PLANEJAMENTO INDUSTRIAL POR PROGRAMAÇÃO LINEAR COM OBJETIVOS MÚLTIPLOS

Carlos Alejandro Tejada Pazmiño

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.)

Aprovada por:

Carlos Augusto Perlingeiro
Presidente

Clóvis Caesar Gonzaga

Affonso Carlos Seabra da Silva Telles

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 1983

TEJADA, CARLOS ALEJANDRO

Planejamento Industrial por Programação Linear com Objetivos Múltiplos (Rio de Janeiro). 1983.

IX, 126p. 29,7cm (COPPE-UFRJ,M.Sc., Engenharia de Sistemas, 1983)

Tese - Univ.Fed.Rio de Janeiro,Fac. de Engenharia.

1. Utilização de Modelos Recursivos e de Programação Linear com Objetivos Múltiplos no planejamento da indústria do Metano no Equador. I. COPPE/UFRJ II. Planejamento Industrial por Programação Linear com Objetivos Múltiplos.

Aos meus pais

AGRADECIMENTOS

Aos Professores Carlos Augusto Perlingeiro e Clóvis Caesar Gonzaga pela cooperação, incentivo e valiosas sugestões como orientadores desta tese.

Ao Engenheiro Luis Román L., cujo apoio e estímulo possibilitaram minha vinda à COPPE.

Ao Engenheiro Marco Salvador O., pela cooperação e ensinamentos.

À COPPE que me ofereceu a oportunidade de especializar-me.

À Corporación Estatal Petrolera Ecuatoriana (CEPE) pela ajuda financeira e pela confiança em mim depositada.

À todos aqueles que direta ou indiretamente contribuiram para que este trabalho fosse realizado.

RESUMO

Este trabalho objetiva mostrar a utilidade dos Modelos Recursivos de Planejamento e da Programação Liner com Objetivos Múltiplos (PLOM), na análise e resolução do problema de planejamento do desenvolvimento da indústria do metano no Equador.

Mostra-se ainda como a Programação Linear com objetivos múltiplos consegue conjugar num modelo, vários objetivos conflitantes e obter uma solução que os satisfaz segundo uma escala de prioridades previamente estabelecida.

Apresenta-se um algoritmo para a resolução de problemas de PLOM e um programa computacional baseado nesse algoritmo.

Finalmente, analisam-se os resultados das diferentes alternativas e cenários considerados, e são propostas algumas idéias úteis para a escolha final das capacidades das plantas industriais.

ABSTRACT

This work shows the utility of Recursive Planning Models and of Goal Linear Programming in the analysis and solution of the problem of planning the development of the methane industry in Equador.

It also shows how Goal Linear Programming deals with competitive objectives and obtains results following priorities given in advance.

An algorithm for the solution of PLOM problems is presented together with its computer program.

Finally, the results for different alternatives and scenarios have been described and analyzed. At the same time, useful ideias on how to choose the capacities in the industrial plants are proposed.

ÍNDICE

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

No litoral equatoriano, e especificamente no Golfo de Guayaquil, têm sido detectada a existência de uma importante fonte de gás natural com alto conteúdo de metano (aproximadamente 98%). Assim sendo, existe a possibilidade de que a produção normal deste recurso natural, possa iniciar-se ainda no próximo quinqüênio. Por esta razão, tem especial importância a realização do planejamento do desenvolvimento industrial em face à disponibilidade desta matéria-prima.

Até hoje, têm sido definidas algumas utilizações industriais deste gás natural, que são consideradas prioritárias para o desenvolvimento do país, como é o caso da amônia e a uréia. Neste trabalho serão respeitadas estas produções já definidas, objetivando ampliar a gama das aplicações industriais desta matéria prima através de uma abordagem sistêmica do processo de planejamento industrial.

É importante mencionar, que além do enfoque puramente técnico e financeiro, é também objetivo deste trabalho, que os projetos a serem implementados tendo como matéria prima o gás natural, ajudem a resolver os crônicos problemas sócio-econômicos do Equador.

A resolução deste problema, envolve a tomada de um conjunto de decisões, cuja principal dificuldade, está relacionada com o cumprimento de vários objetivos conflitantes entre si, num ambiente de interesses diversos, informações incompletas e recursos limitados.

Até a pouco tempo, este processo era eminentemente intuitivo, baseado na experiência ou no bom senso dos responsáveis pelas decisões. Ainda na atualidade, a moderna tecnologia da decisão, não substitui completamente este enfoque subjetivo. Porém, a cada dia que passa percebe-se melhor a necessidade e as vantagens de um enfoque científico para a tomada das decisões.

Neste trabalho, procura-se sistematizar a visão subjetiva da tomada de decisões dentro de um processo de planejamento industrial, a fim de oferecer aos responsáveis pelas decisões, alternativas mais concretas para sua escolha. Para isso, são adotados critérios da moderna Análise das Decisões que propõe a utilização do método científico para realizar uma análise sistemática do processo de decisão (15).

Nestes termos, são realizadas as seguintes ações:

- Identificação dos objetivos a serem cumpridos com a utilização industrial do gás natural.
- Definição de um modelo de planejamento industrial que permite quantificar as possíveis conseqüências dos diferentes cursos de ação.
- Proposição de algumas idéias úteis para sistematizar o processo da escolha de melhor alternativa.

No que se refere à organização e apresentação do trabalho, tem-se que após o primeiro Capítulo meramente introdutório, realiza-se no Capítulo II uma revisão bibliográfica sobre o desenvolvimento industrial e o seu planejamento.

No Capítulo III, define-se um modelo para o planejamento da indústria do metano no Equador.

No capítulo IV, apresenta-se o algoritmo de resolução de problemas de Programação Linear com Objetivos Múltiplos, cujo modelo foi adotado para descrever o operador de decisão do modelo de planejamento.

No Capítulo V, descreve-se o programa computacional implementado para resolver problemas de Programação Linear com Objetivos Múltiplos e níveis de prioridade pré-estabelecidos.

No Capítulo VI, são definidas as utilizações do gás natural, e define-se o modelo geral do operador de decisão.

No Capítulo VII, são analisados os resultados das diferentes alternativas e cenários considerados, propondo-se uma metodologia para a escolha final das capacidades.

No Capítulo VIII apresentam-se as conclusões do trabalho.

No Anexo A, é descrita a proposta para uma utilização industrial ampliada do metano.

No Anexo B, é feita uma revisão teórica sobre o método de Programação Linear com Objetivos Múltiplos.

No Anexo C, apresentam-se os dados utilizados e os resultados numéricos obtidos.

O Anexo D, corresponde ao programa computacional.

CAPÍTULO II

O PLANEJAMENTO INDUSTRIAL

II.1. Introdução

Neste Capítulo apresenta-se um resumo da bibliografia especializada em matéria de planejamento do desenvolvimento da Indústria Petroquímica.

II.2. O Desenvolvimento Industrial e o seu Planejamento

O objetivo fundamental do planejamento do desenvolvimento industrial é a elaboração de um plano coerente para o futuro, baseado na experiência passada e na compreensão das forças em jogo dentro de um determinado ambiente econômico. Da exatidão na percepção destas variáveis, dependerá o sucesso no desenvolvimento de uma nova indústria ou a manutenção de um vigoroso desenvolvimento de uma indústria já instalada (1).

Com relação ao desenvolvimento industrial, deve-se distinguir sua descrição e sua teoria. A descrição é a primeira fase para a compreensão, mas a simples coleta de dados estatísticos e séries históricas fornece apenas uma pequena idéia sobre o futuro da indústria. Por sua vez, a teoria do desenvolvimento industrial serve para integrar as forças que atuam num determinado meio dentro de uma simulação dinâmica, e permite obter uma idéia global sobre as principais características da indústria.

O curso do desenvolvimento industrial, é controlado pela interação das forças econômicas, técnicas e ambientais. A compreensão de cada uma delas separadamente resulta ineficiente para modelar o desenvolvimento de uma indústria, daí a importância do seu conhecimento e integração num modelo global.

Os problemas que enfrenta o planejamento do desenvolvimento industrial em nossos dias são muito grandes, devido principalmente à atual crise econômica mundial e à dificuldade para determinar as possíveis situações futuras num ambiente de alta incerteza.

Daí, a importância da metodologia proposta por Day e Nelson[14], segundo o qual a tomada de decisões sobre o desenvolvimento industrial pode ser feita com base em resultados de otimizações a curto prazo e de análises de pós-otimização que simulem as situações futuras.

II.2.1. Modelo Recursivo do Planejamento Industrial

Geralmente, as decisões referentes ao planejamento industrial são tomadas com base em planos de longo prazo que procuram otimizar determinados parâmetros. Porém, também é conhecido que após algum tempo, novas informações são obtidas e consequentemente aparecem novos planos, e são descartados os planos iniciais diante da atual concepção de "alternativa ótima".

Os modelos recursivos de planejamento procuram otimizar este comportamento. Para isso , utilizam recursivamente dois operadores básicos:

- operador de decisão;
- operador de realimentação.

O primeiro operador corresponde, em sua forma mais geral, a um algoritmo qualquer de seleção de valores ótimos das variáveis de decisão consideradas. Por sua vez, o operador de realimentação gera novos dados para o operador de decisão.

II.2.1.1. <u>Formulação Matemática dos Modelos Recursivos</u> (14)

Sejam:

x : n-vetor das variáveis de decisão a serem determinadas no ano t.

a_t : n-vetor dos coeficientes correspondentes às variáveis de decisão no ano t.

B_t : matriz (n x k) dos coeficientes das restrições para o ano t.

c_t : k-vetor correspondente aos limites superiores das restrições no ano t.

O conjunto de soluções viáveis para o ano t, será:

$$\Gamma(B_t,c_t) = \{x | B_t\, x \leq c_t \ ,\ x \geq 0\} \qquad \text{(II.1)}$$

Se a função objetivo para o ano t é:

$$\gamma_t = \langle a_t,x\rangle \qquad \text{(II.2)}$$

Então, a seqüência de programas lineares será:

$$\gamma^*(a_t,B_t,c_t) = \min\{\langle a_t,x\rangle | x \in \Gamma(B_t,c_t)\} \qquad \text{(II.3)}$$

onde t = 1,2,3,...

Definindo-se $(a_t,B_t,c_t) = W_t$ como dados de planejamento para o ano t, o conjunto de soluções ótimas, para cada membro da seqüência definida na equação (II-3), será:

$$\Psi(W_t) = \{x | \langle a_t,x\rangle \leq \gamma^*(a_t,B_t,c_t)\} \cap \Gamma(B_t,c_t) \qquad \text{(II.4)}$$

No caso em que o algoritmo de seleção considere as decisões anteriores, a forma geral do operador de decisão será:

$$X_t = F(X_{t-1}, W_t) \subset \Psi(W_t) \qquad (II.5)$$

Se para a definição do operador de realimentação são levadas em conta as decisões e os dados anteriores e também as variáveis exógenas, então a sua forma geral será a seguinte:

$$W_t = W({}_{t_0}X_{t-1}, {}_{t_0}W_{t-1}, Z_t) \qquad (II.6)$$

onde:

${}_{t_0}X_{t-1}$: corresponde às decisões tomadas desde o ano inicial do período considerado (t_0) até o ano anterior (t-1).

${}_{t_0}W_{t-1}$: Dados utilizados entre o ano inicial (t_0) e o ano anterior (t-1).

Z_t : vetor das variáveis exógenas.

II.2.1.2. <u>Fluxo de informação de um modelo recursivo</u>

Na Fig.II-1, é apresentado o fluxo de informação de um modelo recursivo utilizado para simular o desenvolvimento da indústria química (1).

Primeiramente realiza-se a conversão da demanda dos diferentes produtos finais e das ofertas de materiais, em dados específicos de oferta-demanda de moléculas particulares.

Em seguida, aplica-se um determinado algoritmo de seleção para conseguir a curto prazo, uma distribuição ótima das capacidades de processamento existentes.

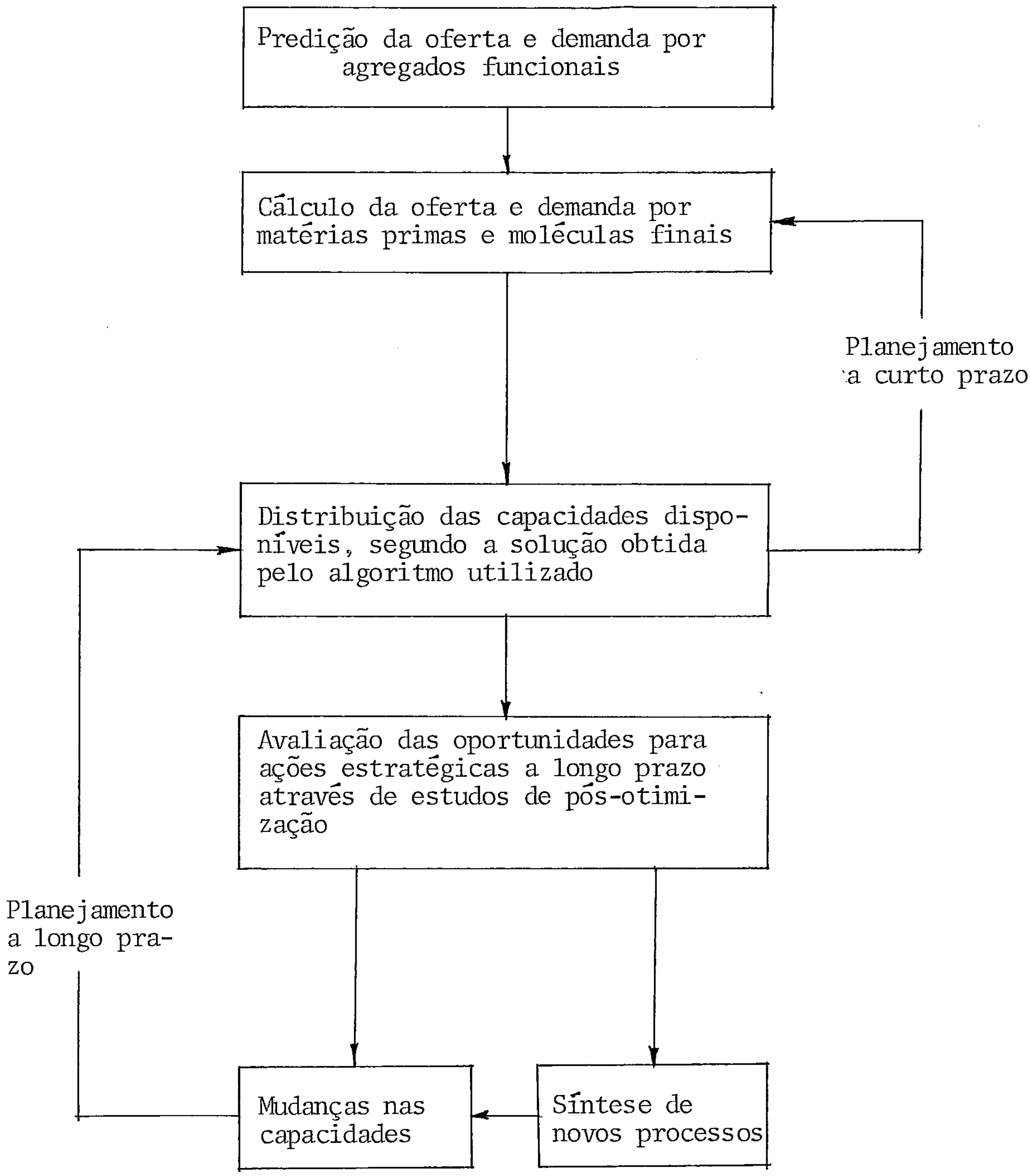


Fig.II-1. Fluxo de Informação de um Modelo Recursivo de Planejamento do Desenvolvimento Industrial.

Geralmente, para modelar e resolver o problema do planejamento a curto prazo tem sido utilizada a Programação Linear.

Posteriormente, realizam-se análises de pós-otimização para avaliar as oportunidades de ações estratégicas a serem executadas num horizonte de 5-10 anos. Estas ações estratégicas envolvem mudanças na capacidade de processamento, desenvolvimento de novos processos e mudanças nos padrões de oferta e demanda.

II.3. Natureza e Características da Indústria Petroquímica

Historicamente, a Indústria Petroquímica iniciou-se no ano de 1919, quando pela primeira vez foi produzido o isopropanol em quantidades comerciais a partir de um derivado do petróleo: o propileno (3).

O seu desenvolvimento foi muito rápido, até se converter neste relativamente curto período, numa das maiores e mais dinâmicas das indústrias.

As matérias primas básicas para esta indústria provêm, principalmente do gás e do petróleo. Porém, na atualidade, cresce a importância do carvão e do álcool devido à expectativa de uma futura escassez de gás e petróleo.

A Petroquímica toma as matérias primas e as transforma numa grande variedade de produtos básicos, intermediários e finais. Os produtos intermediários são utilizados pela própria Indústria Petroquímica. Por sua vez, os produtos finais são utilizados como matérias primas para a produção de bens como plásticos, fibras sintéticas, elastômeros etc.

Entre as características mais importantes desta indústria, podem-se mencionar as seguintes:

- Grandes tamanhos de plantas;
- Pouco intensiva em mão-de-obra;
- Intensiva em capital;
- Grande flexibilidade;
- Freqüente desenvolvimento de novas tecnologias.

A flexibilidade mencionada, refere-se ao fato de que as mudanças na disponibilidade de uma matéria prima ou na rentabilidade do processo, podem ser compensadas utilizando um conjunto completamente diferente de matérias primas e/ou processos para obter os mesmos produtos.

É um fato conhecido, que as tecnologias disponíveis para realizar uma determinada reação são semelhantes, tanto em nível de sofisticação como em intensidade de capital. Por sua vez, sabe-se que os custos das matérias primas nesta indústria, representam de 40% a 80% do custo de produção (2).

Pode-se concluir, então, que o comportamento desta indústria é guiado fundamentalmente pela flexibilidade referente às matérias primas e aos coprodutos.

Em resumo, temos que a Indústria Petroquímica, se encontra limitada por um lado pelas fontes de matérias primas derivadas do petróleo e do gás natural, e por outro lado pelo mercado. Dentro desses limites, a Petroquímica forma um sistema flexível e interdependente de reações químicas comprovadas comercialmente.

II.4. Visão Sistêmica da Indústria Petroquímica

Na atualidade, a Indústria Petroquímica tem-se convertido num complexo sistema econômico. Este sistema tem centenas de segmentos que ligam as matérias primas aos mercados. Se um segmento qualquer é analisado e melhorado, não se pode garantir que a sua melhora vai determinar a melhora do sistema em geral. De fato, podem existir ineficiências locais que não afetam a eficiente operação do sistema (2).

Consequentemente, a visão sistêmica da Indústria Petroquímica não concentra o seu interesse num segmento determinado, senão no funcionamento do sistema em geral.

Devido ao tamanho e à complexidade desta indústria, não é prático incluir os detalhes desta estrutura iterativa quando se constrói o modelo global do sistema. Daí, que a indústria petroquímica será analisada como um sistema de reações químicas que transformam as matérias primas em produtos finais.

Sem dúvida, este modelo pode não abranger importantes fatores tecnológicos e econômicos locais, mas ele fornece uma aproximação razoável do comportamento da indústria (2).

II.5. Modelos Matemáticos da Indústria Petroquímica

Os modelos a serem apresentados adiante, são modelos estáticos que resolvem o problema do planejamento a curto prazo e correspondem ao operador de decisão dos modelos recursivos já analisados.

II.5.1. Modelo de Programação Linear

II.5.1.1. Formulação Matemática do Modelo

Stadtherr e Rudd[2] apresentam a indústria petroquímica como um sistema composto de:

M : transformações (reações) químicas que produzem:

N : substâncias químicas

p_i : quantidade de substância química i, utilizada como matéria prima

q_i : quantidade de substância i, que sai como produto final

x_j : capacidade de transformação j, usada pela indústria

Se a substância química é produzida pela transformação j, então, a_{ij} é a quantidade de i, produzido por unidade de j. Se i é consumido pela transformação j, então, a_{ij} é a quantidade de matéria prima i, consumida por unidade de j. Se i não é nem entrada nem saída de j, então, $a_{ij} = 0$. Os a_{ij} são chamados de coeficientes de entrada - saída e $A = [a_{ij}]$ de matriz tecnológica.

Logo, os balanços materiais para cada substância, podem ser escritas da seguinte forma:

$$p_i + \sum_{j=1}^{M} a_{ij}\, x_j - q_i = 0 \qquad (i = 1,2,\ldots,N) \qquad \text{(II.7)}$$

A equação (II.7), a curto prazo, é restrita pela oferta de matérias primas:

$$p_i \leq s_i \qquad (i = 1,2,3,\ldots,N) \qquad \text{(II.8)}$$

pela demanda de produtos:

$$q_i \geq d_i \qquad (i = 1,2,3,\ldots,N) \qquad \text{(II.9)}$$

e pela capacidade de cada transformação química

$$x_j \leq c_j \qquad (j = 1,2,3,\ldots,M) \qquad \text{(II.10)}$$

onde s_i e d_i são os dados de oferta e demanda e c_j representa a capacidade industrial.

As equações (II.7) - (II.10) formam um sistema de restrições lineares que, junto com uma função objetivo linear determinado, constituem um modelo de Programação Linear. Da resolução deste modelo pode-se determinar os valores de p_i, q_i e x_j que satisfazem ao objetivo pré-determinado.

Geralmente, não são consideradas as restrições de capacidade, permitindo-se dispor de uma capacidade ilimitada para qualquer transformação. Neste caso, a solução do problema de Programação Linear corresponde à estrutura ótima da indústria em relação de um determinado conjunto de dados de oferta e demanda (4).

II.5.1.2. Construção do Modelo

A primeira fase para a construção do modelo já formulado, é a seleção das substâncias e das transformações químicas que participam do modelo.

Para cada substância escolhida, o modelo deve incluir transformações químicas paralelas. Assim, se assegura que o modelo não está orientado para um determinado ambiente econômico e que pode se adaptar a diferentes padrões de oferta e demanda (2).

O coração do modelo é a matriz tecnológica.Daí, que uma estimativa correta dos coeficientes de entrada-saída é a base para um bom modelo. Para isso, é necessário conhecer os dados sobre rendimento de cada transformação química, os quais podem ser procuradas na literatura especializada.

Para completar o modelo, é necessário conhecer os dados de oferta e demanda das matérias primas, as demandas dos produtos e as capacidades industriais disponíveis no meio geográfico onde será aplicado o modelo.

II.5.1.3. Funções Objetivo

A definição da função objetivo a ser incluida no problema de Programação Linear, corresponde ao critério de otimização que o planejador deseja utilizar.

O critério mais aconselhado seria a maximização do lucro (minimização dos custos). Infelizmente, este critério é difícil de se implementar, já que não se dispõe de dados econômicos detalhados para todas as transformações químicas.

Como já foi dito, na fabricação de produtos petroquímicos, os custos das matérias primas dominam os custos totais de produção. Então, parece razoável utilizar o critério proposto por Stadtherr e Rudd[4] de minimizar o consumo da matéria prima e, mais exatamente, minimizar o consumo em termos de conteúdo de carbono. Neste caso, se Wc_i é a fração em peso de carbono na matéria prima i , o algoritmo de resolução procurará os valores de p_i, q_i e x_j que minimizem o somatório:

$$\sum_{i=1}^{N} Wc_i \, p_i \quad ,$$

sujeito às restrições (II.7)-(II-10). Se as restrições das capacidades não são consideradas, então a solução corresponde à estrutura ótima da indústria em relação ao consumo de matéria prima.

Este critério foi testado com os dados da indústria petroquímica dos EEUU nos últimos 30 anos (4). Os resultados obtidos permitem concluir que o critério de minimização do consumo da matéria prima é plausível, e pode ser utilizado para modelar o desenvolvimento industrial.

Outro critério já testado, é a minimização de custo da matéria prima (4). Mas os resultados foram menos satisfatórios do que aqueles obtidos com o critério anterior, devido, aparentemente, ao fato de que os preços das matérias primas no mercado não correspondem a seu verdadeiro valor.

Outras funções objetivo utilizadas neste tipo de modelos foram as seguintes (8):

- Maximização da variação de exergia, ou seja, o trabalho útil que um sistema ideal (reversível) troca com o ambiente.

$$\max \Phi_{ideal} = \sum_{j=1}^{M} x_j \left(\sum_{i=1}^{N} W_i \, \beta_i \right)_j \qquad (j = 1,2,\ldots,M)$$

onde:

Φ_{ideal} - variação total de exergia

x_j - nível de operação da transformação j

w_i - quantidade da substância química i

β_i - exergia específica de i

- Minimização da criação irreversível de entropia, ou seja o trabalho perdido

$$\min \Phi_{entro} = \sum_{j=1}^{M} (T_o R_s)_j$$

onde:

Φ_{entro} - criação total de entropia

T_o - temperatura

R_s - taxa de acréscimo da entropia

- minimização do calor de reação

$$\min \Phi_H = \sum_{j=1}^{M} x_j \; Hr_j$$

onde:

Φ_H - calor total da reação

x_j - nível de operação da transformação j

Hr_j - calor de reação da transformação j.

Neste caso, Rotstein[8] utiliza parâmetros energéticos intrínsecos das transformações químicas para determinar estruturas tecnológicas ótimas. Os resultados obtidos demonstram a viabilidade dos critérios propostos. Porém, o autor explica que os resultados são parciais, já que os sistemas analisados são de pequeno porte.

II.5.2. Modelo de Programação Mixta

Neste modelo, procura-se levar em conta a não-linearidade das inversões em relação às capacidades, ou seja, tenta-se refletir a economia de escala que é um fator decisivo na seleção de processos químicos e em geral no planejamento do desenvolvimento industrial.

II.5.2.1. Formulação Matemática do Modelo

Neste caso, Jimenez e Rudd[7] também apresentam à indústria petroquímica como um sistema composto de:

M - transformações químicas (reações)

N - substâncias químicas.

Para a formulação do modelo parte-se das seguintes hipóteses:

- as expressões correspondentes aos balanços de massa e energia são lineares.
- as expressões dos custos são não-lineares.

Logo, em face à Programação Linear pode-se formular o seguinte modelo:

$$\min_{F,X,I} \sum_{i=1}^{N} F_i P_i + \sum_{j=1}^{M} C_j X_j + \sum_{i=1}^{N} I_i B_i$$

$$\text{sujeito a: } F_i + \sum a_{ij} X_j + I_i \geq D_i \qquad (i = 1,\ldots,N)$$

$$0 \leq F_i \leq S_i \qquad (i = 1,\ldots,N)$$

$$X_j \geq 0 \qquad (j = 1,\ldots,M)$$

$$I_i \geq 0 \qquad (i = 1,\ldots,N)$$

onde:

F_i : matéria prima exógena i

P_i : preço unitário da matéria prima i

C_j : custo de operação unitário do processo j

X_j : nível de operação do processo j

I_i : quantidade de material importado

B_i : custo do material importado

D_i : demanda exógena da substância i

S_i : oferta disponível da matéria prima i

a_{ij} : coeficiente de entrada-saída (refletem o consumo/produção da substância i no processo j).

Segundo esta formulação do modelo, os custos operacionais das plantas são lineares. Então C_j corresponderia ao custo unitário devido às utilidades e investimentos para cada processo j. (o custo das matérias primas não se inclue em C_j)

Uma formulação mais exata do modelo, permite a modelagem dos custos operacionais face a uma função de incremento fixo (ver Fig.II.2)

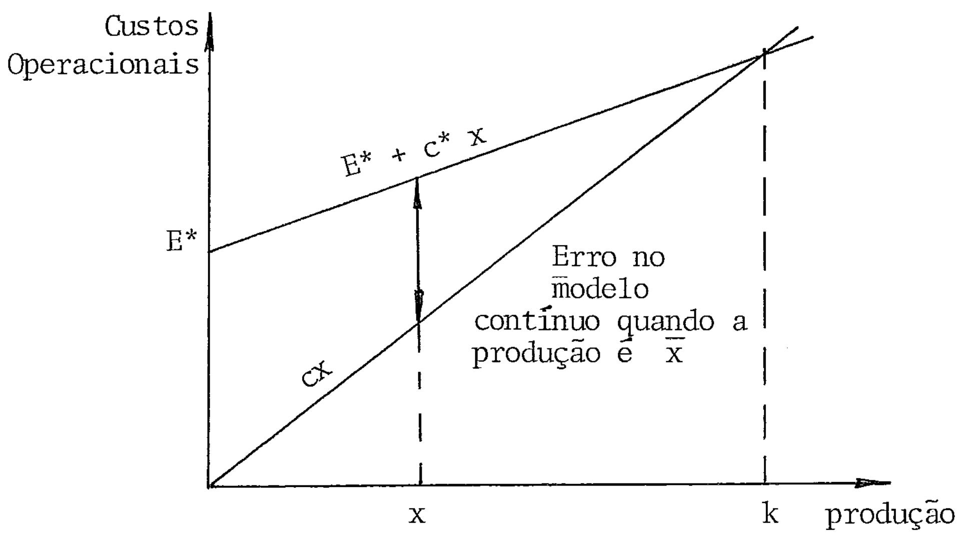


Fig.II.2. Modelagem dos Custos Operacionais Face a uma Função de Incremento Fixo.

Esta função de incremento fixo tem as seguintes características:

$$\text{custos operacionais} = \begin{cases} 0 \ , & \text{se} \quad x = 0 \\ E^* + C^* x \ , & \text{se } x > 0 \end{cases}$$

onde E^* é o investimento fixo e C^* reflete o custo unitário da energia consumida como utilidades.

É conhecido que esta função não pode ser modelada com um modelo linear, mas pode ser representado pelo seguinte modelo:

$$\text{custos operacionais} = \min\ (E^*Y + C^*X)$$

sujeito a:

$$0 \leq X \leq K.Y$$

$$Y = 1 \text{ ou } 0$$

onde K é um limite superior válido (neste caso: a capacidade do processo químico). A variável linear Y , reflete o fato da planta ter sido construída (Y=1) ou não (Y=0). Então, o problema pode ser reformulado da seguinte forma mixta:

$$\min_{F,X,I,Y} \sum_{i=1}^{N} F_i P_i + \sum_{j=1}^{M} (E_j^* Y_j + C_j^* X_j) + \sum_{i=1}^{N} I_i B_i$$

sujeito a:

$$F_i + \sum_{j=1}^{M} a_{ij} X_j + I_i \geq D_i \qquad (i = 1,\dots,N)$$

$$0 \leq F_i \leq S_i \qquad (i = 1,\dots,N)$$

$$I_i \geq 0 \qquad (i = 1,\dots,N)$$

$$0 \leq X_j \leq K_j Y_j \qquad (j = 1,\dots,M)$$

$$Y_j = 0 \text{ ou } 1 \text{ para todos os } j .$$

Com esta formulação, pode-se encontrar um ponto de equilíbrio a partir do qual se tomaria a decisão de importar ou produzir um determinado produto petroquímico (ver fig.II.3).

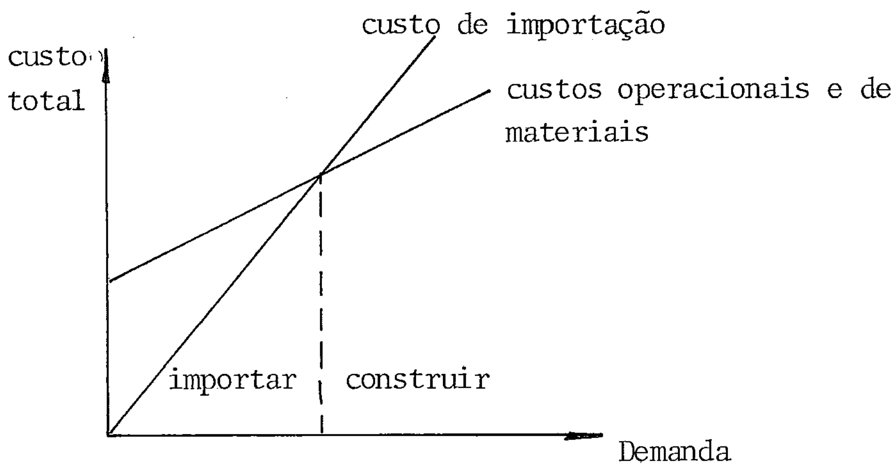


Fig.II.3. Comparação Econômica entre as Alternativas de Construir uma Planta ou Importar o Produto.

II.6. Estudos Complementares

Estes estudos têm sido feitos para avaliar as possibilidades de ações estratégicas a longo prazo em face das análises de pós-otimização nos modelos a curto prazo.

Até hoje, foram estudados ajustes a longo prazo do modelo inicial nas seguintes direções (1),(2):

a) variações nas ofertas e nas demandas;

b) alterações nas capacidades instaladas;

c) desenvolvimento de novas tecnologias.

II.6.1. Perturbações na Oferta e na Demanda

Neste caso, costuma-se considerar alguns cenários, ou seja: um conjunto de suposições razoáveis sobre o comportamento da oferta de matérias primas ou da demanda de produtos finais. Obtém-se, assim, uma rápida percepção das possíveis situações no futuro desenvolvimento da indústria. Sobre este tema tem sido feito um importante estudo por Stadtherr e Rudd[2] sobre a eliminação do gás natural como matéria prima na indústria petroquímica dos EEUU.

II.6.2. Alterações na Capacidade Industrial

As análises, neste caso, referem-se às mudanças nas capacidades dos processos de tecnologias conhecidas como em mecanismo adaptativo da indústria numa futura conjuntura econômica , norteada especialmente pelas variações na demanda de produtos. Neste caminho, as tecnologias passam pelas seguintes fases de desenvolvimento (1):

- Adoção;
- Ajuste;
- Declíneo;
- Obsolecência.

Estes conceitos são de grande importância, especialmente na seleção e na negociação das tecnologias a serem adquiridas ou ampliadas.

Especial interesse nesta área, tem o estudo realizado por Trevino e Rudd[6] sobre políticas para a instalação de novas (ou ampliação das antigas) capacidades industriais para a produção de básicos, intermediários e produtos finais petroquímicos, no México.

Para o caso de um modelo cuja função objetivo é a minimização do consumo de matéria prima, foi proposto o uso dos índices de conservação da matéria prima, que refletem a quantidade de matéria prima poupada por unidade de processo utilizado. Daí, que os processos com índice de conservação da matéria prima relativamente menores, serão prováveis candidatos à decadência, e suas capacidades instaladas diminuirão sensivelmente nos anos posteriores. Esta hipótese foi testada com sucesso na indústria americana para os anos 1940, 1950, 1960 e 1970 (4).

II.6.3. Desenvolvimento de Novos Processos

A simples expansão ou redução das capacidades de processamento, como já foi dito, é só um mecanismo adaptativo que não traz grandes surpresas na atividade industrial. Porém, o desenvolvimento de uma nova tecnologia pode ter um efeito revolucionário e mudar a estrutura básica da indústria. É por isso que, às vezes, é difícil implementar mudanças deste tipo.

Importantes avanços têm sido feitos na simulação de novas tecnologias, como resultado do considerável progresso alcançado pela Síntese de Processos, que permite dispor de um conjunto de características técnicas e econômicas sobre a nova tecnologia que possibilitarão com suficiente exatidão determinar o impacto de sua introdução na indústria (1).

É importante salientar que para os novos processos, a viabilidade técnica é condição necessária mas não suficiente, pois deve-se assegurar primeiramente a viabilidade econômica.

M. Stadther propõe um método para estimar as possibilidades de sucesso de uma nova tecnologia a longo prazo. O modelo básico é o de Programação Linear analisado em II.5.1., e como função objetivo tem-se a minimização do consumo de matéria prima. Associado a este problema tem-se o seu dual. No caso particular das restrições de capacidade, as variáveis duais, ou também chamadas preços sombra refletem a variação marginal no consumo de matéria prima como resultado da introdução do novo processo na indústria. Logo, os processos com preços sombra negativos, são aqueles cuja introdução daria como resultado, uma utilização mais eficiente das matérias primas e,assim, teriam maiores possibilidades de sucesso nos próximos anos.

CAPÍTULO III

MODELO PARA O PLANEJAMENTO DA INDÚSTRIA DO METANO

III.1. Introdução

Neste Capítulo descreve-se um modelo recursivo a ser adotado no planejamento do uso industrial do gás natural equatoriano.

Quanto ao operador de decisão do modelo recursivo, será justificado a adoção da Programação Linear com Objetivos Múltiplos (PLOM) para modelá-lo (a revisão teórica deste método é feita no Anexo B). Por último será feita uma referência à forma geral do operador de realimentação.

III.2. Visão Sistêmica da Indústria do Metano

Neste trabalho adota-se uma visão sistêmica, similar à utilizada para a Indústria Petroquímica (II.4), com a finalidade de descrever o conjunto de produtos gerados a partir do gás natural. Assim sendo, teremos um sistema de reações ou processos químicos que utilizam ou transformam o metano em bens finais ou serviços. Esta adoção é feita, já que a dita representação é considerada como uma aproximação razoável, para fins de modelagem, do verdadeiro comportamento da indústria petroquímica em geral (2).

Na Figura III.1 apresenta-se um esquema que corresponde a esta visão sistêmica da indústria do metano.

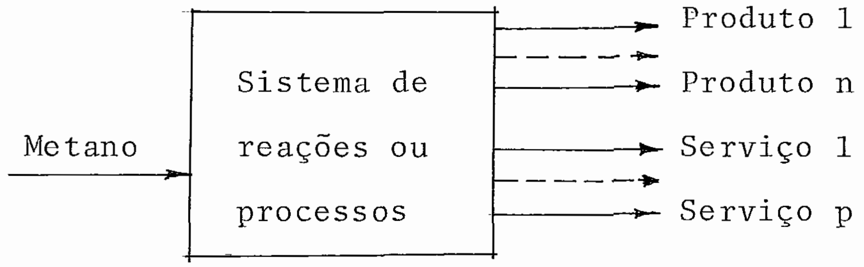


Figura III.1. Visão Sistêmica da Indústria do Metano

III.3. Modelo para o Planejamento do Desenvolvimento da Indústria do Metano

Para o modelos em questão, será adotado, em termos gerais o modelo recursivo já descrito em (II.2.1), pelas seguintes considerações:

a) Atualmente continua sendo um fator determinante no planejamento industrial a incerteza nos dados a longo prazo.

b) Este modelo recursivo tem sido testado com sucesso por vários pesquisadores: Rudd[1], Stadther e Rudd[2], Stadther[3].

c) O operador de decisão, que até hoje correspondia a modelos de Programação Linear ou Programação Mixta, é suficientemente flexível para permitir a utilização de outros tipos de modelos (9), como o modelo de Programação Linear com objetivos múltiplos por exemplo.

Para o caso particular do desenvolvimento industrial a partir do metano, o fluxo de informação do modelo é representado na Figura III.2.

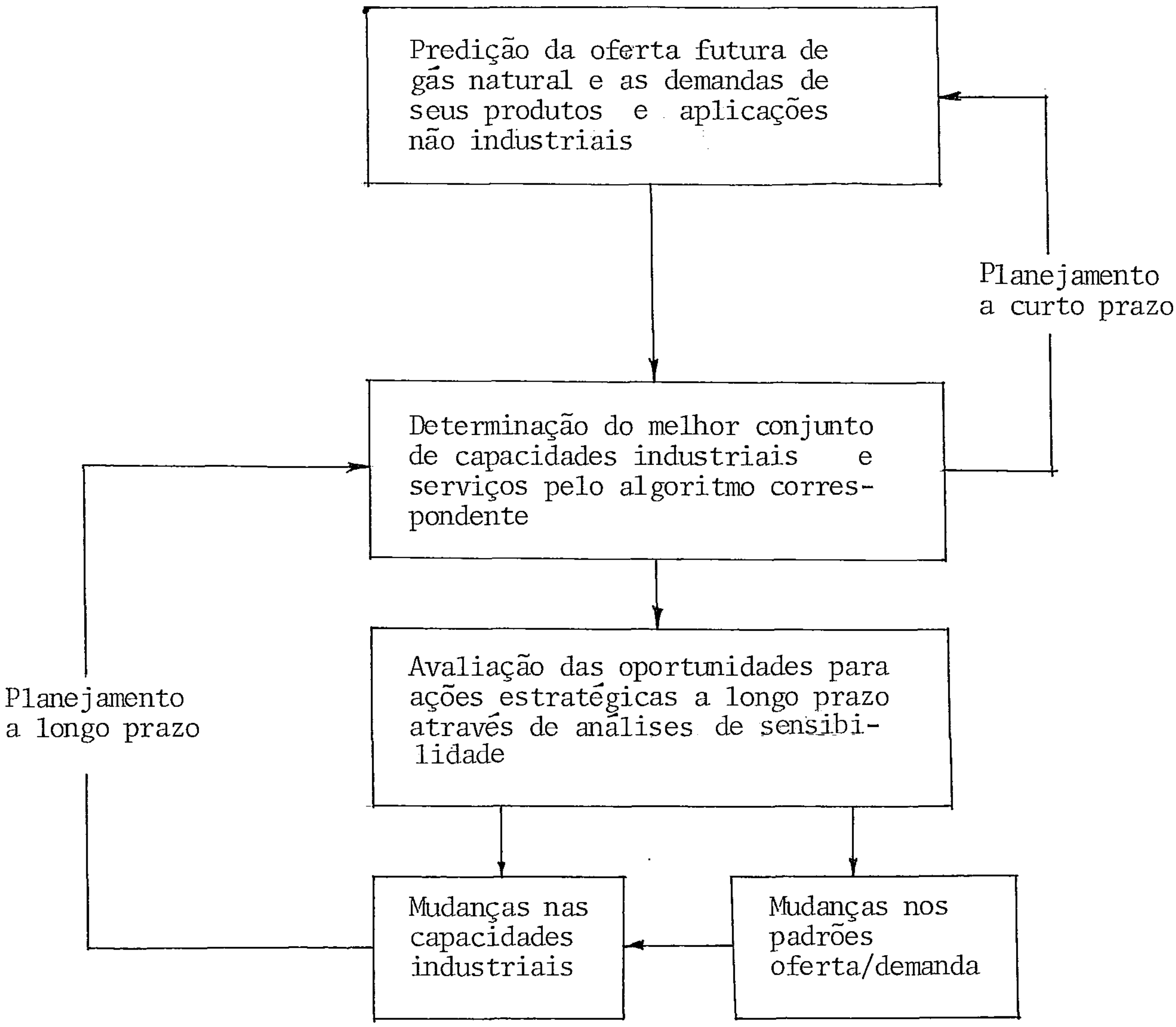


Figura III.2. Fluxo de Informação do Modelo Recursiva para o Planejamento Industrial do Metano.

III.4. O Operador de Decisão

III.4.1. Vantagens Comparativas da Programação Linear com Objetivos Múltiplos (PLOM)

A escolha da Programação Linear com Objetivos Múltiplos para modelar o operador de decisão, foi feita pelas seguintes razões:

- A análise de vários objetivos conflitantes, que se precisa fazer ao mesmo tempo nos estudos sobre planejamento industrial, pode ser realizado com ajuda da PLOM.
- Pode-se pré-estabelecer a ordem das prioridades para o cumprimento dos objetivos e consequentemente, analisar o impacto sobre os projetos, das mudanças na ordenação destas prioridades.
- Comparativamente, apresenta diversas vantagens sobre outros métodos de programação matemática que poderiam ser utilizados, neste caso para modelar o operador de decisão.

É necessário notar que para a decisão de utilizar PLOM para modelar e resolver o problema de planejamento industrial proposto, também foram levadas em conta suas limitações, como por exemplo a necessidade de pré-estabelecer as prioridades do cumprimento dos objetivos ou de estabelecer a preferência no cumprimento de um determinado objetivo dentro de um nível de prioridade.

A seguir procede-se a uma análise comparativa das vantagens da PLOM sobre outros métodos, sem incluir porém, uma análise profunda das diferenças fundamentais.

Pretende-se apenas, apresentar algumas vantagens formais do método de Programação Linear com Objetivos Múltiplos e Níveis de Prioridade Pré-estabelecidos.

III.4.1.1. Programação Linear com um Objetivo e Programação Linear com Objetivos Múltiplos

Uma formulação padrão do problema de Programação Linear com um objetivo é a seguinte:

Encontrar $\bar{x} = (x_1, x_2, \ldots, x_J)$ tal que:

maximize ou minimize:

$$Z = \sum_{j=1}^{J} d_j \, x_j$$

sujeito a:

$$\sum_{j=1}^{J} c_{ij} \, x_j \begin{smallmatrix} \leq \\ = \\ \geq \end{smallmatrix} b_i \qquad (1,2,\ldots,M) \tag{III.1}$$

$$\bar{x} \geq \bar{0} \tag{III.2}$$

onde:

d_j : coeficiente da variável de decisão x_j na função objetivo,

c_{ij}: coeficientes da variável de decisão x_j na restrição i ,

b_i : lado direito da restrição i .

Neste caso somente é possível encontrar a solução ótima x^* se as restrições (III.1) e (III.2) são totalmente cumpridas.

Agora, em termos de PLOM, o modelo equivalente seria o seguinte (ver detalhes no Anexo B):

Encontrar: $\bar{x} = (x_1, x_2, \ldots, x_J)$ que minimize

$$\bar{a} = \{ |g_1(\bar{n},\bar{p}), \; g_2(\bar{n},\bar{p})| \}$$

tal que:

$$\sum_{j=1}^{J} c_{ij}\, x_j + n_i - p_i = b_i \qquad (i=1,2,\ldots,M) \qquad \text{Prioridade 1}$$

$$\sum_{j=1}^{J} d_j\, x_j + n_{M+1} - p_{M+1} = b_{M+1} \qquad \text{Prioridade 2}$$

$\bar{x},\ \bar{p},\ \bar{n} \geq \bar{0}$

Desta nova formulação, pode-se observar a inflexibilidade típica da Programação Linear com um objetivo, que exige o cumprimento total do conjunto completo de restrições para cumprir a função objetivo.

O exemplo seguinte, baseado num caso apresentado por Ignizio[11], mostra um problema não viável, que pode ter solução quando é enunciado em termos de Programação Linear com Objetivos Múltiplos.

Exemplo III.1:

Um investidor dispõe de Cr$ 60.000 e o seu objetivo é maximizar o retorno mensal sobre o investimento. Com este fim, dispõe-se a fazer o seguinte:

- Comprar no mínimo Cr$ 20.000 em bonus do governo, que tem juros de 6% mensais.
- Investir entre Cr$ 5.000 e Cr$ 15.000 na caderneta de poupança que tem juros de 5% mensais.
- Destinar até Cr$ 10.000 à compra de ações com juros de 8% mensais.

- Investir no mínimo Cr$ 30.000 num novo empreendimento industrial com juros de 7% mensais.

Teremos, então, as seguintes variáveis de decisão:

x_1 - investimento em bonus de governo

x_2 - investimento em caderneta de poupança

x_3 - investimento em ações

x_4 - investimento no empreendimento industrial.

Modelo em termos de Programação Linear com um objetivo:

Encontrar $\bar{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4)$ que maximize:

$$Z = 0{,}06\ x_1 + 0{,}05\ x_2 + 0{,}08\ x_3 + 0{,}07\ x_4$$

Sujeito a:

$$\begin{array}{llllll}
x_1 & + x_2 & + x_3 & + x_4 & \leq & 50.000 \\
x_1 & & & & \geq & 20.000 \\
 & x_2 & & & \geq & 5.000 \\
 & x_2 & & & \leq & 15.000 \\
 & & x_3 & & \leq & 10.000 \\
 & & & x_4 & \geq & 30.000
\end{array}$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4 \geq 0$$

Ao tentarmos resolver este problema encontraremos que não existe solução. Isto é óbvio se analisarmos a primeira, a segunda, terceira e a sexta restrições, ou seja, o investidor não teria dinheiro suficiente para investir segundo as suas intenções.

Agora, procuraremos resolver este problema através da Programação Linear com Objetivos Múltiplos:

Admite-se que o investidor tem as seguintes prioridades:

P_1 - Não investir mais de Cr$ 50.000 num mês (objetivo absoluto).

P_2 - Investir, se possível, mais de Cr$ 20.000 em bonus e entre Cr$ 5.000 e Cr$ 15.000 na caderneta de poupança.

Ademais, ele considera duas vezes mais importante poupar que investir em bonus. (sobre a possibilidade de atribuir pesos aos objetivos dentro de cada nível de prioridade pode-se consultar em VI.3.3.2).

P_3 - Investir no novo empreendimento uma quantia maior ou igual a Cr$ 30.000.

P_4 - (a) Investir até Cr$ 10.000 em ações;

(b) Obter, se possível, um retorno total mensal de Cr$ 4.000.

O modelo de PLOM, neste caso, será o seguinte:

Encontrar $\overline{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4)$ que minimize:

$$\overline{a} = \{(p_1), (n_2 + 2n_3 + 2p_4), (n_6), (p_5 + n_7)\}$$

tal que:

$$
\begin{aligned}
x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + n_1 - p_1 &= 50.000 \\
x_1 \qquad\qquad\qquad + n_2 - p_2 &= 20.000 \\
x_2 \qquad\qquad + n_3 - p_3 &= 5.000 \\
x_2 \qquad\qquad + n_4 - p_4 &= 15.000 \\
x_3 \qquad + n_5 - p_5 &= 10.000 \\
x_4 + n_6 - p_6 &= 30.000
\end{aligned}
$$

$$0{,}06\ x_1 + 0{,}05\ x_2 + 0{,}08\ x_3 + 0{,}07\ x_4 + n_7 - p_7 = 4.000$$

$$\bar{x},\ \bar{n},\ \bar{p} \geq \bar{0}$$

A solução obtida para o problema é a seguinte:

$x_1^* =$ Cr\$ 20.000

$x_2^* =$ Cr\$ 5.000

$x_3^* = 0$

$x_4^* =$ Cr\$ 25.000

$\bar{a}^* = (0,\ 0\ ,$ Cr\$ 5.000 , Cr\$ 800)

E o investidor ao final consiguirá um retorno total mensal de Cr\$ 3.200 (6%).

Em resumo, pode-se indicar as seguintes vantagens de PLOM sobre a Programação Linear com uma função objetivo:

- Permite uma flexibilidade maior na procura das soluções ótimas.

- Podem-se analisar vários objetivos ao mesmo tempo.

III.4.1.2. Programação Linear Multicritério e PLOM

Para realizar essa comparação, lembremos que o problema de multicritério, também conhecido como o problema do vetor máximo, consiste num problema de Programação Linear com mais de uma função objetivo (ou critério). A formulação padrão pode ser apresentada da seguinte forma:

Minimizar Dx

Sujeito a:

$$Ax \leq b$$
$$x \geq 0$$

onde:

D - matriz p x n

A - matriz m x n

$x \in R^n$

$b \in R^m$

p - número de objetivos

Se V é o conjunto de soluções viáveis, resolver o problema significa encontrar um $\bar{x} \in V$ tal que não existe outro $x \in V$ que "melhore" os valores vetoriais das soluções, como será explicado adiante.

Deseja-se, então, encontrar o conjunto:

$$E = \{\bar{x} \in V \mid \nexists\, x \in V \text{ com } Dx \leq D\bar{x} \text{ e } Dx \neq D\bar{x}\}$$

chamado conjunto das soluções eficientes.

Explicando melhor o conjunto E, temos que, se

$\bar{x} \in E$, então não existe nenhum $x \in V$ tal que $d^i x \leq d^i \bar{x} \, \forall i$, e $d^j x < d^j \bar{x}$ para algum j . Aqui, considera-se d^i uma linha da matriz D , correspondendo, portanto, aos coeficientes de uma das funções objetivo.

Então, para resolver o problema linear de multicritério, o ideal seria encontrar uma solução que otimize simultaneamente, todas as funções objetivo. Esta seria indubitavelmente a solução ótima do problema. Acontece que, para a maioria dos problemas, esta solução não existe, ou então, é muito difícil de ser determinada. Cabe, então, se contentar com um resultado bem mais modesto, qual seja, encontrar uma solução viável $\bar{x}$, tal que não exista outra solução viável x que apresente valores menores (caso que o problema seja de minimização) ou iguais para todas as funções objetivo, e um valor menor para ao menos uma função objetivo. Ou seja, cabe encontrar uma solução viável $\bar{x}$ tal que todas as demais soluções viáveis tenham um valor maior para ao menos uma função objetivo, ou então, tenham valores iguais para todas as funções objetivo. Uma solução $\bar{x}$ que satisfaz a estas condições e chamado solução eficiente (12).

Como os valores vetoriais nas soluções eficientes não são totalmente ordenados, dificulta-se grandemente a escolha final da "melhor" das soluções eficientes. Devendo-se adotar para isso, um critério complementar.

Em relação à resolução do problema, observa-se a mesma estrutura inflexível na procura das soluções, já analisada para a Programação Linear com uma função objetivo.

Em resumo, pode-se concluir que, também com respeito à Programação Linear Multicritério, a PLOM apresenta algumas vantagens como:

- A procura das soluções é bem mais flexível, o que permite a solução de uma maior quantidade de problemas.
- Facilita a tomada de decisões, já que se trabalha com vetores estritamente ordenados de acordo com as prioridades pré-estabelecidas.

III.4.1.3. <u>Programação Linear com Vários Objetivos Ponderados numa Função Objetivo e Programação Linear com Objetivos Múltiplos e Níveis de Prioridade Pré-estabelecidos</u>

Basicamente a idéia nestes dois tipos de programação é a mesma: incluir objetivos como restrições, procurando minimizar os somatórios dos valores absolutos dos desvios negativos e/ou positivos relativos a estes objetivos.

No caso da função objetivo única, ela corresponde a uma função linear das variáveis de desvio que serão minimizadas, associando-se a cada uma delas um peso que, supostamente, garante uma ordenação na minimização das diferentes parcelas da função objetivo (15).

Logicamente, esta concepção simplifica o problema em termos da resolução, já que se pode utilizar diretamente o algoritmo SIMPLEX da Programação Linear. Porém, surgirá o seguinte problema:

As variáveis de desvio, podem não ser comensuráveis, dificultando-se assim, a determinação dos pesos para as diferentes parcelas da função objetivo.

Pode-se argumentar que também a PLOM agrupa, nos níveis de prioridade um (P_1), variáveis de desvio não comensuráveis. Mas, neste caso, tem-se que todos os objetivos desse nível, por serem absolutos, precisam ser executados completamente, senão a solução não será aceita. Logo não tem importância se na função linear que corresponde ao primeiro nível de prioridade encontram-se desvios não comensuráveis.

Alguns autores propõem substituir os citados pesos associados às variáveis de desvio por valores numéricos arbitrários. Geralmente, o primeiro desses valores é um número muito grande, o seguinte é menor e assim por diante. Com este processo, praticamente se volta à formulação inicial,com a desvantagem adicional de que o erro nos cálculos vai ser maior devido aos grandes valores utilizados como pesos.

Em resumo, as vantagens da Programação Linear com Objetivos Múltiplos e Níveis de Prioridade Pré-estabelecidas em relação ao método analisado são as seguintes:

- Ao se ter como função de execução um vetor ordenado, assegura-se também um cumprimento ordenado dos objetivos em ordem decrescente das prioridades.
- Não existe o risco de se incluir (exceto na prioridade um)numa mesma prioridade, objetivos não comensuráveis.
- Não existe a dificuldade adicional da determinação dos pesos para cada uma das parcelas da função objetivo única.
- Não se tem os problemas de instabilidade numérica que pode aparecer como resultado de se associar aos pessos valores muito grandes.

III.5. O Operador de Realimentação

Lembremos a expressão matemática definida no Capítulo anterior, para o Operador de Realimentação do modelo geral para o planejamento do desenvolvimento industrial.

$$W_t = W({}_{t_0}X_{t-1} \, , \, {}_{t-1}W_{t-1} \, , \, Z_t)$$

onde:

${}_{t_0}X_{t-1}$ - decisões tomadas entre os períodos inicial (t_0) e o anterior ao considerado $(t-1)$.

${}_{t_0}W_{t-1}$ - seqüência histórica dos dados.

Z_t - fatores exógenos no período t .

Em outras palavras, este operador tem a função de criar uma nova massa de dados para um determinado tempo t , em dependência do histórico das decisões tomadas, dos dados utilizados e dos atuais fatores exógenos.

No nosso caso, propõe-se a geração de diversos cenários, que levarão em conta os fatores já mencionados, para substituir à função W cuja formulação resultaria muito complicada devido à quantidade de variáveis envolvidas nesse tipo de problemas. Esta simplificação é feita pois, segundo Day[9], o operador de realimentação pode tomar outra forma diferente daquela estritamente matemática, sempre que tenha uma apresentação adequada e corresponda aos desejos do formulador do modelo.

CAPÍTULO IV

ALGORITMO DE RESOLUÇÃO

IV.1. Introdução

Neste Capítulo, apresenta-se o algoritmo de resolução dos problemas de Programação Linear com Objetivos Múltiplos e níveis de prioridade pré-estabelecidos. São analisados também, alguns problemas específicos na utilização do algoritmo e as correspondentes soluções. Além disso, procura-se ilustrar os conceitos teóricos apresentados, com exemplos gráficos e numéricos.

IV.2. Análise Gráfica

O método para resolver modelos de Programação Linear com Objetivos Múltiplos e níveis de prioridade pré-estabelecidos, poderá ser compreendido com mais facilidade se, inicialmente, realiza-se a análise gráfica dos passos seguidos para procurar a solução ótima.

Esta análise, serve somente para problemas com no máximo de três variáveis de decisão e tem a seguinte metodologia para a resolução dos problemas:

a) Representar com linhas retas , ou planos, todos os objetivos em termos das variáveis de decisão.

b) Determinar a(s) solução(ões) para os objetivos pertencentes ao nível de prioridade 1.

c) Toma-se o(s) objetivo(s) do nível de prioridade seguinte, e determina-se a melhor solução(ões) para este(s) objetivo(s), tomando cuidado para não degradar a(s) solução(ões) já determinadas para as prioridades anteriores.

d) Repete-se (c) até que todos os níveis de prioridade tenham sido analisados.

A seguir apresenta-se um exemplo da resolução gráfica:

Considere o modelo: Procurar x_1, x_2 que minimize $\bar{a} = \{(2p_1 + 3p_2), (n_3), (p_4)\}$

tal que:

$$
\begin{array}{rlr}
x_1 + x_2 + n_1 - p_1 = 10 & & G_1 \\
x_1 + n_2 - p_2 = 4 & & G_2 \\
5x_1 + 3x_2 + n_3 - p_3 = 56 & & G_3 \\
x_1 + x_2 + n_4 - p_4 = 12 & & G_4 \\
\bar{x}, \bar{n}, \bar{P} \geq 0 & &
\end{array}
$$

a) Representação dos objetivos (Figura IV.1)

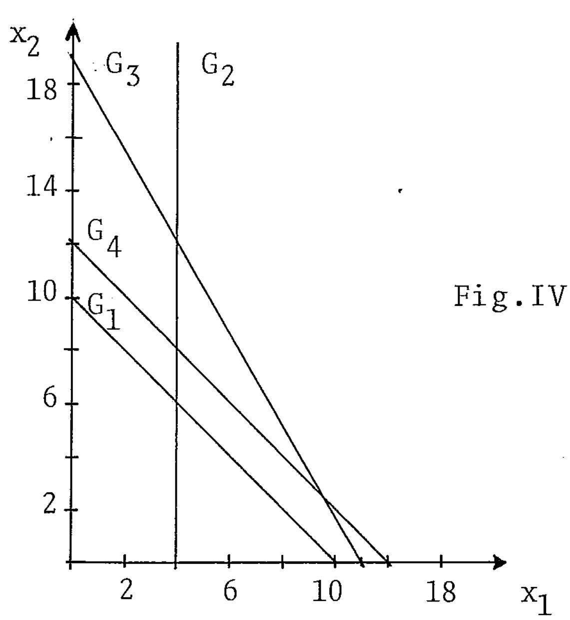


Fig.IV.1

b) São consideradas, inicialmente, os objetivos G_1 e G_2 pertencentes ao nível de prioridade 1.

A primeira prioridade é cumprida quando a função linear $2p_1 + 3p_2$ é minimizada, levando em conta, também, que $\overline{x}$, $\overline{p}$ e $\overline{n}$ são não-negativas.

Pode-se igualar a zero a função linear:

$2p_1 + 3p_2 = 0$

Logo, $p_1 = p_2 = 0$, e a região hachurada (Fig.IV.2) corresponde às soluções viáveis do primeiro nível de prioridade.

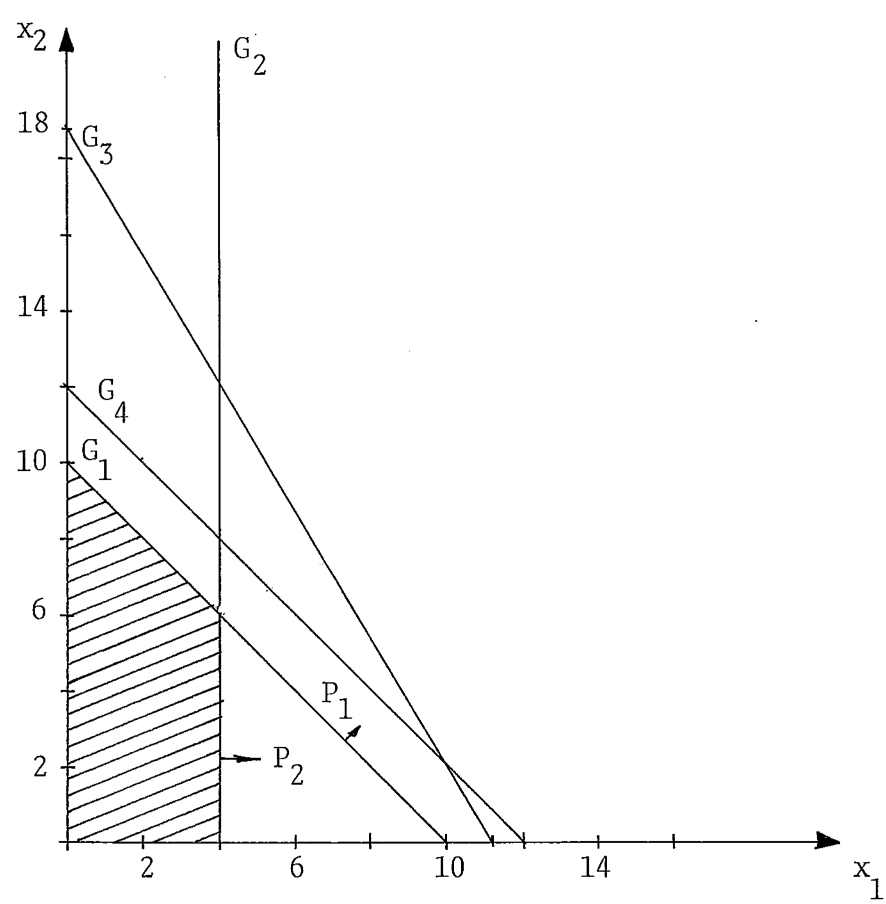


Fig.IV.2

c) Em seguida, analisa-se o nível de prioridade seguinte (P_2). Esta prioridade somente tem um objetivo: G_3 . E para cumprilo é preciso minimizar n_3 . Porém, é necessário observar que n_3 não pode ser levado ao seu nível mínimo ($n_3 = 0$) sem degradar as soluções obtidas para o nível de prioridade superior. Então, o valor mínimo de n_3 que não afeta as soluções anteriores, corresponde ao ponto $x_1 = 4$, $x_2 = 6$; ver Figura IV.3

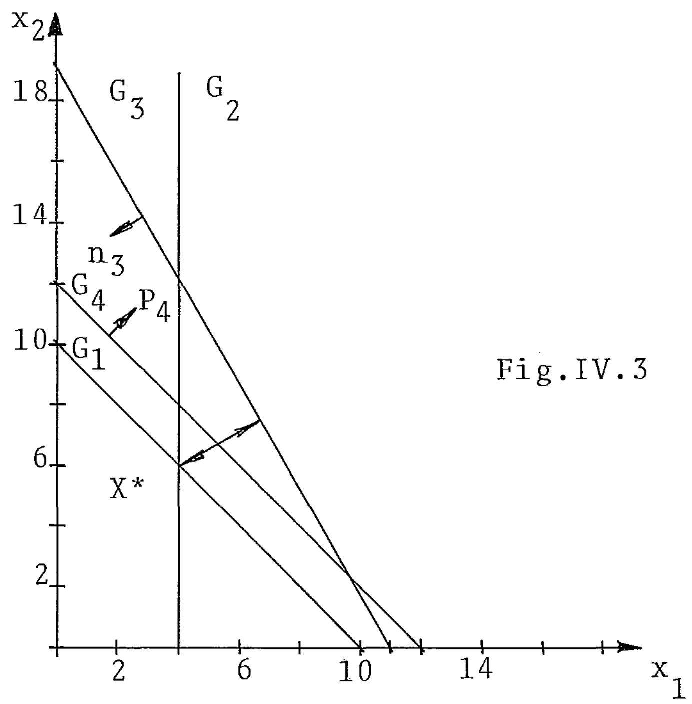


Fig.IV.3

d) Finalmente, analisa-se a nível de prioridade P_3 que tem um objetivo: G_4 , devendo ser minimizado p_4 para satisfazê-lo. Observa-se que, qualquer ponto que pertence ao triângulo limitado por G_n , $x_1 = 0$ e $x_2 = 0$, cumpre esta condição. Além disso, o ponto solução dos níveis anteriores também pertence a este triângulo. Então, este ponto corresponde à solução ótima do problema total.

Logo, a solução final do problema será:

$x_1^* = 4$; $x_2^* = 6$; $\bar{a}^* = (0,18,0)$

O vetor $\bar{a}^*$ indica que os níveis de prioridade P_1 e P_3 foram cumpridos totalmente, enquanto P_2 foi somente cumprido em forma parcial.

IV.3. Método do Simplex Modificado

Apresenta-se um procedimento para a resolução de problemas de Programação Linear com Objetivos Múltiplos, desenvolvido com base no conhecido método SIMPLEX de Programação Linear (11).

IV.3.1. O quadro inicial

O passo fundamental para uma rápida resolução de um problema de PLOM é o estabelecimento do quadro inicial (Quadro IV.1)

	P_k	$w_{k,1} \cdots w_{k,j}$	$w_{k,j+1} \cdots w_{k,j+m}$	Campo Superior
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	
Campo Esquerdo	P_1	$w_{1,1} \cdots w_{i,j}$	$w_{1,j+1} \cdots w_{1,j+m}$	
$P_k \cdots P_1$	v	$x_1 \cdots\cdots x_j$	$p_1 \cdots p_m$	$\bar{b}$
$u_{1,k} \cdots u_{1,1}$	n_1	$e_{1,1} \cdots e_{1,j}$	$c_{1,j+1} \cdots c_{1,j+m}$	b_1
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$u_{m,k} \cdots u_{m,1}$	n_m	$e_{m,1} \cdots e_{m,j}$	$e_{n,j+1} \cdots e_{n,j+m}$	b_m
	P_1	$I_{1,1} \cdots I_{1,j}$	$I_{1,j+1} \cdots I_{1,j+n}$	a_1
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	P_k	$I_{k,1} \cdots I_{k,j}$	$I_{k,j+1} \cdots I_{k,j+m}$	a_k

Quadro IV.1. Quadro inicial do método simplex modificado.

Os elementos deste Quadro são definidos da seguinte forma:

Cabeçalhos:

P_k = nível de prioridade k (k = 1,2,...,k)

v = variáveis do problema. À direita de v, estão o conjunto de variáveis não básicas (x_j e P_i); abaixo de v, está o conjunto inicial de variáveis básicas (n_i)

$\bar{b}$ = os elementos sob $\bar{b}$ são os valores dos lados direitos de cada objetivo.

Elementos:

j = 1,2,...,J ; i = 1,...,m ; s = 1,...,S ; k = 1,...,K

$e_{i,s}$ = elementos na fila i sob a variável não básica s, ou seja, $e_{i,s}$ é o coeficiente da variável não básica s no objetivo i.

$w_{k,s}$ = peso associado à variável não básica s no nível de prioridade k.

$u_{i,k}$ = peso associado à variável básica i, no nível de prioridade k.

$I_{k,s}$ = Índice numérico de prioridade k, sob a variável não básica s.

a_k = nível de execução da prioridade k ; $\bar{a} = \{a_1, a_2, \ldots, a_k\}$

Todos os elementos, menos $I_{k,s}$ e a_k, são obtidos do modelo matemático; para o cálculo de $I_{k,s}$ e a_k utilizam-se as seguintes fórmulas:

$$I_{k,s} = \sum_{i=1}^{m} (e_{i,s} \cdot U_{i,k}) - W_{k,s}$$

$$a_k = \sum_{i=1}^{m} (b_i \cdot U_{i,k})$$

No Quadro inicial, as variáveis básicas correspondem (salvo em casos especiais a serem analisadas depois) ao conjunto das variáveis de desvio negativo (n_i). As iterações do algoritmo consistem simplesmente na troca de uma variável pertencente à base por uma variável não básica, quando esta troca melhora a solução vigente.

As soluções em cada etapa são dadas em função de $a_1, a_2, \ldots, a_k$, onde a_k representa a nível de execução da prioridade k. Como a função de execução foi adotada na forma de minimização, a um menor valor de a_k corresponde um melhor nível de execução da prioridade k.

O valor de um $a_k = 0$ indica, em particular, que o nível de prioridade k foi completamente executado.

O conjunto das linhas dos índices no quadro geral, serve para indicar se a solução vigente é a ótima ou não.

IV.3.2. Algoritmo para a Resolução de Problemas de PLOM

Passo 1: Inicialização. Estabelecer o quadro inicial só com a primeira linha de índices numéricos, ou seja, para $k = 1$.

Passo 2: Comprovação da otimalidade. Examinar a_k. Se a_k é igual a zero, continuar com o passo 6. Se não, examinar cada valor positivo dos índices numéricos $(I_{k,s})$ na linha k. Escolher o maior positivo destes índices que não tenha índices negativos nas prioridades superiores na mesma coluna. Designar esta coluna como s' . No caso de existir empate entre vários índices, a escolha será feita arbitrariamente. Se não existir um índice numérico com essas características continuar com o passo 6, caso contrário prosseguir com o passo 3.

Passo 3 : Determinação da variável que entra na base. A variável não básica que corresponde à coluna s', é a variável que entra na base.

Passo 4 : Determinação da variável que sai da base. Determinar a linha associada com o mínimo valor não negativo de:

$b_i / e_{i,s'}$

No caso de empate, escolher a linha que tenha a variável básica com maior nível de prioridade. Designar esta linha como i' . A variável básica associada com a linha i' é a variável que sai da base.

Passo 5 : Estabelecimento do novo quadro

(a) trocar posições da variável básica associada à linha i' , junto com seus correspondentes coeficientes do campo esquerdo, com a variável não básica associada à coluna s' , também junto com seus coeficientes localizados no campo superior.

(b) a linha i' , no novo quadro, é obtida (exceto $e_{i',s'}$) dividindo a linha i' por $e_{i',s'}$.

(c) a coluna s' do novo quadro (exceto $e_{i's'}$) é obtida dividindo a coluna s' do quadro original por $-e_{i',s'}$.

(d) o novo elemento na posição de $e_{i',s'}$ é o recíproco de $e_{i',s'}$. Os elementos restantes são calculados da seguinte forma:

Seja $\hat{b}_i$ e $\hat{e}_{i,s}$ elementos do novo quadro e b_i e $e_{i,s}$ elemento do quadro original, então:

$$\hat{e}_{i,s} = e_{i,s} - \frac{(e_{i',s})(e_{i,s'})}{e_{i',s'}} \qquad \text{(IV.1)}$$

$$\hat{b}_i = b_i - \frac{(b_{i'})(e_{i,s'})}{e_{i',s'}} \qquad \text{(IV.2)}$$

(e) o cálculo dos novos valores de $I_{k,s}$ e a_k se faz pelas fórmulas:

$$I_{k,s} = \sum_{i=1}^{m} (e_{i,s} \cdot U_{i,k}) - w_{k,s} \qquad \text{(IV.3)}$$

$$a_k = \sum_{i=1}^{m} (b_i \cdot U_{i,k}) \qquad \text{(IV-4)}$$

Estes valores devem ser calculados para o nível de prioridade de k e para todos os níveis de prioridades anteriores.

(f) Retornar ao passo 2.

Passo 7 : Comprovação final da otimalidade.

Se todos os valores de a_k são iguais a zero, a solução é ótima. No caso de se ter algum $a_k > 0$, examinar os índices $I_{k,s}$ na linha correspondente. Se sobre os $I_{k,s}$ positivos existem somente valores negativos então esta solução é também ótima. No caso de existir valores não negativos sobre os índices $I_{k,s}$ da linha onde $a_k > 0$, a solução ainda não é ótima, devendo-se retornar ao passo 2.

IV.3.3. Complicações e sua resolução

Existem alguns casos especiais e complicações no estabelecimento do quadro inicial, durante a realização do algoritmo e na interpretação dos resultados. Destes, serão analisados os seguintes casos:

1 - Valores dos lados direitos dos objetivos.

Frequentemente, não existe um valor determinado para os lados direitos dos objetivos. Este problema pode ser resolvido colocando um valor razoável; em outras palavras um nível que se procura atingir. Alternativamente, pode-se utilizar um valor que corresponda ao maior valor que o lado direito possa atingir, para o caso de maximização, ou o menor dos valores, para o caso de minimização. É necessário procurar limites máximos ou mínimos que sejam realmente razoáveis, pois caso contrário pode-se degradar a solução resultante.

2 - Lados direitos negativos

O algoritmo da PLOM exige que todos os lados direitos das restrições sejam não positivos. Esta exigência pode ser facilmente cumprida para os objetivos com lado direito negativo, multiplicando por (-1) o respectivo objetivo. Neste caso, tem-se que levar em conta que para este objetivo, a variável de desvio negativo (n) será negativa e não poderá integrar mais a base inicial.

Deverá ser incluida nesta base, então, a variável de desvio positivo (p).

3 - Soluções não implementáveis

Solução não implementável é aquela que tem o primeiro elemento do vetor $\bar{a}$ (a_1) positivo, o que significa que o nível de prioridade um (que corresponde aos objetivos absolutos) não foi executado completamente. Na prática, este problema se resolve reconsiderando os objetivos ou mudando os limites dos recursos.

4 - Soluções ótimas alternativas

Tem-se soluções ótimas alternativas quando dois ou mais conjuntos de valores das variáveis de decisão têm exatamente o mesmo vetor $\bar{a}$ que corresponde ao nível de execução das prioridades. A existência de soluções ótimas alternativas é determinada pelos seguintes fatos:

(a) Todos os elementos de uma coluna de índices $I_{k,s}$ são iguais a zero.

(b) Existe pelo menos um valor positivo na correspondente coluna dos elementos $e_{i,s}$. Outra possibilidade para se ter soluções ótimas alternativas é quando todos os elementos do vetor $\bar{a}$ são iguais a zero e se tem um ou mais índices $I_{k,s}$ positivos que não têm valores negativos na sua coluna das prioridades superiores.

IV.3.4. Exemplo de aplicação do algoritmo de PLOM

Encontrar $\bar{x} = (x_1, x_2)$ que minimize:

$$\bar{a} = \{(2p_1 + 3p_2),\ (n_3), (p_4)\}$$

tal que:

$$\begin{aligned} x_1 + x_2 + n_1 - p_1 &= 10 \\ x_1 + n_2 - p_2 &= 4 \\ 5x_1 + 3x_2 + n_3 - p_3 &= 56 \\ x_1 + x_2 + n_4 - p_4 &= 12 \\ \bar{x}, \bar{n}, \bar{p} &\geq 0 \end{aligned}$$

Passo 1 : Estabelecimento do quadro inicial (Quadro IV.2)

			P_3	0	0	0	0	0	1	
			P_2	0	0	0	0	0	0	
			P_1	0	0	2	3	0	0	
P_3	P_2	P_1	V	x_1	x_2	p_1	p_2	p_3	p_4	$\bar{b}$
0	0	0	n_1	1	1	-1	0	0	0	10
0	0	0	n_2	1	0	0	-1	0	0	4
0	1	0	n_3	5	3	0	0	-1	0	56
0	0	0	n_4	1	1	0	0	0	-1	12
			P_1	0	0	-2	-3	0	0	0

Passo 2 : $a_1 = 0 \rightarrow$ então prossegue-se com o passo 6.

Passo 6 : $k = k + 1 = 1 + 1 = 2$, $k < K$ $(K = 3) \rightarrow$ então, calcula-se a linha dos índices $I_{k,s}$ para a prioridade P_2 , (Quadro IV.3)

			P_3	0	0	0	0	0	1	
			P_2	0	0	0	0	0	0	
			P_1	0	0	2	3	0	0	
P_3	P_2	P_1	V	x_1	x_2	p_1	p_2	p_3	p_4	$\bar{b}$
0	0	0	n_1	1	1	-1	0	0	0	10
0	0	0	n_2	1	0	0	-1	0	0	4
0	1	0	n_3	5	3	0	0	-1	0	56
0	0	0	n_4	1	1	0	0	0	-1	12
			P_1	0	0	-2	-3	0	0	0
			P_2	5	3	-2	-3	-1	0	56

Quadro IV.3

continua-se com o passo 2.

Passo 2 : $a_2 = 56 \rightarrow$ então examinar todos os índices positivos da linha 2. $I_{2,1}$ é o maior valor positivo (+5) e não tem na sua coluna valores negativos. Então s'=1, prosseguir com o passo 3.

Passo 3 : x_1 é a variável que entra na base.

Passo 4 : Calculando $b_i/e_{i,s'}$, obtém-se:

$$b_1/e_{1,1} = 10/1 = 10$$

$$b_2/e_{2,1} = 4/1 = 4 \text{ (valor mínimo)}$$
$$b_3/e_{3,1} = 56/5 = 11{,}2$$
$$b_4/e_{4,1} = 12/1 = 12$$

Logo a variável que sai é n_2 ($i' = 2$).

Passos 5(a),5(b) e 5(c): Trocam-se as posições das variáveis que entram e saem da base e calculam-se as linhas $i' = 2$ e $s' = 1$ do novo Quadro (Quadro IV.4).

			P_3	0	0	0	0	0	1	
			P_2	0	0	0	0	0	0	
			P_1	0	0	2	3	0	0	
P_3	P_2	P_1	V	n_2	x_2	p_1	p_2	p_3	p_4	$\bar{b}$
0	0	0	n_1	-1						
0	0	0	x_1	1	0	0	-1	0	0	4
0	1	0	n_3	-5						
0	0	0	n_4	1						
			P_1							
			P_2							

Quadro IV.4

Passos 5(d) e 5(e) : Calculam-se os elementos restantes $e_{i,s}$ com as fórmulas (IV.1) e (IV.2) e todos os índices $I_{k,s}$ e a_k (para $k = 1,2$) utilizando as fórmulas (IV.3) e (IV.4) (Quadro IV.5).

			P_3	0	0	0	0	0	1	
			P_2	0	0	0	0	0	0	
			P_1	0	0	2	3	0	0	
P_3	P_2	P_1	V	n_2	x_2	p_1	p_2	p_3	p_4	$\bar{b}$
0	0	0	n_1	-1	1	-1	1	0	0	6
0	0	0	x_1	1	0	0	-1	0	0	4
0	1	0	n_3	-5	3	0	5	-1	0	36
0	0	0	n_4	-1	1	0	1	0	-1	8
			P_1	0	0	-2	-3	0	0	0
			P_2	-5	3	0	5	-1	0	36

Quadro IV.5

Passo 2 : $a_2 = 36 \rightarrow$ logo, ainda não se satisfez completamente o nível de prioridade 2. Examina-se todos os índices positivos na linha 2 e encontra-se que o maior é $I_{2,4} = 5$. Porém, este elemento tem um índice negativo na sua coluna. Então, toma-se $I_{2,2} = 3$, que não tem índices negativos na coluna. Logo $s' = 2$ e prosseguimos com o passo 3.

Passo 3 : x_2 é a variável que entra.

Passo 4 : Calculam-se todos os $b_i/e_{i,s'}$ não-negativos:

$b_1/e_{1,2} = 6/1 = 6$ (valor mínimo)

$b_3/e_{1,3} = 36/3 = 12$

$b_4/e_{1,4} = 8/1 = 8$

Então $i' = 1$ e n_1 é a variável que sai da base.

Passo 5 : O novo Quadro com as variáveis x_2 e n_1 trocadas e todos os novos elementos calculados, mostra-se no (Quadro IV.6) e prossegue-se com o passo 2.

Passo 2 : $a_2 = 18 \rightarrow$ logo, o nível de prioridade não está completamente satisfeito. Porém todos os índices positivos $I_{2,5}$ tem elementos negativos nas respectivas colunas. Então prossegue-se com o passo 6.

			P_3	0	0	0	0	0	1	
			P_2	0	0	0	0	0	0	
			P_1	0	0	2	3	0	0	
P_3	P_2	P_1	V	n_2	n_1	p_1	p_2	p_3	p_4	$\bar{b}$
0	0	0	x_2	-1	1	-1	1	0	0	6
0	0	0	x_1	1	0	0	-1	0	0	4
0	1	0	n_3	2	-3	3	2	-1	0	18
0	0	0	n_4	0	-1	1	0	0	-1	2
			P_1	0	0	-2	-3	0	0	0
			P_2	-2	-3	3	2	-1	0	18

Quadro IV.6

Passo 6 : $k = k+1 = 2 + 1 = 3$. $k \leq K$ $(K = 3)$ então, calcula-se a linha dos índices $I_{k,s}$ para P_3 (Quadro IV.7) e continua-se com passo 2.

			P_3	0	0	0	0	0	1	
			P_2	0	0	0	0	0	0	
			P_1	0	0	2	3	0	0	
P_3	P_2	P_1	V	n_2	n_1	p_1	p_2	p_3	p_4	$\bar{b}$
0	0	0	x_2	-1	1	-1	1	0	0	6
0	0	0	x_1	1	0	0	-1	0	0	4
0	1	0	n_3	-2	-3	3	2	-1	0	18
0	0	0	n_4	0	-1	1	0	0	-1	2
			P_1	0	0	-2	-3	0	0	0
			P_2	-2	-3	3	2	-1	0	18
			P_3	0	0	0	0	0	1	0

Quadro IV.7

Passo 2 : $a_3 = 0 \rightarrow$ então, prossegue-se com o passo 6.

Passo 6 : $k = k + 1 = 3 + 1 = 4 > K$, já que $k > K$. Continua-se com o passo 7.

Passo 7 : Embora $a_2 > 0$, a solução é a ótima.

A solução para este exemplo é, então:

$x_1^* = 4$; $x_2^* = 6$

$\bar{a}^* = (0,18,0)$

CAPÍTULO V

O PROGRAMA COMPUTACIONAL

V.1. Introdução

No presente Capítulo, descreve-se o programa computacional PLOM, cujo objetivo é resolver problemas de Programação com Objetivos Múltiplos. O desenvolvimento deste programa, baseia-se no algoritmo e denominações do Método Simplex Modificado apresentado no Capítulo IV. Por esta razão, não se faz uma explicação especial da nomenclatura utilizada.

O código computacional completo do programa PLOM encontra-se no Anexo D.

V.2. Funcionamento básico

Basicamente, o funcionamento do programa PLOM é o seguinte:

Os dados de entrada são colocados em 4 "arrays" que correspondem ao campo dos coeficientes dos objetivos, campo dos lados direitos dos objetivos e campos superior e esquerdo que correspondem ao valor dos pessos das variáveis de desvio na função de execução.

Em seguida são calculados os índices numéricos $I_{k,s}$, e o valor da função de execução a_k. Esses resultados são guardados em dois "arrays" independentes.

Iterativamente, são testadas as condições de otimalidade para cada nível de prioridade. Se necessário, realiza-se a troca de variáveis na base e o correspondente pivoteamento para gera um novo Quadro.

Depois de cumpridas as exigências sobre a otimalidade dos diferentes níveis de prioridade, imprimem-se os resultados: tanto da solução inicialmente calculada como das possíveis soluções alternativas.

V.3. Estrutura do programa

Para a descrição gráfica da estrutura do programa computacional PLOM, adotou-se a simbologia e a metodologia seguida por Stevens[13], que permite visualizar os módulos que compõem o programa, os fluxos de informações existentes entre eles e a freqüência e a condicionalidade de sua chamada (ver Figura IV.1).

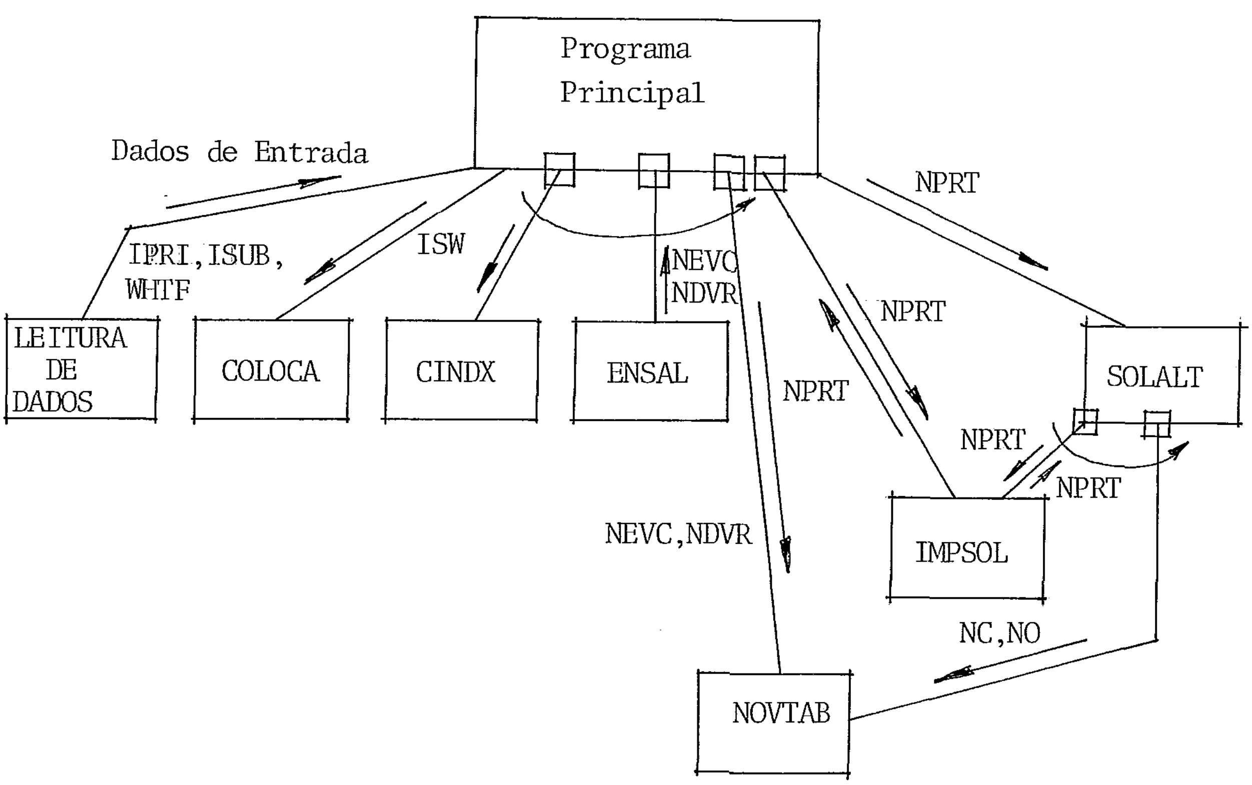


Fig. IV.1

V.4. Descrição dos módulos

V.4.1. Programa principal

a) Recebe os seguintes dados de entrada do arquivo correspondente:
- número de objetivos;
- número de níveis de prioridade;
- número de variáveis;
- número de termos da função de execução;
- coeficientes da matriz dos objetivos;
- lados direitos dos objetivos;
- pesos correspondentes às variáveis de desvio nos diferentes níveis de prioridade.

b) Gera mensagens de erro no caso em que os dados lidos estejam fora dos limites estabelecidos.

c) Chama iterativamente as subrotinas que realizam as diferentes etapas do algoritmo, e aquelas que imprimem as soluções.

V.4.2. COLOCA

Parâmetros de entrada:

IPRI - nível de prioridade para um determinado termo da função de execução.

ISUB - Código associado à variável de desvio ("+" para o desvio positivo e "-" para o negativo).

WTHF - Fator correspondente ao peso da variável de desvio no nível de prioridade.

Parâmetro se saída: não tem

COLOCA - aloca os valores dos pesos das variáveis na função de execução nos campos superior e esquerdo em função do sinal de ISUB. Valores positivos são alocados no campo superior e os negativos no campo esquerdo.

V.4.3. CINDX

Parâmetros de entrada:

ISW : Código para ordenar o cálculo dos índices numéricos e os valores da função de execução.

Parâmetros de saída: não tem

CINDX - Calcula as linhas dos índices numéricos e os valores dos componentes da função de execução. Quando o código ISW = 1, calculam-se todas as linhas desde a primeira até à linha da prioridade pesquisada; caso contrário, ou seja, se ISW ≠ 1, calcula-se somente, a linha de índices numéricos e o valor do componente da função de execução correspondente à prioridade analisada.

V.4.4. ENSAL

Parâmetros de entrada: não tem

Parâmetros de saída:

NEVC - Índice da coluna da variável que entra na base.

NDVR - Índice da linha da variável que sai da base.

EMSAL - determina a coluna correspondente à variável que entra na base e a linha da variável básica que sai. No caso que esta sub-rotina retornar o valor NEVC = 0, isso significará que não é possível otimizar mais o nível de prioridade analisado. Caso contrário NEVC, corresponderá ao índice da coluna que tem o maior valor positivo sem valores negativos na sua coluna das prioridades superiores. Os casos de empate são resolvidos arbitrariamente. MDVR, por sua vez, corresponderá à relação positiva mínima entre os componentes do vetor dos lados direitos dos objetivos e os da coluna NEVC. No caso de empate escolhe-se aquela linha que tem a variável básica com o maior nível de prioridade.

V.4.5. NOVTAB

Parâmetros de entrada: NEVC, NDVR

Parâmetros de saída: não tem

NOVTAB - realiza o pivoteamento e determina o novo Quadro, tomando como base o elemento pivô (NEVC, NDVR). Ela calcula também os novos índices numéricos e os valores dos componentes da função de execução para todas as prioridades, incluindo a analisada.

V.4.6. IMPSOL

Parâmetros de entrada: NPRT - contador dos resultados impressos.

Parâmetros de saída: NPRT

NPRT.

IMPSOL, imprime informações sobre as soluções obtidas.

V.4.7. SOLALT

Parâmetro de entrada: NPRT

Parâmetros de saída : não tem

SOLALT, procura soluções alternativas viáveis, gera-as, uma a uma, e as imprime.

CAPÍTULO VI

MODELO GERAL DO OPERADOR DE DECISÃO

VI.1. Introdução

Neste Capítulo, apresenta-se o modelo do operador de decisão que forma parte do modelo geral de planejamento do desenvolvimento industrial a partir do gás natural equatoriano.

Inicialmente, definem-se as possíveis utilizações desta matéria prima. Em seguida, desenvolve-se o modelo do operador de decisão segundo a metodologia apresentada no Anexo B. Finalmente, mostra-se a forma geral do modelo, que serve de base para realizar o estudo de diversas alternativas, cujos resultados serão analisados no Capítulo seguinte.

VI.2. Utilizações da Matéria Prima

Das variadas utilizações do gás metano, têm sido identificadas as seguintes produções industriais e aplicações energéticas:

Produções industriais:

- Amônia
- Uréia
- Metanol
- Acetileno
- Cloreto de metila
- Clorofórmio
- Tetracloreto de carbono

Outras utilizações:

- siderurgia;
- geração de energia elétrica.

A escolha destes itens, tem sido feita de acordo com as diretrizes do Plano Nacional de Industrialização do Equador (amônia, uréia e siderurgia) e com uma análise de possíveis utilizações do metano, que não sendo altamente sofisticadas ou intensivas em capital, têm suficiente mercado de sustentação a nível interno, subregional ou externo, e podem intervir assim num processo eficiente de desenvolvimento industrial e econômico do país.

VI.3. O Operador de Decisão em Termos da Programação Linear com Objetivos Múltiplos e Níveis de Prioridade Pré-estabelecidos

VI.3.1. Definição das Variáveis de Decisão

As variáveis de decisão são denominadas com a letra x e correspondem às capacidades de processamento, no caso dos processos industriais, e às capacidades instaladas totais, para o caso da geração de energia elétrica e da utilização do metano em siderurgia.

VI.3.2. Formulação e análise dos objetivos

Levando em conta as condições específicas do Equador, e as normas e princípios que regulam as atividades da Corporación Estatal Petrolera Ecuatoriana (CEPE), entidade encarregada de materializar os planos de industrialização dos hidrocarbonetos (como neste caso do metano), foi identificado o seguinte conjunto de objetivos:

A - Satisfazer às demandas de produtos industrializados obtidos a partir do gás natural.

B - Satisfazer outras aplicações do gás natural.

C - Não ultrapassar a quantidade disponível de gás.

D - Maximizar a utilização da mão-de-obra.

E - Maximizar o excedente exportável dos produtos elaborados.

F - Minimizar o volume de matéria prima utilizada.

G - Limitar-se ao orçamento de investimentos.

Outros objetivos muito importantes, como a maximização de lucros ou minimização de custos operacionais, não foram considerados em razão do fato analisado no capítulo II (II.3), sobre a preponderância dos custos da matéria prima nos custos totais de produção na indústria petroquímica. E devido também; à dificuldade para achar dados econômicos detalhados das transformações químicas e dos processos não precisamente industriais, como a geração de energia elétrica. Neste caso, o objetivo "minimizar o volume de matéria prima utilizada" é proposto como o objetivo que reflete a procura do lucro máximo.

A seguir, se faz uma descrição mais detalhada dos objetivos, e a respectiva análise do ponto de vista da Programação Linear com Objetivos Múltiplos.

VI.3.2.1. A) Satisfazer as demandas de produtos industrializados a partir do gás natural

A expressão matemática deste tipo de objetivos é a seguinte:

$$a_i \; x_i \geq d_i \qquad i = 1,2,\ldots, N$$

onde:

a_i - quantidade do produto i produzida por unidade de capacidade instalada, T/T.

x_i - capacidade de processamento, T/ano.

d_i - demanda anual do produto i , T .

N - número de produtos considerados no modelo.

Em termos de objetivos de PLOM, teríamos as seguintes expressões:

$a_1 \; x_1 + n_1 - p_1 = d_1$ (amônia)

$a_2 \; x_2 + n_2 - p_2 = d_2$ (uréia)

$a_3 \; x_3 + n_3 - p_3 = d_3$ (metanol)

$a_4 \; x_4 + n_4 - p_4 = d_4$ (acetileno)

$a_5 \; x_5 + n_5 - p_5 = d_5$ (cloreto de metila)

$a_6 \; x_6 + n_6 - p_6 = d_6$ (clorofórmio)

$a_7 \; x_7 + n_7 - p_7 = d_7$ (Tetracloreto de carbono)

Neste caso, terão que ser minimizados os desvios negativos $n_1, n_2, \ldots, n_7$.

VI.3.2.2. B) Satisfazer outras aplicações do gás natural

Estes objetivos têm a seguinte expressão matemática:

$$r_j \; y_j \geq ds_j \qquad j = 1,2,\ldots,A$$

onde:

r_j - eficiência do processo

y_j - capacidade instalada, TEP/ano

ds_j - demanda anual do serviço, TEP

A - número de aplicações especiais do gás metano

Como objetivos de programação linear com objetivos múltiplos, ter-se-iam os seguintes:

$$r_1 \; y_1 + n_8 - p_8 = ds_1 \qquad \text{(Geração de E. elétrica)}$$

$$r_2 \; y_2 + n_9 - p_9 = ds_2 \qquad \text{(Siderurgia)}$$

Os desvios a serem minimizado são n_8 e n_9.

VI.3.2.2. C) Não ultrapassar a quantidade disponível de gás natural

A expressão matemática correspondente a este objetivo é a seguinte:

$$\sum_{i=1}^{N} b_i \; x_i + \sum_{r=1}^{A} s_j \; y_j \leq PR$$

onde:

b_i - quantidade de gás natural consumida por unidade de capacidade instalada da transformação industrial i , T/T

x_i - capacidade instalada da transformação i , T/ano

s_j - quantidade de gás natural consumida por unidade de processo especial j , T/T

y_j - capacidade instalada do processo j , T/ano

PR - produção anual de gás natural, T/ano

Em termos de PLOM, teríamos o seguinte objetivo:

$$b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_5 + b_6 x_6 +$$
$$+ b_7 x_7 + s_1 y_1 + s_2 y_2 + n_{10} - p_{10} = PR$$

Neste caso, terá que ser minimizado p_{10} .

VI.3.2.4. <u>D) Maximizar a utilização da mão-de-obra</u>

A expressão matemática deste objetivo é:

$$\sum_{i=1}^{N} w_i x_i + \sum_{j=1}^{A} wu_j y_j \geq MO$$

onde:

w_i, wu_j - necessidade de mão-de-obra por unidade de capacidade instalada, homem/T

MO - nível disponível de mão-de-obra, homens

Logo o objetivo será o seguinte:

$$w_1 x_1 + w_2 x_2 + w_3 x_3 + w_4 x_4 + w_5 x_5 + w_6 x_6 +$$
$$+ w_7 x_7 + wu_1 y_1 + wu_2 y_2 + n_{11} - p_{11} = MO$$

A variável de desvio a ser minimizada será n_{11} .

VI.3.2.5. E) Maximizar o excedente exportável dos produtos elaborados

A expressão matemática correspondente a estes objetivos será:

$$a_i \; x_i - d_i \geq VE_i \qquad i = 1,2,\ldots, N$$

onde:

VE_i - volume exportável do produto i , Toneladas.

Os objetivos em termos de PLOM serão:

$$a_1 \; x_1 - d_1 + n_{12} - p_{12} = VE_1$$
$$a_2 \; x_2 - d_2 + n_{13} - p_{13} = VE_2$$
$$a_3 \; x_3 - d_3 + n_{14} - p_{14} = VE_3$$
$$a_4 \; x_4 - d_4 + n_{15} - p_{15} = VE_4$$
$$a_5 \; x_5 - d_5 + n_{16} - p_{16} = VE_5$$
$$a_6 \; x_6 - d_6 + n_{17} - p_{17} = VE_6$$
$$a_7 \; x_7 - d_7 + n_{18} - p_{18} = VE_7$$

Os demais que serão minimizados são:

n_{12} , n_{13} , ..., n_{18} .

VI.3.2.6. F) Minimizar o volume de matéria prima utilizada

A expressão matemática correspondente a este objetivo é a seguinte:

$$PR - \sum_{i=1}^{N} b_i \; x_i - \sum_{j=1}^{A} s_j \; y_j \geq EGN$$

onde:

EGN - volume disponível de gás para outras utilizações, T

O objetivo para PLOM será:

$$PR - (b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_5 + b_6 x_6 + b_7 x_7) - (S_1 y_1 + S_2 y_2) + n_{19} - p_{19} = EGN$$

Neste caso tem-se que minimizar o desvio n_{19} .

VI.3.2.7. G) Limitar-se ao orçamento de investimentos

A expressão matemática do objetivo é:

$$\sum_{i=1}^{N} g_i x_i + \sum_{j=1}^{A} gu_j y_j \leq OI$$

onde:

g_i, gu_j - investimentos unitários, US$/T

OI - nível disponível de recursos financeiros, US$

O correspondente objetivo para PLOM será:

$$g_1 x_1 + g_2 x_2 + g_3 x_3 + g_4 x_4 + g_5 x_5 + g_6 x_6 + g_7 x_7 + gu_1 y_1 + gu_2 y_2 + n_{20} - p_{20} = OI$$

O desvio que terá que ser minimizado é p_{20} .

VI.3.3. Ordenação dos Objetivos

VI.3.3.1. Objetivos Absolutos

Em termos do modelo básico do operador de decisão, propõe-se a seguinte escolha de objetivos absolutos: Devido à estrita restrição referente ao fornecimento de gás natural o objetivo C) : "Não ultrapassar a quantidade disponível de gás", será considerado como absoluto. Logo, p_{11} terá que ser igual a zero.

Igualmente, o conjunto de objetivos agrupados em A) : "Satisfazer às demandas dos produtos", será tomado como objetivo absoluto pelas seguintes razões:

- O volume de investimento é bastante grande e não se justifica uma penetração sòmente parcial no mercado destes produtos.
- O fim de todo projeto industrial é satisfazer demandas e, se for possível, às demandas totais.

VI.3.3.2. Objetivos não absolutos

Neste caso, para ordenar os objetivos não absolutos, utiliza-se o método das comparações sucessivas (15).

A essência deste método consiste em comparar dois objetivos de cada vez. O objetivo de maior prioridade será aquele que apareça mais vezes no lado esquerdo das comparações.

O número total de comparações é igual a $C_m^2 = m! \,/\, 2!\,(m-2)!$ onde m - é o número de objetivos. Adota-se a seguinte simbologia $A \geq B$ equivale a dizer "O objetivo A é mais importante do que o objetivo B".

Depois de que se tem identificados os objetivos em função de sua importância relativa, procede-se ao agrupamento dos objetivos nos diferentes níveis de prioridade. Neste caso, deve-se ter especial atenção em agrupar no mesmo nível somente objetivos comensuráveis.

Finalmente, somente se for necessário, atribuem-se pesos aos objetivos dentro de cada nível de prioridade. Estes pesos são números reais positivos, que refletem a importância particular que pode ter a minimização de uma determinada variável de desvio no nível. Com a ajuda dos pesos, pode-se transmitir a menor ou maior importância de um objetivo dentro do respectivo nível de prioridade.

Numa análise preliminar, os objetivos não absolutos foram ordenados da seguinte forma:

$B \leq D$	$D \leq E$	$E \geq G$
$B \leq E$	$D \leq F$	$F \geq G$
$B \leq F$	$D \geq G$	
$B \leq G$	$E \leq F$	

Reordenando, tem-se:

$F \geq B$	$F \geq B$	$D \geq B$	$G \geq B$
$F \geq D$	$F \geq D$	$D \geq G$	
$F \geq E$	$F \geq G$		
$F \geq G$			

Então, o ordenamento básico será:

$F \geq E \geq D \geq G \geq B$

ou seja:

"minimizar o volume de matéria prima utilizada" $\geq$ "maximizar o excedente exportável de produtos" $\geq$ "maximizar a utilização da mão-de-obra" $\geq$ "limitar-se ao orçamento de investimentos" $\geq$ "satisfazer outras aplicações do gás natural".

VI.3.4. Agrupamento dos Objetivos em Níveis de Prioridade

Os objetivos absolutos dos tipos A e C estarão, logicamente, no nível de prioridade 1.

Na prioridade 2, considera-se somente o objetivo F. No nível de prioridade 3 analisa-se o objetivo E e, finalmente, nas prioridades 4,5 e 6, tem-se os objetivos D,G e B, respectivamente.

VI.3.5. Modelo Básico

O seguinte modelo é denominado básico pois, a partir da sua estrutura inicial, foram realizados testes de sensibilidade para analisar as possíveis situações futuras no desenvolvimento da indústria do metano no Equador.

Função de Execução

$$\min \bar{a} = \{(n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 + n_6 + n_7 + p_{11}),\ (n_{19}),\ (n_{12} + n_{13} + n_{14} + n_{15} + n_{16} + n_{17} + n_{18}),\ (n_{11}),\ (p_{20}),\ (n_8 + n_9)\}$$

Objetivos:

$$a_i\, x_i + n_i - p_i = d_i \qquad (i = 1,2,\ldots,7)$$

$$r_p\, y_p + n_e - p_e = ds_p \qquad (p = 1,2\ ;\ e = 8,9)$$

$$\sum_{i=1}^{7} b_i\, x_i + \sum_{j=1}^{2} s_j\, y_j + n_{10} - p_{10} = PR$$

$$\sum_{i=1}^{7} w_i \; x_i + \sum_{j=1}^{2} wu_j \; y_j + n_{11} - p_{11} = MO$$

$$a_i \; x_i - d_i + n_k - p_k = VE_i \qquad (i = 1,\ldots,7;\; k = 12,\ldots 18)$$

$$PR - \left[\sum_{i=1}^{7} b_i \; x_i + \sum_{j=1}^{2} s_j \; y_j\right] + n_{19} - p_{19} = ENG$$

$$\sum_{i=1}^{7} g_i \; x_i + \sum_{j=1}^{2} gu_j \; y_j + n_{20} - p_{20} = OI$$

$$\overline{x},\; \overline{y},\; \overline{n},\; \overline{p} \geq 0$$

CAPÍTULO VII

RESULTADOS E RECOMENDAÇÕES

VII.1. Introdução

São apresentados neste Capítulo, os possíveis cenários para a indústria do metano no Equador e também diferentes ordenações das prioridades para o cumprimento dos objetivos propostos. Em seguida, analisam-se os estudos de pós-otimização realizados sobre o modelo básico do operador de decisão. Finalmente, propõe-se algumas idéias úteis para a escolha final das capacidades industriais.

VII.2. Cenários futuros

Os cenários considerados neste estudo estão formados, basicamente, pelos seguintes parâmetros:

- Produção anual de gás natural;
- Demandas dos diferentes produtos para o período 1986-1995;
- Porcentagem da produção destinada para a exportação (exceto amônia e uréia);
- Disponibilidade de gás natural para siderurgia e para geração de energia elétrica.

Deve-se notar que em todos os cenários propostos, considera-se que as necessidades diárias de uréia e amônia são de 1500 TMD e 1000 TMD respectivamente, o que corresponde às capacidades já definidas destas plantas.

VII.2.1. Cenário otimista

Neste caso, são considerados os seguintes parâmetros:

- A maior expectativa de produção de gás natural: 120 MMPCD (milhões de pés cúbicos/dia);
- As demandas internas mais otimistas (ver Anexo C);
- 30% da produção são destinados à exportação;
- 15 MMPCD e 50MMPCD de gás são utilizados diariamente em siderurgia e geração de energia elétrica.

VII.2.2. Cenário médio

Este cenário considera que:

- A produção de gás será de 50MMPCD;
- As demandas de produtos no mercado interno correspondem aos valores médios (Ver Anexo C);
- Exporta-se 15% do volume produzido;
- Destinam-se para siderurgia, 15 MMPCD.

VII.2.3. Cenário pessimista

Os parâmetros considerados neste cenário são os seguintes:

- Volume produzido de gás: 45 MMPCD;
- Os valores das demandas internas são os menores disponíveis (ver Anexo C);
- Considera-se a possibilidade de exportar somente uréia e amônia.

VII.3. Variações no Modelo Básico e nas Ordenações das Prioridades

Em face à disponibilidade de dados das produções industriais consideradas inicialmente foi realizada uma simplificação do modelo básico (VI.3.5), considerando-se somente os seguintes objetivos:

A - satisfazer as demandas dos produtos industrializados a partir do gás natural.

C - Não ultrapassar a quantidade disponível de gás.

E - Maximizar os excedentes exportáveis dos produtos elaborados.

F - Minimizar o volume da matéria prima utilizada.

No que diz respeito às produções, não serão consideradas: o cloreto de metila e o tetracloreto de carbono, ficando unicamente como produto chave o clorofórmio. Isto pode ser feito, pelo fato de que esses três produtos são elaborados numa mesma planta industrial, em proporções definidas, e de acordo com a estrutura da demanda interna destes produtos, a satisfação da demanda do cloroformio permite a elaboração de quantidades suficientes, para o mercado equatoriano, de tetracloreto de carbono e cloreto de metila.

Em relação às possíveis ordenações das prioridades, foram escolhidos as seguintes:

Ordenação 1

A,C $\geq$ F $\geq$ E

Ordenação 2

A $\geq$ F $\geq$ E $\geq$ C

Ordenação 3

C $\geq$ E $\geq$ F $\geq$ A

Ordenação 4

E $\geq$ A $\geq$ C $\geq$ F

VII.4. Estudos de pós-otimização

Os ditos estudos, tiveram duas finalidades específicas:

- Analisar as diferentes ordenações das prioridades em termos dos cenários considerados.
- Estudar o efeito das mudanças nas ordenações das prioridades, dentro de um mesmo cenário.

Com esta finalidade, foram realizados os testes correspondentes, utilizando o sistema PLOM (Ver Anexo D), mudando os lados direitos dos objetivos e as respectivas ordenações das prioridades.

VII.4.1. Análise das Diferentes Ordenações das Prioridades em Termos dos Cenários Considerados

Para realizar esta análise, foi necessário estabelecer as capacidades das produções industriais consideradas, em cada um dos anos do período 1986-1995, variando as ordenações das prioridades (ver Anexo C).

Em muitos casos, obteve-se algumas soluções alternativas, pelo que foi necessário adotar um critério específico para escolher entre as soluções com o mesmo vetor $\overline{a}^*$. O critério utilizado foi o seguinte:

"Entre as soluções alternativas, será escolhida aquela que tenha o maior valor do desvio positivo correspondente ao objetivo: Minimizar o volume de matéria prima utilizada".

Desta forma, assegura-se uma maior disponibilidade de gás natural para outros usos.

VII.4.1.1. Ordenação 1

P1 ("Satisfazer as demandas dos produtos industrializados a partir do gás natural" e "não ultrapassar a quantidade disponível de gás) $\geq$ P2 ("Minimizar o volume de matéria prima utilizada") $\geq$ P3 ("Maximizar os excedentes exportáveis dos produtos industrializados").

Cenário Otimista

Ao longo do período analisado, estabelece-se que:

- As capacidades das produções industriais (exceto amônia e uréia), correspondem aos valores das demandas internas mais as quantidades previstas para exportação.
- No caso da amônia e da uréia, as capacidades correspondem às já definidas de 1000 TMD e 1500 TMD, respectivamente.
- Todos os anos, dispõe-se de gás natural excedente em quantidades logicamente decrescentes, devido ao aumento das demandas dos produtos (11,8 MMPCD em 1986 e 9,8 MMPCD em 1995).
- Os diferentes níveis de prioridade se cumprem totalmente, ou seja, em todos os anos obteve-se vetores $\overline{a}^* = \overline{0}$.

Cenário médio

Segundo este cenário, para 1986-1995 ter-se-iam as seguintes situações:

- As capacidades das plantas de metanol, acetileno e clorofórmio são definidas somente pelos valores das demandas internas. Conseqüentemente, não existem excedentes disponíveis destes produtos para exportação.
- A planta de uréia tem uma capacidade de 1500 TMD. Porém, a unidade de amônia não tem o mesmo comportamento, pois sua capacidade alcança a 660 TMD em 1986 e decresce durante o período, chegando a 627 TMD em 1995.

Neste caso, sacrifica-se parcialmente a produção de amônia a fim de manter a produção pré-estabelecida de uréia e satisfazer a demanda interna dos outros produtos.

- Além dos 15 MMPCD para siderurgia, ao longo do período considerado, não existe gás disponível para outros usos.
- Devido ao não cumprimento dos objetivos que procuram maximizar o excedente exportável, o último componente do vetor $\bar{a}^*$ aparece todos os anos com valores positivos.

Cenário pessimista

Para o período considerado, obtiveram-se os seguintes resultados:

- As capacidades das plantas de metanol, acetileno e clorofórmio correspondem aos valores da demanda interna.

- Consegue-se que as capacidades das plantas de uréia e amônia sejam as pré-estabelecidas de 1500 TMD e 1000 TMD respectivamente.

- Existe uma relativamente pequena quantidade disponível de gás para outros usos. Estas quantidades são decrescentes ano a ano (2,6 MMPCD para 1986 e 1,9 MMPCD para 1995), devido ao aumento das demandas dos produtos e das capacidades industriais.

VII.4.1.2. Ordenação 2

P1 ("Satisfazer as demandas dos produtos industrializados a partir do gás natural") $\geq$ P2 ("Minimizar o volume de matéria prima utilizada") $\geq$ P3 ("Maximizar o excedente exportável dos produtos industrializados") $\geq$ P4 ("Não ultrapassar a quantidade disponível de gás natural").

Critério otimista

Os resultados segundo este critério, são:

- As capacidades dos produtos (exceto uréia e amônia) são definidas pelas demandas internas, mais as quantidades destinadas para a exportação.

- Uréia e amônia são produzidas nos volumes definidos (1500 TMD e 1000 TMD).

- Todos os anos existe gás excedente, além das quantidades destinadas para a geração de energia elétrica e siderurgia.

- São cumpridos totalmente todos os níveis de prioridade.

Cenário médio

Neste caso, foram obtidos os seguintes resultados:

- As capacidades de metanol, acetileno e cloroformio, correspondem cada ano à demanda interna, pelo que não existe a possibilidade de sua exportação.
- A capacidade da unidade de uréia se mantém no nível das 1500 TMD, mas a planta de amônia apresenta capacidades descrecentes (660 TMD para 1986 e 627 em 1995).
- Além dos 15 MMPCD de gás destinados para siderurgia, não existe mais gás disponível.
- Dos 4 níveis de prioridades pré-estabelecidos, são cumpridos totalmente, ao longo do período, P_1, P_2 e P_4. O nível P_3 é cumprido só parcialmente, pois não existe excedente exportável de metanol, acetileno e clorofórmio.

Cenário Pessimista

Para este cenário, foram obtidos os seguintes resultados ao longo do período 1986-1995:

- As capacidades industriais do metanol, acetileno e clorofórmio correspondem ano a ano às demandas internas destes produtos.
- Uréia e amônia são produzidos nas capacidades oficialmente estabelecidas.
- Cada ano, existe uma quantidade pequena (2,6 MMPCD em 1986 e 1,9 MMPCD em 1995) e decrescente de gás disponível para outros usos.

- Todos os anos, são totalmente cumpridos todos os níveis de prioridade ($\overline{a}^* = \overline{0}$).

VII.4.1.3. Ordenação 3

P1("Não ultrapassar a quantidade disponível de gás") ≥ P2 ("Maximizar os excedentes exportáveis dos produtos elaborados") ≥ P3 ("Minimizar o volume de matéria utilizada") ≥ P4("Satisfazer as demandas dos produtos industrializados a partir do gás natural").

Cenário otimista

Os resultados neste caso são os seguintes:

- As capacidades dos produtos: metanol, acetileno e clorofórmio são definidas ano a ano pelos valores acumulados das demandas internas e as quantidades destinadas à exportação.
- As capacidades das plantas de uréia e amônia são de 1500 TMD e 1000 TMD respectivamente.
- Ao longo do período, existe gás disponível para outras utilizações, além das já consideradas no cenário.
- Ano a ano, são cumpridos totalmente todos os níveis de prioridade.

Cenário médio

Ao longo do período (1986-1995), segundo este cenário, obter-se-iam os seguintes resultados:

- As capacidades das plantas de metanol, acetileno e clorofórmio são iguais cada ano, aos valores correspondentes ao somatório das demandas internas e as quantidades destinadas para exportação.

- Durante o período analisado, as capacidades das plantas de uréia e amônia correspondem às pré-estabelecidas de 1500 TMD e 1000 TMD, respectivamente.

- Para satisfazer às necessidades de exportação, são retiradas ano a ano as correspondentes quantidades do gás destinado para siderurgia. Estes volumes são numericamente iguais aos valores dos desvios negativos obtidos para o objetivo do nível de prioridade P3 : "Minimizar o volume da matéria prima utilizada", que tem como lado direito as quantidades de gás natural destinado para outros usos.

Cenário pessimista

Segundo os parâmetros considerados neste cenário, ter-se-iam as seguintes situações:

- As capacidades das plantas de metanol, acetileno e clorofórmio correspondem, ao longo do período considerado, aos valores das demandas internas destes produtos.

- Uréia e amônia são produzidas em plantas de 1500 MTD e 1000 TMD, respectivamente.

- Cada ano, fica disponível uma quantidade pequena de gás natural, que decresce ao longo do período (2,6 MMPCD em 1986 e 1,9 MMPCD em 1995).

- São cumpridos totalmente todos os níveis de prioridade propostos.

VII.4.1.4. Ordenação 4

P1 ("Maximizar o excedente exportável dos produtos elaborados") $\geq$ P2 ("Satisfazer as demandas dos produtos industrializados a partir do gás natural") $\geq$ P4 ("Minimizar o volume de matéria prima utilizada").

Cenário otimista

Segundo este cenário, no período 1986-1995, teriam-se os seguintes resultados:

- As capacidades das plantas dos produtos (exceto uréia e amônia) correspondem cada ano aos valores acumulados das demandas internas, mais as quantidades destinadas para a exportação.
- Uréia e amônia são produzidas nas capacidades pré-estabelecidas de 1500 TMD e 1000 TMD respectivamente.
- Cada ano, existe uma quantidade excedente significativa de gás natural, embora seja decrescente, devido ao acréscimo das capacidades industriais. Estas quantidades excedentes, são as mesmas calculadas para os cenários otimistas anteriores e poderiam ser exportadas, uma vez que têm sido satisfeitas as necessidades consideradas no cenário.
- Ao longo dos anos 1986-1995, são cumpridos totalmente todos os níveis de prioridade analisados.

Cenário médio

Os resultados, neste caso, são os seguintes:

- As plantas industriais de metanol, acetileno e clorofórmio têm capacidades definidas pelas demandas internas e as quantidades destinadas para a exportação.
- Uréia e amonia são produzidos em unidades de 1500 TMD e 1000 TMD.
- Como no caso do cenário médio do ordenamento anterior, a quantidade de gás natural destinado para siderurgia é reduzida com a finalidade de satisfazer o excedente exportável dos produtos (prioridade um).
- Somente o nível de prioridade correspondente ao objetivo de "minimizar a matéria prima utilizada" (P4), não é cumprido totalmente.

Cenário pessimista

Para este cenário, os resultados foram:

- As capacidades das plantas de metanol acetileno e clorofórmio correspondem cada ano aos valores da demanta interna.
- Uréia e amônia são produzidas em unidades de 1500 TMD e 1000 TMD.
- Cada ano ficam disponíveis quantidades de gás natural que poderiam ser destinadas para outras utilizações.
- São cumpridos totalmente todos os níveis de prioridade em cada ano do período considerado.

Em função dos resultados apresentados, pode-se fazer as seguintes observações:

As mudanças de cenário para uma mesma ordenação das prioridades, determina variações em alguns resultados, por exemplo nas capacidades das unidades de metanol, amônia, acetileno e clorofórmio; nas quantidades disponíveis de gás natural para outras utilizações e no cumprimento das prioridades (vetor $\bar{a}^*$). Porém, existem outros resultados, como a capacidade da unidade de uréia, que não experimentam nenhuma mudança com a variação dos cenários numa mesma ordenação.

Em particular, a invariabilidade da capacidade na planta de uréia, é devida ao fato de que no objetivo que define essa capacidade, tem-se no lado direito um valor muito grande em comparação com os demais lados direitos dos outros produtos. Então, este objetivo deve ser cumprido prioritariamente para evitar o aparecimento dos correspondentes desvios (que seriam também grandes) na função linear a ser minimizada.

Um resumo geral das informações consideradas mais importantes obtidas nesta análise apresentam-se no (Quadro VII.1).

VII.4.2. Influência das Diferentes Ordenações num Mesmo Cenário

Para explicar a influência das ordenações num mesmo cenário, será analisados dois casos:

a) Num determinado cenário todos os níveis de prioridades têm sido totalmente satisfeitos ou seja, o vetor $\bar{a}^* = 0$. Neste caso, a ordenação das prioridades não tem nenhuma influência, devido ao fato de que todas as funções lineares da função de execução foram minimizadas até o seu nível mínimo (zero). Então, não tem importância a ordem de minimiza-

Quadro VII.1. Resumo das informações da análise das ordenações das prioridades em termos dos cenários considerados no período 1986-1995.

Ordenações e cenários	Definição das Capacidades das plantas(*)	Capacidade da planta de uréia, TMD	Capacidade da planta de amônia, TMD	Disponibilidade de Gás para outros usos	Se cumprem todos os níveis de prioridades?
Ordenação 1 (A,C ≥ F ≥ E)					
Cenário Otimista	DI + Exp	1500	1000	sim	sim
Cenário Médio	DI	1500	<1000	não	não
Cenário Pessimista	DI	1500	1000	sim	sim
Ordenação 2 (A ≥ F ≥ E ≥ C)					
Cenário Otimista	DI + Exp	1500	1000	sim	sim
Cenário Médio	DI	1500	<1000	não	não
Cenário Pessimista	DI	1500	1000	sim	sim
Ordenação 3 (C ≥ E ≥ F ≥ A)					
Cenário Otimista	DI + Exp	1500	1000	sim	sim
Cenário Médio	DI + Exp	1500	1000	não	não
Cenário Pessimista	DI	1500	1000	sim	sim
Ordenação 4 (E ≥ A ≥ C ≥ F)					
Cenário Otimista	DI + Exp	1500	1000	sim	sim
Cenário Médio	DI + Exp	1500	1000	não	não
Cenário Pessimista	DI	1500	1000	sim	sim

OBS.: DI = Demandas internas

Exp= Quantidades destinadas para exportação

(*) Plantas de Metanol, acetileno e clorofórmio

(Os resultados numéricos correspondentes podem ser encontrados no Anexo C).

ção dos desvios correspondentes.

b) Nos vetores $\bar{a}^*$ existem componentes com valores positivos. Neste caso, qualquer alteração na ordenação das prioridades, determina mudanças nos valores das variáveis de decisão (capacidades das plantas) ou na expressão final do vetor de execução ($\bar{a}^*$).

Os casos apresentados sobre a influência da mudança das ordenações das prioridades, num mesmo cenário, podem ser comprovados analisando o Quadro resumo (VII.1).

VII.5. Escolha das Capacidades Industriais a serem Construídas

É um fato conhecido, que na escolha final das capacidades das plantas industriais, intervêm muitos fatores técnicos, econômicos e fatores de outra natureza como tamanhos de plantas disponíveis no mercado, facilidades de financiamento, etc.

Porém, como este trabalho procura facilitar a tomada de decisões dos responsáveis pelo futuro desenvolvimento da indústria do gás natural equatoriano, propõe-se a seguinte seqüência das situações mais importantes que deveriam ser levadas em conta para definir as futuras capacidades das plantas industriais:

- Inicialmente deve-se escolher entre os cenários propostos, qual será considerado como "o mais provável" para o período considerado.
- Em segundo lugar, deve-se definir qual será a ordenação oficial das prioridades no cumprimento dos objetivos.

- Em seguida, é necessário definir capacidades mínimas para cada planta, em função de critérios econômicos, como a capacidade correspondente ao ponto de equilíbrio, e/ou critérios tecnológicos, como a capacidade mínima disponível.

Feito isto, para cada ano haveria um conjunto de capacidades, definido como o "melhor" no contexto do modelo de Programação Linear com Objetivos Múltiplos, do cenário e da ordenação das prioridades consideradas. Haveria também um nível mínimo inferior das capacidades para as quais o empreendimento ainda seria econômico e/ou técnicamente viável. Então, a escolha das capacidades far-se-ia tomando como base as capacidades mínimas viáveis acrescentando-se com fatores estratégicos como possibilidades de penetração nos mercados externos, porcentagem tolerada de capacidades ociosas, fatores de segurança etc.,para, assim, alcançar um dos conjuntos de capacidades definidas pelo correspondente algoritmo da PLOM.

CAPÍTULO VIII

CONCLUSÕES

Os resultados e as experiências obtidas no desenvolvimento deste trabalho, permitem a enumeração das seguintes conclusões:

a) Foi demonstrada na prática, a aplicabilidade de um modelo recursivo de planejamento, que até hoje somente havia sido utilizado para indústrias complexas (Petroquímica e Metalúrgica), para simular situações futuras no desenvolvimento de uma indústria particular baseada fundamentalmente numa matéria prima: o gás natural.

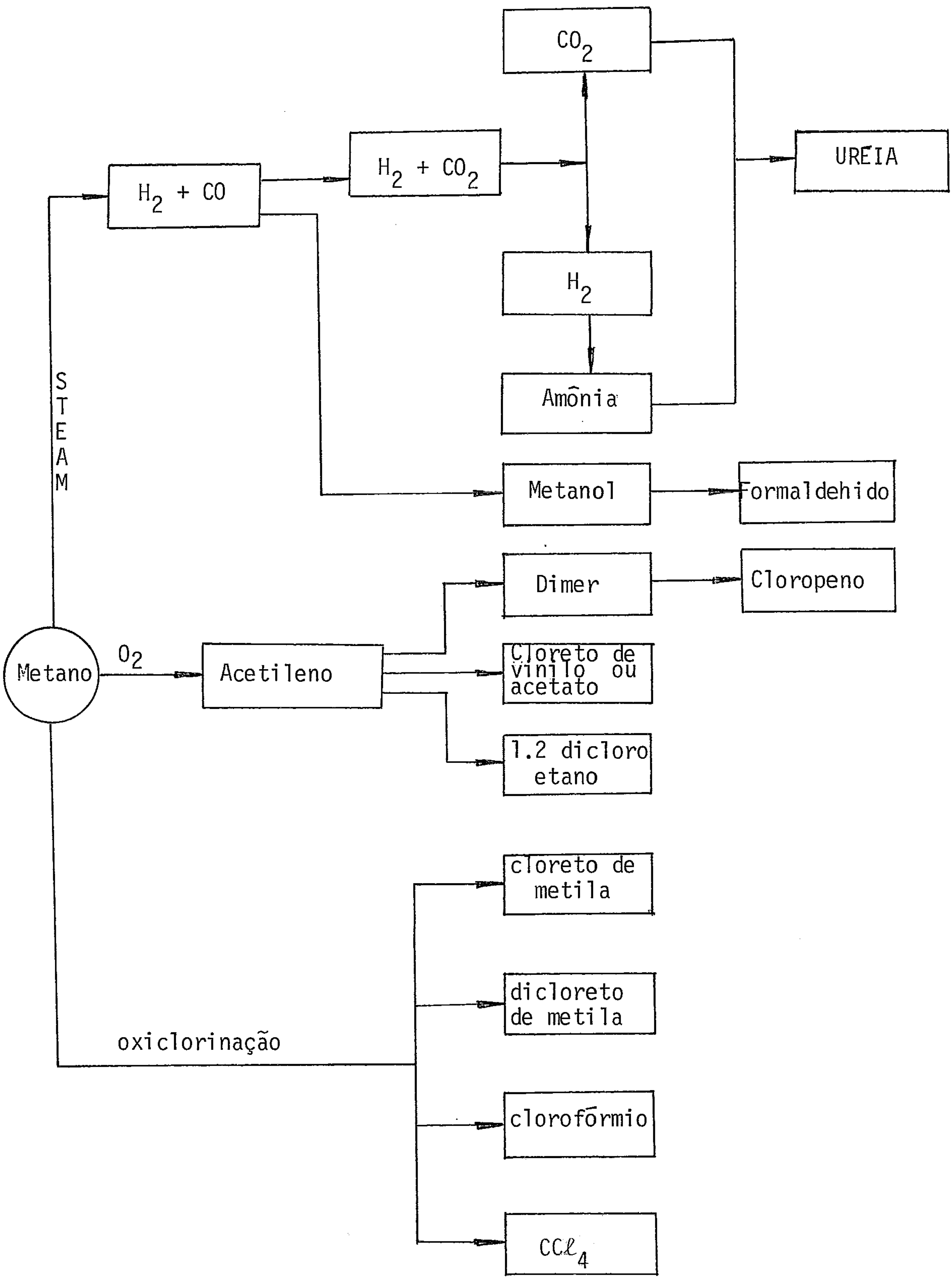
b) A idéia fundamental de utilizar um modelo de Programação Linear com Objetivos Múltiplos para descrever o operador de decisão do modelo geral de planejamento do desenvolvimento industrial, mostrou-se viável. Além disso, apresenta-se como uma interessante perspectiva para a análise e resolução deste tipo de problema que, geralmente exige o cumprimento simultâneo de vários objetivos, embora conflitantes, na maioria das vezes.

c) A utilização de cenários, como um recurso para prover de dados ao operador de decisão, demonstrou ser de uma grande utilidade, além da relativa facilidade para sua definição.

d) O presente trabalho apresenta uma alternativa válida para o planejamento harmônico e integral do desenvolvimento da indústria do metano no Equador.

ANEXO A

PROPOSTA INDUSTRIAL



ANEXO B

REVISÃO TEÓRICA DA PROGRAMAÇÃO LINEAR COM OBJETIVOS MÚLTIPLOS E NÍVEIS DE PRIORIDADES PRÉ-ESTABELECIDAS

B.1 . Introdução

Os problemas do mundo real envolvem sistemas não determinísticos, nos quais existem uma variedade de objetivos não comensuráveis e conflitantes. Frente a esta realidade, a Programação com Objetivos Múltiplos, sem tentar ser a panacéia, apresenta um importante avanço na modelagem e na análise dos problemas com vários objetivos. Além disso, o modelo geral da Programação com Objetivos Múltiplos apresenta uma estrutura a partir da qual o problema tradicional com um único objetivo (tanto linear como não linear) pode ser analisado somente como um caso particular deste tipo de programação (10).

Estas são as razões pelas quais, o interesse por este tipo de programação tem aumentado significativamente nos últimos anos, assim como o número de suas aplicações práticas.

Como resultado das pesquisas desenvolvidas neste campo, dispõe-se atualmente de modelos e algoritmos de resolução para os seguintes tipos de Programação com Objetivos Múltiplos:

- Programação Linear com Objetivos Múltiplos;
- Programação não Linear com Objetivos Múltiplos;
- Programação Inteira com Objetivos Múltiplos;
- Programação Linear zero-um com Objetivos Múltiplos.

B.2. Programação Linear com Objetivos Múltiplos (PLOM)

Neste caso, faz-se referência somente ao método da PLOM, já que é o tipo de programação que é utilizada para o planejamento a curto prazo no modelo recursivo de desenvolvimento industrial proposto.

Inicialmente, é necessário mencionar que a PLOM tem duas convenções fundamentais:

a) O responsável pela tomada de decisões pode estabelecer livremente uma ordenação das prioridades para o cumprimento dos objetivos.

b) Todas as variáveis de decisão são não negativas.

A seguir é apresentada uma seqüência de etapas a serem cumpridas para a construção de um modelo de PLOM, e são definidos alguns conceitos importantes para este tipo de programação.

B.2.1. Definição das variáveis de decisão

A definição das variáveis de decisão constitui a etapa fundamental no desenvolvimento de um modelo de PLOM.

Estas variáveis correspondem àqueles fatores sobre os quais temos controle. Por isso são chamadas, também, de variáveis de controle.

Denotaremos as variáveis de decisão com a letra "x". Então, x_j será a j-ésima variável de decisão. Por sua vez, x_j^* corresponderá ao valor ótimo da j-ésima variável de decisão.

B.2.2. Formulação das funções objetivo

Neste tipo de modelo, a formulação dos objetivos é determinada pelas seguintes causas principais (11):

a) Metas do responsável pela tomada das decisões;

b) limitações na disponibilidade dos recursos;

c) outras restrições implícita ou explícitamente colocadas no momento da escolha das variáveis de decisão.

Como exemplo, apresenta-se a seguinte lista de objetivos relacionados com as causas anteriormente citadas (11):

a) Metas do executivo:

. Maximização do lucro;

. minimização do custo;

. minimização do tempo extra (overtime);

. maximização da utilização de mão-de-obra;

. maximização da utilização de processos automatizados;

. minimização das capacidades ociosas;

. minimização do risco;

. maximização das probabilidades de que um processo trabalhe dentro de determinados limites.

b) Limitação de recursos:

. limites na oferta de mão-de-obra;

. limites na disponibilidade de matérias primas;

. limites na disponibilidade de recursos.

c) Outras restrições:

. Não negatividade das variáveis de decisão;

. exigência de que uma ou mais variáveis de decisão sejam iguais ou maiores que um certo limite mínimo.

Depois de formular os objetivos, a fase seguinte consiste em tentar minimizar o número total de objetivos. Isto será possível se forem examinados os objetivos redundantes como, por exemplo, a maximização dos lucros e a minimização dos custos. Outra forma de minimizar o número de objetivos, é a eliminação daqueles de menor importância relativa.

Uma vez reduzido o número de objetivos ao mínimo possível ou desejável, formulam-se as respectivas expressões matemáticas dos objetivos sobreviventes.

Os diferentes objetivos, são designados com a letra "G".

Cada função objetivo deve ser expressa como uma função linear das variáveis de decisão:

$$G_i = f_i(x)$$

Onde, $f_i(x)$ é uma função das variáveis de decisão associada ao objetivo i. Toda função objetivo deve ter o seu lado direito, ou seja:

$$f_i(\overline{x}) \begin{array}{c} \geq \\ = \\ \leq \end{array} b_i$$

Onde, b_i é um valor que reflete o nível que $f_i(\overline{x})$ deve satisfazer, exceder ou ser menor. Além do mais, toda função obje tivo é incrementada em seu lado esquerdo com variáveis de desvio negativas e positivas (n_i e p_i, respectivamente). O valor de n_i para um determinado $\overline{x}$ reflete o desvio negativo com respeito a b_i, por sua vez, p_i reflete o desvio positivo referente ao mesmo valor de b_i. Conseqüentemente cada função objetivo terá a seguinte forma final:

$$f_i(\overline{x}) + n_i - p_i = b_i \qquad (i = 1,2,\ldots,m)$$

B.2.3. Objetivos absolutos

Se para um determinado objetivo, os desvios p_i ou n_i devem ser iguais a zero, para que a solução seja implementável, então, esse objetivo é chamado objetivo absoluto, ou seja, ele deve ser satisfeito, para que a solução seja aceita (11). A esses objetivos absolutos associa-se o primeiro nível de prioridade P_1. Em outras palavras, eles serão satisfeitos antes dos outros objetivos com menor nível de prioridade.

B.2.4. Designação dos objetivos por níveis de prioridade

Neste ponto, é necessário fazer uma rápida referência aos "níveis de prioridade pré-estabelecidos" que é um conceito básico dentro do enfoque da PLOM que estamos utilizando neste trabalho. Para o estabelecimento destes níveis de prioridade, parte-se da premissa de que o responsável pela tomada de decisão pode pré-estabelecer prioridades na resolução de um problema. Então, a prioridade designada como P1 é preferível a outra prioridade designada como P2, independentemente de qualquer multiplicador associado a P1 ou P2, e assim sucessivamente. Com relação à designação de objetivos por níveis de prioridade, como já foi descrito anteriormente, todos os objetivos absolutos são designados com nível de prioridade um (P1), com o qual se assegura que pelo menos eles serão satisfeitos completamente. Os objetivos não absolutos restantes são designados na prática aos respectivos níveis de prioridade como resultado de uma decisão tomada entre o executivo e o analista que desenvolve o modelo, ou utilizando métodos específicos para realizar esta designação (15).

É necessário notar que, dentro de um mesmo nível de prioridade, somente podem ser agrupados objetivos comensuráveis, ou seja, que estejam nas mesmas unidades.

B.2.5. <u>Formação da função de execução</u>

A fase final do desenvolvimento do modelo de PLOM é o estabelecimento da função de execução:

Consideremos uma função objetivo típica:

$$f_i(\overline{x}) + n_i - p_i = b_i$$

Podemos, então, ter valores de $\overline{x}$ tais que a função $f(\overline{x})$:

a) seja maior ou igual a b_i ;

b) seja menor ou igual a b_i ;

c) seja igual a b_i .

Estas três possibilidades podem ser alcançadas pela minimização de uma função linear das variáveis de desvio, como mostra o seguinte quadro:

Objetivo	Procedimento
a) maior ou igual a b_i	minimizar n_i
b) menor ou igual a b_i	minimizar p_i
c) igual a b_i	minimizar $n_i + p_i$

Então, a função (ou vetor) de execução resultante terá a seguinte forma:

$$\text{minimizar} \quad \bar{a} = \{P_1[g_1(\bar{n},\bar{p})],\ P_2[g_2(\bar{n},\bar{p}),\ \ldots\ldots,\ P_k[g_k(\bar{n},\bar{p})]\}$$

onde:

$g_k(\bar{n},\bar{p})$ - função linear das variáveis de desvio

P_k - prioridade associada com $g_k(\bar{n},\bar{p})$

$k \leq m$ - número de níveis de prioridade que pode ser menor ou igual ao número total de objetivos.

A dimensão do vetor $\bar{a}$, corresponde ao número (k) de níveis de prioridade pré-estabelecidos. Como sabemos que $\bar{a}$ é um vetor ordenado podemos suprimir os P_k. Então, a função de execução ficaria assim:

$$\text{minimizar} \quad \bar{a} = \{[g_1(\bar{n},\bar{p})],\ [g_2(\bar{n},\bar{p})],\ \ldots,\ [g_k(\bar{n},\bar{p})]\}$$

B.2.6. O modelo geral da PLOM

O modelo geral da Programação Linear com Objetivos Múltiplos e Níveis de Prioridade Pré-estabelecidos, tem a seguinte forma:

Procurar $\bar{x} = (x_1, x_2, \ldots, x_J)$ que minimize:

$$\bar{a} = \{[g_1(\bar{n},\bar{p})],\ [g_2(\bar{n},\bar{p})],\ \ldots,\ [g_k(\bar{n},\bar{p})]\}$$

tal que:

$$\sum_{j=1}^{J} c_{ij}\, x_j + n_i - p_i = b_i \qquad (i = 1,2,\ldots,m)$$

$$\bar{x},\ \bar{n},\ \bar{p} \geq \bar{0}$$

onde:

c_{ij} - coeficiente associado à variável j no objetivo j.

x_j - variável de decisão.

n_i, p_i - variáveis de desvio negativas e positivas.

$g_k(\bar{n},\bar{p})$ - função linear das variáveis de desvio no nível de prioridade k .

B.2.6. Definições

A seguir, apresentam-se algumas definições usuais em PLOM.

Solução viável

Qualquer conjunto não negativo de valores correspondentes às variáveis x_i, n_i e p_i , constitui uma solução viável.

Solução básica

Se (J + 2m) - m variáveis (x_i, n_i ou p_i) são iguais a zero e as m variáveis restantes têm valores definidos não-negativos, então a solução resultante é chamada básica. As m variádefinidas com valores não-negativos chamam-se variáveis básicas, e as variáveis restantes: não básicas.

Solução degenerada

Qualquer solução básica onde uma ou mais variáveis básicas sejam iguais a zero, é chamada de solução degenerada.

Solução implementável

Uma solução viável, na qual todos os objetivos absolutos são cumpridos totalmente, é chamado solução implementável.

Solução ótima

A solução $\bar{x}^*$ para um determinado modelo de PLOM é considerado ótima se, a esta solução, corresponde um vetor de execução $\bar{a}^*$ que é preferível a qualquer outro vetor $\bar{a}$ definido por outra solução viável $\bar{x}$.

Para se escolher o vetor $\bar{a}^*$, utiliza-se o critério do mínimo lexicográfico, segundo o qual o vetor $\bar{a}^*$ será preferível ao vetor $\bar{a}$ se a primeira componente diferente de zero do vetor $(\bar{a}^* - \bar{a})$ é negativa, com todos os elementos de $\bar{a}^*$ e $\bar{a}$ não negativos. Exemplo: $\bar{a}^* = (0,1,400)$ é preferível ao vetor $\bar{a} = (0,2,0)$.

ANEXO C
DADOS E RESULTADOS

C.1. Dados

C.1.1. Coeficientes técnicos

Correspondem à quantidade de metano (em toneladas) necessária para produzir uma tonelada de produto:

Amônia	0,45	(utilidades 0,14)
Uréia	0,26	
Metanol	0,65	
Acetileno	4,10	
Clorofórmio	0,51	

C.1.2. Demandas

As demandas otimistas, médias e pessimistas foram calculadas da seguinte maneira:

a) - As curvas correspondentes aos dados das importações dos produtos, foram suavizadas utilizando o método das médias móveis.

b) - Utilizando regressão linear, foram estabelecidos os coeficientes de correlação para as séries originais e para as suavizadas.

c) - A demanda otimista, foi estabelecida por extrapolação para o período 1986-1995 da série com melhor coeficiente de correlação.

A demanda média, foi calculada por extrapolação de uma série com coeficiente médio. Por sua vez a demanda pessimista foi calculada mediante a extrapolação da série com o menor coeficiente de correlação.

Para o caso específico das demandas otimistas da uréia e do metanol, foram utilizadas as estimativas da CEPE.

URÉIA

ANO	Demanda Otimista, TM/A	Demanda média, TM/A	Demanda pessimista TM,A
1986	136789	82960	81090
1987	148325	87510	85510
1988	159860	92060	89920
1989	171400	96600	94340
1990	182935	101150	98750
1991	194470	105700	103170
1992	206000	110250	107580
1993	217540	114800	111990
1994	229080	119350	116410
1995	240620	123900	120820

METANOL

ANO	Demanda Otimista, TM/A	Demanda média, TM/A	Demanda Pessimista TM/A
1986	10060	8390	7610
1987	11350	9010	8180
1988	12700	9620	8740
1989	14100	10230	9300
1990	15550	10850	9860
1991	17070	11460	10430
1992	18650	12080	10990
1993	20300	12690	11550
1994	22020	13300	12110
1995	23800	13920	12680

ACETILENO

ANO	Demanda Otimista TM/A	Demanda Média TM/A	Demanda Pessimista TM/A
1986	838	767	742
1987	879	802	775
1988	920	837	808
1989	960	873	841
1990	1002	908	874
1991	1043	943	907
1992	1083	979	940
1993	1124	1014	973
1984	1165	1050	1005
1985	1206	1085	1038

CLOROFORMIO

ANO	Demanda Otimista TM/A	Demanda Média TM/A	Demanda Pessimista TM/A
1986	110	97	95
1987	116	103	100
1988	123	108	105
1989	129	114	111
1990	136	119	116
1991	142	125	121
1992	149	130	126
1993	155	136	131
1994	162	141	136
1995	168	146	142

C.2. Resultados

Os resultados numéricos apresentados neste anexo,são analisados no capítulo VII. Todos os detalhes sobre os cenários e as ordenações das prioridades para o cumprimento dos objetivos, podem ser procurados no dito capítulo.

URÉIA

Cenário Otimista

Ano	Capacidades Industriais, TMA			
	ordenações das prioridades			
	1	2	3	4
1986	495000	495000	495000	495000
1987	495000	495000	495000	495000
1988	495000	495000	495000	495000
1989	495000	495000	495000	495000
1990	495000	495000	495000	495000
1991	495000	495000	495000	495000
1992	495000	495000	495000	495000
1993	495000	495000	495000	495000
1994	495000	495000	495000	495000
1995	495000	495000	495000	495000

Cenário Médio

Ano	Capacidades Industriais			
	ordenações das prioridades			
	1	2	3	4
1986	495000	495000	495000	495000
1987	495000	495000	495000	495000
1988	495000	495000	495000	495000
1989	495000	495000	495000	495000
1990	495000	495000	495000	495000
1991	495000	495000	495000	495000
1992	495000	495000	495000	495000
1993	495000	495000	495000	495000
1994	495000	495000	495000	495000
1995	495000	495000	495000	495000

Cenário Pessimista

Ano	Capacidades Industriais ordenações das prioridades			
	1	2	3	4
1986	495000	495000	495000	495000
1987	495000	495000	495000	495000
1988	495000	495000	495000	495000
1989	495000	495000	495000	495000
1990	495000	495000	495000	495000
1991	495000	495000	495000	495000
1992	495000	495000	495000	495000
1993	495000	495000	495000	495000
1994	495000	495000	495000	495000
1995	495000	495000	495000	495000

AMÔNIA

Cenário Otimista

Ano	Capacidades Industriais TMA ordenações das prioridades 1	2	3	4
1986	330000	330000	330000	330000
1987	330000	330000	330000	330000
1988	330000	330000	330000	330000
1989	330000	330000	330000	330000
1990	330000	330000	330000	330000
1991	330000	330000	330000	330000
1992	330000	330000	330000	330000
1993	330000	330000	330000	330000
1994	330000	330000	330000	330000
1995	330000	330000	330000	330000

Cenário Médio

Ano	Capacidades Industriais TMA ordenações das prioridades 1	2	3	4
1986	217723	217723	330000	330000
1987	216501	216501	330000	330000
1988	215296	215296	330000	330000
1989	214080	314080	330000	330000
1990	212860	212860	330000	330000
1991	211653	211653	330000	330000
1992	210424	210424	330000	330000
1993	209217	209217	330000	330000
1994	208002	208002	330000	330000
1995	206782	206782	330000	330000

Cenário Pessimista

Ano	Capacidads Industriais TMA			
	ordenações das prioridades			
	1	2	3	4
1986	330000	330000	330000	330000
1987	330000	330000	330000	330000
1988	330000	330000	330000	330000
1989	330000	330000	330000	330000
1990	330000	330000	330000	330000
1991	330000	330000	330000	330000
1992	330000	330000	330000	330000
1993	330000	330000	330000	330000
1994	330000	330000	330000	330000
1995	330000	330000	330000	330000

METANOL

Cenário Otimista

Ano	Capacidades Industriais TMA			
	ordenações das prioridades			
	1	2	3	4
1986	13080	13080	13080	13080
1987	14750	14750	14750	14750
1988	16510	16510	16510	16510
1989	18330	18330	18330	18330
1990	20220	20220	20220	20220
1991	22200	22200	22200	22200
1992	24240	24240	24240	24240
1993	26390	26390	26390	26390
1994	28630	28630	28630	28630
1995	30940	30940	30940	30940

Cenário Médio

Ano	Capacidades Industriais TMA			
	ordenações das prioridades			
	1	2	3	4
1986	8390	8390	9650	9650
1987	9010	9010	10400	10400
1988	9620	9620	11060	11060
1989	10230	10230	11760	11760
1990	10850	10850	12480	12480
1991	11460	11460	13180	13180
1992	12080	12080	13890	13890
1993	12690	12690	14590	14590
1994	13300	13300	15290	15290
1995	13920	13920	16000	16000

Cenário Pessimista

Ano	Capacidades Industriais TMA			
	ordenações das prioridades			
	1	2	3	4
1986	7610	7610	7610	7610
1987	8180	8180	8180	8180
1988	8740	8740	8740	8740
1989	9300	9300	9300	9300
1990	9860	9860	9860	9860
1991	10430	10430	10430	10430
1992	10990	10990	10990	10990
1993	11550	11550	11550	11550
1994	12110	12110	12110	12110
1995	12680	12680	12680	12680

ACETILENO

Cenário Otimista

Ano	Capacidades Industriais TMA			
	ordenações das prioridades			
	1	2	3	4
1986	1090	1090	1090	1090
1987	1140	1190	1140	1140
1988	1190	1190	1190	1190
1989	1250	1250	1250	1250
1990	1300	1300	1300	1300
1991	1360	1360	1360	1360
1992	1400	1400	1400	1400
1993	1460	1460	1460	1460
1994	1510	1510	1510	1510
1995	1570	1570	1570	1570

Cenário Médio

Ano	Capacidades Industriais TMA			
	ordenações das prioridades			
	1	2	3	4
1986	767	767	880	880
1987	802	802	920	920
1988	837	837	960	960
1989	873	873	1000	1000
1990	908	908	1040	1040
1991	943	943	1090	1090
1992	979	979	1130	1130
1993	1014	1014	1170	1170
1994	1050	1050	1207	1207
1995	1085	1085	1250	1250

Cenário Pessimista

Ano	Capacidades Industriais ordenações das prioridades			
	1	2	3	4
1986	742	742	742	742
1987	775	775	775	775
1988	808	808	808	808
1989	841	841	841	841
1990	874	874	874	874
1991	907	907	907	907
1992	940	940	940	940
1993	973	973	973	973
1994	1005	1005	1005	1005
1995	1038	1038	1038	1038

CLOROFÓRMIO

Cenário Otimista

Ano	Capacidades Industriais TMA ordenações das prioridades			
	1	2	3	4
1986	143	143	143	143
1987	150	150	150	150
1988	160	160	160	160
1989	168	168	168	168
1990	177	177	177	177
1991	185	185	185	185
1992	194	194	194	194
1993	201	201	201	201
1994	211	211	211	211
1995	218	218	218	218

Cenário Médio

Ano	Capacidades Industriais TMA ordenações das prioridades			
	1	2	3	4
1986	97	97	112	112
1987	103	103	118	118
1988	108	108	124	124
1989	114	114	131	131
1990	119	119	137	137
1991	125	125	143	143
1992	130	130	149	149
1993	136	136	156	156
1994	141	141	162	162
1995	146	146	168	168

Cenário Pessimista

Ano	Capacidades Industriais TMA ordenações das prioridades			
	1	2	3	4
1986	95	95	95	95
1987	100	100	100	100
1988	105	105	105	105
1989	111	111	111	111
1990	116	116	116	116
1991	121	121	121	121
1992	126	126	126	126
1993	131	131	131	131
1994	136	136	136	136
1995	142	142	142	142

ANEXO D

PROGRAMA COMPUTADICONAL E SOLUÇÃO DO PROBLEMA V.3.4.

```
C             ***********************************************************
C             *                                                         *
C             *                @@@@ @     @@@@ @    @                   *
C             *                @   @ @     @   @ @@ @@                  *
C             *                @@@@ @     @   @ @ @ @                   *
C             *                @     @@@@ @@@@ @    @                   *
C             *                                                         *
C             ***********************************************************
C
C
C
C
C          O OBJETIVO DESTE PROGRAMA E RESOLVER PROBLEMAS
C          DE PROGRAMACAO LINEAR COM OBJETIVOS MULTIPLOS
C
C
C          CARTAO 1 NOBJ,NPRI,NVAR,NTAF                FORMAT 5I5
C          NOBJ=NUMERO DE OBJETIVOS
C          NPRI=NUMERO DE NIVEIS DE PRIORIDADE
C          NVAR=NUMERO DE VARIAVEIS (X)
C          NTAF=NUMERO DE TERMOS DA FUNCAO DE EXECUCAO
C
C          CARTAO 2 COEFICIENTES DA MATRIZ TE          FORMAT 6F10.1
C
C          CARTAO 3 LADOS DIREITOS,
C                   VALORES DO VETOR TB                FORMAT 6F10.1
C
C          CARTOES 4 UM CARTAO PARA CADA TERMO DE FUNCAO DE EXECUCAO
C                    IPRI,ISUB,WHTF                    FORMAT 2I5,F10.0
C          IPRI=NIVEL DE PRIORIDADE PARA UM DETERMINADO TERMO
C          ISUB=CODIGO ASSOCIADO A VARIAVEL DE DESVIO
C          WHTF=FACTOR PONDERAVEL CORRESPONDENTE A RESPEITIVA
C               VARIAVEL DE DESVIO
C
C          O QUADRO COMPUTACIONAL E DIVIDIDO EM 6 ARRAYS
C          TE(NO,NC)=CAMPO DOS COEFICIENTES DE X  C(I,J)
C          TB(NO)   =CAMPOS DOS LADOS DIREITOS
C          TL(NO,NP)=CAMPO IZQUERDO
C          TT(NP,NC)=CAMPO SUPERIOR
C          TI(NP,NC)=LINHAS DOS INDICES I(K,S)
C          TA(NP)   =CAMPO DE A
C
C          OS SUBINDICES UTILIZADOS SAO OS SEGUINTES:
C          NO=1,NOBJ  NUMERO DE OBJETIVOS,CORRESPONDE AO NUMERO
C                     DE LINHAS EM TE,TB E TL
C          NC=1,NCOL  NUMERO DE COLUNAS EMTE,TT E TI
C          NP=1,NPRI  NUMERO DE PRIORIDADES,CORRESPONDE AO NUMERO
C                     DE LINHAS EM TT,TI,TA E AO NUMERO DE COLUNAS
C                     NO CAMPO TL
C
C          OS CABECALHOS DAS LINHAS E COLUNAS SAO CODIFICADOS
C          NOS SEGUINTES CAMPOS:
C          JFIL(NSUB,NTYPE) E
C          JCOL(NSUB,NTYPE)
C          NSUB=NUMERO DE SUBINDICE
C          O VALOR DE NTYPE DEVE SER INTERPRETADO DA SEGUINTE FORMA:
C          2=X
C          3=P
C          4=N
```

```
C
C         OS ESCALARES NA AREA COMMON SAO OS SEGUINTES:
C         NOBJ=NUMERO DE OBJETIVOS
C         NPRI=NUMERO DE PRIORIDADES
C         NVAR=NUMERO DE VARIAVEIS (X)
C         NCOL=NUMERO DE COLUNAS
C         NFIL=NUMERO DA LINHA PESQUISADA
C
      DIMENSION TK(40,61)
      COMMON        TL(40,10),    TT(10,60),    TE(40,60),   TI(10,60),
     *              TB(40),       TA(10),       JCOL(60,2),  JFIL(60,2),
     *              NOBJ,         NPRI,         NVAR,        NCOL,
     *              NFIL
C
C
C         AS DIMENSOES PROPOSTAS PERMITEN RESOLVER PROBLEMAS DE
C         20 VARIAVEIS,10 NIVEIS DE PRIORIDADE E 40 OBJETIVOS
C
C         LEITURA DO NUMERO DE OBJETIVOS, NUMERO DE NIVEIS DE PRIORIDA
C         NUMERO DE VARIAVEIS E NUMERO DE TERMOS NA FUNCAO DE EXECUCAO
C
   25 READ (5,30) NOBJ,NPRI,NVAR,NTAF

C         ANALIZAM-SE OS DADOS FORNECIDOS A FIM DE QUE NAO
C         ULTRAPASSEM AS DIMENCOES DOS ARRAYS DADOS
      IF ((NOBJ.LT.1).OR.(NPRI.LT.1).OR.(NVAR.LT.1)) GO TO 20
      IF ((NOBJ.GT.40).OR.(NPRI.GT.10).OR.(NVAR.GT.20)) GO TO 20
      WRITE(6,22) NOBJ,NPRI,NVAR,NTAF
      NCOL=NOBJ+NVAR
C         CABECALHO DAS COLUNAS (OBS:X=2,P=3,N=4)
      DO 1 NV=1,NVAR
      JCOL(NV,1)=2
    1 JCOL(NV,2)=NV
      DO 2 NO=1,NOBJ
      NC=NO+NVAR
C         IDENTIFICACAO DAS COLUNAS -P
      JCOL(NC,1)=3
      JCOL(NC,2)=NO
C         IDENTIFICACAO DAS LINHAS-N
      JFIL(NO,1)=4
    2 JFIL(NO,2)=NO
C         LEITURA DOS COEFICIENTES C(I,J)
      READ(5,31) ((TE(NO,NV),NV=1,NVAR),NO=1,NOBJ)
      WRITE(6,311)
      WRITE (6,334)
C         COLOCACAO DE -1 NA DIAGONAL E ZERO NAS OUTRAS POSICOES
      DO 3 NOR=1,NOBJ
      DO 3 NO=1,NOBJ
      NOC=NO+NVAR
      TE(NOR,NOC)=0
      IF(NO.EQ.NOR) TE(NOR,NOC)=-1
    3 CONTINUE
```

```
C          LEITURA DO LADO DIREITO OU SEJA O VETOR TB
      READ (5,31)  (TB(NO),NO=1,NOBJ)
      NMAR=NVAR+1
      DO 50 NO=1,NOBJ
      DO 51 NV=1,NVAR
   51 TK(NO,NV)=TE(NO,NV)
   50 TK(NO,NMAR)=TB(NO)
      WRITE  (6,312)((TK(NO,NV),NV=1,NMAR),NO=1,NOBJ)
C           ZERAMOS OS CAMPOS SUPERIOR E IZQUERDO
      DO 6 NP=1,NPRI
      DO 4 NO=1,NOBJ
    4 TL(NO,NP)=0
      DO 5 NC=1,NCOL
    5 TT(NP,NC)=0
    6 CONTINUE
C           LEITURA DOS VALORES DOS CAMPOS SUPERIOR E IZQUERDO
      WRITE (6,333)
      DO 7 NT=1,NTAF
      READ  (5,32)IPRI,ISUB,WHTF
      WRITE  (6,332)IPRI,ISUB,WHTF
C            A SUBROUTINE 'COLOCA' UBICA OS VALORES NOS CAMPOS
      CALL COLOCA (IPRI,ISUB,WHTF)
    7 CONTINUE
       WRITE(6,240)
C          ZERA-SE O CONTADOR DAS IMPRECOES DE RESULTADOS
      NPRT=0
C          PARA INICIAR O ALGORITMO ZERA-SE O CONTADOR DAS LIHAS
    8 NFIL=0
C          QUANDO NFIL=NPRI O ALGORITMO TERMINA
    9 IF(NFIL.EQ.NPRI)  GO TO 11
C          NFIL E O NUMERO DA LINHA QUE ESTA OTIMIZANDO-SE
      NFIL=NFIL+1
C          CHAMADA A 'CINDX(O)' PARA CALCULAR OS I(K,S) DE NFIL
      CALL CINDX(O)
C          CHAMADA A ENSAL PARA DETERMINAR A COLUNA DA VARIAVEL
C          QUE ENTRA NA BASE E A LINHA DA VARIAVEL BASICA QUE SAI
   10 CALL ENSAL(NEVC,NDVR)
C          SE 'ENSAL' RETORNA O VALOR NEVC=0, A LINHA NAO PODE
C          SER MAIS OTIMIZADO
      IF(NEVC.LE.0)GO TO 9
C          CHAMADA A'NOVTAB' PARA CALCULAR O NOVO TABLEAU
      CALL NOVTAB(NEVC,NDVR)
      GO TO 10
C          CHAMADA A 'IMPSOL'PARA IMPRIMIR AS SOLUCOES
   11 CALL IMPSOL  (NPRT)
C          CHAMADA A'SOLALT' PARA PROCURAR SOLUCOES ALTERNATIVAS
C          VALIDAS E IMPRIMIR-AS CASO EXISTAM
      CALL SOLALT(NPRT)
C          'IMPSOL' E 'SOLALT' INCREMENTAN NPRT+1 CADA VEZ QUE
C           IMPRIMEN SOLUCOES.SE NPRT=0 QUER DECIR QUE NAO
C           EXISTE SOLUCAO
```

```
      GO TO 40
   20 WRITE(6,21)
   21 FORMAT(3X,'*** DADO OU DADOS REFERENTES AS VARIAVEIS NOBJ,NPRI,NV
     *R ESTAO FORA DOS LIMITES ESTABELECIDOS ***')
   22 FORMAT(3X,'AS CARACTERISTICAS PRINCIPAIS DO PROBLEMA SAO AS SEGUIN
     *TES :',//,3X,'NUMERO DE OBJETIVOS :',I5,//,3X,'NUMERO DE PRIORIDAD
     *ES :',I5,//,3X,'NUMERO DE VARIAVEIS :',I5,//,3X,'NUMERO DE TERMOS
     * DA FUNCAO DE EXECUCAO :',I5,////)
  240 FORMAT(//////,3X,'****** RESULTADOS DO PROBLEMA *****',////)
   30 FORMAT (5I5)
   31 FORMAT (6F10.2)
   32 FORMAT(2I5,F10.2)
  311 FORMAT (17X,'MATRIZ DOS COEFICIENTES',17X,'LADO DIREITO',///)
  312 FORMAT (10X,F10.2,10X,F10.2,20X,F10.1)
  323 FORMAT (5X,F10.1)
  332 FORMAT (10X,I5,8X,I5,1X,F10.2)
  333 FORMAT (///,9X,'PRIORIDADE',5X,'CODIGO',5X,'PESO',/)
  334 FORMAT (16X,'X1',18X,'X2',28X,'B',/)
   40 CONTINUE
      STOP
      END
```

```
      SUBROUTINE COLOCA(IPRI,ISUB,WHTF)
C
C          A SUBROUTINE 'COLOCA' UBICA OS VALORES DA FUNCAO DE
C          EXECUCAO NOS CAMPOS SUPERIOR E IZQUERDO
C          IPRI=NIVEL DE PRIORIDADE
C          ISUB: +ISUB PARA P, -ISUB PARA N
C          WHTF=FACTOR PONDERAVEL
C
      COMMON       TL(40,10),     TT(10,60),     TE(40,60),   TI(10,60),
     *             TB(40),        TA(10),        JCOL(60,2),  JFIL(60,2),
     *             NOBJ,          NPRI,          NVAR,        NCOL,
     *             NFIL
C
C          VALORES POSITIVOS DE ISUB SAO COLOCADOS NO CAMPO SUPERIOR
      IF (ISUB.GT.0) GO TO 1
C          VALORES NEGATIVOS DE ISUB SAO COLOCADOS NO CAMPO IZQUERDO
      ISUB=-ISUB
      TL(ISUB,IPRI)=WHTF
      GO TO 2
    1 ICOL=ISUB+NVAR
      TT(IPRI,ICOL)=WHTF
    2 RETURN
      END
```

```
      SUBROUTINE CINDX(ISW)
C
C           'CINDX' CALCULA AS LINHAS DOS COEFICIENTES I(K,S)
C           SE ISW=1 CALCULA-SE AS LINHAS DE 1 A NFIL
C           SE ISW E DIFERENTE DE UM SO CALCULA-SE A LINHA NFIL
C
      COMMON         TL(40,10),     TT(10,60),     TE(40,60),   TI(10,60),
     *               TB(40),        TA(10),        JCOL(60,2),  JFIL(60,2),
     *               NOBJ,          NPRI,          NVAR,        NCOL,
     *               NFIL
      I=1
      IF (ISW.NE.1) I=NFIL
C           PARA CINDX(0) O LOOP E EXECUTADO PARA I=NFIL, NFIL
      DO 3 NP=I,NFIL
      TA(NP)=0
C           CALCULA-SE OS LADOS DIREITOS TA
      DO 1 NO=1,NOBJ
    1 TA(NP)=TA(NP)+TB(NO)*TL(NO,NP)
      DO 2 NC=1,NCOL
      TI(NP,NC)=-TT(NP,NC)
      DO 2 NO=1,NOBJ
      TI(NP,NC)=TI(NP,NC)+TL(NO,NP)*TE(NO,NC)
    2 CONTINUE
    3 CONTINUE
      RETURN
      END
```

```
      SUBROUTINE ENSAL (NEVC,NDVR)
C
C           'ENSAL' CALCULA A COLUNA DA VARIAVEL QUE ENTRA NA BASE
C           E A LINHA DA VARIAVEL BASICA QUE SAI
C           SE E RETORNADO O FLAG NEVC=0 QUER DICER QUE NAO E POSSIVEL
C           OTIMIZAR MAIS,CASO CONTRARIO NEVC CORRESPONDE AO INDICE
C           DA COLUNA QUE TEN O MAIOR VALOR POSITIVO SEM VALORES NEGA-
C           TIVOS NAS ANTERIORES PRIORIDADES.OS EMPATES SAO RESOLVIDOS
C           ARBITRARIAMENTE. NDVR CORRESPONDE A MINIMA RELACAO ENTRE
C           TB(NEVR)TE(NEVR,NEVC),SOMENTE PARA ELEMENTOS POSITIVOS.
C           NO CASO DE EMPATE ESCOLHE-SE AQUELA LINHA QUE TEN A VARIAVEL
C           BASICA COM O MAIOR NIVEL DE PRIORIDADE.
C
C
      COMMON        TL(40,10),     TT(10,60),     TE(40,60),  TI(10,60),
     *              TB(40),        TA(10),        JCOL(60,2), JFIL(60,2),
     *              NOBJ,          NPRI,          NVAR,       NCOL,
     *              NFIL
      NEVC=0
C           DETERMINACAO DA COLUNA DA VARIAVEL QUE ENTRA
      VEVC=0
      NRMW=NFIL-1
      DO 3 NC=1,NCOL
      IF (TI(NFIL,NC).LE.0) GO TO 3
      IF (NFIL.EQ.1) GO TO 2
      DO 1 N=1,NRMW
      IF(TI(N,NC).LT.0) GO TO 3
    1 CONTINUE
    2 IF(TI(NFIL,NC).LE.VEVC) GO TO 3
      NEVC=NC
      VEVC=TI(NFIL,NC)
    3 CONTINUE
      IF (NEVC.EQ.0) GOTO 10
C            DETERMINACAO DA LINHA DA VARIAVEL QUE SAI DA BASE
      NDVR=0
      DO 7 NR=1,NOBJ
      IF (TE(NR,NEVC).LE.0) GO TO 7
      V=TB(NR)/TE(NR,NEVC)
      IF(NDVR.EQ.0) GO TO 6
      IF (V-VDVR)6,4,7

    4 DO 5 NP=1,NPRI
      IF (TL(NR,NP)-TL(NDVR,NP)) 7,5,6
    5 CONTINUE
    6 VDVR=V
      NDVR=NR
    7 CONTINUE
      IF (NDVR.GE.1) GO TO 10
      WRITE (6,8)
    8 FORMAT (//,'    ** NAO EXISTE PIVO **     ')
   10 RETURN
      END
```

```
      SUBROUTINE NOVTAB (NEVC,NDVR)
C
C           A SUBROUTINE 'NOVTAB' CALCULA O NOVO QUADRO EM FASE
C           DOS VALORES DE NEVC E NDVR
C
C
      COMMON        TL(40,10),      TT(10,60),      TE(40,60),   TI(10,60),
     *              TB(40),         TA(10),         JCOL(60,2),  JFIL(60,2),
     *              NOBJ,           NPRI,           NVAR,        NCOL,
     *              NFIL
C           TROCAMOS AS POSICOES DAS VARIAVEIS
      DO 1 I=1,2
      J=JCOL(NEVC,I)
      JCOL(NEVC,I)=JFIL(NDVR,I)
    1 JFIL(NDVR,I)=J
C           PASSAMOS OS VETORES CORRESPONDENTES AS VARIAVEIS DOS
C           CAMPOS TT E TL
      DO 2 NP=1,NPRI
      TEMP=TL(NDVR,NP)
      TL(NDVR,NP)=TT(NP,NEVC)
    2 TT(NP,NEVC)=TEMP
C           CALCULAM-SE OS NOVOS VALORES DO TABLEAU
      PIV=TE(NDVR,NEVC)
      PIB=TB(NDVR)
      DO 31 NO=1,NOBJ
      IF (NO.EQ.NDVR) GO TO 31
      PIX=TE(NO,NEVC)/PIV
      TB(NO)=TB(NO)-PIX*PIB
      DO 3 NC=1,NCOL
      IF(NC.EQ.NEVC) GO TO 3
      TE(NO,NC)=TE(NO,NC)-TE(NDVR,NC)*PIX
    3 CONTINUE
   31 CONTINUE
      DO 4 NC=1,NCOL
    4 TE(NDVR,NC)=TE(NDVR,NC)/PIV
      DO 5 NO=1,NOBJ
    5 TE(NO,NEVC)=-TE(NO,NEVC)/PIV
      TB(NDVR)=TB(NDVR)/PIV
      TE(NDVR,NEVC)=1/PIV
C           CALCULAMOS OS NOVOS INDICES I(K,S)
      CALL CINDX(1)
      RETURN
      END
```

```
      SUBROUTINE IMPSOL(NPRT)
C
C           'IMPSOL' IMPRIME INFORMACAO SOBRE AS SOLUCOES
C           TAMBEM INDICA AS SOLUCOES ALTERNATIVAS
C           NPRT=NUMERO DE SOLUCOES IMPRESSAS.
C
C
      COMMON        TL(40,10),     TT(10,60),     TE(40,60),  TI(10,60),
     *              TB(40),        TA(10),        JCOL(60,2), JFIL(60,2),
     *              NOBJ,          NPRI,          NVAR,       NCOL,
     *              NFIL
      DIMENSION WOUT(40,4)
      NPRT=NPRT+1
      IF(NPRT.NE.1) WRITE (6,31) NPRT
C           ZERAMOS A MATRIZ DE SAIDA
   11 DO 12 I=1,40
      DO 12 J=1,4
   12 WOUT(I,J)=0
C           PRENCHEMOS A MATRIZ DE SAIDA
      DO 13 NP=1,NPRI
   13 WOUT(NP,1)=TA(NP)
      DO 14 NO=1,NOBJ
      IC=JFIL(NO,1)
      IP=JFIL(NO,2)
   14 WOUT(IP,IC)=TB(NO)
C           IMPRIMIMOS AS SOLUCOES
      WRITE(6,33) NPRI,NVAR,NOBJ,NOBJ
      I=MAX0(NPRI,NVAR,NOBJ)
      DO 20 K=1,I
      IF (K.GT.NPRI) GO TO 16
      IF (K.GT.NVAR) GO TO 15
      WRITE (6,34) K,(WOUT(K,J),J=1,4)
      GO TO 20
   15 WRITE(6,35) K,WOUT(K,1),(WOUT(K,J),J=3,4)
      GO TO 20
   16 IF (K.GT.NVAR) GO TO 17
      WRITE (6,36) K,(WOUT(K,J),J=2,4)
      GO TO 20
   17 WRITE (6,37) K,(WOUT(K,J),J=3,4)
   20 CONTINUE
   31 FORMAT (/,'   SOLUCAO ALTERNATIVA NUMERO:  ',I3)
   33 FORMAT (/,'   SUBINDICE',I5,' TERMOS DE A',I5,' TERMOS DE X',
     *I5,' TERMOS DE P',I5,' TERMOS DE N',/)
   34 FORMAT (I7,4F18.1)
   35 FORMAT (I7,F18.1,18X,2F18.1)
   36 FORMAT (I7,18X,3F18.1)
   37 FORMAT (I7,36X,2F18.1)
      RETURN
      END
```

```
      SUBROUTINE SOLALT (NPRT)
C
C          ESTA SUBROUTINE PROCURA SOLUCOES ALTERNATIVAS
C          VIAVEIS,GENERA-AS E AS IMPRIME.
C
C
      COMMON        TL(40,10),     TT(10,60),     TE(40,60),  TI(10,60),
     *              TB(40),        TA(10),        JCOL(60,2), JFIL(60,2),
     *              NOBJ,          NPRI,          NVAR,       NCOL,
     *              NFIL
      DO 4 NC=1,NCOL
C          NO CAMPO TI PROCURA-SE UMA COLUNA DE ZEROS QUE INDICA
C          A EXISTENCIA DE SOLUCOES ALTERNATIVAS NESSA COLUNA
      DO 1 NP=1,NPRI
      IF(TI(NP,NC).NE.0) GO TO 4
    1 CONTINUE
      DO 3 NO=1,NOBJ
      IF (TE(NO,NC).LE.0) GO TO 3
      IF (TB(NO).LE.0)GO TO 3
C          SE ACHA-SE UM VALOR POSITIVO NA COLUNA FIXADA DE TE
C          E TAMBEM E POSITIVO O VALOR CORRESPONDENTE EM TB ,
C          ENTAO ESTE ELEMENTO E TOMADO COMO NOVO PIVO.
    2 CALL NOVTAB (NC,NO)
      DO 5 NB=1,NOBJ
      IF (TB(NB).LT.0) GO TO 6
C         SE A NOVA SOLUCAO NAO TEN ELEMENTOS NEGATIVOS EM TB
C         ENTAO A SOLUCAO ALTERNATIVA E VALIDA
    5 CONTINUE
      CALL IMPSOL(NPRT)
C         A SUBROUTINE 'NOVTAB' E CHAMADA OTRA VEZ PARA COLOCAR O
C         QUADRO EM SUA FORMA ORIGINAL,E DAI PARTIR EM PROCURA
C         DE NOVAS SOLUCOES ALTERNATIVAS.
    6 CALL NOVTAB (NC,NO)
    3 CONTINUE
    4 CONTINUE
      RETURN
      END
```

AS CARACTERISTICAS PRINCIPAIS DO PROBLEMA SAO AS SEGUINTES :

NUMERO DE OBJETIVOS : 4

NUMERO DE PRIORIDADES : 3

NUMERO DE VARIAVEIS : 2

NUMERO DE TERMOS DA FUNCAO DE EXECUCAO : 4

MATRIZ DOS COEFICIENTES		LADO DIREITO
X1	X2	B
1.00	1.00	10.0
1.00	0.00	4.0
5.00	3.00	56.0
1.00	1.00	12.0

PRIORIDADE	CODIGO	PESO
1	1	2.00
1	2	3.00
2	-3	1.00
3	4	1.00

****** RESULTADOS DO PROBLEMA *****

SUBINDICE	3 TERMOS DE A	2 TERMOS DE X	4 TERMOS DE P	4 TERMOS DE
1	0.0	4.0	0.0	0.0
2	18.0	6.0	0.0	0.0
3	0.0		0.0	18.0
4			0.0	2.0

BIBLIOGRAFIA

1. RUDD, Dale F. - Modelling the Development of the Intermediate Chemical Industry, The Chem. Eng. Journal, 9, 1, 1975.

2. STADTHERR, Mark A. e D.F. Rudd - Systems Study of the Petrochemical Industry, Chem. Eng. Sci. 31, 1019, 1976.

3. STADTHERR, Mark A. - A Systems Approach to Assessing New Petrochemical Tecnology, Chem. Eng. Sci. 33, 921, 1978.

4. STADTHERR, Mark A. e Dale Rudd - Resource Use By the Petrochemical Industry, Chem. Eng. Sci. 33, 923, 1978.

5. FATHI-AFSHAR, Saeed e Dale F. Rudd - The Economic Impact of New Chemical Technology, Chem. Eng. Sci. 36, 1421,1981.

6. TREVINO, Andres A. e Dale F. Rudd - On Planning an Integrated Mexican Petrochemical Industry , Eng. Cost and Production.Economics, 5, 129, 1980.

7. JIMENEZ, Arturo, Dale F. Rudd e Robert R. Meyer - A study of the Development of a Mexican Petrochemical Industry Using Mixed-Integer Programming, Computers and Chemical Eng., 6, 219, 1982.

8. ROTSTEIN, Enrique e George Stephanoupoulos - Exergia y Creación de Entropía en la Selección de Tecnologias de Procesos Químicos , Rev. latinoam. ing.quim. quim. apli., 9, 89, 1979.

9. DAY, Richard H. e Peter E. Kennedy - Recursive Decision Systems: An Existence Analysis , Econometrica, 38, 666, 1970.

10. IGNICIO, James P. - A Review of Goal Programming: a tool for multiobjective analysis, J. Ope. Res. Soc. 29, 1109, 1978.

11. IGNICIO, James P. - Goal Programming and Extensions, Lexington Books, Lexington, Mass, 1979.

12. BORNSTEIN, Claudio T., Paulo C. Parga e Paulo R. Castro - Problemas de Pós-otimização Multiparametrização e Multicritério em Programação Linear, PDD 11/82, COPPE-UFRJ, 1982.

13. STEVENS, Wayne P. - Using Structured Desing, John Wiley and Son, New York, 1981.

14. DAY, Richard H. e J.P. Nelson - A Class of Dynamic Models for Describing and Projecting Industrial Development, Journal of econometrics, 1, 155-190, 1973.

15. LEE, Sang M. - Goal Programming for Decision Analysis, Auerbach Publishers Inc, Philadelphia, 1972.

16. BORNSTEIN, Claudio T., Paulo F. Bregalda e Antonio F. de Oliveira - Introdução à Programação Linear, Editora Campus Ltda, Rio de Janeiro, 1981.