = 1	$[0 (4)] + 0$ = 0	$[1/2 (4)] + 0$ = 2	$[4 (4)] + 0$ = 16

A tabela resultante desta etapa é:

Base	$x_1$	$x_2$	$F_1$	$f_2$	b
$f_1$	0	2	1	-1	4
$x_1$	1	1/2	0	1/2	4
Z	0	1	0	2	16

**Passo 7:** Verificar se a nova solução é ótima.

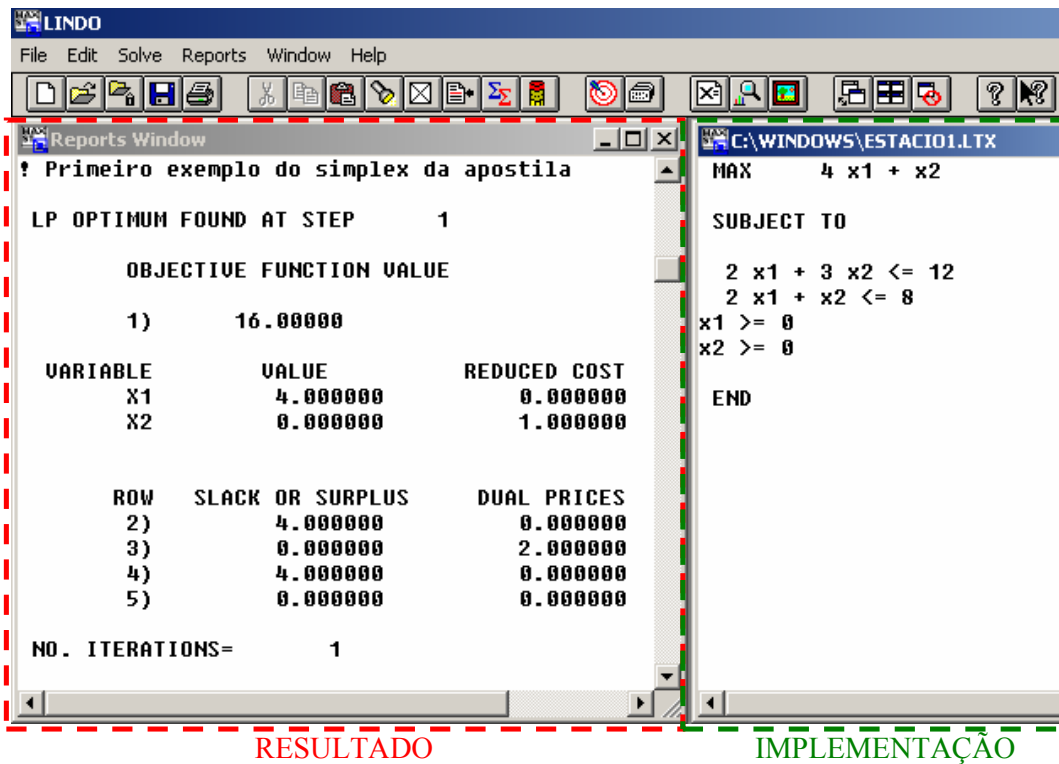
Para verificar se essa solução é a ótima, observam-se as variáveis não-básicas ( $x_1$  e  $x_2$ ) na linha Z:

- 4) **Se todos os valores forem positivos, a solução é ótima e única.**
- 5) Se aparecerem valores positivos e alguns nulos, a solução é ótima mas não única.
- 6) Se aparecer algum valor negativo a solução não é a ótima, devendo-se passar para o próximo passo.

Base	$x_1$	$x_2$	$f_1$	$f_2$	b
$f_1$	0	2	1	-1	4
$x_1$	1	1/2	0	1/2	4
Z	0	1	0	2	16

Sendo assim,  $x_1 = 4$ ;  $f_1 = 4$ ;  $x_2 = 0$ ;  $f_2 = 0$ ; e  $Z = 16$ .

A próxima figura mostra a implementação (direita) e o resultado (esquerda) exposta pelo programa Lindo (<http://www.lindo.com>)



Exemplo 2 (adaptado de Lisboa, 2002):

Maximizar  $Z = 11 x_1 + 12 x_2$   
 sujeito a:  $x_1 + 4 x_2 \leq 10000$   
 $5 x_1 + 2 x_2 \leq 30000$   
 $x_1, x_2 \geq 0$

**Passo 1:** Introdução das variáveis de folga.

Maximizar  $Z = 11 x_1 + 12 x_2 + 0 f_1 + 0 f_2$   
 sujeito a:  $x_1 + 4 x_2 + f_1 \leq 10000$   
 $5 x_1 + 2 x_2 + f_2 \leq 30000$   
 $x_1, x_2, f_1, f_2 \geq 0$

**Passo 2:** Montagem do quadro Simplex.

Base	$x_1$	$x_2$	$f_1$	$f_2$	b
$f_1$	1	4	1	0	10000
$f_2$	5	2	0	1	30000
Z	-11	-12	0	0	0

Observar se aparece algum valor negativo como coeficiente da linha Z. Se sim, a solução não é a ótima, devendo-se passar para o próximo passo.

**Passos 3, 4 e 5:** Primeira Iteração.

- a) Variável a entrar na base:  $x_2$  (coluna com maior valor negativo na última linha \* -12 \*).
- b) Variável a sair da base:  $f_1$  (entre os quocientes  $30000/2$  e  $10000/4$ , o último é o menor).
- c) Dividir a linha pivô pelo pivô (4).

d) Fazer: Novo valor = [linha pivô . (coef. coluna pivô . -1)] + coeficiente atual da linha a mudar

Base	$x_1$	$x_2$	$f_1$	$f_2$	b
$f_1$	1	4	1	0	10000
$f_2$	5	2	0	1	30000
Z	-11	-12	0	0	0

Base	$x_1$	$x_2$	$f_1$	$f_2$	B
$x_2$	1/4	4/4=1	1/4	0/4=0	10000/4=2500
$f_2$	[1/4 (-2)] + 5	[1 (-2)] + 2	[1/4 (-2)] + 0	[0 (-2)] + 1	[2500 (-2)] + 30000
Z	[1/4 (12)] -11	[1 (12)] -12	[1/4 (12)] + 0	[0 (12)] + 0	[2500 (12)] + 0

Nova tabela após a primeira iteração:

Base	$x_1$	$x_2$	$f_1$	$f_2$	b
$x_2$	1/4	1	1/4	0	2500
$f_2$	9/2	0	-1/2	1	25000
Z	-8	0	3	0	30000

Observar se aparece algum valor negativo como coeficiente da linha Z. Se sim, a solução não é a ótima, devendo-se passar para o próximo passo.

**Passos 3, 4 e 5:** Segunda Iteração.

- a) Variável a entrar na base:  $x_1$  (coluna com maior valor negativo na última linha \* -8 \*).
- b) Variável a sair da base:  $f_2$  (entre os quocientes 2500/(1/4) e 25000/(9/2), o último é o menor).
- c) Dividir a linha pivô pelo pivô (9/2).
- d) Fazer: Novo valor = [linha pivô . (coef. coluna pivô . -1)] + coeficiente atual da linha a mudar

Base	$x_1$	$x_2$	$f_1$	$f_2$	b
$x_2$	1/4	1	1/4	0	2500
$f_2$	9/2	0	-1/2	1	25000
Z	-8	0	3	0	30000

Base	$x_1$	$x_2$	$f_1$	$f_2$	b
$x_2$	[1.(-1/4)] + 1/4 = 0	[0.(-1/4)] + 1 = 1	[-1/9.(-1/4)] + 1/4 = 5/18	[2/9.(-1/4)] + 0 = -2/36	[50000/9.(-1/4)] + 2500 = 10000/9
$x_1$	(9/2)/(9/2) = 1	0/(9/2) = 0	-1/2/(9/2) = -1/9	1/(9/2) = 2/9	25000/(9/2) = 50000/9
Z	[1. (+8)] - 8 = 0	[0. (+8)] + 0 = 0	[-1/9. (+8)] + 3 = 19/9	[2/9. (+8)] + 0 = 16/9	[50000/9. (+8)] + 30000 = 670000/9

Nova tabela após a segunda iteração:

Base	$x_1$	$x_2$	$f_1$	$f_2$	b
$x_2$	0	1	5/18	-2/36	10000/9
$x_1$	1	0	-1/9	2/9	50000/9
Z	0	0	19/9	16/9	670000/9

Sendo assim,  $x_1 = 50000/9 = 5555,56$ ;  $f_1 = 0$ ;  $x_2 = 10000/9 = 1111,11$ ;  $f_2 = 0$ ; e  $Z = 670000/9 = 74444,44$ .

Observar se aparece algum valor negativo como coeficiente da linha Z: não, e sendo assim, como aparecerem valores nulos, a solução é ótima.

A próxima figura mostra a implementação (direita) e o resultado (esquerda) exposta pelo programa Lindo (<http://www.lindo.com>)

The screenshot shows the LINDO software interface. The left window, titled 'Reports Window', displays the following results:

```

? Segundo exemplo do simplex da apostila

LP OPTIMUM FOUND AT STEP      2

      OBJECTIVE FUNCTION VALUE

    1)      74444.45

      VARIABLE            VALUE            REDUCED COST
      X1              5555.555664            0.000000
      X2              1111.111084            0.000000

      ROW  SLACK OR SURPLUS    DUAL PRICES
      2)           0.000000            2.111111
      3)           0.000000            1.777778
      4)      5555.555664            0.000000
      5)      1111.111084            0.000000

NO. ITERATIONS=      2
  
```

The right window shows the problem formulation:

```

MAX      11 X1 + 12 X2

SUBJECT TO

      x1 + 4 x2 <= 10000
5 x1 + 2 x2 <= 30000
x1 >= 0
x2 >= 0

END
  
```

Below the screenshot, the words "RESULTADO" and "IMPLEMENTAÇÃO" are written in blue text, corresponding to the left and right windows respectively.

Exemplo 3 – Aplicação com variável livre.

$$\text{Maximizar : } z = x_1 + 2x_2 + x_3$$

Sujeito a

$$x_1 + x_2 + x_3 \leq 10$$

$$2x_1 + 3x_2 \leq 20$$

com  $x_1$  e  $x_3$  não negativas e  $x_2$  livre

Como se tem uma variável livre (a condição de não negatividade não acontece com todas as variáveis), antes de se incluir variáveis de folga, de excesso e artificiais, deve-se substituir a variável livre pela subtração de duas novas variáveis não negativas. Deve-se substituir, então,  $x_2$  por  $x_4 - x_5$ . Reescrevendo o problema, temos:

$$\begin{aligned} \text{Maximizar} \quad & Z = x_1 + x_3 + 2x_4 - 2x_5 \\ & x_1 + x_3 + x_4 - x_5 \leq 10 \\ & 2x_1 + 3x_4 - 3x_5 \leq 20 \\ & \text{com todas as variáveis não negativas} \end{aligned}$$

A sua forma normalizada é:

$$\begin{aligned} \text{Maximizar} \quad & Z = x_1 + x_3 + 2x_4 - 2x_5 + 0f_6 + 0f_7 \\ & x_1 + x_3 + x_4 - x_5 + f_6 = 10 \\ & 2x_1 + 3x_4 - 3x_5 + f_7 = 20 \\ & \text{com todas as variáveis não negativas} \end{aligned}$$

onde  $f_6$  e  $f_7$  são as variáveis de folga adicionadas. O quadro inicial do simplex será, portanto, o seguinte:

	$x_1$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$f_6$	$f_7$	
$f_6$	1	1	1	-1	1	0	10
$f_7$	2	0	3	-3	0	1	20
$Z$	-1	-1	-2	2	0	0	0

Aplicando-se o método simplex a este quadro, a coluna da variável  $x_4$  deverá ser a coluna de trabalho, já que -2 é valor mais negativo da última linha. O pivô será o valor 3 da segunda linha de números por apresentar um maior quociente que o valor da primeira linha (3/20 contra 1/10). Realizando-se então as operações elementares, o próximo quadro do simplex será:

	$x_1$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$f_6$	$f_7$	
$f_6$	$\frac{1}{3}$	1	0	0	1	$-\frac{1}{3}$	$\frac{10}{3}$
$x_4$	$\frac{2}{3}$	0	1	-1	0	$\frac{1}{3}$	$\frac{20}{3}$
$Z$	$\frac{1}{3}$	-1	0	0	0	$\frac{2}{3}$	$\frac{40}{3}$

Ainda há um valor negativo na última linha e, portanto, os passos do simplex devem ser aplicados novamente a esse novo quadro. Nesta situação, a coluna da variável  $x_3$  deverá ser a coluna de trabalho, já que -1 é o único valor negativo na última linha e o pivô será o valor 1 da primeira linha de números por ser o único valor positivo. Realizando-se então as operações elementares, o próximo quadro do simplex será:

	$x_1$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$f_6$	$f_7$	
$x_3$	$\frac{1}{3}$	1	0	0	1	$-\frac{1}{3}$	$\frac{10}{3}$
$x_4$	$\frac{2}{3}$	0	1	-1	0	$\frac{1}{3}$	$\frac{20}{3}$
$Z$	$\frac{2}{3}$	0	0	0	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{50}{3}$

Como não há valores negativos na última linha, obtemos o resultado ótimo com  $x_1 = 0, x_3 = \frac{10}{3}, x_4 = \frac{20}{3}, x_5 = 0$  e  $f_6 = 0$ , e  $z = \frac{50}{3}$ . Como no problema original, as variáveis eram  $x_1, x_2$  e  $x_3$ , podemos reescrever a solução ótima como  $x_1 = 0, x_2 = \frac{20}{3}, x_3 = \frac{10}{3}, x_5 = 0, f_6 = 0$  e  $f_7 = 0$ , e  $z = \frac{50}{3}$ .

A próxima figura mostra a implementação (direita) e o resultado (esquerda) exposta pelo programa Lindo (<http://www.lindo.com>)

The screenshot shows the LINDO software interface. The Reports Window displays the following information:

LP OPTIMUM FOUND AT STEP 2

OBJECTIVE FUNCTION VALUE

1) 16.66667

VARIABLE	VALUE	REDUCED COST
X1	0.000000	0.666667
X3	3.333333	0.000000
X4	6.666667	0.000000
X5	0.000000	0.000000

ROW	SLACK OR SURPLUS	DUAL PRICES
2)	0.000000	1.000000
3)	0.000000	0.333333
4)	0.000000	0.000000
5)	3.333333	0.000000
6)	6.666667	0.000000
7)	0.000000	0.000000

NO. ITERATIONS= 2

The problem definition on the right is:

```

MAX      x1 + x3 + 2 x4 - 2 x5
SUBJECT TO
x1 + x3 + x4 - x5 <= 10
2 x1 + 3 x4 - 3 x5 <= 20
          x1 >= 0
          x3 >= 0
          x4 >= 0
          x5 >= 0
END
    
```

**Exercício: Fazer pelo método Simplex os exercícios de modelagem e de solução gráfica.**