

FACULDADE DE ENGENHARIA ELETRICA
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Este exemplar corresponde à redação final da tese
definida por Celso Socorro Oliveira
e aprovada pela Comissão
Julgadora em 12/10/90.

Orientador

ESTUDO DE CASO DE PROBLEMAS DE
LOCALIZACAO DISCRETA : DISTRIBUICAO DE
ACUCAR EM UMA COOPERATIVA

CELSO SOCORRO OLIVEIRA
ORIENTADOR : JURANDIR J. R. FERNANDES

Dissertação apresentada ao
departamento de engenharia de
sistemas (DENSIS), Faculdade de
engenharia elétrica, UNICAMP, como
requisito parcial para obtenção do
título de mestre em Engenharia
Elétrica.

91100710bc

Agradecimentos

- A minha esposa, Silvana, pela paciência, apoio, companhia e revisão do trabalho.
- Aos meus pais pelo apoio.
- Ao "Jura" pela orientação deste trabalho.
- Ao França, Clovis, e demais colegas e professores da Unicamp que contribuíram em discussões e intercâmbio de conhecimentos.
- Ao amigo Reinaldo pelo apoio e pelas longas discussões e informações.
- A Copersucar, em particular ao Sobral e ao Regis pelo apoio, pela concessão de trabalhar nos dois projetos internos que originaram esta tese.
- Aos colegas da área de informática da Copersucar, em particular Paulo, Prates, Mário e Lamoso, pela paciência e ajuda na execução das rodadas.
- Aos demais colegas da Copersucar que contribuíram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho.
- A todos os amigos que participaram indiretamente dando o seu apoio para a conclusão deste trabalho.

ÍNDICE

Introdução	04
Cap. I. - Descrição da Rede de Distribuição de Açúcar (RDA).	10
I.1. Descrição do produto: açúcar.	11
I.2. Descrição dos elementos que compõem a rede.	13
I.2.1 - Usinas (U).	14
I.2.2 - Armazéns das usinas (AU).	15
I.2.3 - Centrais de distribuição (CD).	17
I.2.4 - Empacotadoras (E).	17
I.2.5 - Refinarias (R).	18
I.2.6 - Mercados de indústrias e comércio (I).	18
I.2.7 - Instalações para recepção a granel (RE, RR e RI)	19
I.2.8 - Depósitos (D).	19
I.2.9 - Mercados de consumo (M).	20
I.2.10 - Formas de "unitização" (tipos de embalagem).	21
I.2.11 - Formas de transporte.	21
I.3. Representação do modelo por grafos.	23
I.3.1 - Elementos do grafo.	23
I.3.2 - Representação de situações especiais em grafos.	25
I.4. Definição de classe de nós.	26
I.5. Descrição do fluxo dos produtos na RDA.	27
I.6. Descrição dos problemas.	31
	Introdução 1

Cap.II - Problemas de Localização de Instalações Industriais (PLI): um breve retrospecto.	34
II.1.Classificação e apresentação de alguns modelos existentes.	35
II.2.Retrospecto de algumas metodologias existentes.	41
II.3.Evolução dos modelos ao longo do tempo.	45
Cap.III.- Descrição dos modelos para a RDA.	47
III.1.Primeira formulação : Localização de instalações industriais intermediárias (empacotadoras, refinarias e depósitos).	48
III.1.1 - Objetivos e condições de contorno do problema I	48
III.1.2 - Representação gráfica do modelo.	49
III.1.3 - Formulação do modelo adotado.	51
III.1.4 - Aspectos operacionais e computacionais.	54
III.2.Segunda formulação : Decisão do melhor sistema de distribuição.	57
III.2.1 - Objetivos e condições de contorno do problema II	57
III.2.2 - Representação gráfica do modelo.	58
III.2.3 - Formulação do modelo adotado.	62
III.2.4 - Aspectos operacionais e computacionais.	68
III.3.Descrição de regras para redução do porte do problema	69

Cap.IV. - Comentários e resultados obtidos com os modelos.	73
IV.1.Primeiro problema : Localização de instalações industriais intermediárias (empacotadoras, refinarias e depósitos).	73
Cenário 1 do problema I.	74
Cenário 2 do problema I.	82
IV.2.Segundo problema : Decisão do melhor sistema de distribuição.	87
IV.3.Aspectos operacionais e computacionais.	95
Cap.V. - Resultados finais, conclusões e perspectivas.	101
V.1.Resultados finais e conclusões do trabalho.	101
V.1.1 - Conclusões do primeiro problema : Localização das instalações intermediárias.	101
V.1.2 - Conclusões do segundo problema : Decisão da melhor alternativa de distribuição.	102
V.1.3 - Conclusões dos aspectos operacionais e computacionais.	102
V.2.Perspectivas de continuação do trabalho.	104
Anexos :	
A - Formulação de modelos citados no capítulo II	106
B - Terminologia da classificação do açúcar	117
Referências Bibliográficas	118

INTRODUÇÃO

A importância dos derivados da cana-de-açúcar (açúcar, álcool, mel e bagaço) para o Brasil não se deve tanto pela sua participação na balança comercial como produto de exportação¹ (como ocorria na época do chamado ciclo da cana-de-açúcar), e sim pela sua importância estratégica como uma alternativa para a substituição de importação do petróleo (62% da cana-de-açúcar moída no Brasil é destinada à fabricação de álcool hidratado e anidro, este último para servir como aditivo da gasolina).

Entretanto, o país continua a ser um dos maiores produtores mundiais de açúcar, perdendo apenas para a CEE, URSS e Índia, com uma participação de mais de 8% da produção mundial². O estado de São Paulo é o responsável por 40% da produção nacional e a Cooperativa de Produtores de Cana, Açúcar e Alcool do Estado de São Paulo Ltda - COPERSUCAR, a maior produtora individual, responde por 2,7% da produção mundial (Veja a tabela a seguir).

¹ A cotação do açúcar no mercado internacional é de US\$0.11 por libra, enquanto o suco de laranja chega a US\$1.80 - Gazeta Mercantil 13/08/90.

² Baseado nas estatísticas das safras de 85/86 e 86/87 do World Commodity Journal.

Tabela dos dados de produção de cana e derivados - safra 85/86

	Mundial	Brasil	São Paulo	COPERSUCAR
Cana Plantada(ha) ¹	ND	3.951.842	1.680.276	ND
Cana Produzida(t) ¹	ND	239.178.319	116.280.842	ND
Cana Moída(t) ¹				
. Total	ND	223.673.753	121.731.432	ND
. açúcar	ND	83.003.483	36.209.948	ND
. álcool	ND	137.950.517	85.437.496	ND
. mel	ND	2.719.753	83.988	ND
Açúcar (t) ²				
Total	151.807.587	10.345.493	3.415.808 ⁴	2.657.673 ⁴
Reservas	28.893.187	2.095.493	ND	ND
Consumo	99.402.697	6.300.000	2.559.967 ³	1.960.812 ³
Exportação	26.669.542	2.500.000	502.586 ³	387.173 ³
Produção	97.960.375	8.250.000	3.415.808 ³	2.657.673 ³

FONTES : (1) ANUARIO ESTATISTICO IBGE 1987/1988

(2) WORLD SUGAR STATISTICS

(3) MINISTERIO DA INDUSTRIA E COMERCIO

OBS. : (ND) - NAO DISPONIVEL, (4) - ASSUMINDO RESERVAS IGUAIS A ZERO

A tabela acima mostra ainda que para uma área plantada de quase 4 milhões de hectares, são moídas 224 milhões de toneladas de cana, sendo o montante de 83 milhões destinados para a produção de açúcar, que rendem 8,3 milhões de toneladas daquele produto.

Todos esses milhões de toneladas de cana e seus subprodutos necessitam ser transportados, seja da área de plantio para as usinas, no caso da cana-de-açúcar, seja da usina para os mercados, no caso do álcool e do açúcar. O transporte da cana feito no interior da usina tem sido estudado por diversos autores, entre eles Ide,B., Oliveira,C. e outros(1988). O transporte de álcool é feito pela Petrobrás. O transporte de açúcar, desde as usinas até os mercados, envolve uma rede de distribuição muito complexa; além disso, as áreas dos mercado das usinas são distintas e divididas em Norte-Nordeste e Centro-Sul do Brasil. Escolhemos estudar a rede de distribuição de açúcar de uma cooperativa da região Centro-Sul, a COPERSUCAR, por ser a de maior porte do país.

Definiremos o que entendemos por sistemas de distribuição, problemas de localização e redes de distribuição, porque julgamos que esses conceitos são necessários na compreensão dos objetivos do trabalho.

Sistemas de distribuição são todos os controles, planejamentos, equipamentos e instalações necessários ao fluxo de produtos partindo de um ponto de origem, uma fábrica por exemplo, em direção a um ou mais destinos, as lojas ou pontos de revenda. A situação inversa também existe, ou seja, os fluxos de produtos provindos de diversos pontos, insumos e matérias-primas, para um único, uma fábrica.

O planejamento de sistemas de distribuição, do ponto de vista de planejamento estratégico com horizonte de 10 a 20 anos, se enquadra dentro da classe de Problemas de Localização. Estes sistemas contêm elementos de produção (fábricas), de consumo (lojas, pontos de revenda, etc.) e até de abastecimento (depósitos) que precisam ser instalados de forma a tornarem-se competitivos em relação aos seus mercados³.

Problemas de localização⁴ tratam da decisão do local da construção de uma instalação industrial, fábrica ou depósito, ou de serviço. Eles podem também ser enquadrados em um tipo de problema conhecido como problemas com custo fixo, quando impomos um custo à decisão de instalar e, além disso, limitamos a capacidade operacional destas instalações (Salkin(1975)).

³ Uma técnica alternativa bastante usada em engenharia econômica é o estudo de viabilidade por fluxo de caixa, onde admitimos uma instalação padrão, calculamos o custo do investimento e sua taxa de retorno e comparamos os resultados com outras aplicações possíveis para o capital.

⁴ Em inglês: "Plant", "Facility" ou "Warehouse Location Problems".

Redes de distribuição são os sistemas de distribuição mais complexos que possuem várias fontes de produtos para servir a vários pontos de consumo, podendo ter instalações intermediárias que se interrelacionam, tal que o impacto de uma alteração em um ponto ou fluxo é absorvido por outro elemento ou fluxo na rede. A rede bancária e a de supermercados são exemplos de redes.

O objetivo deste estudo é analisar a rede de distribuição de açúcar, doravante RDA, da Cooperativa respondendo a algumas questões sobre ela :

- A configuração da RDA, a localização e as dimensões de suas instalações, é adequada à sua realidade ?
- É viável a instalação de Centrais de Distribuição (CD's), de tal forma que o açúcar produzido possa ser levado até ela(s) e a partir desse ponto ser feita a distribuição ?
- Por que não é utilizado o sistema de transporte a granel⁵ se já está consagrado em vários países, contribuindo para uma garantia maior da qualidade do produto ?

A análise da rede pretende discutir o tratamento a ser dado a algumas peculiaridades encontradas na RDA como :

- existência de dois produtos, cristal e refinado, o que implica em restrições adicionais na rede de distribuição;
- descontinuidade da produção, devido a sua sazonalidade e
- existência de instalações industriais intermediárias com características diferentes.

⁵ O sistema de transporte a granel inclui todos os equipamentos, instalações e meios de transporte para a movimentação do produto em "grãos".

Vários modelos podem ser encontrados na literatura para resolver problemas de localização em redes de distribuição. Algumas das características dos modelos atuais são, por exemplo, a possibilidade de simular uma capacidade operacional máxima e mínima, a implantação modularizada das instalações, etc. Procuramos aproveitar desses modelos as características mais apropriadas à resolução da RDA, incorporando modificações que atendessem às peculiaridades já citadas.

Observamos em uma análise preliminar da RDA que as três questões a serem respondidas - análise da sua configuração, estudos de viabilidade de centrais de distribuição, assim como a viabilidade de granelização - podem ser consideradas como partes de dois problemas: o primeiro é o de localização tomando a rede completa, da produção ao consumo, verificando quais as localizações e as dimensões adequadas das instalações industriais intermediárias, supondo fixas as unidades produtoras (usinas) e as regiões de consumo. O segundo problema, que responde às segunda e terceira perguntas, é o de decisão do melhor sistema de distribuição, com os locais e as dimensões das instalações intermediárias necessários definidos pelo problema anterior.

O primeiro problema, de localizar e dimensionar instalações industriais intermediárias, pode ser visto como um problema de localização capacitado (estático) com uso de dados reais de instalações, distâncias, equipamentos e mão-de-obra. O segundo, de escolha do melhor sistema de distribuição, pode ser entendido como um problema de localização capacitado dinâmico com dados reais e estimados, estes últimos devido à inexistência de instalações semelhantes.

A análise do problema de localização de instalações intermediárias mostrou que a RDA estava superdimensionada e necessitava de ajustes. Outros cenários são explorados.

A resolução do segundo problema indicou que as centrais de distribuição eram desnecessárias e que uma solução mista entre o uso da sacaria de algodão e o transporte em contêineres era a alternativa mais viável com pouco investimento.

O capítulo I é uma descrição dos componentes da rede e das questões estudadas na RDA.

O capítulo II é um retrospecto parcial do que tem sido feito na área de problemas de localização, sob os aspectos de modelos e de metodologias para sua resolução.

No capítulo III são apresentados os objetivos, condições de contorno, representações gráficas e formulações para cada um dos dois problemas estudados.

No capítulo IV são feitos comentários e observações sobre os resultados obtidos com as formulações do capítulo anterior e no V apresentamos conclusões e perspectivas de continuação do trabalho.

CAPÍTULO I - DESCRIÇÃO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE AÇÚCAR (RDA).

Introdução

A Cooperativa de Produtores de Cana, Açúcar e Alcool do Estado de São Paulo - COPERSUCAR - foi escolhida para o modelamento de uma rede de distribuição de açúcar (RDA) por ser a maior produtora individual do país e participar de todas as etapas da rede, desde a produção até o comércio do açúcar. Ela produz cerca de 2,6 milhões de toneladas de açúcar e cerca de 3,0 bilhões de litros de álcool por ano.

Os problemas identificados na RDA¹ são dois : um de localização e dimensionamento de instalações industriais intermediárias e outro de decisão entre alternativas de sistemas de movimentação e transporte do produto no trecho compreendido entre as usinas produtoras de açúcar e as instalações industriais intermediárias e mercados de indústrias e comércio.

Descreveremos neste capítulo os produtos, instalações, tipos de transporte e de unitização² que compõem a RDA e os problemas associados a ela. Além disto, apresentamos algumas restrições específicas da rede que serão utilizadas na modelagem.

¹ Szmrecsányi (1979) faz uma extensa descrição da agroindústria canavieira de 1930 a 1975, incluindo aspectos produtivos (desde a plantação da cana-de-açúcar até o produto final, açúcar refinado e/ou cristal), aspectos políticos (como são as políticas nacionais para o desenvolvimento do setor e as atuações dos órgãos governamentais) e aspectos econômicos (como custos de produção, planejamentos, etc.).

² Em Aurélio (1986), unitizar, em marinha mercante, é "reunir (cargas de diversas naturezas) num só volume para fins de transporte". Neste trabalho usaremos esta palavra em um sentido mais amplo : reunir os produtos, no nosso caso os diferentes tipos de açúcar, para o transporte ou o armazenamento.

I.1 Descrição do produto : açúcar.

O produto que flue na RDA é o açúcar, mas outros nomes podem ser associados a ele, a depender da situação. Apresentamos as três classificações mais utilizadas:

O açúcar, de acordo com as suas propriedades³ (ver tabela I.1), pode ser classificado em "standard", superior e especial.

TABELA I.1 Sinopse das especificações do açúcar

PROPRIEDADE	TIPO	ESPECIAL	SUPERIOR	STANDARD
Reflectância (% mínima)		≥ 60	≥ 60	-
Cor ICUMSA (420nm, U. I. máx.)		≤ 230	≤ 480	≤ 760
Umidade (% máxima)		≤ 0.04	≤ 0.04	≤ 0.10
Pontos pretos totais (/100g)		≤ 80	≤ 80	-
Resíduos insolúveis (unid.)		≤ 10	≤ 10	-

FONTE: COPERSUCAR

Outra classificação baseada no destino do açúcar também é utilizada :

- açúcar-produto - aquele que é considerado produto acabado quando sai da usina⁴ não precisando refinar. As empacotadoras⁵ e os mercados de indústrias e comércio⁶ são os destinos desse tipo de açúcar. Os tipos superior e especial, da classificação anterior, são considerados açúcar-produto quando têm os destinos citados;

³ As principais propriedades são Reflectância, Cor, Umidade, Pontos Pretos Totais, Resíduos Insolúveis. A explicação desta terminologia encontra-se no glossário técnico no anexo B.

⁴ A descrição de usinas (U) está em I.2.1.

⁵ A descrição de empacotadoras (E) está em I.2.4.

⁶ A descrição de mercado de indústrias e comércio (I) está em I.2.6.

- matéria-prima - aquele que serve como matéria-prima das refinarias⁷. Qualquer um dos tipos da classificação anterior pode ser considerado como matéria-prima, desde que o destino seja a refinaria.

Esta segunda classificação simplifica o problema, mantendo as restrições relacionadas à qualidade do açúcar da seguinte forma : os tipos de açúcar superior e especial podem ter os mesmos destinos e formas de transporte; entretanto, quando são misturados ao "standard", o último prevalece por ser de qualidade inferior. Este problema é agravado porque perde-se no preço do produto devido à mistura, e também na flexibilidade de escolha do destino, ou seja, o açúcar vai para as refinarias.

A terceira classificação está relacionada com a presença ou não do retículo cristalino na estrutura do açúcar :

- crystal - quando ocorre o retículo;
- amorfo - caso contrário. Este tipo é também conhecido como refinado.

A produção anual média da cooperativa é da ordem de 2,6 milhões de toneladas, ou, como é usualmente expresso, 52 milhões de sacos de 50Kg. A composição, segundo as classificações acima, é a seguinte:

TABELA 1.2 Composição dos tipos de açúcar (em sacos e %)

TIPO	QUANTIDADE	%
STANDARD	11.960.000	23,0
SUPERIOR	10.400.000	20,0
ESPECIAL	29.640.000	57,0
PRODUTO	40.040.000	77,0
MATÉRIA-PRIMA	11.960.000	23,0
CRISTAL	26.400.000	50,8
AMORFO/REFINADO	25.600.000	49,2
TOTAL	52.000.000	100,0

⁷ A descrição de refinarias (R) está em I.2.5.

I.2 Descrição dos elementos que compõem a rede.

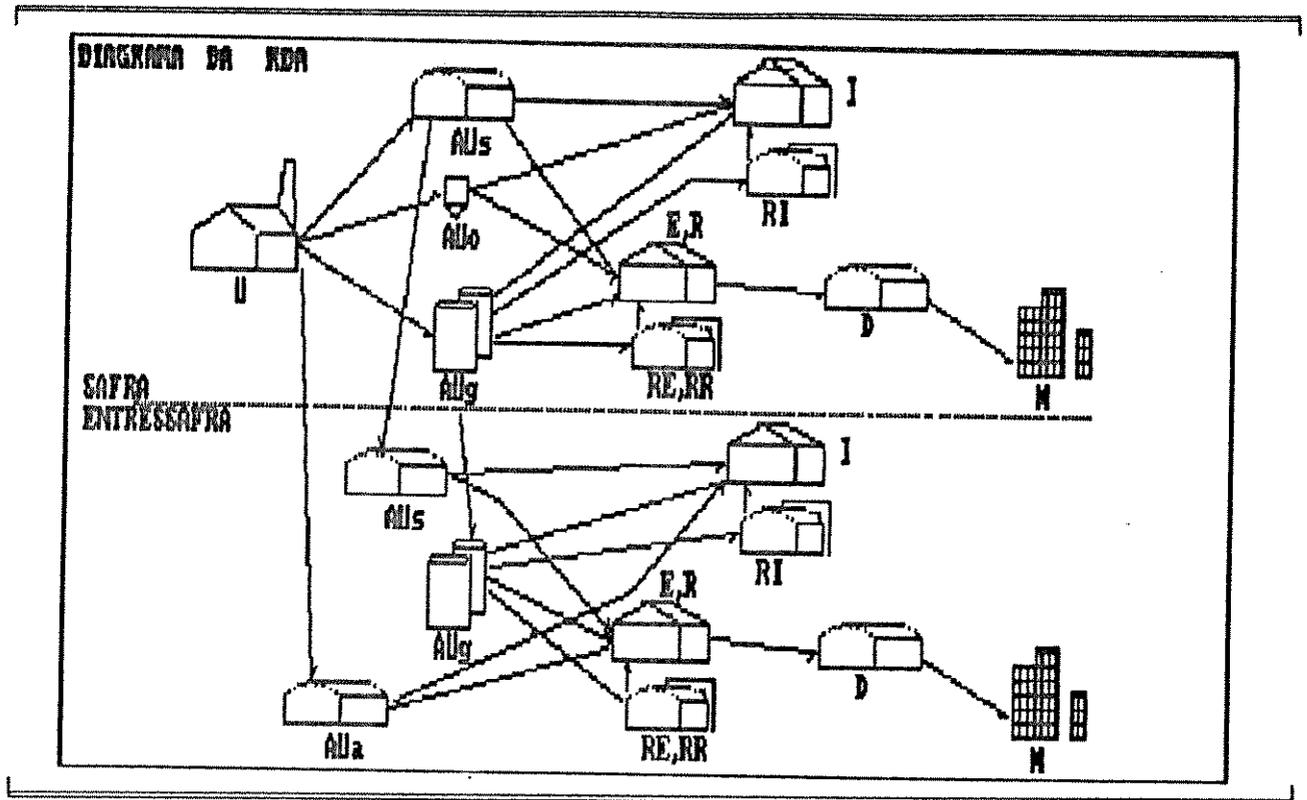
Descreveremos a seguir as instalações industriais e as formas de transporte que existem entre elas. Na tabela I.3, abaixo, encontra-se um resumo desses 18 "tipos de elementos" e a figura I.1, a seguir, mostra os principais fluxos da RDA. O número elevado de armazéns deve-se ao fato de poder existir até seis tipos de armazéns para cada usina no modelo desenvolvido para representar a RDA.

TABELA I.3 Sinopse do tipos de elementos considerados na RDA

TIPO	DESCRIÇÃO DO ELEMENTO	CÓDIGO USADO	UNI-DADES	REPRESENTAÇÃO	OBS.
1	USINA	U	50	fonte	
2	ARMAZÉM DE USINA	AU	300	no	1U→6
3	CENTRAL DE DISTRIBUIÇÃO	CD	2	no	
4	EMPACOTADORA	E	9	no*	
5	RECEPÇÃO GRANEL NA EMPACOTAD.	RE	9	no	
6	REFINARIA	R	3	no*	
7	RECEPÇÃO GRANEL NA REFINARIA	RR	3	no	
8	MERCADO DE INDÚSTRIAS E COM.	I	40	sumidouro	
9	RECEPÇÃO GRANEL NA INDÚSTRIA	RI	40	no	
10	DEPÓSITO DE AÇÚCAR REFINADO	DR	20	no	
11	DEPÓSITO DE AÇÚCAR EMPACOTADO	DE	20	no	
12	MERCADO DE REF. E EMP. CIF	MC	20	sumidouro	
13	MERCADO DE REF. E EMP. FOB	MF	20	sumidouro	
14	ARMAZENAGEM EM SACO			arco	
15	ARMAZENAGEM A GRANEL			arco	
16	MOVIMENTAÇÃO/TRANSPORTE EM SACO			arco	
17	MOVIMENTAÇÃO/TRANSPORTE EM CONTEINER			arco	
18	MOVIMENTAÇÃO/TRANSPORTE A GRANEL			arco	

Obs.:(*) assumiremos que estes tipos de elementos serão nós sumidouros no segundo problema.

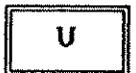
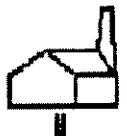
FIGURA I.1 Diagrama dos elementos e fluxos da RDA



Nos tipos de elementos descritos a seguir, procuraremos associar os ícones apresentados no diagrama acima com os símbolos que serão usados na representação gráfica do modelo desenvolvido no capítulo III.

I.2.1. Usinas (U)

Produzem açúcar a partir da cana-de-açúcar, durante uma parte do ano, no período conhecido como safra. No restante do ano, período conhecido como entressafra, a produção é nula. Considera-se ano-safra o período compreendido entre duas colheitas consecutivas, o que equivale a um ano no caso desta planta.



A safra começa entre abril e junho e termina entre outubro e dezembro na região Centro-Sul do Brasil, dependendo do porte das instalações industriais e da produção de cana. Uma usina pode antecipar ou atrasar o início da safra em decorrência de diversos fatores externos, tais como clima, rotação de culturas, etc.

Para efeito de simplificação do problema, principalmente devido à dificuldade de se obter um histórico confiável dos dados, adotamos o período padrão de seis meses tanto para a safra como para a entressafra, extensivo a todas as usinas. No caso de generalização deste procedimento para outras culturas, cujo período médio de duração da safra seja diferente, adotar-se-ia o valor médio para a safra e o período complementar do ano-safra como entressafra. A razão desse procedimento se deve ao fato dos níveis de produção e de demanda serem diferentes, isto é, durante a safra, a produção deve cobrir os dois períodos (safra e entressafra).

O consumo, apesar de não ter necessariamente uma curva de demanda uniforme, apresenta uma continuidade ao longo do ano. A produção da usina, também para efeito de simplificação, é toda encaminhada aos seus respectivos armazéns, para movimentação ou armazenagem.

I.2.2. Armazéns de usina (AU)

Guardam o açúcar para o período de entressafra ou atuam como estação de transbordo para movimentação de carga. A maior parte deles são depósitos horizontais que abrigam o açúcar em sacos. Apenas uma usina utiliza, durante a safra, o transporte a granel com a ajuda de um silo de "fabricação caseira".

No modelo desenvolvido assumiremos que os armazéns servem exclusivamente às usinas a que estão ligados e que a armazenagem pode ser feita de duas formas: em sacos ou a granel⁸, em função da instalação existente. Serão considerados seis tipos :

⁸ Estaremos nos referindo ao saco de algodão de 50Kg de açúcar como simplesmente saco, e ao açúcar sem embalagem como granel.

- armazéns de propriedade da usina (AU_s) : são barracões industriais para guardar sacos. Serão considerados como se estivessem sempre próximos da usina. Estas instalações já existem nas usinas e, portanto, não é necessário nenhum investimento para implantação;
- armazéns de terceiros ou alugados (para açúcar em sacos) (AU_t): serão considerados com capacidade limitada (contratada) e tarifas reais;
- armazéns de terceiros extras (para açúcar em sacos) (AU_e): serão considerados com capacidade ilimitada e tarifas superiores àquelas cobradas nos armazéns do tipo anterior;
- silos verticais (AU_g): são construções cilíndricas verticais, em aço ou concreto, com capacidade variável entre 5000 e 80000t de açúcar, providas de equipamento para movimentação e climatização do açúcar a granel. Serão considerados os investimentos iniciais para implantação, uma vez que este tipo de armazém não existe ainda;
- silos horizontais (AU_h): são os armazéns de propriedade da usina para sacos adaptados (com estrutura reforçada) para receber o açúcar a granel. Como a estocagem do açúcar, neste caso, não dispõe de equipamentos adequados (o açúcar é estocado no chão do armazém), sua utilização implica em destinar o açúcar apenas para as refinarias. Serão considerados os investimentos necessários à adaptação;
- mini-silos (AU_c): são tanques de aço para pequenas capacidades, no máximo 1000t, com fundo afunilado para escoar o produto. Serão considerados os investimentos iniciais necessários.



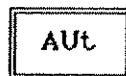
AU_s



AU_s



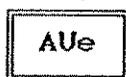
AU_t



AU_t



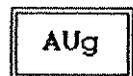
AU_e



AU_e



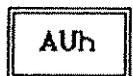
AU_g



AU_g



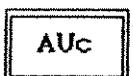
AU_h



AU_h



AU_c



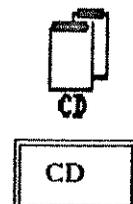
AU_c

I.2.3 Centrais de distribuição (CD)

Ainda não existem instalações similares na RDA.

Estes elementos têm o mesmo objetivo dos armazéns de usina, ou seja, transbordo e/ou armazenagem, mas com a diferença de receberem o açúcar de qualquer usina e poderem enviá-lo a qualquer destino.

Estimamos, baseado em outras redes, que as economias de escala nos investimentos iniciais, proporcionada por este tipo de armazém, somadas aos custos de transporte e de transbordo, compensam os custos do sistema atual.

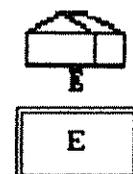


O silo vertical, que só utiliza granel (descrito em I.2.2), será o único tipo de central de distribuição (CD) considerado, já que agiliza a movimentação e o transporte e, além disso, as maiores reduções de custos serão atribuídas à substituição de sacos por granel.

I.2.4. Empacotadoras (E)

Existem atualmente seis unidades industriais que empacotam o açúcar-produto recebido em sacos novos⁹, em container ou a granel, para posteriormente comercializarem nas embalagens de 1,2,5 e 30Kg.

Para simplificar o problema consideraremos a quantidade em saco-equivalente da produção das embalagens, ou seja, para cada 50Kg de açúcar empacotado em quaisquer composições das embalagens de 1, 2, 5 e 30Kg, diremos que é simplesmente um saco.



Para manter a continuidade da produção admitimos que cada empacotadora (E) possui um estoque regulador de matéria-prima pequeno em armazém próprio. A política de aquisição de açúcar das

⁹ O controle de qualidade exige que os sacos recebidos na empacotadora sejam novos. Esta exigência será representada no modelo através de restrições adicionais.

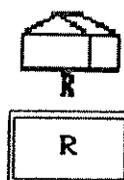
empacotadoras é desconhecida, portanto, consideraremos que todo o açúcar demandado por elas será consumido dentro do período, não havendo transferência do excedente para o período seguinte.

Consideraremos, além das empacotadoras existentes, três outros possíveis locais para instalação, admitindo que tanto uma instalação existente pode ser fechada como uma nova empacotadora pode ser implantada.

I.2.5. Refinarias (R)

Existem três refinarias na RDA que refinam e empacotam o açúcar matéria-prima para comercialização. Aqui também desconhe-se a política das refinarias e valem as considerações do item I.2.4.

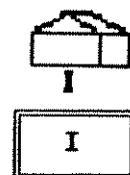
Não serão considerados locais alternativos para implantação de novas refinarias.



I.2.6. Mercado de indústrias e comércio (I)

Um segmento do mercado consumidor de açúcar, predominantemente formado por indústrias e comércio atacadista (I), adquire o açúcar-produto nas usinas (às vezes, na saída do processo de fabricação, conhecido como "bica") durante a safra, sem empacotar.

Para não prejudicar este mercado (I) que tem, muitas vezes, de retirar o açúcar de usinas mais distantes, duas situações podem ocorrer : na primeira, a quantidade de açúcar consumida por este mercado em uma região seria deduzida do total da produção da usina mais próxima, e tanto esta produção como esta demanda não seriam considerados no problema; na segunda alternativa seria incluído o transporte deste açúcar ao custo do sistema.



Adotaremos a inclusão do transporte na rede, segunda alternativa, porque serve para indicar qual a melhor usina (U) ou central de distribuição (CD) para servir o cliente e, também, para comparar os investimentos necessários para implantar açúcar a granel contra o sistema atual (transporte e armazenagem em saco).

Eventuais distorções da situação real em relação aos resultados do modelo como, por exemplo, a exigência de uma indústria de retirar o açúcar de uma usina mais distante, serão desconsideradas.

I.2.7. Instalações para recepção de açúcar a granel (RE, RR e RI)

As instalações para receber açúcar a granel ainda não existem, mas as denominaremos, conforme a instalação industrial a que servem, em recepção em empacotadoras (RE), em refinarias (RR) e em indústrias e comércio (RI).

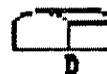
Consideraremos que os equipamentos estão sempre próximos às instalações a que servem e que os investimentos para construí-las são proporcionais à capacidade operacional.

Além disso, no caso do mercado das indústrias e comércio (I) de uma região, assumiremos que os investimentos para a recepção do açúcar a granel pelo mercado (RI) são globais para o conjunto de clientes industriais e comerciantes (I) agregados naquela região.



I.2.8. Depósitos (D)

Os depósitos são armazéns que estocam os produtos das refinarias e das empacotadoras, açúcar refinado e açúcar cristal (ou empacotado) respectivamente, sem nenhuma restrição da origem dos produtos. Utilizamos esta denominação para diferenciar dos armazéns de usina, descritos em I.2.2., e evitar a terminologia "Terminais Regionais de Distribuição", utilizada pela cooperativa, que não encontra respaldo na literatura consultada.



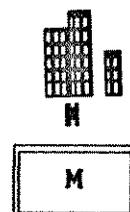
Existem 19 unidades atualmente e cada uma das seis empacotadoras e três refinarias possui um depósito próximo.

No modelo consideramos a existência de 20 depósitos, sendo 10 deles anexos às empacotadoras e às refinarias. Quando anexo a uma instalação produtora, existe apenas a movimentação de carga, sem transporte, entre a instalação e o depósito.

Consideraremos cada depósito como sendo dois : um para empacotado (DE) e outro para refinado (DR). Entretanto, não limitaremos o depósito a este nível, já que dispomos de uma capacidade de armazenagem válida somente para a soma dos produtos.

I.2.9. Mercados de consumo (MD)

Os mercados são os consumidores dos produtos. Apesar de existirem 250 regiões geográficas, reduziremos esse número para 40, de forma que a soma das demandas de regiões agregadas seja significativa e que a sede seja nas localidades de maior demanda. O segmento do mercado que retira o açúcar diretamente da usina (I) foi tratado em I.2.6.



Consideraremos dois tipos de mercado para contornar o problema do "frete de retorno". No "frete de retorno", o cliente prefere retirar o produto de um local mais distante, ao invés de retirá-lo do local mais próximo, porque consegue um frete mais barato.

Os mercados de consumo considerados aqui são dois, conforme a forma de entrega do produto :

- Mercado CIF¹⁰ (MC) - com frete de distribuição (ver I.2.11);
- Mercado FOB¹¹ (MF) - com frete de transferência (ver I.2.11).

O mercado é ainda subdividido em refinado (MCR e MFR) e empacotado (MCE e MFE), para cada um dos tipos acima.

10 Abreviatura para "Cost, Insurance and Freight", significando que o cliente receberá o produto no local que indicar, com os custos de produção e distribuição incluídos.

11 Abreviatura para "Free On Board", significando que o cliente retira a mercadoria pagando apenas o custo de produção.

I.2.10 Formas de unitização (tipos de embalagens)

O tipo de embalagem clássica é o saco, mas outras formas vêm sendo estudadas para diminuir o custo e aumentar a garantia de qualidade e facilidade operacional. O container flexível e o transporte a granel, cuja viabilidade é analisada no segundo problema, descrito em III.2, são algumas dessas opções.

O container tem uma capacidade de uma tonelada cada um e será considerado equivalente a 20 sacos. O granel tem uma capacidade variável, mas também será tratado como saco-equivalente.

I.2.11 Formas de transporte

Assim como para a embalagem, soluções alternativas de transporte têm sido avaliadas. Os resultados técnicos quanto às alternativas de uso do transporte ferroviário ou hidroviário apresentam problemas devido, principalmente, a ineficiência nos transbordos. O sistema hidroviário não possui infra-estrutura adequada para a cabotagem. No sistema ferroviário, as instalações para transbordo e as locomotivas são ineficientes, a ponto do transporte de soja em um trecho de 700km, durar 12 dias (2,4km/h em média) e custar o equivalente a US\$60.00/t, enquanto nos EUA este custo é estimado em US\$10.00/t para a mesma distância (Transporte Moderno (1989)).

As alternativas de transporte ferroviário e hidroviário, por apresentarem um custo mais elevado em relação ao rodoviário, estão fora do escopo do presente trabalho. Analisaremos as diferentes formas de unitização considerando apenas a alternativa do transporte rodoviário, sem perda de generalidade para avaliar as outras duas.

O transporte rodoviário será subdividido em três, conforme a natureza da distribuição seja de :

- abastecimento: o transporte satisfaz a demanda das empacotadoras (E), das refinarias (R) e dos mercados das indústrias e comércio (I);

- transferência: neste caso ocorre a transferência do produto das empacotadoras (E) e das refinarias (R) para os depósitos (D), ou apenas a movimentação estratégica do produto entre os depósitos (D);
- distribuição: entrega do produto ao cliente final (transporte para satisfazer o mercado CIF).

A subdivisão acima é necessária devido às diferenças de contrato de frete, tipo de caminhão, tipo de operação, entre outras.

Além disso, o frete será considerado linear por partes, com dois segmentos de reta, porque existem custos adicionais para faixas de distâncias maiores. Um caminhão que faz um percurso de 300Km, por exemplo, pára mais vezes na estrada do que um que viaja 100Km.

Admitiremos também uma subdivisão nos custos de transporte de abastecimento em função da forma de unitização utilizada.

I.3 Representação do modelo por grafos.

A terminologia e representação descrita abaixo, utilizada para explicar o modelo, é baseada em otimização de fluxos em redes¹².

I.3.1. Elementos do grafo

Toda rede de distribuição possui locais (instalações de produção, armazenagem e/ou serviço) onde os produtos chegam ou partem, além dos caminhos por onde circulam os produtos. Chamaremos *nó* a cada um desses locais, e o caminho que os produtos fazem entre dois *nós*, denominaremos de *arco*. O conjunto dos *nós* e *arcos* constitui o *grafo* que representa a nossa Rede de Distribuição. Um exemplo de grafo pode ser visto abaixo (figura I.2), onde os retângulos são os *nós* (U, AU, CD, etc.) e as linhas são os *arcos* (1, 2, ... , 12).

Podem ocorrer três situações com os produtos que passam pelos *nós* :

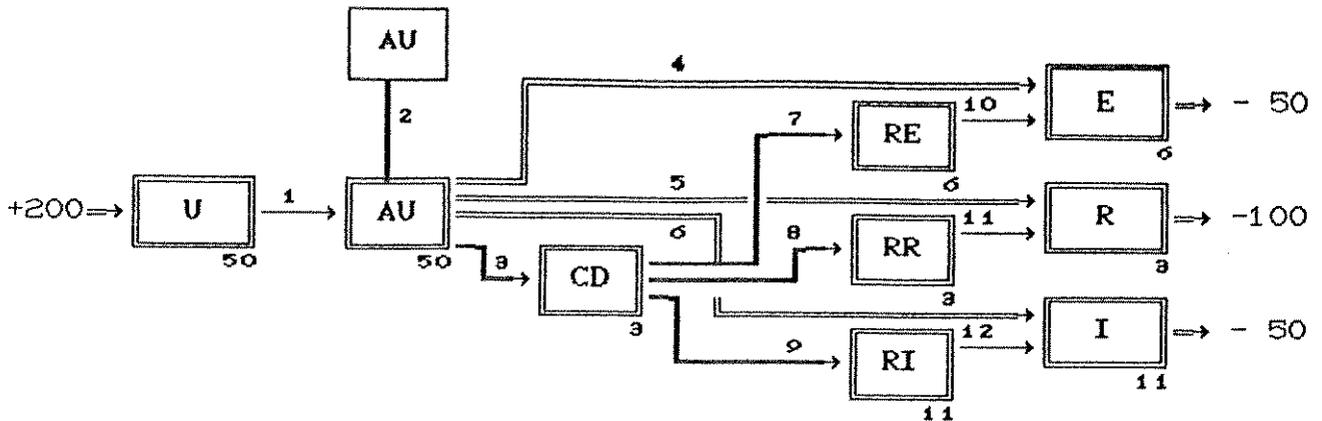
a) *geração de produtos* : a instalação gera produtos para a rede; chamaremos esse *nó* de *nó fonte*. Neste caso representaremos a quantidade produzida com um valor positivo e uma seta apontará para o *nó* (veja o caso do *nó U* da figura I.2);

b) *consumo de produtos* : a instalação consome os produtos da rede; chamaremos de *nó sumidouro*. Neste caso representaremos a demanda com um valor negativo e uma seta saindo do *nó* (como no caso dos *nós E,R,I* da figura);

c) *passagem de produtos* : a instalação serve para movimentação/passagem dos produtos; denominaremos de *nó de transbordo*.

¹² Otimização de fluxos em redes pode ser encontrada mais detalhadamente em Kennigton(1980) e Jensen(1980).

FIGURA 1.2 Exemplo de grafo



Ainda no exemplo acima, podemos ver que as linhas possuem setas nas suas extremidades (com exceção do arco 2). Elas indicam o sentido do fluxo do produto no arco. Grafos onde todos os arcos possuem sentido único, são ditos *direcionados*. A situação contrária seria todas as linhas sem setas, *grafo não-direcionado*. Os arcos *não-direcionados* (arco 2) podem ser transformados em arcos *direcionados* pela duplicação dos mesmos, mantendo suas características, com sentidos contrários.

Além do sentido do fluxo do produto, o arco pode vir a ter outras características como : as limitações (superior e inferior) da quantidade de fluxo que pode passar por ele ; os arcos *capacitados*, um custo (no caso de problemas de minimização) e/ou lucro (ou margem de contribuição¹³), no caso de problemas de maximização. Além disso, os arcos podem ter uma variação de fluxo ao longo do trajeto com perdas ou ganhos. Neste caso, o grafo é dito generalizado.

¹³ A diferença básica entre lucro e margem de contribuição é que no primeiro estão deduzidas todas as despesas, enquanto no segundo só estão deduzidos os gastos que afetam o resultado do problema. O segundo será sempre maior ou igual ao primeiro.

I.3.2. Representação de situações especiais em grafos

Para representar algumas situações são necessários alguns artifícios. Relacionamos a seguir apenas aqueles que serão utilizados para o problema :

1) Armazenagem

A armazenagem de um produto geralmente implica em um custo e uma capacidade¹⁴ (limitante superior) de armazenagem. A sua representação é feita duplicando-se o nó e criando um arco com as características de custo e de capacidade relativas àquela armazenagem. Esta situação está representada na figura I.2 pelo nó AU, onde podemos interpretar o arco 2 como sendo o armazenamento do produto que existia no período anterior para o atual (neste caso haveria uma seta indicando esta direção).

2) Caminhos alternativos

O transporte dos produtos pode ter várias alternativas (tipos de caminhos diferentes e/ou transportes ferroviário e hidroviário). Para cada uma das alternativas a ser estudada será criado um arco que liga os dois nós, origem e destino, com as características de cada alternativa.

3) Representação da rede no tempo

Para representar vários períodos de tempo, o artifício utilizado é o de representar a rede tantas vezes quanto o número de períodos considerados, ligando-as por arcos que representem a transferência do produto no tempo, ou seja, de um período para o seguinte. Geralmente estes arcos são de armazenagem, mas podem ser de transporte, indicando que o produto foi transportado durante a mudança de período.

¹⁴ No caso de modelos não capacitados, admite-se um valor suficientemente alto como, por exemplo, o valor da produção total.

I.4 Definição de CLASSE de NÓS.

Definiremos *classe de nós* como um conjunto de instalações que apresentam as mesmas características. Serão representados por um único nó com contorno de linha dupla e com o número de unidades existentes (conforme figura I.2, onde apenas o nó AU de cima não representa uma classe).

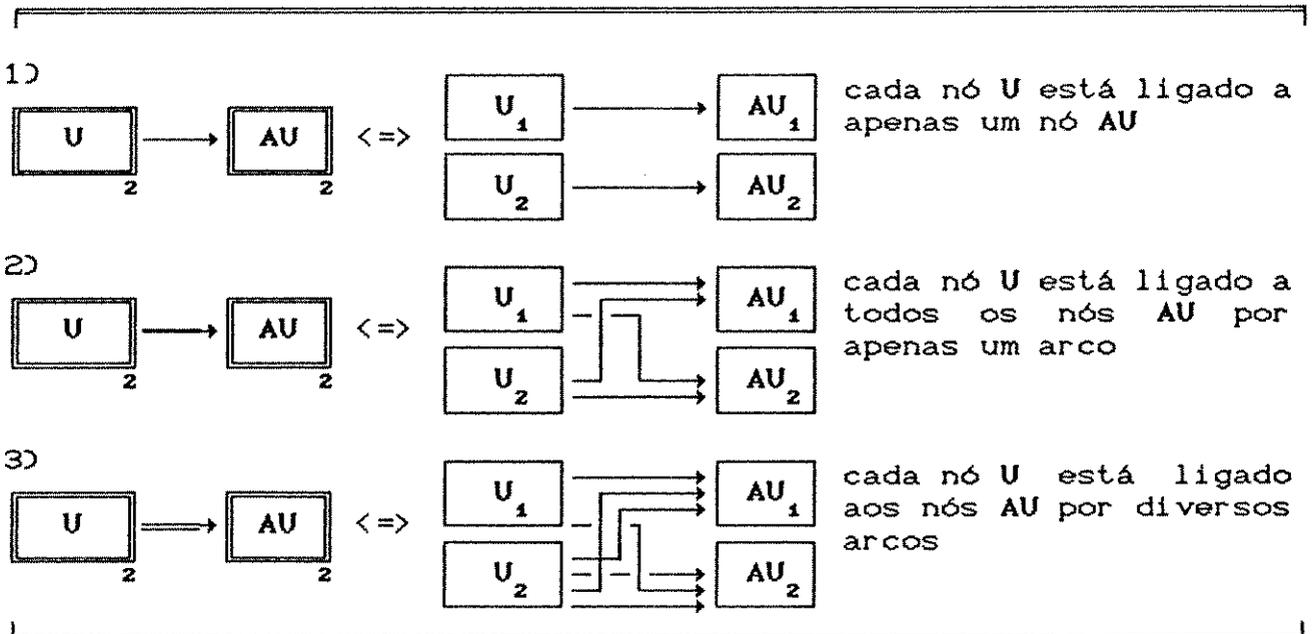
Para representar os arcos que ligam as classes entre si definiremos os seguintes tipos de arcos:

- linha simples (\longrightarrow) para representar fluxo único entre dois nós;
- linha dobrada (\longmapsto) para representar fluxo combinatório entre nós
- linha dupla (\Longrightarrow) para representar fluxos não convencionais.

Tanto a definição de classe de nós quanto as diferentes representações de arcos, visam diminuir e simplificar a apresentação da rede em estudo.

As situações possíveis para as combinações das notações expostas acima são mostradas a seguir:

FIGURA I.3 Exemplos da representação adotada.



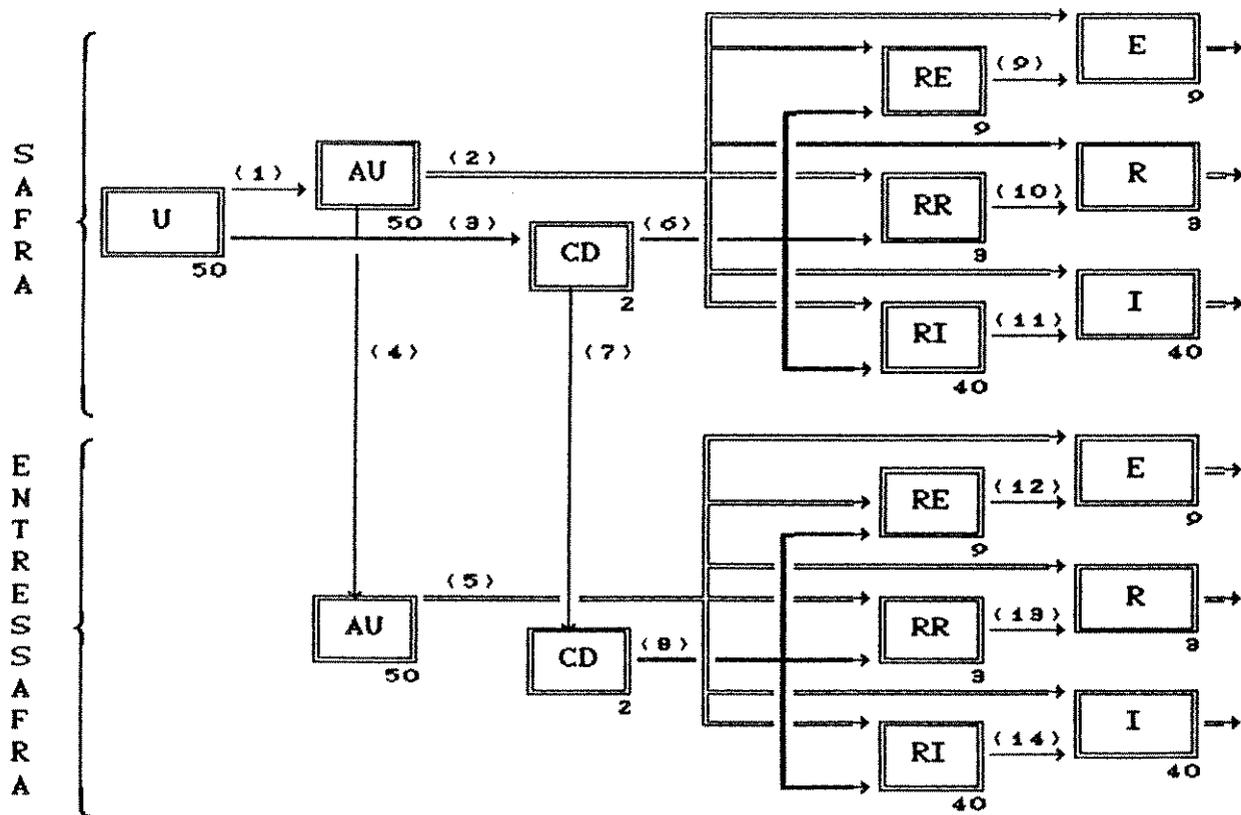
I.5 Descrição do fluxo dos produtos na RDA.

Os elementos que compõem o sistema, descrito em I.2, estão interligados pela malha rodoviária, que pode ser representada por um grafo como o descrito na figura a seguir.

A RDA será apresentada em duas partes, figuras I.4 e I.5, onde a primeira, a I.4, está relacionada apenas ao problema de decisão do melhor sistema de distribuição entre usinas (U) e clientes diretos (E, R e I) (descrito em III.2) e a segunda, figura I.5, faz, junto com a I.4, parte do primeiro problema que é o de localização de instalações industriais intermediárias.

A primeira parte da RDA, esquematizada a seguir, tem a numeração dos arcos entre parênteses e a quantidade de instalações que cada classe de nós representa abaixo do canto inferior direito dos nós :

FIGURA I.4 Diagrama da RDA com representação adotada, parte 1



O açúcar produzido na safra pelas usinas (U) segue em sacos, em containeres ou a granel para armazenagem ou movimentação em seus respectivos armazéns (AU) (arco 1) ou nas centrais de distribuição (CD) (arco 3).

O açúcar que chega aos armazéns (AU) pode ser imediatamente enviado para os clientes (E, R, ou I) (arco 2) ou, após ser armazenado (arco 4), ser enviado no período seguinte (arco 5). Se o açúcar estiver a granel, ele será enviado às respectivas instalações de recepção do granel (RE, RR e RI).

As centrais de distribuição (CD) ainda não existem e são uma alternativa a ser estudada com as funções de um "super-armazém", como foi descrito em I.2.3. O açúcar a granel que chegasse até elas teria os mesmos destinos (E, R, ou I) daqueles já expostos para os armazéns (AU) (arcos 6, 7 e 8).

As empacotadoras (E) recebem apenas o açúcar-produto em saco novo, em container e/ou a granel (arcos 2 e 6 na safra, e 5 e 8 na entressafra) com a qualidade exigida, ou seja, devidamente armazenado e transportado. Deverá ser construída uma instalação (RE) para receber adequadamente o produto e encaminhá-lo ao processo (arcos 9 e 12), caso o transporte seja a granel.

As refinarias (R) recebem qualquer tipo de açúcar (arcos 2, 5, 6 e 8) sob as formas de saco, em container e/ou a granel, mas todo o açúcar "standard" deve ser enviado a elas. Também deverá ser construída uma instalação (RR) para receber adequadamente o produto e encaminhá-lo ao processo (arcos 10 e 13), caso o transporte seja a granel.

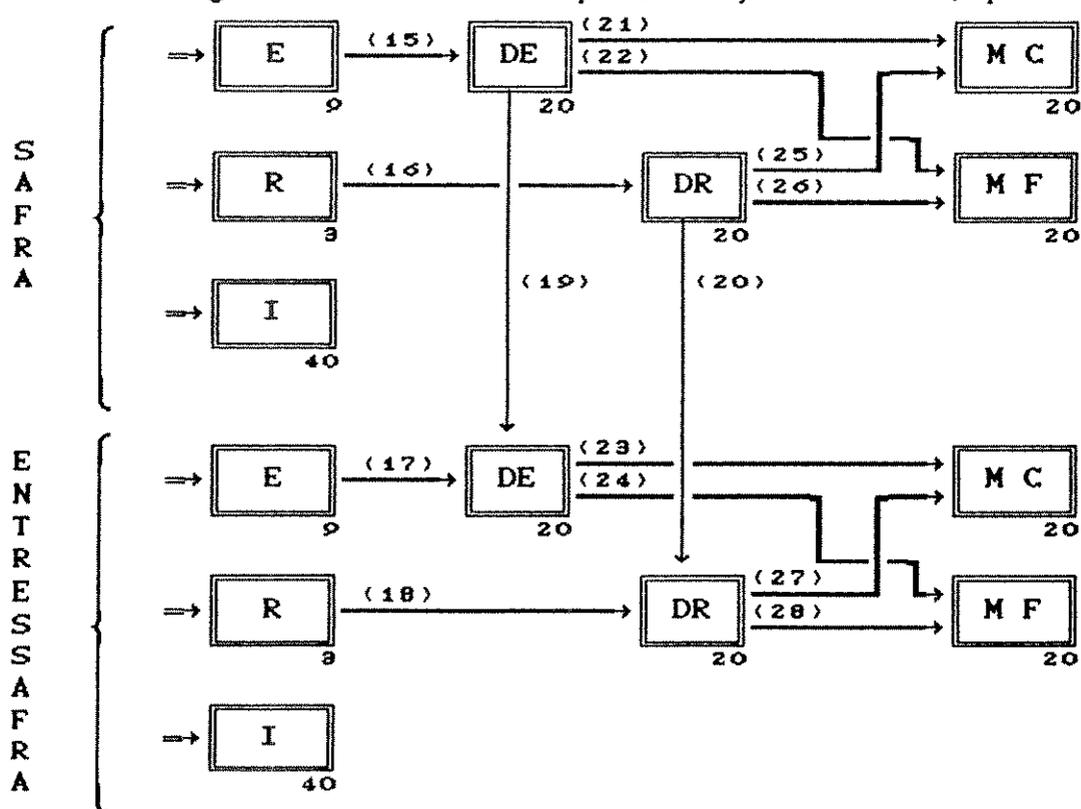
As indústrias (I), assim como as empacotadoras, recebem apenas açúcar-produto (Carcos 2, 5, 6 e 8) sob as formas de saco, em container e/ou a granel com a qualidade exigida, mas não necessariamente em saco novo. Consideraremos que será construída uma instalação (RI) para receber adequadamente o produto da região (Carcos 11 e 14), caso o transporte seja a granel.

As indústrias (I) são o destino final.

Todo o transporte utilizado no trecho compreendido entre as usinas (U) e as empacotadoras (E), refinarias (R) e indústrias (I) é o de abastecimento.

As alternativas de unitização e transporte consideradas mais viáveis para o trecho acima (U, E, R e I), são mostradas em III.2.1., onde tratamos também do controle do número de viagens de cada embalagem.

FIGURA 1.5 Diagrama da RDA com representação adotada, parte 2



Uma vez processado, o açúcar segue para o destino final como mostra a figura I.5.

Os depósitos (D) recebem os produtos das empacotadoras (E) e refinarias (R) (Carcos 15 a 18) para armazenagem (Carcos 19 e 20) ou para satisfazer as demandas dos mercados CIF (MC) e FOB (MF) (Carcos 21 a 28).

O frete de transferência é utilizado entre as empacotadoras (E), refinarias (R) e os depósitos (D). Consideramos que não existe realocação de produtos entre depósitos.

Os mercados CIF para refinado e empacotado (MCR e MCE) recebem o produto pelo frete de distribuição, que é normalmente mais caro que o de transferência.

Duas situações podem ocorrer para os mercados FOB : na primeira, o mercado retira o produto do depósito da região correspondente acarretando apenas em um custo de movimentação. Na segunda situação, o mercado recebe o produto de outra região com um custo de transferência. Consideraremos neste caso que um comerciante com um depósito próprio, por exemplo, receberá um desconto de frete como uma vantagem comercial adicional, por ter adquirido uma grande quantidade de açúcar.

I.6 Descrição dos problemas.

A cooperativa tem três questões a serem analisadas, cuja descrição expomos a seguir :

□ Qual a configuração, localização e dimensões, das instalações intermediárias mais adequada ?

A cooperativa atualmente é composta de 50 usinas, 6 empacotadoras, 3 refinarias e 10 depósitos. Cada empacotadora e cada refinaria possui seu depósito anexo que, somados aos outros 10, perfazem 18 depósitos porque um deles é comum a uma refinaria e a uma empacotadora.

O mercado consumidor dos dois produtos (açúcar cristal e amorfo) está dividido em 250 zonas de comercialização para cada um dos três segmentos do mercado (cristal empacotado, amorfo refinado e venda direta sem empacotar).

Alguns aspectos da RDA influenciaram na análise da configuração, localização e dimensionamento das instalações intermediárias. São eles :

- existiam clientes cadastrados em uma zona que preferiam retirar o produto em outra, mais distante, porque obtinham descontos significativos ("frete de retorno");
- a malha rodoviária não é retangular e, além disso, a presença de acidentes geográficos em alguns trechos, por exemplo, a serra, inviabilizava o uso de distâncias euclidianas;
- o número de clientes, mais de 10000, distribuídos em 250 zonas de comercialização, tornavam o problema grande demais em termos absolutos de distâncias, custos e alternativas de transporte;
- três outras cidades eram cogitadas para instalação de empacotadoras por estarem melhor localizadas geograficamente.

□ As centrais de distribuição (CD) são viáveis ?

As maiores vantagens das centrais de distribuição (CD) seriam a diminuição do esforço de coordenação de abastecimento e de

manutenção do nível de estocagem, a agilização do transporte e a possível redução dos custos devido a economias de escala.

Além disso, dois locais com características geográficas adequadas precisavam ser avaliados.

□ Qual a forma de unitização mais adequada ?

A forma de unitização mais utilizada é a sacaria. Segundo a cooperativa, o granel e o container, que respondem por 20% do transporte, agilizam o fluxo com a correspondente redução de custos.

Nesta questão, além da decisão de implantar uma alternativa de transporte, devemos responder a outras questões como : quais os limites da situação proposta, isto é, de que maneira fatores como o custo da mão-de-obra e os custos de investimentos em novas tecnologias afetam o problema; se seria possível adotar uma alternativa parcial, onde diferentes alternativas de transporte do açúcar pudessem coexistir.

A partir do exposto, podemos verificar que somente a primeira questão está relacionada com toda a rede. As outras estão relacionadas com o trecho compreendido entre as usinas (U) e as empacotadoras (E), refinarias (R) e indústrias (I). Além disso, a primeira questão é prioritária sobre as outras, porque define a existência das instalações intermediárias.

Definiremos duas formulações de problemas baseado no escopo das questões a serem respondidas : a primeira inclui toda a RDA, resolvendo a primeira questão e é um problema de localização capacitado, onde a maior parte das instalações já existem e as alternativas de instalações possíveis serão incluídas. A segunda, que responde às segunda e terceira questões, é um problema de localização capacitado dinâmico, onde a decisão de implantar alguma alternativa implica em localizar e dimensionar as instalações adequadas.

CAPÍTULO II - PROBLEMAS DE LOCALIZAÇÃO DE INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS (PLI) : UM BREVE RETROSPECTO.

A preocupação com "Problemas de Localização de Instalações Industriais - PLI¹" datam do início do século XX, quando Weber(1909) formalizou o problema de localizar uma fábrica com o objetivo de minimizar os custos de transporte em relação a três pontos definidos, o de dois fornecedores e o de um consumidor (França(1979)).

Esta classe de problemas tem sido largamente estudada devido ao seu interesse estratégico. Na literatura é encontrada sob várias denominações, quase sempre acompanhadas pela palavra "localização". Seu nome deriva da analogia com problemas de decisão do local de implantação de instalações produtoras e/ou de serviços, de forma a minimizar os custos de implantação e distribuição (Krarup e Pruzan(1983)).

A decisão do local onde instalar fábricas, escolas e/ou centrais de distribuição são exemplos de problemas de localização.

O retrospecto apresentado a seguir enfoca três aspectos :

- Classificação e apresentação de alguns modelos existentes;
- Apresentação de algumas metodologias existentes;
- Breve histórico através de uma "árvore genealógica" obedecendo ao eixo temporal.

Deve-se ressaltar que não é objetivo do trabalho apresentar uma extensa e completa exposição dos itens acima, mas fornecer ao leitor dados úteis na compreensão do modelo e metodologia adotados na resolução do problema abordado.

¹ Vários autores, França(1979) e Flores(1985) por exemplo, utilizam o nome "Problemas de Localização de Armazéns" devido à aplicação mais específica, para armazéns de produtos agrícolas e/ou centrais de distribuição.

A fim de generalizar, usaremos "unidade" ou "instalação" como sendo qualquer tipo de instalação industrial a ser localizada.

II.1 Classificação e apresentação de alguns modelos existentes

Desde sua primeira formulação, o problema de localização tem sido cada vez mais detalhado, de forma a incluir as características inerentes a cada situação estudada. Aikens(1985) faz uma sinopse de modelos disponíveis enfatizando as diferenças de formulação e as variações incorporadas a estes. A sua classificação estende àquela feita por França(1979), sendo ambas, entretanto, sob nosso ponto de vista, complementares.

Em França(1979), os problemas de localização são qualificados como *contínuos*, quando houvesse um espaço infinito de soluções como, por exemplo, em um plano, e *discretos*, quando o local para instalação de unidades fosse escolhido a partir de um conjunto de locais potencialmente possíveis como, por exemplo, em cidades de uma região ou ao longo de uma rodovia. Os problemas discretos foram subdivididos em dois outros : *minimax*, quando o objetivo é minimizar a maior distância entre a demanda e o ponto de serviço (e.g. localizar uma instalação para o corpo de bombeiros); e *minisoma* quando deseja-se minimizar a soma das distâncias² percorridas (como, por exemplo, a instalação de uma central de correios).

Os problemas descritos a seguir dizem respeito àqueles classificados como *discretos* e *minisoma*, considerando que desejamos minimizar os custos totais de transporte, movimentação e de investimentos. Em Aikens(1985), onde todos os modelos apresentados

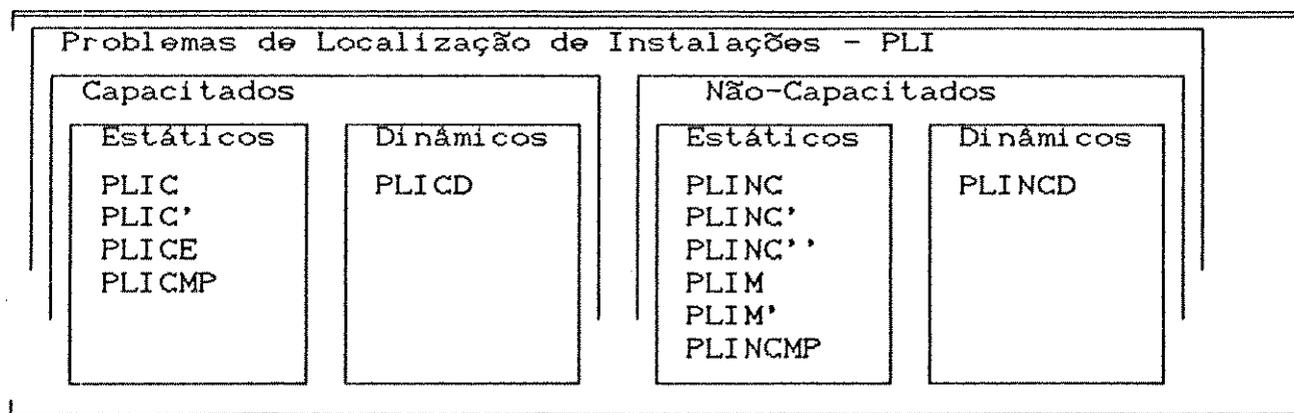
² O termo "distância" deve ser entendido aqui de uma forma mais ampla: - distância ponderada - uma vez que a menor distância para localizar, por exemplo, um hospital, pode resultar em um local de difícil acesso(Morris e Norback(1983)). Os fatores de ponderação seriam de natureza geográfica, econômica e/ou temporais, entre outros.

Esta observação é importante para o modelamento do problema, como veremos adiante.

estão na classe citada, encontramos ainda uma classificação por características de cada modelo. Apresentaremos apenas os modelos que interessam ao nosso estudo e, além disso, a sua ordem procurará mostrar a evolução e sofisticação destes modelos.

Construímos um esquema que contém a denominação dos modelos utilizados neste trabalho e, além disso, destacamos as suas posições em relação a dois critérios que consideramos mais importantes : a limitação das instalações e a influência do fator tempo, denominados de capacitação e dinâmica dos problemas, respectivamente.

FIGURA II.1 Modelos classificados por capacitação e dinâmica



As formulações dos modelos acima encontram-se no anexo A e descreveremos neste capítulo apenas as suas características principais. As três primeiras letras referem-se a "Problemas de Localização de Instalações".

A formulação mais simples do problema, "Problema de Localização de Instalações Não Capacitadas" - PLINC, é a seguinte :

	$\text{Min } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{i \in I} F_i \cdot z_i \quad (1)$
(PLINC)	$\text{s. a. } \sum_{i \in I} x_{ij} = 1, \quad j \in J \quad (2)$
	$x_{ij} \leq z_i, \quad i \in I, \quad j \in J \quad (3)$
	$x_{ij} \geq 0, \quad i \in I, \quad j \in J \quad (4)$
	$z_i \in (0,1), \quad i \in I \quad (5)$

onde:

- x_{ij} é a fração da demanda do cliente j satisfeita pela instalação i ;
 z_i é a variável de decisão de implantação de i que assume o valor 1, se for implantada, e 0, caso contrário(5);
 C_{ij} são os custos de produção e distribuição para suprir toda a demanda do cliente j a partir da instalação i ;
 F_i são os custos fixos de instalar i ;
 I, J são os conjuntos de locais candidatos à instalação de i e o conjunto de áreas de demanda dos clientes j , respectivamente.
-

No modelo acima, as restrições (2) asseguram que a demanda é satisfeita apenas pelas unidades implantadas (3). Diversos autores trabalharam neste modelo, entre os quais destacamos : Kuehn e Hamburger(1963), Feldman(1966), Efrøymson e Ray(1966), Spielberg(1969) e Khumawala(1972)).

Existem duas outras formas de representar este modelo : uma delas considera a variável x_{ij} como o fluxo de unidades do produto, ao invés de fração da demanda, modificando as equações (1),(2) e (3) e mantendo inalteradas (4) e (5) (PLINC'). A outra forma (PLINC'') utiliza a modificação anterior e desdobra os custos variáveis em custos de produção e de distribuição na função objetivo.

A maior desvantagem deste modelo, para o nosso caso, é a não limitação das instalações, além de não permitir avaliar o efeito das economias de escala para diversas capacidades das instalações.

Uma variante do problema anterior é o "Problema de Localização de Instalações Capacitadas" - PLIC, onde são considerados limites superiores para as capacidades das instalações.

A diferença entre os modelos PLINC e PLIC é dado pela equação que assegura que a demanda seja satisfeita apenas pelas unidades abertas, respeitando-se as capacidades das mesmas (ver equação 12 do anexo A).

Assim como no primeiro modelo, o PLIC possui outra forma de apresentação, considerando x_{ij} como fluxo de produtos. Akinc e Khumawala(1977), Dearing & Newruck(1979), Garfinkel e Rao(1971) e Nauss(1978) trabalharam nesta sub-classe de problemas .

Geoffrion & McBride(1978) propuseram uma generalização deste problema (PLIC') permitindo, além dos limites superiores às capacidades das instalações, limites inferiores e restrições lineares adicionais às variáveis x_{ij} e z_i , o que possibilitou representar situações particulares do problema (ver restrições adicionais no Salkin(1975)). As restrições adicionais serviriam para representar, por exemplo, uma quantidade mínima de instalações abertas.

Este modelo também não é adequado à RDA porque não considera as instalações intermediárias e nem a sazonalidade da produção.

Uma variação do (PLIC), o modelo estocástico, considera as demandas como variáveis aleatórias ("Problema de Localização de Instalações Capacitado Estocástico" - PLICE), mas Aikens(1985) cita que, na maioria das aplicações, o esforço de cálculo de uma função probabilística, que representa a demanda, é superior aos erros introduzidos pela estimativa de demanda determinística.

Acrescentando outro aspecto ao problema, diferente da limitação às capacidades das instalações, o "Problema de Localização das Instalações Modulares" (PLIM), permite a decisão de instalar, simultaneamente ou não, unidades de produção e de armazenagem, ou ainda, unidades de armazenagem de diferentes tamanhos.

A primeira formulação, proposta por Kaufman, Eede e Hansen(1977), adaptava a formulação do (PLINC) para incluir instalações modulares (PLIM no sentido de se ter dois níveis de distribuição (produção e armazenamento).

Por outro lado, a formulação de Tcha e Lee (1984) generaliza o modelo proposto por Kaufman *et alli* e utiliza uma abordagem de fluxo em redes (PLIM').

Outro aspecto estudado diz respeito ao número de tipos de produtos que circulam na rede de distribuição. O Problema de Localização de Instalações Não Capacitadas com Múltiplos Produtos (PLINCMP) foi trabalhado por Warszawski(1973), Bilde & Krarup(1977), Erlenkotter(1978), Karkazis & Boffey(1981), Khumawala & Neebe(1978) e Neebe & Khumawala(1981). As restrições (34) garantem o suprimento da demanda apenas pelas unidades abertas (36). As instalações produzem apenas um tipo de produto cada uma (35). A desvantagem deste modelo deve-se à sua pouca aplicabilidade, já que a produção é enviada diretamente aos clientes e não há limitantes da capacidade operacional.

Esses fatores, envio de produção diretamente aos clientes e não limitação da capacidade operacional, já haviam sido evitados por Elson(1972) ao formular o problema capacitado (PLICMP). Tapiero(1972) também considerava múltiplos produtos ao longo do tempo em um problema de transporte. Assad(1978) apresenta modelos e metodologias para problemas com fluxos lineares e não-lineares.

Uma variação do modelo proposto por Elson é formulada por Geoffrion & Graves(1974), onde a variável do fluxo dos produtos indica tanto a origem quanto o destino (indexação quadrúpla onde os índices referem-se a origem, instalação intermediária, destino e produto). Esta modificação é interessante para os problemas onde existam restrições quanto à origem dos produtos ou ao tempo do trânsito do produto.

Em outra formulação, (PLICMP'), Geoffrion-Graves-Lee(1978) refinaram o modelo anterior, de forma a permitir a representação de situações mais realistas, possibilitando que, por exemplo:

- a origem única de produtos seja imposta a apenas alguns itens similares;
- a violação das capacidades dos armazéns seja permitida, mas penalizada no custo;
- os limites inferiores e superiores nas capacidades fossem usados para controlar parcialmente as economias de escala e
- existam custos diferenciados de passagem de cada produto por uma determinada unidade de distribuição.

Outros modelos disponíveis consideram o fator tempo como um componente das variáveis para o que denominamos de "Problemas de Localização de Instalações Dinâmicos", que podem ser capacitados ou não, respectivamente PLICD e PLINCD. Khumawala e Whybark(1976), Van Roy e Erlenkotter(1982) trabalharam no modelo não-capacitado, enquanto Klincewicz, Luss e Yu(1988) generalizaram o modelo proposto por Klincewicz(1985), que era semelhante ao PLICMP, para obter um modelo capacitado dinâmico, denominado de modelo de planejamento de capacidade. As características de tais modelos de planejamento podem ser encontradas com maiores detalhes em Luss(1982) e Lee e Luss(1987). Um modelo onde o sistema de distribuição inclui os problemas de roteamento de veículos pode ser encontrado, por exemplo, em Bookbinder e Reece(1988).

Os modelos de PLI são objeto de críticas quanto à representação da realidade a partir do trabalho de Kuehn e Hamburger(1963). Shycom e Maffei(1963), por exemplo, sugeriram uma alteração nos custos de transporte propostos por Kuehn e Hamburger(1963), de maneira a permitir custos diferenciados por rotas, espelhando melhor a realidade da política de frete adotada nos EUA. Ventura(1982) propõe uma função de custos de transporte, onde o frete é uma função do volume transportado. Outros autores ainda sugerem uma curva de custos côncava ou, pelo menos, linear por partes.

Novaes(1988) analisa, além dos custos, as vantagens e desvantagens do uso de distâncias retangulares e euclidianas. Lyra(1984) considera as perdas ao longo do trajeto. Tanto Geoffrion e Graves(1974) como Garcia-Diaz(1983) ressaltam a necessidade de se estudar vários cenários ao se trabalhar com estes problemas.

A partir do que foi exposto, consideraremos um modelo intermediário com algumas características dos que foram apresentados como, por exemplo, possibilidade de limitação mínima e máxima da capacidade, restrições adicionais e capacidade de expansão em módulos. Acrescentaremos novas características para satisfazer às particularidades dos problemas como, por exemplo, a de subdividir as demandas em dois mercados distintos (CIF e FOB).

II.2 Retrospecto de algumas metodologias existentes.

As metodologias utilizadas para resolver os problemas de localização podem, a grosso modo, ser agrupadas em técnicas heurísticas³, em exatas e em mistas.

Um dos primeiros algoritmos heurísticos contemporâneos propostos foi o de Kuehn & Hamburger(1963), que se tornou referência para vários outros subsequentes, fossem eles heurísticos ou exatos. O algoritmo tinha 2 (duas) etapas : a primeira acrescentava instalações à rede de distribuição, uma de cada vez, enquanto não aumentasse o custo global; a segunda etapa fazia a substituição de algumas unidades (não instaladas por instaladas) na rede, visando diminuir o custo global.

³ Palavra grega que indica "qualquer regra ou informação que sirva para diminuir o espaço de busca de uma solução". Graham(1979) cita que "elas (as heurísticas) aplicam-se a situações específicas e são aconselháveis, mas ao contrário dos algoritmos, não garantem nenhum sucesso" (pág.21).

Feldman e outros(1966) propuseram então uma extensão desse trabalho através de um algoritmo inverso, ou seja, com todas as unidades instaladas, para depois retirá-las uma a uma, de forma a reduzir o custo global. Eles também propuseram uma função linear por partes para os custos fixos das unidades, simplificando a curva de custos côncava onde são consideradas as economias de escala.

Entre as metodologias exatas, ocorrem aquelas utilizadas em programação inteira como "método de partição de Benders", "método de Balas", "relaxação lagrangeana" e "branch-and-bound" (BB)⁴. Bitran e outros(1981), Christofides e Beasley(1983), Baker(1986) e Beasley(1988) são alguns autores que trabalharam com relaxação lagrangeana.

As técnicas mistas, que envolvem heurísticas e programação matemática, têm sido as mais utilizadas. Efraymson & Ray(1966), por exemplo, usam "branch-and-bound" considerando os conjuntos K_0 , K_1 , K_2 , de variáveis 0-1, com valores 0, 1 e indeterminado, respectivamente, simplificando o espaço de busca com as três regras delta a seguir:

1) Se $\sum_{j \in P_i} \Delta_{ij} - f_i > 0$, então $y_i = 1$,

onde $\Delta_{ij} = \min(\max(c_{kj} - c_{ij}, 0))$, $i \in K_2$, $j \in P_i$, $k \in K_1 \cup K_2$, $k \in N_j$.

A regra acima diz que :

se - houver uma instalação i , ainda não decidida ($i \in K_2$),

- que pode atender o cliente j ,

- com um custo variável menor que os de todas as unidades que podem atender j e

- cujo custo fixo é menor do que a economia (Δ_{ij}) proporcionada pela substituição dos fluxos para atender j pela instalação i ,

⁴ Os métodos de Balas e de "Branch-and-Bound" podem ser encontrados com mais detalhes em Salkin(1975), enquanto os métodos de partição de Benders, relaxação lagrangeana e outros de decomposição podem ser encontrados em Lasdon(1970).

então a instalação i deve ser implantada para qualquer solução parcial gerada pelo "branch-and-bound" a partir desta avaliação;

2) Se $\min_{k \in K_1} (c_{kj} - c_{ij}) < 0$, $i \in K_2$, $j \in P_i$,

A regra acima diz que :

se - houver uma instalação i , ainda não decidida ($i \in K_2$),

- cujo custo variável é maior que o de uma instalação k já decidida ($k \in K_1$) que pode atender j ,

então j é excluído do conjunto de alternativas de atendimento de i .

Se todas as opções de atender clientes da instalação i forem eliminadas, então esta unidade será definitivamente eliminada para todos os ramos do "branch-and-bound" gerados a partir desta avaliação;

3) Se $\sum_{j \in P_i} \Delta_{ij} - f_i < 0$, então $y_i = 0$,

onde $\Delta_{ij} = \min \langle \max \langle c_{kj} - c_{ij}, 0 \rangle \rangle$, $i \in K_2$, $j \in P_i$, $k \in K_1$, $k \in N_j$.

A regra acima diz que :

se - houver uma instalação i , não decidida ($i \in K_2$),

- cujo custo fixo não é menor do que a economia (Δ_{ij}) proporcionada pela substituição dos fluxos para atender j a partir de i ,

então ela não deve ser instalada ($i \in K_0$) para qualquer ramo do "branch-and-bound" gerado a partir dela.

Khumawala(1972) enumerou oito regras para decisão de ramificação que agilizassem o "branch-and-bound" : Maior e Menor Delta, Maior e Menor Omega, Maior e Menor Ipsilon e Maior e Menor Demandas. Estas regras foram aplicadas tanto para o modelo PLINC como para o PLIC (este último em Akinc e Khumawala(1977)).

Utilizaremos uma observação de Ventura(1982): existe uma tendência de que instalações vizinhas a uma instalação fechada absorvam a demanda daquela região, como base para uma heurística que usaremos para reduzir o porte do problema.

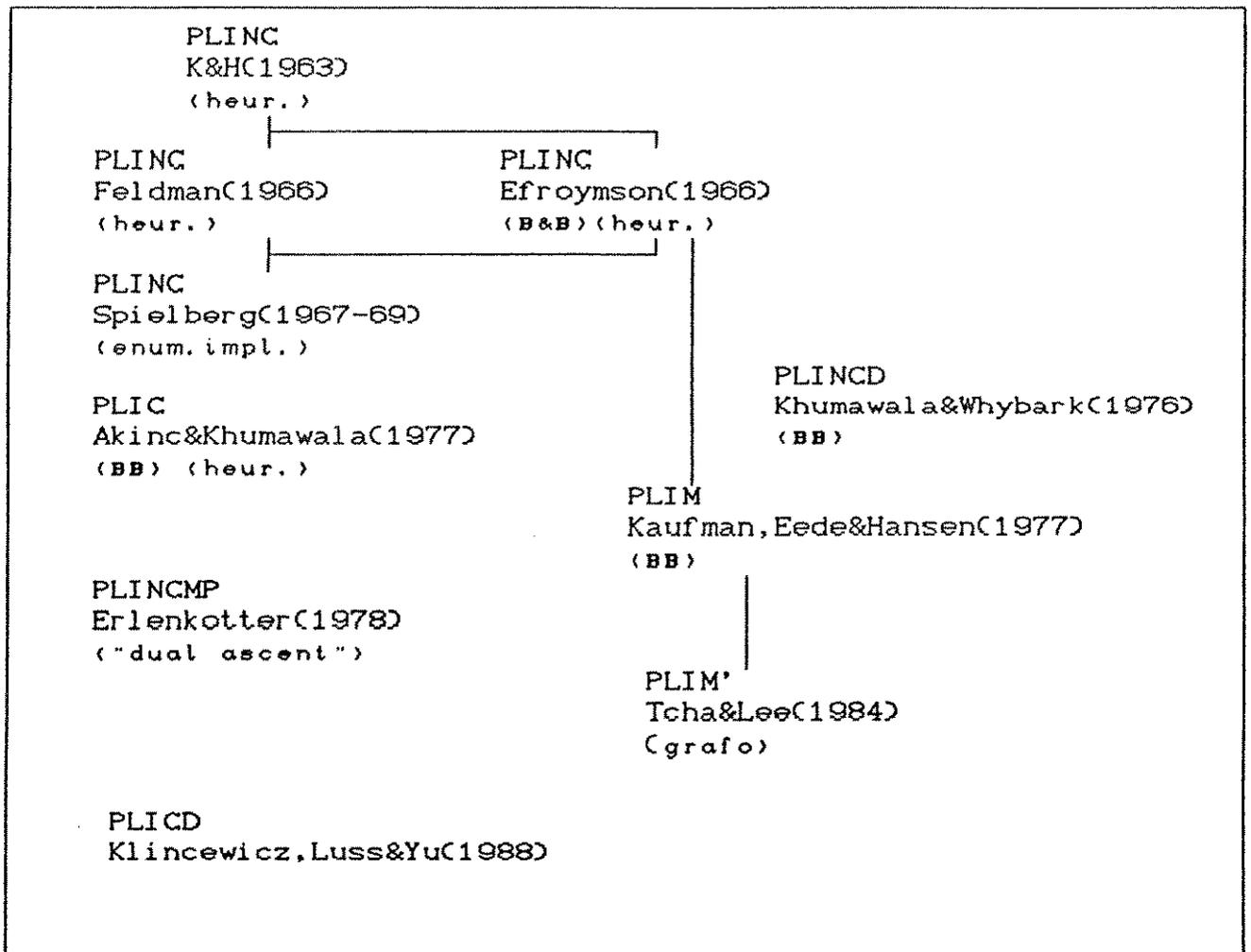
Existem outras regras que podem ser encontradas na literatura e em aplicativos de programação matemática como, por exemplo, o MPSX/MIP da IBM para computadores de grande porte. Crowder, Johnson e Padberg(1982), por exemplo, utilizam algumas destas regras e criam outras. O uso de aplicativos de programação matemática especializados têm se desenvolvido muito : Geoffrion, Graves e Lee(1978), Nakagawa(1984) e Xavier(1983) são alguns que trabalharam sobre esse desenvolvimento.

A disseminação do uso do microcomputador fez também com que surgissem vários aplicativos de programação matemática para computadores de uso pessoal, entre os quais podemos citar o módulo de pesquisa operacional do SAS Institute (para programação inteira, linear, não-linear, grafo, transporte e sequenciamento), o hiper-lindo (programação inteira, linear e não-linear) e o OMNI (que é a versão atualizada e adaptada para micro do MPSX/MIP da IBM). Entretanto, Stadtler(1988) mostra que muitos aplicativos para microcomputadores apresentam problemas na resolução de situações que envolvam mais de 400 restrições. Outras observações sobre avaliações de aplicativos podem ser encontradas em Ashford e Daniel(1988).

II.3 Evolução dos modelos ao longo do tempo.

Os modelos evoluíram do caso mais simples, PLINC, aos mais complexos, como o de planejamento de capacidade, PLICD, em um período curto, em menos de 30 anos. A figura a seguir mostra a evolução de alguns modelos e a ligação entre eles mostra quando o modelo foi uma consequência direta do modelo anterior. Entre parenteses encontra-se a técnica aplicada.

FIGURA II.2 Diagrama dos trabalhos e autores ao longo do tempo



CAPÍTULO III - DESCRIÇÃO DOS MODELOS PARA A RDA.

A existência de apenas dois produtos permitiu simplificar as formulações dos problemas da RDA, evitando o tratamento para problemas com multifluxo. Outras simplificações foram feitas para reduzir o porte do problema sem prejuízo do resultado.

Doravante denominaremos de primeira formulação o modelo que descreve o problema I, localização de instalações industriais intermediárias (empacotadoras(E), refinarias(R) e depósitos(D)) -exposto no capítulo I, e de segunda formulação o modelo que descreve o problema II, de decisão do melhor sistema de distribuição no trecho entre as usinas (U) e as empacotadoras (E), refinarias (R) e os mercados de indústrias e comércio (I).

Faremos algumas simplificações e assumiremos algumas situações padrões, com a finalidade de não permitir uma "explosão" no número de variáveis e restrições de cada uma das formulações. Algumas explicações do porquê das simplificações e situações foram feitas no capítulo I, onde a rede e seus problemas são apresentados.

Para cada formulação apresentaremos os objetivos, as condições de contorno, a representação gráfica, a formulação e aspectos operacionais.

Apresentamos também, no final do capítulo, as duas regras utilizadas para reduzir o porte dos problemas. As regras utilizam conhecimentos sobre fluxos e geografia dos problemas e alguns resultados da sua aplicação são antecipados.

III.1 Primeira formulação : Localização de instalações industriais intermediárias (empacotadoras, refinarias e depósitos).

III.1.1. Objetivos e condições de contorno do problema I

O objetivo deste problema é obter a melhor configuração da RDA, a de menor custo, de forma a satisfazer a demanda. Para isto assumiremos algumas situações :

- a demanda dos mercados é uniformemente distribuída ao longo do ano porque não dispomos de uma série histórica confiável, apenas a demanda anual;
- as usinas (U) e os mercados (M e I) serão considerados fixos e a decisão recairá sobre as instalações industriais intermediárias (E, R e D);
- os armazéns de usina (AU) e as instalações para recepção a granel (RE, RR e RI) serão considerados anexos às suas instalações industriais (U, E, R, e I, respectivamente). Esta medida ajuda a reduzir o número de variáveis do problema e não afeta as decisões a serem tomadas;
- as centrais de distribuição (CD) serão desconsideradas nesta etapa porque não existem e sua viabilidade está relacionada à existência do granel. Reconsiderar-se-á esta situação em uma pós-otimização, caso as centrais sejam viáveis no outro problema;
- as transferências de estoque do produto de um ano para o outro serão tomadas como iguais;
- a única forma de unitização é o saco e
- consideraremos apenas um período, o equivalente ao ano-safra.

Para adequar o problema à realidade, adotamos as seguintes medidas para a coleta dos dados utilizados :

- a unidade das variáveis de fluxo é o saco;
- as demandas e produções são os totais anuais;
- os mercados estarão divididos em CIF e FOB;
- os custos dos arcos são compostos de três parcelas : movimentação na origem, transporte e movimentação no destino;
- os custos de movimentação foram obtidos a partir do rateio dos custos dos recursos utilizados pela capacidade operacional;
- os fretes são três (abastecimento, transferência e distribuição) e dependem do trecho da rede;
- os fretes são admitidos também lineares por partes, com dois segmentos de reta;
- as distâncias para o cálculo dos fretes são reais, ou estimadas através da soma das medições em um mapa, dos trechos de rodovia que ligam os nós;
- os custos fixos das instalações a serem avaliadas são compostos de três parcelas : imóveis, equipamentos e mão-de-obra fixa;
- os valores dos imóveis - avaliados pelo custo de locação - e dos equipamentos - avaliados pelo preço de novos - foram uniformemente anualizados;

III.1.2. Representação gráfica do modelo.

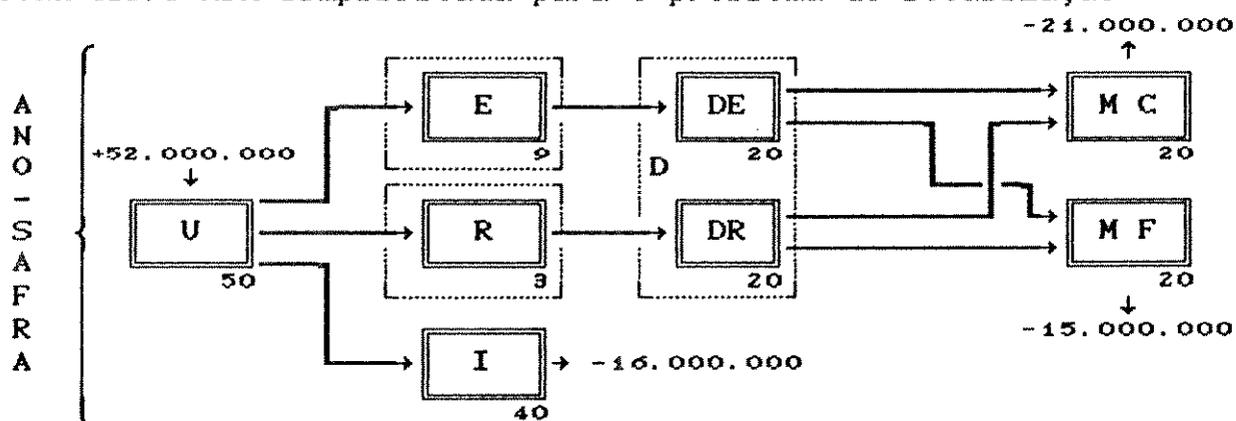
A representação deste modelo foi simplificada, em relação ao apresentado em I.5, em virtude do que foi exposto em III.1.1 acima (conforme figura III.1).

O modelo, sem as simplificações e considerando apenas o uso de saco como forma de unitização, contemplava 9150 variáveis, onde: 4440 variáveis representavam o fluxo de açúcar na safra e outras 4440 representavam a entressafra; 150 variáveis representavam o armazenamento nas 50 usinas do ano anterior para a safra, da safra para a entressafra e da entressafra para o ano seguinte; e 120

variáveis representavam o armazenamento nos 20 depósitos para os mesmos períodos. Em consequência das simplificações obtivemos uma redução do porte do problema de 9150 variáveis para 4440 (o que representa uma redução de 51,5%), permanecendo inalteradas as 32 variáveis de decisão (9E, 3R e 20D).

As classes de instalações industriais circundadas pelas linhas pontilhadas na figura III.1, empacotadoras (E), refinarias (R) e depósitos (D), representam as possíveis decisões que podem ser tomadas no âmbito do problema.

FIGURA III.1 RDA simplificada para o problema de localização



No caso dos depósitos, a decisão de instalar um depósito (D) implica em se ter espaço para o produto empacotado (DE) e para o refinado (DR). Será considerada uma capacidade global para o depósito (D), ficando livre a decisão sobre a parcela desse montante destinada ao empacotado e ao refinado.

As demandas dos mercados CIF e FOB (MC e MF, respectivamente) referem-se ao total de açúcar empacotado e refinado para cada um dos tipos de mercado.

III.1.3. Formulação do modelo adotado.

Considerando as variáveis e os parâmetros a seguir:

x_{ijp} é o número de unidades do produto p que sai de i para j ;

y_j é a variável de decisão de implantação da instalação j ;

N é o número total de instalações industriais e de locais de demanda (nós da rede);

c_{ijp} é o custo unitário do produto p que sai de i para j ;

F_j é o custo fixo de implantação da instalação j ;

S_i é a produção total da instalação i ;

$SCE)_i$, $S(R)_i$ são as produções parciais de i que podem ir para as empacotadoras e que devem ir para as refinarias, respectivamente;

D_j é a demanda total da instalação j ;

\underline{D}_j é a demanda mínima da instalação j ;

$DCE)_j$, $DXR)_j$ são as demandas parciais de j relacionadas com empacotado e com refinado, respectivamente;

P é o conjunto de produtos da rede;

$P(E)$, $P(R)$ são os conjuntos de produtos relacionados com empacotado e com refinado, respectivamente;

\bar{L}_j é a capacidade operacional da unidade j , no caso de empacotadoras e refinarias, ou de armazenagem, no caso de depósitos;

U , E , R , I , D , DE , DR , MC , MF são, respectivamente, os conjuntos de usinas, empacotadoras, refinarias, indústrias, depósitos, parte do depósito reservado para empacotado, parte do depósito reservado para refinado, mercado C.I.F. e mercado F.O.B.

A função objetivo do problema pode ser expressa assim:

$$\text{Min} \sum_{i \in N-M-I} \sum_{j \in N-U} \sum_{p \in P} c_{ijp} \cdot x_{ijp} + \sum_{j \in E,R,D} F_j \cdot y_j \quad (01)$$

onde a primeira somatória trata dos fluxos na RDA e a segunda trata das variáveis de decisão.

E as restrições do problema da seguinte forma:

1) Restrições de produção

$$\sum_{j \in E, R, I} x_{ijp} \leq S_{i,p}, \quad i \in U, p \in P \quad (02)$$

Cada um dos produtos tem uma produção definida (S). Como estamos trabalhando com dois produtos que têm destinos específicos e regime de produção uniforme, utilizaremos (02) na forma a seguir:

$$\sum_{j \in E, R, I} \sum_{p \in P} x_{ijp} \leq S_i, \quad i \in U \quad (03)$$

2) Restrições quanto ao açúcar enviado às empacotadoras (E)

$$\sum_{j \in E} \sum_{p \in P(E)} x_{ijp} \leq S(E)_i, \quad i \in U \quad (04)$$

Estas restrições (04) garantem que apenas o açúcar-produto em saco novo segue para as empacotadoras.

3) Restrições quanto ao açúcar enviado às refinarias (R)

$$\sum_{j \in R} \sum_{p \in P(R)} x_{ijp} \geq S(R)_i, \quad i \in U \quad (05)$$

Estas restrições (05) garantem que todo açúcar matéria-prima produzido siga somente para a refinaria, sem impedir que o açúcar produto tenha o mesmo destino, se necessário.

4) Restrições de transbordo

$$\sum_{i \in U} \sum_{p \in P(E)} x_{ijp} - \sum_{k \in DE} \sum_{p \in P(E)} x_{jkp} = 0, \quad j \in E \quad (06)$$

$$\sum_{i \in U} \sum_{p \in P} x_{ijp} - \sum_{k \in DR} \sum_{p \in P} x_{jkp} = 0, \quad j \in R \quad (07)$$

$$\sum_{i \in E} \sum_{p \in P(E)} x_{ijp} - \sum_{k \in MC, MF} \sum_{p \in P(E)} x_{jkp} = 0, \quad j \in DE \quad (08)$$

$$\sum_{i \in R} \sum_{p \in P} x_{ijp} - \sum_{k \in MC, MF} \sum_{p \in P} x_{jkp} = 0, \quad j \in DR \quad (09)$$

Estas restrições (06 a 09) garantem que nenhum produto, refinado ou empacotado, fique armazenado nas instalações

intermediárias (empacotadoras (E), refinarias (R), parcela do depósito para o empacotado (DE) e do depósito para o refinado (DR), respectivamente).

5) Restrições de demanda

$$\sum_{i \in DE} \sum_{p \in P(E)} x_{ijp} \geq DCE_j, \quad j \in MC \quad (10)$$

$$\sum_{i \in DE} \sum_{p \in P(E)} x_{ijp} \geq DCE_j, \quad j \in MF \quad (11)$$

$$\sum_{i \in DR} \sum_{p \in P} x_{ijp} \geq DCR_j, \quad j \in MC \quad (12)$$

$$\sum_{i \in DR} \sum_{p \in P} x_{ijp} \geq DCR_j, \quad j \in MF \quad (13)$$

$$\sum_{i \in U} \sum_{p \in P-P(R)} x_{ijp} \geq D_j, \quad j \in I \quad (14)$$

Estas restrições (10 a 14) garantem a demanda dos mercados que recebem o empacotado pela distribuidora da empresa (MCE), dos que retiram no depósito da empresa (MFE), dos que recebem o refinado pela distribuidora (MCR), dos que retiram o refinado na empresa (MFR), e dos que retiram o açúcar sem empacotar ou refinar na usina (I), respectivamente.

7) Restrições de decisão

$$\sum_{i \in U} \sum_{p \in P(E)} x_{ijp} \geq \underline{D}_j \cdot y_j, \quad j \in E \quad (15)$$

$$\sum_{i \in U} \sum_{p \in P} x_{ijp} \geq \underline{D}_j \cdot y_j, \quad j \in R \quad (16)$$

$$\sum_{i \in E} \sum_{p \in P(E)} x_{ijp} \geq \underline{D}_j \cdot y_j, \quad j \in DE \quad (17)$$

$$\sum_{i \in R} \sum_{p \in P} x_{ijp} \geq \underline{D}_j \cdot y_j, \quad j \in DR \quad (18)$$

$$\sum_{i \in U} \sum_{p \in P(E)} x_{ijp} \leq \bar{L}_j \cdot y_j, \quad j \in E \quad (19)$$

$$\sum_{i \in U} \sum_{p \in P} x_{ijp} \leq \bar{L}_j \cdot y_j, \quad j \in R \quad (20)$$

$$\sum_{i \in E, R} \sum_{p \in P} x_{ijp} \leq \bar{L}_j \cdot y_j, \quad j \in D \quad (21)$$

As quatro primeiras restrições (15 a 18) garantem que uma quantidade mínima de produto, açúcar refinado ou empacotado, passe pelas instalações intermediárias - empacotadoras (E), refinarias (R), parcela dos depósitos para empacotado (DE) ou para refinado (DR), respectivamente.

As outras restrições (19 a 21) garantem que os fluxos dos produtos não excedam a capacidade das instalações intermediárias (E, R e D), caso elas existam. O limite estabelecido para a capacidade dos depósitos (D) representa o teto para a soma das capacidades das parcelas dos depósitos para empacotado (DE) e refinado (DR).

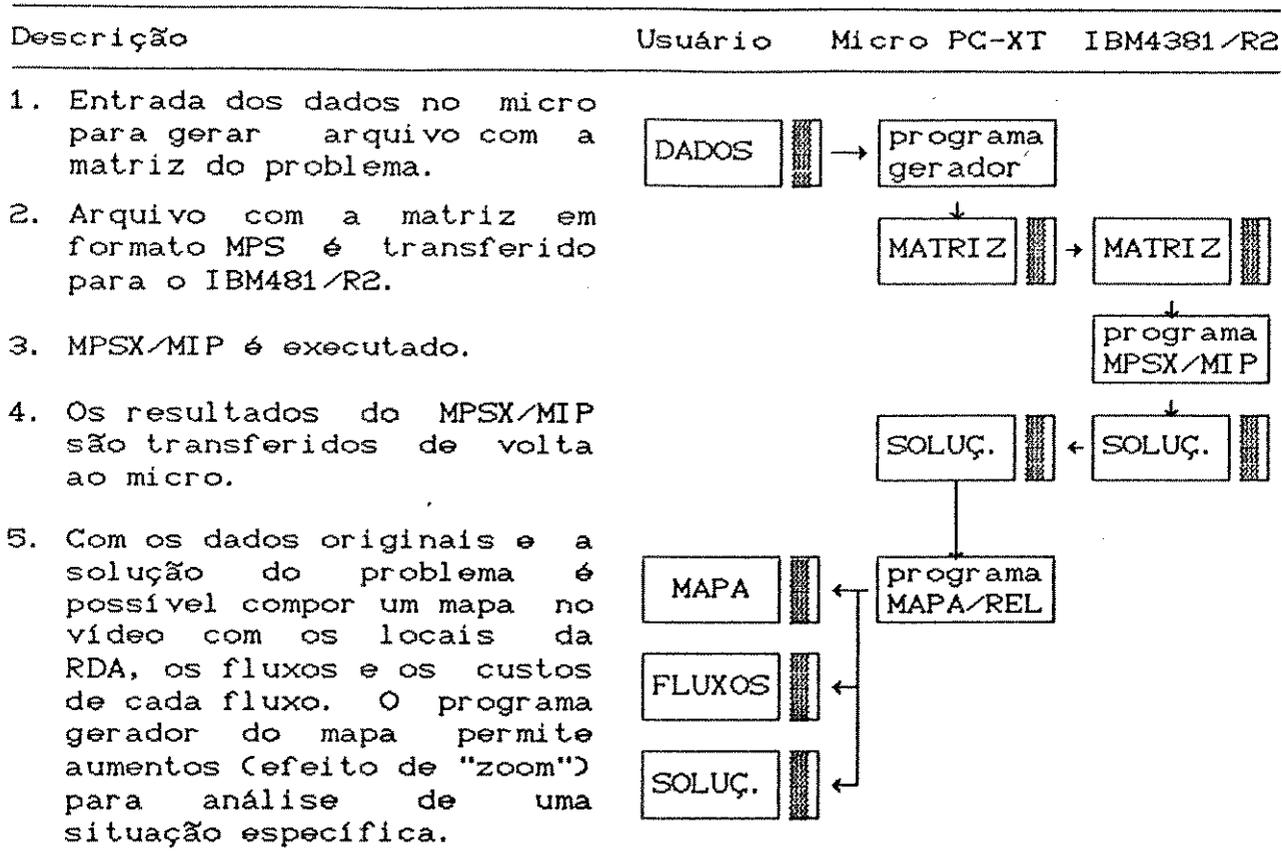
III.1.4. Aspectos operacionais e computacionais

O porte deste problema após as simplificações é uma matriz com 4472 variáveis (inclusive as 32 variáveis inteiras), 407 restrições (sendo 50 referente às usinas (U), 9 às empacotadoras (E), 3 às refinarias (R), 40 às regiões industriais (I), 40 aos depósitos parciais (DE e DR), 80 aos mercados de consumo parciais (MCE, MFE, MCR e MFR) e 185 às restrições adicionais) e uma densidade de 0,8%.

Os procedimentos para executar as rodadas procuraram compatibilizar a flexibilidade dos microcomputadores com a capacidade de processamento dos computadores de grande porte. O esquema abaixo mostra a seqüência de atividades de cada rodada envolvendo o usuário, o micro e o computador IBM4381/R2. Os dois símbolos do diagrama referem-se, respectivamente, a

dados e programas.

FIGURA III.2 Sequência de operações para as rodadas



As figuras III.3 e III.4 mostram, respectivamente, um exemplo de mapa com os fluxos finais e um exemplo de consulta dos valores dos fluxos e custos de uma instalação da RDA. O mapa é construído a partir dos dados de saída do MPSX/MIP e dos dados de localização geográfica de cada instalação.

FIGURA III.3 Exemplo do mapa com os fluxos finais.

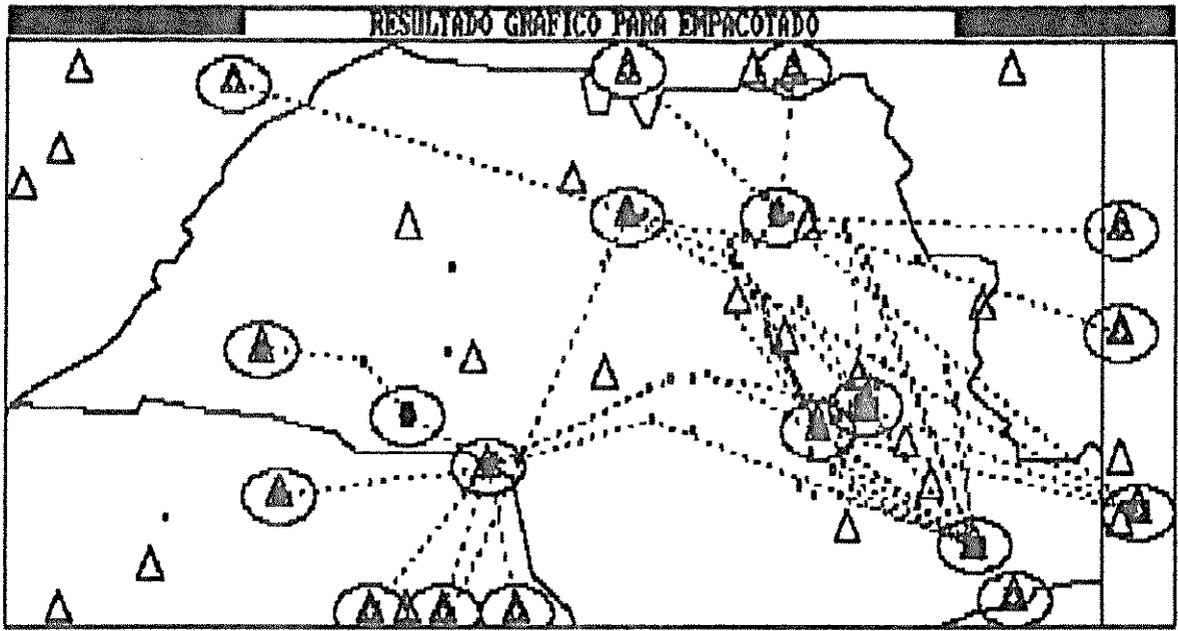
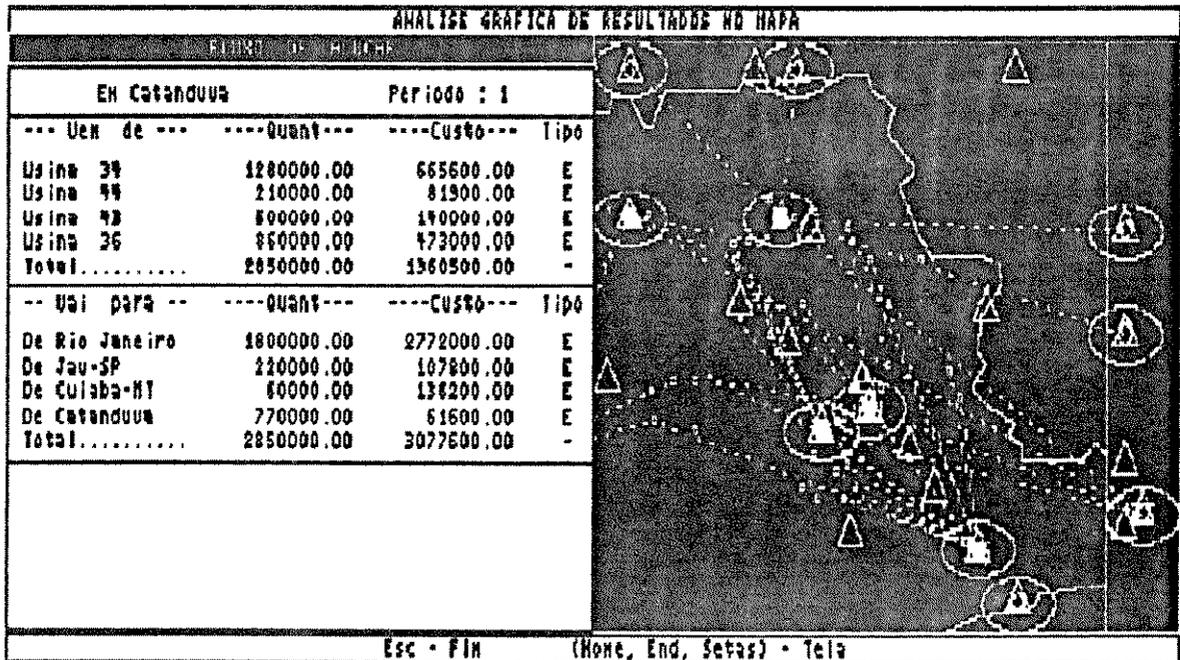


FIGURA III.4 Exemplo do mapa com os valores e custos dos fluxos.



III.2 Segunda formulação : Decisão do melhor sistema de distribuição

III.2.1 Objetivos e condições de contorno do problema II

O objetivo deste problema é avaliar alternativas de distribuição que impliquem em : uma garantia maior de qualidade do produto, agilização da distribuição e/ou diminuição dos custos envolvidos.

As alternativas consideradas são as seguintes:

- Estudo de viabilidade de centrais de distribuição (CD), com instalações adequadas para agilizar a operação de distribuição, garantir a qualidade do armazenamento e diminuir os custos ;
- Estudo de viabilidade do transporte a granel e/ou em container no trecho compreendido entre as usinas (U) e seus clientes diretos (E, R e I);

Para formular o problema assumiremos algumas situações :

- controlaremos os fluxos de sacos e containeres, além do fluxo de açúcar;
- os armazéns (AU), que estavam anexos às usinas (U) no problema anterior, serão separados e considerados instalações para decisão;
- assumiremos dois períodos, safra e entressafra, com demanda uniforme, com produção somente na safra;
- as centrais de distribuição (CD) serão consideradas apenas se granel for viável.

Para adequar o problema à realidade, adotaremos as seguintes medidas para a coleta dos dados utilizados, além daquelas expostas no problema anterior :

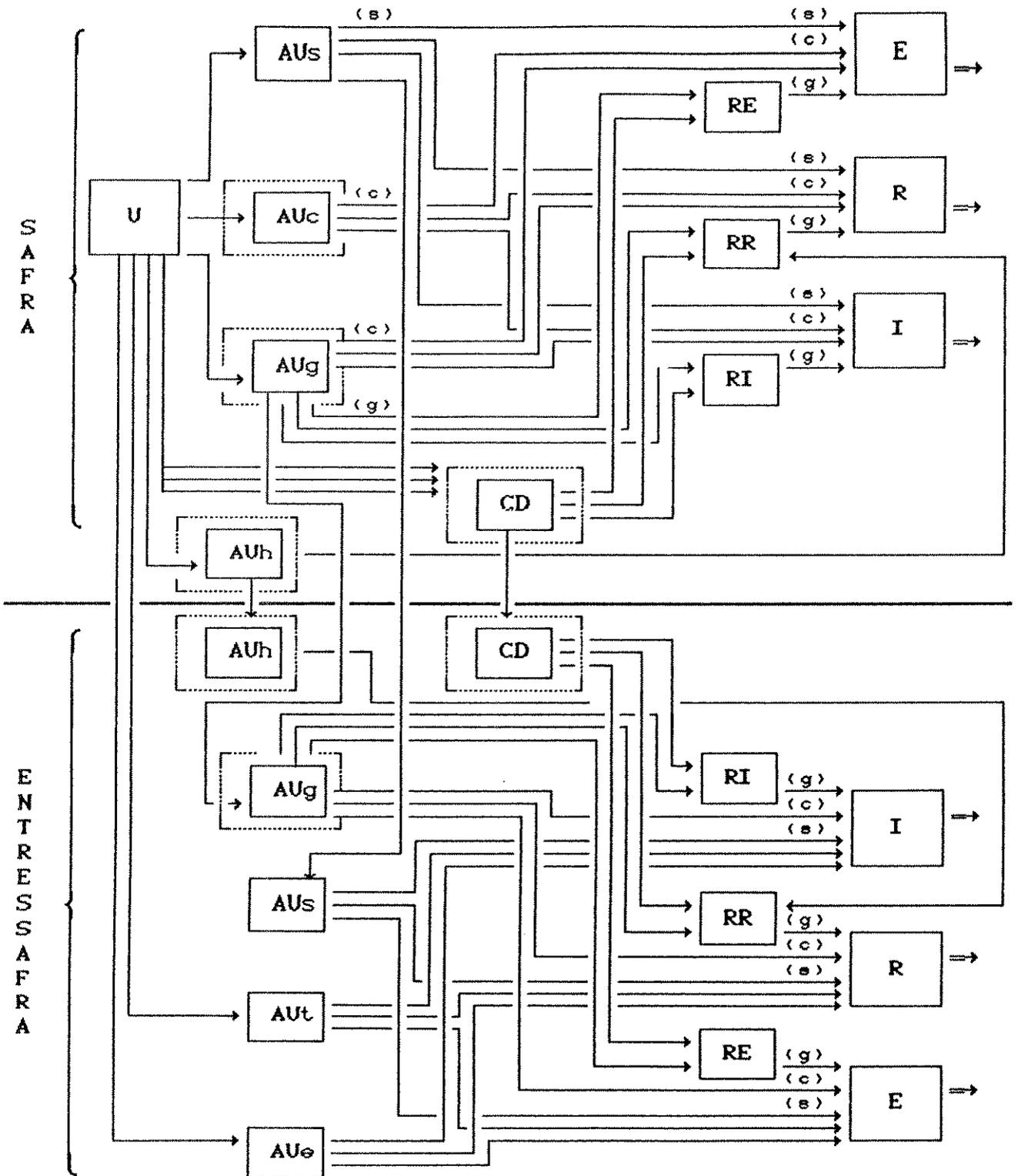
- utilizaremos três tipos de frete de abastecimento : saco, container e granel;
- as quantidades das formas de unitização alternativas, container e granel, serão tratadas em sacos-equivalentes;
- as condições para o controle do número máximo de viagens dos sacos, em função do destino, foram consideradas no problema, utilizando-se o conceito de classe de nós para reduzir o porte do mesmo;
- utilizaremos uma heurística que leva em consideração a geografia do problema para diminuir o porte do mesmo (maiores detalhes estão em III.3).

III.2.2. Representação gráfica do modelo adotado.

A representação deste modelo foi simplificada em relação à RDA apresentada em I.5. O diagrama com as alternativas de fluxo de açúcar mais viáveis é mostrado na figura III.5 para uma situação com uma usina (U) e seus tipos possíveis de armazéns (AUs, AUc, AUg, AUh, AUt e AUe), uma empacotadora (E), uma refinaria (R), um mercado de indústria e comércio (I) e uma central de distribuição (CD). Os fluxos de sacos e containeres não estão representados nessa figura para não "poluir" mais o grafo, que já tem com 54 arcos.

O silo horizontal (AUh) será considerado um caso especial do silo vertical, onde existe apenas o arco correspondente ao produto destinado à refinaria a granel. Os arcos que transportam produtos das usinas (U) para as centrais de distribuição (CD) serão três em razão das restrições quanto à qualidade do produto.

FIGURA III.5 Exemplo da RDA com fluxos viáveis entre instalações



O total de variáveis para um problema com 50 usinas (U), 2 centrais (CD), 9 empacotadoras (E), 3 refinarias (R) e 40 mercados de indústrias e comércio (I) é de 24.764 (sem incluir variáveis de decisão e as relativas às restrições adicionais).

O total de variáveis pode ser calculado assim :

$$\sum_{i \in C} c_i \cdot \left[\sum_{j \in C - \{i\}} (ae_{ij} + as_{ij}) \cdot c_j / 2 + ai_i \right],$$

onde :

C é o conjunto de classes de nós;

c_i e c_j são os totais de elementos das classes i e j, respectivamente;

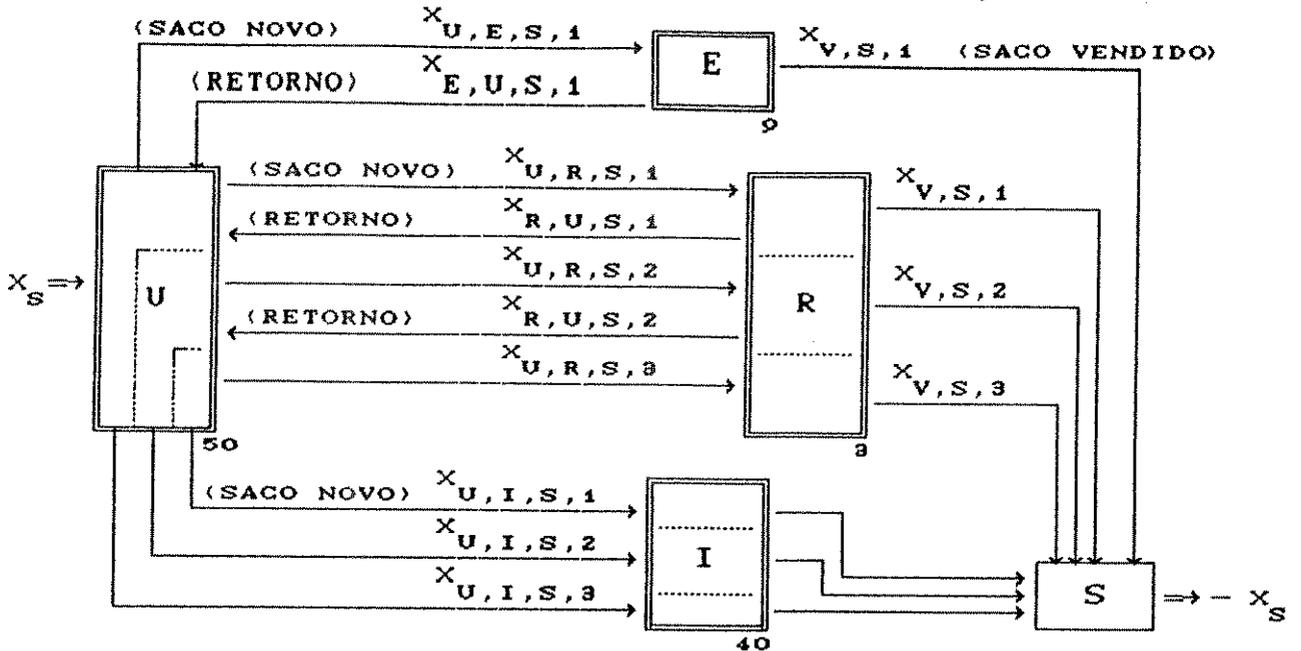
ae_{ij} , as_{ij} e ai_i são o total de arcos que chegam em i vindo de j, total de arcos que saem de i para j e o total de arcos internos à classe, respectivamente.

Se considerarmos o controle do número máximo de viagens que cada saco pode fazer para as empacotadoras (E), refinarias (R) e indústrias (I), incluindo os seus retornos para as usinas (U) nos dois períodos, o total de variáveis aumenta para 40708.

Com o uso da primeira regra (ver ítem III.3), de redefinir parte do problema e aglutinar variáveis em função das classes de nós, foi possível uma diminuição de 39% no total de variáveis em decorrência do agrupamento dos arcos referentes ao controle de viagens dos sacos (ver figura III.6). A primeira regra também considera o balanço de massa para container (ver figura III.7).

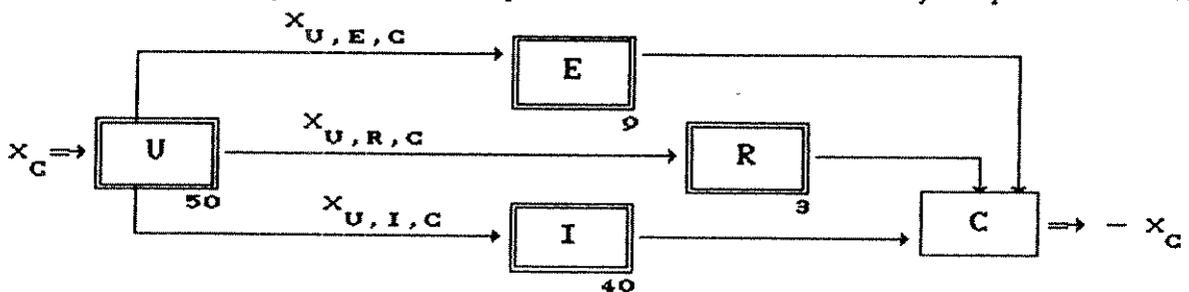
O controle do número de viagens de sacos no problema é importante porque cada saco só pode ser enviado uma vez para uma empacotadora (E), $x_{U,E,S,1}$. Depois os sacos avariados e sujos são vendidos, $x_{V,S,1}$, ou retornam às usinas (U), $x_{E,U,S,1}$, para serem reprocessados e enviados às refinarias (R), $x_{U,R,S,2}$, ou indústrias (I), $x_{U,I,S,2}$.

FIGURA III.6 Diagrama do subproblema de movimentação de sacos



O diagrama acima mostra que os sacos fazem até três viagens para a classe de refinarias (R) ($x_{U,R}$). Os sacos em condições de uso fazem até dois retornos para a usina ($x_{R,U}$). Sacos avariados e/ou sujos são vendidos (x_V). O circuito dos sacos é mais simples quando os destinos são as empacotadoras (E) ($x_{U,E}$, $x_{E,U}$ e x_V), que exigem saco novo, e também quando seguem para as indústrias (I) ($x_{U,I}$), onde não têm retorno.

FIGURA III.7 Diagrama do subproblema de movimentação para container



Com relação ao container, consideramos apenas que uma quantidade de container em sacos-equivalentes é fornecida às usinas (U) para abastecer os clientes (E, R e I). Raciocínio análogo foi feito para o granel.

III.2.3. Formulação do modelo adotado

Considerando as variáveis e os parâmetros a seguir:

x_{ijpt} é o número de unidades do produto p que sai de i para j no período t ;

y_j é a variável de decisão de implantação da instalação j ;

N é o número total de instalações industriais e de demanda consideradas (nós da rede);

c_{ijpt} é o custo unitário do produto p que sai de i para j no período t ;

F_j é o custo fixo de implantação da instalação j ;

S_i é a produção total da instalação i ;

$S(E)_i$, $S(R)_i$ são as produções parciais de i que podem ir para as empacotadoras e que devem ir para as refinarias, respectivamente;

D_j é a demanda total da instalação j ;

$D(E)_j$, $D(R)_j$ são as demandas parciais de j relacionadas com empacotado e com refinado, respectivamente;

P é o conjunto de produtos;

$P(E)$, $P(R)$ são os subconjuntos de P relacionados com empacotado e com refinado, respectivamente;

\bar{L}_j é a capacidade operacional da instalação j ;

U , AU_s , AU_c , AU_g , AU_h , AU_t , AU_e , CD , E , R , I são os conjuntos de usinas, armazéns de usina (para saco, container, granel vertical, granel horizontal, alugado e alugado extras), centrais de distribuição, empacotadoras, refinarias e indústrias, respectivamente;

T , $T(s)$, $T(e)$ são os períodos, safra e entressafra, respectivamente.

A função objetivo do problema pode ser expressa assim:

$$\text{Min} \sum_{i \in N-R-E-I} \sum_{j \in N-U} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} c_{ijpt} \cdot x_{ijpt} + \sum_{j \in CD, AU} F_j \cdot y_j \quad (01)$$

onde a primeira somatória trata dos fluxos neste trecho da RDA e a segunda trata das variáveis de decisão.

E as restrições do problema da seguinte forma:

1) Restrições de produção

$$\sum_{j \in AU, CD} x_{ijpt} \leq S_{ipt}, \quad i \in U, p \in P, t \in T \quad (02)$$

Cada um dos produtos tem uma produção definida (S_{ipt}). Como estamos trabalhando com dois produtos que têm destinos específicos, regime de produção uniforme e, além disso, toda a produção ocorre em apenas um período, utilizaremos a eq.2 na forma a seguir:

$$\sum_{j \in AU, CD} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T(s)} x_{ijpt} \leq S_i, \quad i \in U \quad (03)$$

2) Restrições quanto ao açúcar enviado às empacotadoras (E)

$$\sum_{j \in CD} \sum_{p \in P(E)} \sum_{t \in T(s)} x_{ijpt} + \sum_{k \in AU_i - \{AUh_i\}} \sum_{l \in E, RE} \sum_{p \in P(E)} \sum_{t \in T} x_{klpt} \leq S(E)_i, \quad i \in U \quad (04)$$

$$\sum_{i \in U} \sum_{j \in CD} \sum_{p \in P(E)} \sum_{t \in T(s)} x_{ijpt} - \sum_{j \in CD} \sum_{l \in RE} \sum_{p \in P(E)} \sum_{t \in T} x_{jlpt} = 0 \quad (04')$$

Estas restrições (04) garantem que apenas o açúcar-produto em saco novo, em container ou a granel ($p \in P(E)$) siga para as empacotadoras. O segundo grupo de equações (04') garante o balanço de massa da fração do açúcar que passa pelas centrais de distribuição (CD), se estas forem viáveis.

3) Restrições quanto ao açúcar enviado às refinarias (R)

$$\sum_{j \in CD} \sum_{p \in P(R)} \sum_{t \in T(s)} x_{ijpt} + \sum_{k \in AU_i} \sum_{l \in R, RR} \sum_{p \in P(R)} \sum_{t \in T} x_{klpt} \geq S(R)_i, \quad i \in U \quad (05)$$

$$\sum_{i \in U} \sum_{j \in CD} \sum_{p \in P(R)} \sum_{t \in T(s)} x_{ijpt} - \sum_{j \in CD} \sum_{l \in RR} \sum_{p \in P(R)} \sum_{t \in T} x_{jlpt} = 0 \quad (05')$$

Estas restrições garantem que todo açúcar matéria-prima produzido ($p \in P(R)$) siga somente para a refinaria, sem impedir, no entanto, que parte do açúcar-produto também tenha o mesmo destino. O segundo grupo de equações (05') garante o balanço de

massa da fração do açúcar que passa pelas centrais (CD), somente se estas forem viáveis.

4) Restrições de transbordo

$$\sum_{p \in P(s)} x_{ijpt} - \sum_{p \in P(s)} x_{jlp} - \sum_{k \in E, R, I} \sum_{p \in P(s)} x_{jkpt} = 0, \quad \left. \begin{array}{l} i \in U, j \in AUS_i, t \in T(s) \text{ e } l \in AUS_{i, t \in T(s)} \end{array} \right\} (06)$$

$$\sum_{p \in P(s)} x_{ijp} - \sum_{k \in E, R, I} \sum_{p \in P(s)} x_{jkpt} = 0, \quad \left. \begin{array}{l} i \in AUS_{i, t \in T(s)}, \\ j \in AUS_i \text{ e } t \in T(s) \end{array} \right\} (06)$$

$$\sum_{p \in P(c)} x_{ijpt} - \sum_{k \in E, R, I} \sum_{p \in P(c)} x_{jkpt} = 0, \quad \left. \begin{array}{l} j \in AUC_i, i \in U \\ \text{e } t \in T(s) \end{array} \right\} (07)$$

$$\sum_{p \in P(g)} x_{ijpt} - \sum_{p \in P(g)} x_{jlp} - \sum_{k \in E, R, I} \sum_{p \in P(c)} x_{jkpt} - \sum_{k \in E, RR, RI} \sum_{p \in P(g)} x_{jkpt} = 0, \quad \left. \begin{array}{l} i \in U, j \in AUG_i, t \in T(s) \text{ e } l \in AUG_{i, t \in T(s)} \end{array} \right\} (08)$$

$$\sum_{p \in P(g)} x_{ijp} - \sum_{k \in E, R, I} \sum_{p \in P(c)} x_{jkpt} - \sum_{k \in E, RR, RI} \sum_{p \in P(g)} x_{jkpt} = 0, \quad \left. \begin{array}{l} i \in AUG_{i, t \in T(s)}, j \in AUG_i \text{ e } t \in T(s) \end{array} \right\} (08)$$

$$\sum_{p \in P(g)} x_{ijpt} - \sum_{p \in P(g)} x_{jlp} - \sum_{k \in RR} \sum_{p \in P(g)} x_{jkpt} = 0, \quad \left. \begin{array}{l} i \in U, j \in AUH_i, t \in T(s) \text{ e } l \in AUH_{i, t \in T(s)} \end{array} \right\} (09)$$

$$\sum_{p \in P(g)} x_{ijp} - \sum_{k \in RR} \sum_{p \in P(g)} x_{jkpt} = 0, \quad \left. \begin{array}{l} i \in AUH_{i, t \in T(s)}, \\ j \in AUH_i \text{ e } t \in T(s) \end{array} \right\} (09)$$

$$\sum_{p \in P(s)} x_{ijp} - \sum_{k \in E, R, I} \sum_{p \in P(s)} x_{jkp} = 0, \quad \left. \begin{array}{l} i \in U_{t \in T(s)}, \\ j \in AUT_{i, t \in T(s)}, AUe_{i, t \in T(s)} \end{array} \right\} (10)$$

$$\sum_{p \in P(g)} x_{ijpt} - \sum_{p \in P(g)} x_{jlp} - \sum_{k \in E, RR, RI} \sum_{p \in P(g)} x_{jkpt} = 0, \quad \left. \begin{array}{l} i \in U, j \in CD, t \in T(s) \text{ e } l \in CD_{t \in T(s)} \end{array} \right\} (11)$$

$$\sum_{p \in P(g)} x_{ijp} - \sum_{k \in E, RR, RI} \sum_{p \in P(g)} x_{jkpt} = 0, \quad \left. \begin{array}{l} i \in CD_{t \in T(s)}, \\ j \in CD \text{ e } t \in T(s) \end{array} \right\} (11)$$

$$\left. \begin{aligned} \sum_{p \in P(g)} \sum_{j \in AUg, CD} x_{jkpt} - \sum_{l \in E, I} \sum_{p \in P(g)} x_{klpt} = 0, \\ k \in RE, RI \text{ e } t \in T \end{aligned} \right\} (12)$$

$$\left. \begin{aligned} \sum_{p \in P(g)} \sum_{j \in AUg, AUh, CD} x_{jkpt} - \sum_{l \in R} \sum_{p \in P(g)} x_{klpt} = 0, \\ k \in RR \text{ e } t \in T \end{aligned} \right\} (13)$$

Estas restrições (06 a 13) garantem o balanço de massa nos armazéns de usina (AUs (06 e 06'), AUc (07), AUg (08 e 08'), AUh (09 e 09'), AUT e AUe (10)), nas centrais de distribuição (CD (11 e 11')) e nas recepções de açúcar a granel (RE, RI (12) e RR (13)).

5) Restrições de demanda.

$$\sum_{i \in AU-AUh, RE} \sum_{p \in P(E)} x_{ijpt} \geq D_{jt}, \quad j \in E, \quad t \in T \quad (14)$$

$$\sum_{i \in AU, RR} \sum_{p \in P} x_{ijpt} \geq D_{jt}, \quad j \in R, \quad t \in T \quad (15)$$

$$\sum_{i \in AU-AUh, RI} \sum_{p \in P-R} x_{ijpt} \geq D_{jt}, \quad j \in I, \quad t \in T \quad (16)$$

Estas restrições (14 a 16) garantem a demanda das empacotadoras (E), das refinarias (R) e dos mercados de indústrias e comércio (I), respectivamente.

6) Restrições de decisão

$$\sum_{p \in P(g)} x_{ijpt} \leq \bar{L}_j \cdot y_j, \quad j \in AUc_i, \quad t \in T(s), \quad i \in U \quad (17)$$

$$\left. \begin{aligned} \sum_{p \in P(g)} x_{jkp} \leq \bar{L}_l \cdot y_l, \quad j \in AUg_{i, t \in T(s)}, \quad k \in AUg_{i, t \in T(e)}, \\ l \in AUg_i, \quad i \in U \end{aligned} \right\} (18)$$

$$\left. \begin{aligned} \sum_{p \in P(g)} x_{j k p} \leq \bar{L}_l \cdot y_l, \quad j \in AUh_i, t \in T(s), k \in AUh_i, t \in T(e), \\ l \in AUh_i, i \in U \end{aligned} \right\} (19)$$

$$\sum_{p \in P(g)} x_{j k p} \leq \bar{L}_l \cdot y_l, \quad j \in U, t \in T(s), k \in CD, t \in T(s), l \in CD \quad (20)$$

$$\sum_{i \in AU-AUh, CD} \sum_{p \in P(g)} x_{i j p t} \leq \bar{L}_j \cdot y_j, \quad j \in RE, RI, t \in T \quad (21)$$

$$\sum_{i \in AU, CD} \sum_{p \in P(g)} x_{i j p t} \leq \bar{L}_j \cdot y_j, \quad j \in RR, t \in T \quad (22)$$

Estas restrições (17 a 22) garantem que o afluxo de produtos não exceda a capacidade da instalação, caso ela exista e seja um tipo de armazém (AUc, AUg ou AUh), uma central de distribuição (CD), ou sirva para a recepção de açúcar a granel (RE, RI ou RR), respectivamente.

7) Restrições de aglutinação dos fluxos de açúcar na RDA para as variáveis das classes de nós

$$\sum_{i \in U} \sum_{j \in AU, CD} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} x_{i j p t} - x_U = 0 \quad (23)$$

$$\sum_{i \in (AU-AUh), RE} \sum_{j \in E} \sum_{p \in P(E)} \sum_{t \in T} x_{i j p t} - x_E = 0 \quad (24)$$

$$\sum_{i \in AU, RR} \sum_{j \in R} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} x_{i j p t} - x_R = 0 \quad (25)$$

$$\sum_{i \in AU, RI} \sum_{j \in I} \sum_{p \in P(I)} \sum_{t \in T} x_{i j p t} - x_I = 0 \quad (26)$$

$$\sum_{i \in AU, s, AUt, AUe} \sum_{j \in E, R, I} \sum_{p \in P(s)} \sum_{t \in T} x_{i j p t} - x_s = 0 \quad (27)$$

$$\sum_{i \in AUc, AUg} \sum_{j \in E, R, I} \sum_{p \in P(c)} \sum_{t \in T} x_{i j p t} - x_c = 0 \quad (28)$$

$$\sum_{i \in RE, RR, RI} \sum_{j \in E, R, I} \sum_{p \in P(g)} \sum_{t \in T} x_{i j p t} - x_g = 0 \quad (29)$$

As restrições (23 a 29) fazem as somatórias dos fluxos na RDA que partem das usinas, que chegam nas empacotadoras, nas

refinarias e nas indústrias e que utilizam sacos, contêineres e granel, respectivamente.

8) Restrições de aglutinação dos fluxos de formas de unitização

$$x_E - x_{U,E,S,1} - x_{U,E,C} = 0 \quad (30)$$

$$x_R - x_{U,R,S,1} - x_{U,R,S,2} - x_{U,R,S,3} - x_{U,R,C} = 0 \quad (31)$$

$$x_I - x_{U,I,S,1} - x_{U,I,S,2} - x_{U,I,S,3} - x_{U,I,C} = 0 \quad (32)$$

$$\left. \begin{aligned} x_S - x_{U,E,S,1} - x_{U,R,S,1} - x_{U,R,S,2} - x_{U,R,S,3} - \\ - x_{U,I,S,1} - x_{U,I,S,2} - x_{U,I,S,3} = 0 \end{aligned} \right\} (33)$$

$$x_C - x_{U,E,C} - x_{U,R,C} - x_{U,I,C} = 0 \quad (34)$$

As restrições (30) a (32) fazem um balanço do fluxo das embalagens que passam pelas empacotadoras, refinarias e indústrias de uma maneira geral, comparando com as somatórias dos fluxos obtidas pelas restrições (24) a (26).

As restrições (33) e (34) fazem um balanço do fluxo global de sacos e contêineres, comparando com as somatórias dos fluxos obtidas pelas restrições (27) e (28).

9) Restrições do controle do número de viagens dos sacos

$$x_{U,E,S,1} - x_{E,U,S,1} - x_{V,S,1} = 0 \quad (35)$$

$$x_{U,R,S,1} - x_{R,U,S,1} - x_{V,S,1} = 0 \quad (36)$$

$$x_{U,R,S,2} - x_{R,U,S,2} - x_{V,S,2} = 0 \quad (37)$$

$$x_{U,R,S,3} - x_{V,S,3} = 0 \quad (38)$$

$$x_{E,U,S,1} + x_{R,U,S,1} - x_{U,R,S,2} - x_{U,I,S,2} = 0 \quad (39)$$

$$x_{R,U,S,2} - x_{U,R,S,3} - x_{U,I,S,3} = 0 \quad (40)$$

$$x_{U,E,S,1} - 1,25 \cdot x_{E,U,S,1} \geq 0 \quad (41)$$

$$x_{U,R,S,1} - 1,25 \cdot x_{R,U,S,1} \geq 0 \quad (42)$$

$$x_{U,R,S,2} - 1,60 \cdot x_{R,U,S,2} \geq 0 \quad (43)$$

As restrições (35 a 40) garantem o balanço de sacos nas classes de nós (conforme o diagrama apresentado na figura III.6). As restrições (41 a 43) impõem uma proporção entre sacos que chegam às classes de empacotadoras (E) e às de refinarias (R) e sacos que são vendidos a partir dessas mesmas classes.

III.2.4. Aspectos computacionais e operacionais

O porte deste problema, após as simplificações, é uma matriz com 5993 variáveis (incluindo as 137 variáveis inteiras), 991 restrições e uma densidade de 0,64%.

Os procedimentos para executar as rodadas foram os mesmos daqueles explicados em III.1.4.

III.3 Descrição de regras para a redução do porte do problema

Neste segundo problema consideramos duas regras para reduzir o tamanho do problema, sendo a segunda delas uma heurística.

- A primeira regra diz que todas as restrições e variáveis, que estão relacionadas exclusivamente com as classes dos nós, serão tratadas como restrições das classes, ou seja, as restrições serão as classes dos nós e as variáveis serão os fluxos entre as classes. Teremos, então, restrições de nós e de classes de nós na matriz.

Para garantir que os fluxos referentes às classes de nós não inviabilizem os fluxos dos nós, acrescentamos restrições de balanço de fluxo para cada uma das classes envolvidas.

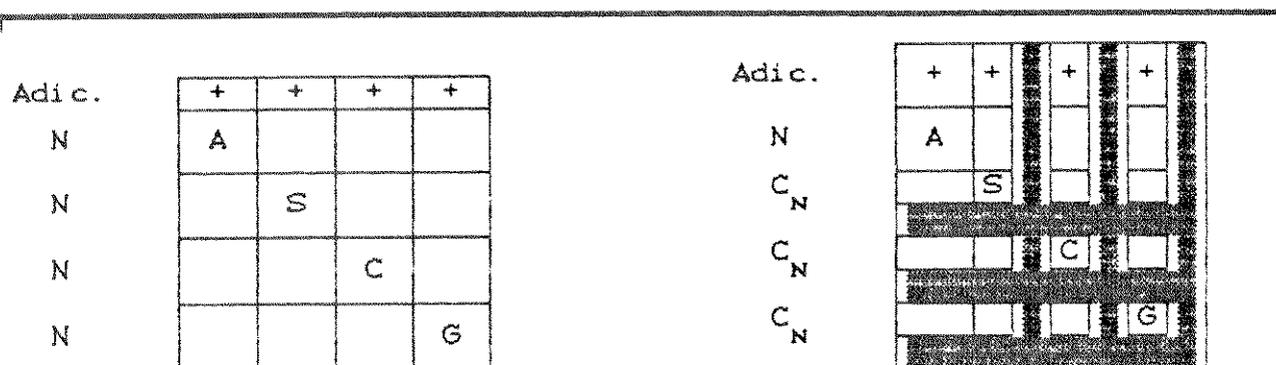
Se tivéssemos, por exemplo, um problema com apenas 3 usinas e 2 empacotadoras, teríamos 6 arcos para o fluxo de açúcar e mais 6 para o fluxo de sacos, além de algumas restrições adicionais para acomodar estes fluxos. Com a utilização desta regra acrescentaríamos ao problema uma variável, referente ao fluxo de sacos entre as classes, e três restrições (duas referentes às classes de usinas e de empacotadoras e a outra amarrando o fluxo da variável recém-admitida com a soma dos fluxos de açúcar das usinas para as empacotadoras), considerando que as 6 variáveis e as suas restrições para os fluxos de sacos seriam retiradas do problema.

No problema original, sem o uso desta regra, teríamos os arcos mostrados no diagrama III.6, referentes às várias viagens dos sacos, reproduzidos no diagrama III.5. Os arcos de fluxos de sacos seriam incluídos a partir de cada armazém de usina para saco (cada AU_s, AV_s e AV_e) para cada empacotadora (E), para cada refinaria (R) e para cada mercado de indústrias e comércio (I), ou seja, mais 30600 arcos seriam incluídos neste problema.

Os custos associados diretamente aos arcos dos sacos são o preço de compra, o custo de estocagem e o de reprocessamento. Os fluxos dos sacos nas suas várias viagens na RDA devem ser compatíveis com o fluxo de açúcar em sacos. Tratamos, então, dos dados dos sacos (custos e fluxos), acrescentando ao problema apenas as variáveis para o fluxo dos sacos que envolvem as classes de usinas (U), de empacotadoras (E), de refinarias (R) e de mercados de indústrias e comércio (I). Este procedimento permite que apenas 10415 arcos existam (uma redução de 66% sobre os 30600 previstos).

A figura III.8 mostra o que acontece na matriz quando aplicamos esta regra.

FIGURA III.8 Exemplo de uma situação antes e depois da regra



onde :

N é o conjunto de nós que fazem parte do problema;

C_N é o conjunto de classes de nós que fazem parte do problema;

A,S,C,G são os fluxos de açúcar, saco, container e granel, respectivamente e

representa a diminuição devido a aplicação da regra.

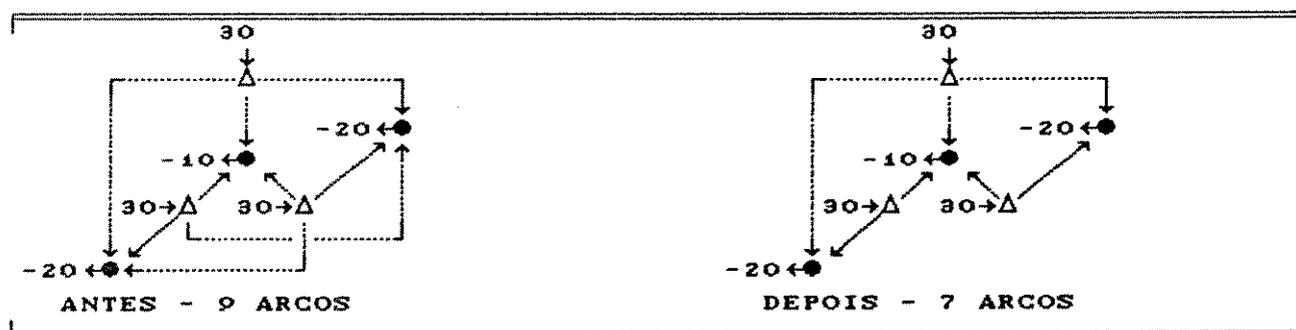
- A segunda regra diz que as demandas das regiões geográficas mais externas ao problema serão atendidas, prioritariamente, pelas instalações mais próximas. As demandas das outras regiões também serão atendidas pelas instalações mais próximas, desde que não violem a capacidade e depois de considerarmos a condição anterior.

Esta regra, baseada na observação de Ventura(1982), mostra que as instalações industriais vizinhas tendem a absorver a demanda de uma instalação fechada.

Esta regra foi testada para o trecho entre os armazéns de usina (AU) e os mercados de indústrias e comércio (I), com 1500 arcos, e permitiu reduzir em 45% (equivalente a 674 arcos) o número de arcos necessários ao problema.

Na figura III.9 mostramos um exemplo de aplicação desta regra.

FIGURA III.9 Exemplo de uma situação antes e depois da regra



No exemplo acima, admitimos que a possível instalação de cima (Δ) é a alternativa mais indicada para fornecer o produto ao ponto de demanda inferior esquerdo (●), caso a instalação mais próxima não seja instalada. Raciocínio análogo foi admitido para os outros pontos de demanda.

CAPÍTULO IV - COMENTÁRIOS E RESULTADOS OBTIDOS COM OS MODELOS

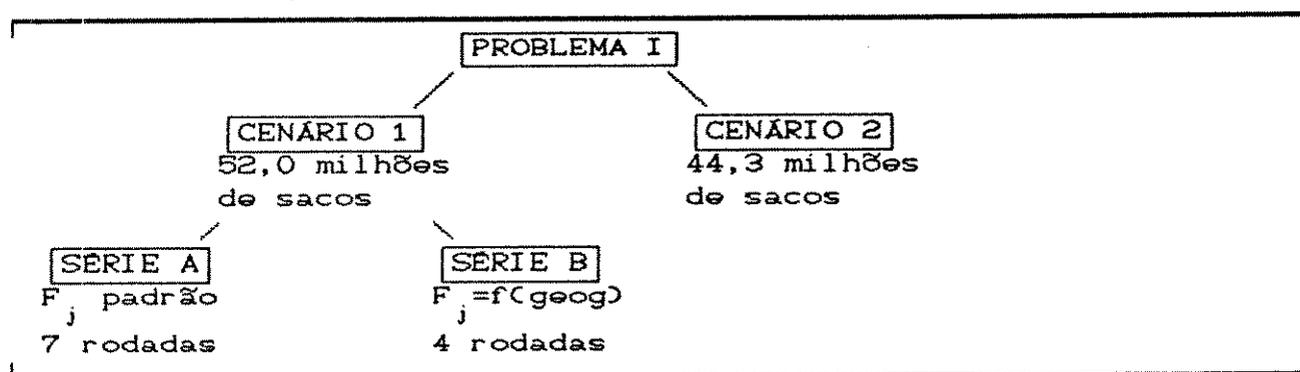
Os resultados obtidos com a execução das formulações apresentadas no capítulo III são discutidos a seguir.

Consideraremos três conjuntos para as variáveis de decisão, baseados na nomenclatura de Efroymsom e Ray(1966) : o conjunto de variáveis K_0 , onde $K_0 = \langle y_i | y_i=0 \rangle$, o conjunto K_1 , onde $K_1 = \langle y_i | y_i=1 \rangle$, e o conjunto K_2 , onde $K_2 = \langle y_i | y_i \in (0,1) \rangle$ ¹.

IV.1 Primeiro problema : Localização de instalações industriais intermediárias (empacotadoras, refinarias e depósitos)

Na análise deste problema testamos dois cenários : no primeiro, para um volume total de açúcar igual a 52 milhões de sacos, verificamos a melhor configuração para a RDA; no segundo, com 44,3 milhões de sacos, avaliamos a possível alteração nas decisões a serem tomadas por influência da transferência da demanda do mercado CIF para o FOB, na hipótese de fechamento de instalações. O diagrama IV.1 mostra este esquema.

FIGURA IV.1 Esquema das rodadas executadas



¹ Em algumas simulações, onde consideramos as instalações como módulos, o valor de y_i pode ser 1, 2 ou 3.

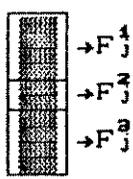
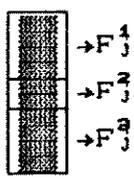
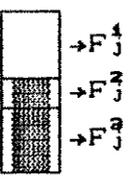
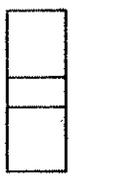
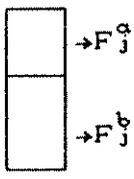
CENÁRIO 1:

O objetivo deste cenário é de definir a configuração da RDA, localização e dimensão das instalações.

O cenário, com um fluxo de 52 milhões de sacos, é composto de duas séries de rodadas (séries A e B) que diferem apenas no custo de investimento para as instalações intermediárias : na primeira série, os custos são iguais para as instalações da mesma classe de nós. Na segunda série, os custos de investimento dependem da região geográfica, ou seja, a parcela do custo fixo referente à locação da área é variável com o local. Além disso, a sequência das rodadas nas séries visavam aumentar gradativamente o número de instalações a serem decididas simultaneamente, com exceção da rodada A7 que mostrava outro aspecto do problema.

Assumiremos que onde pudesse co-existir duas instalações, sendo uma de produção e outra de armazenamento e distribuição, os seus custos de investimento seriam complementares, ou seja, poderíamos instalar uma empacotadora e um depósito juntos, por exemplo, por um custo fixo F_j , mas se a empacotadora fosse fechada e o depósito não, apenas a fração de F_j correspondente à empacotadora seria retirada. A figura IV.2 abaixo explica melhor o porquê desta hipótese.

FIGURA IV.2 Casos possíveis de complementariedade de custos fixos

CASO I	CASO II	CASO III	CASO IV	CASO V
				
$F_j = F_j^1 + F_j^2 + F_j^3$ $y_j = 1, j \in E, D$	$F_j = F_j^1 + F_j^2 + F_j^3$ $y_j = 1, j \in E$	$F_j = F_j^1 + F_j^2$ $y_j = 1, j \in D$	$F_j = 0$ $y_j = 0, j \in E, D$	$F_j^a = F_j^1$ $F_j^b = F_j^2 + F_j^3$

Na figura IV.2 ilustramos os casos possíveis dos custos complementares, com F_j^1 , a parcela de F_j correspondente aos equipamentos e mão-de-obra para a produção, F_j^2 , a parcela de F_j correspondente aos equipamentos e mão-de-obra para a movimentação, e F_j^3 , a parcela de F_j correspondente a administração, locação e outros custos fixos. O caso I representa a decisão de implantação das duas instalações; o caso II representa a decisão de implantação da instalação de produção; o caso III representa a decisão de implantação da instalação de armazenamento e o caso IV representa a decisão de não implantar nenhuma instalação. O caso V é o tratamento adotado de custos complementares e que pode representar todos os casos anteriores.

A tabela a seguir descreve as condições de contorno das rodadas das duas séries (A e B) deste cenário e mostra também alguns resultados computacionais obtidos com o MPSX/MIP da IBM.

As estatísticas da saída do MPSX/MIP fornecem o tempo de execução, a iteração em que foi encontrada a primeira solução inteira, a iteração em que foi encontrada a solução ótima e quantas iterações foram necessárias para comprovar que a solução encontrada é ótima. Além disso, a saída contém o vetor y de variáveis inteiras das soluções inteiras intermediárias e os fluxos da solução ótima. Mostraremos todos estes dados estatísticos a título de ilustração, mas nos deteremos apenas em analisar os resultados finais que serão mostrados em outra tabela.

TABELA IV.1 Descrição das condições de contorno e estatísticas finais

Descrição das rodadas	Tempo MPSX/MIP	Número de Iterações		Total Sol.Int.	
		1a.Sol.	Ótimo Total		
Rodadas da Série A					
A1 $y_j \in K_1, j \in E, R, D$	0.64	539	539	539	1
A2 $y_j \in K_2, j \in E, y_j \in \langle 0,1 \rangle$	11.76	686	686	687	1
A3* $y_j \in K_2, j \in E, D', y_j \in \langle 0,1 \rangle$	32.93	896	1632	1868	4
A4 $y_j \in K_2, j \in E, D, y_j \in \langle 0,1 \rangle$	809.87	1040	2725	26250	6
A5 $y_j \in K_2, j \in E, R, D, y_j \in \langle 0,1 \rangle$	635.01	551	3757	22285	7
A6 $y_j \in K_2, j \in E, R, D, y_j \in \langle 0,1,2,3 \rangle$	-	1133	-	1601	3
A7 $y_j \in K_2, j \in E, R, D, y_j \in \langle 0,1 \rangle$ $F_j = 0, j \in R$	635.01	1032	2717	26309	6
Rodadas da Série B					
B1 $y_j \in K_1, j \in E, R, D, y_j \in \langle 0,1 \rangle$	0.43	514	514	514	1
B2 $y_j \in K_2, j \in E, y_j \in \langle 0,1 \rangle$	5.00	619	632	658	3
B3 $y_j \in K_2, j \in E, R, D, y_j \in \langle 0,1 \rangle$	297.82	1050	1606	10770	7
B4 $y_j \in K_2, j \in E, R, D, y_j \in \langle 0,1,2,3 \rangle$	-	1201	-	5283	3

Obs.: (*) se D for anexo a E.

Comentários :

1) as rodadas da série A indicadas na tabela IV.1, com custos fixos padrão, são :

- simulação da situação com todas os investimentos decididos pela implantação ($y_j=1, \forall j \mid j \in E, R$ ou D);
- decisão livre apenas para as empacotadoras (E);
- decisão livre para as empacotadoras (E) e para os depósitos (D') anexos a empacotadoras;
- decisão livre para as empacotadoras (E) e para os depósitos (D);
- decisão livre para as 32 instalações (E, R e D);
- decisão livre para as 32 instalações (E, R e D), mas com possibilidade de instalar até três módulos de cada tipo de instalação em cada local, limitando o MPSX/MIP a encontrar apenas três soluções inteiras ou a processar por duas horas, o que fôr maior;
- idem a rodada A5, mas com os custos fixos das refinarias zerados.

2) as rodadas da série B indicadas na tabela IV.1, com custos fixos
Comentários e resultados 76

em função de aspectos geográficos, são :

- simulação da situação com todas os investimentos decididos pela implantação ($y_j=1, \forall j \mid j \in E, R \text{ ou } D$);
- decisão livre apenas para as empacotadoras (E);
- decisão livre para as 32 instalações (E, R e D);
- decisão livre para as 32 instalações (E, R e D), mas com possibilidade de instalar até três módulos de cada tipo de instalação em cada local, limitando o MPSX/MIP a encontrar apenas três soluções inteiras ou a processar por duas horas, o que fôr maior.

3) a rodada A7, onde zeramos o custo fixo das refinarias, não alterou as decisões finais da rodada A5 e apresentou os mesmos fluxos de açúcar, com uma diferença na Função Objetivo (doravante FO) devido aos custos fixos das refinarias. Esta rodada foi necessária para concluir que uma das refinarias é desnecessária, mesmo com custo fixo nulo.

Na tabela IV.2 apresentamos os resultados relativos das rodadas. As colunas da tabela referem-se, respectivamente, a :

- relação entre a FO da rodada e a FO da rodada considerada a situação atual (rodada A1) - $FO/FO_{at.}$;
- relação entre a FO da rodada e a FO da rodada considerada a solução da série (A6 e B4) - FO/FO^* ;
- participação do custo fixo (F_j) na FO - $F_j/FO \times 100.0$;
- participação da mão-de-obra (M.O.) na FO - $C_{MO}/FO \times 100.0$;
- participação do transporte (Transp) na FO - $C_{Transp}/FO \times 100.0$;
- total de instalações efetivamente abertas;
- total de empacotadoras efetivamente abertas;
- total de refinarias efetivamente abertas;
- total de depósitos efetivamente abertos;

TABELA IV.2 Resultados obtidos e composição dos custos finais

	FO/FOat. (%)	FO/FO* (%)	F _j (%)	M.O. (%)	Transp (%)	Inst. Abertas Total E R D			
Rodadas da Série A ¹									
A1	100,0	103,0	13,1	12,3	74,6	31	0	2	20
A2	98,3	102,2	11,4	12,6	76,1	28	6	2	20
A3	97,8	101,7	10,7	12,6	76,7	25	6	2	17
A4	96,5	100,3	9,0	12,8	78,2	18	6	2	10
A5	96,5	100,3	9,0	12,8	78,2	18	6	2	10
A6	96,2	100,0	8,8	12,8	78,4	17	6	2	9
A7	94,0	97,7	6,6	13,1	80,3	18	6	2	10
Rodadas da Série B ²									
B1	97,3	103,7	10,3	12,7	77,0	31	0	2	20
B2	96,7	103,1	9,8	12,8	77,4	29	7	2	20
B3	95,2	101,4	7,9	13,0	79,1	22	7	2	13
B4	93,9	100,0	7,0	13,2	79,8	16	5	2	9

Obs.: (1) Tomando a melhor solução com custo fixo da série A como referência

(2) Tomando a melhor solução da série B como referência

Os resultados podem ser melhor analisados através dos gráficos das figuras IV.3 e IV.4 adiante, entretanto colocaremos alguns comentários referentes aos números apresentados :

- Através das rodadas A7, onde o custo fixo das refinarias (R) é nulo, concluímos que o número de refinarias necessárias é constante e independe do custo fixo, respeitando-se os limites do cenário;
- As melhores rodadas das séries (A6 e B4) apresentaram economias de 3,9 e 3,7% na FO, respectivamente;
- O decréscimo do custo fixo - da rodada A1 a A5 - aumentou sucessivamente o custo do transporte. O custo fixo reduziu até 64,8% na série A (excluindo a rodada A7), mas esta variação alterou em menos de 1,2% o custo de transporte; na série B, uma variação de 65,8% nos custos fixos praticamente não alterou os custos de transporte;

- Nas rodadas onde consideramos a modularização - A6 e B4 - os custos fixos e de transporte reduziram-se. Concluímos que com a expansão da capacidade de processamento de algumas instalações que estavam trabalhando no seu limite máximo, as distâncias percorridas pelo açúcar diminuíram (o que justifica a diminuição no transporte) e que as economias-de-escala da modularização provocaram a redução no custo fixo;
- A RDA é extremamente sensível às variações do custo de transporte, visto que o último representa entre 74,6 e 80,3% do custo total;
- A racionalização das zonas de distribuição poderia contribuir para uma diminuição do custo do transporte. A transferência das demandas dos mercados CIF (MC) para o FOB (MF) seria uma alternativa - investigaremos esta alternativa no cenário 2;
- A localização geográfica contribue com uma diferença na FO de até 2,7% - comparando as rodadas com fluxos semelhantes A1 e B1;
- Todas as rodadas mostram um claro superdimensionamento da RDA : as melhores soluções nas duas séries apontam para uma redução de 33% no número de empacotadoras (E) e de refinarias (R), além de uma redução de 50% no número de depósitos (D);
- Comparando as indicações do item anterior com a situação real, concluímos que : o número de empacotadoras atualmente abertas (6) é satisfatório para este volume de fluxo - 52 milhões de sacos; as consequências, não previstas no modelo, dos pontos de vista comercial, de "marketing" e legal para o fechamento de uma refinaria (R) e de 10 depósitos (D), devem ser investigadas.
- A rodada A7 indicou que a expansão de duas empacotadoras, dois módulos em cada uma, reduziria o número de locais para quatro.
- A mão-de-obra não variou em valores absolutos porque é proporcional ao volume total de açúcar transportado. A mão-de-obra administrativa está incluída nos custos fixos.

FIGURA IV.3 Custos absolutos da FO e suas parcelas principais

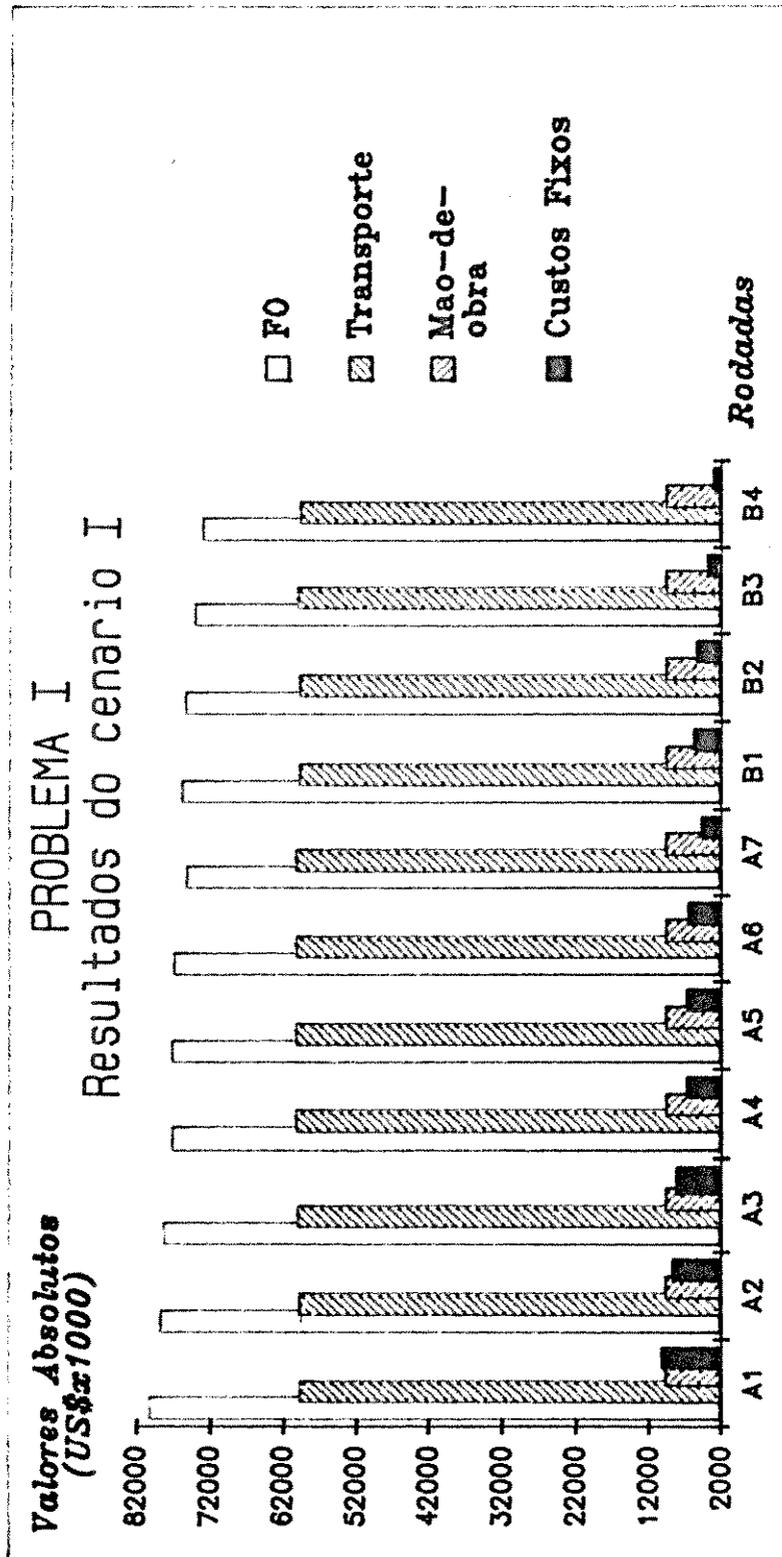
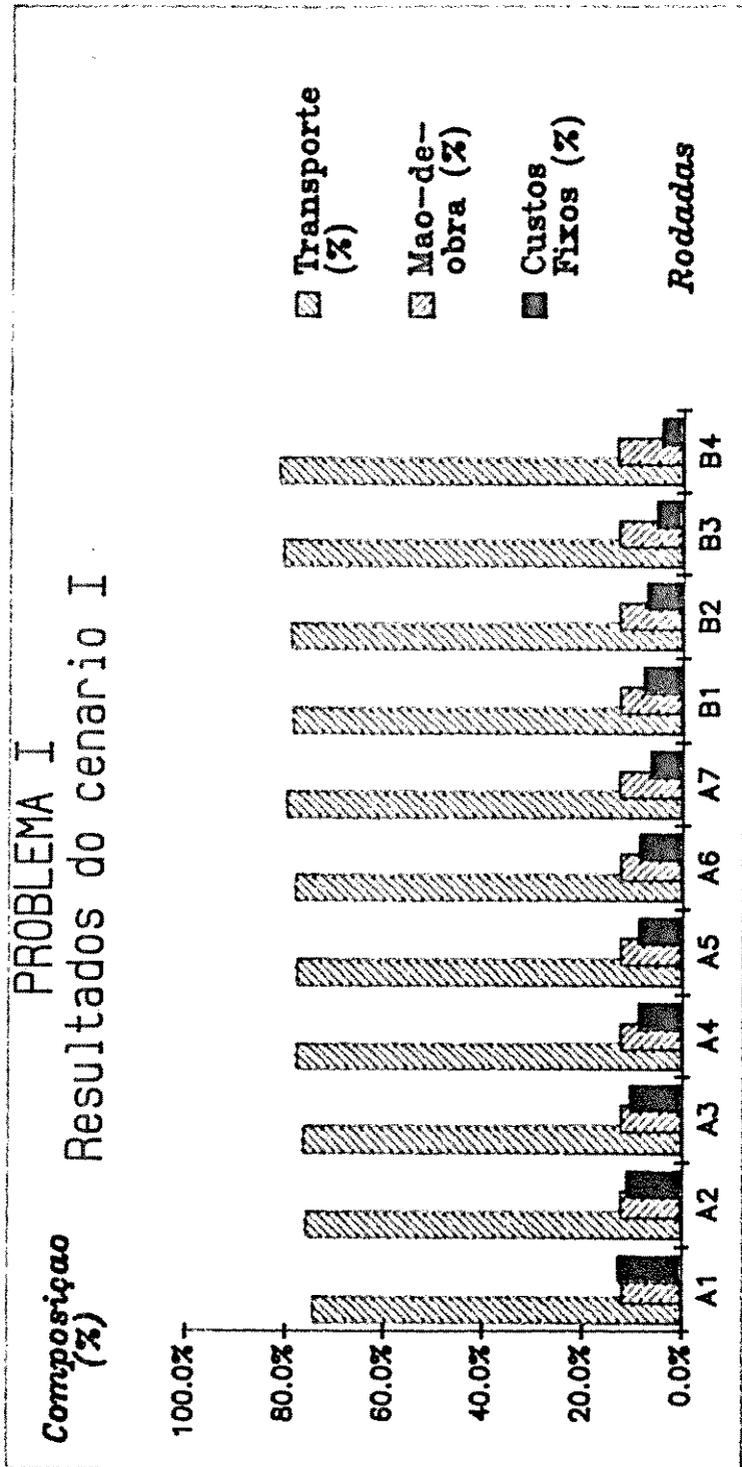


FIGURA IV. 4 Composição percentual das parcelas da FO



CENÁRIO 2:

O objetivo deste cenário é analisar como a decisão de transferir a demanda do mercado CIF para o mercado FOB pode alterar as decisões a serem tomadas. Para ilustrar esta situação escolhemos 4 simulações, onde partindo de uma situação real (rodada C1) pudéssemos chegar a uma outra, ótima, com as transferências (rodada C4) e que não correspondesse ao ótimo da primeira (rodada C2).

A figura abaixo mostra como é representada a transferência. Na tabela IV.4 mostramos as alterações na FO em consequência desta decisão. Na prática, este procedimento implica que o comprador do açúcar deve retirar a mercadoria arcando com as despesas de frete.

FIGURA IV.5 Exemplo de modificações para transferir demandas

D		MF		D		MF			
20 → Δ	FT	→ □	→ -10	20 → Δ	FT	→ □	→ -20	FT ≡ frete de transf.	
	FD	→ □	→ -10			→ □	→ 0	FD ≡ frete de distrib.	
		MC				MC			
antes			depois						

Este cenário considera uma produção de 44,3 milhões sacos, sendo 16,3 milhões para mercados de indústrias e comércio (I), 23,2 milhões para refinarias (R) e 4,8 milhões para empacotadoras (E). É composto de quatro rodadas para avaliar uma situação específica do problema².

Os custos dependem da região geográfica. Assumimos que os custos de investimentos nos locais onde pudessem co-existir uma empacotadora, ou refinaria, com um depósito seriam complementares.

² Este novo cenário foi criado a partir das grandes alterações ocorridas na configuração da RDA, em decorrência da decisão de produzir mais álcool e, em menor escala, dos resultados parciais obtidos com este estudo.

As tabelas a seguir são semelhantes àquelas do cenário anterior e dispensam maiores explicações.

TABELA IV. 3 Descrição das condições de contorno e estatísticas finais

Descrição das rodadas	Tempo MPSX/MIP	Número de Iterações		Total	
		1a. Sol.	Ótimo	Total	Sol. Int.
Rodadas da Série C					
C1 $y_j \in K_1, j \in E, R, D, c/4E, 3R, 8D$	.35	306	306	306	1
C2 $y_j \in K_2, j \in E, D, y_j \in (0,1), 4E, 3R, 6D$	4.92	508	508	521	1
C3 $y_j \in K_1, j \in E, R, D, c/2E, 3R, 5D$	.44	273	273	273	1
C4 $y_j \in K_1, j \in E, R, D, c/2E, 3R, 6D$	.65	305	305	305	1

Obs.: as demandas dos mercados CIF (MC) foram transferidas para os mercados FOB (MF) correspondentes nas rodadas 3 e 4.

Comentários :

1) As rodadas do cenário II (série C) indicadas na tabela IV.3, com custos fixos em função de aspectos geográficos, são :

- simulação de uma situação real para referência;
- ótimo global da rodada anterior;
- simulação de uma situação com transferência das demandas dos mercados CIF, a partir da rodada C1, por tentativa;
- simulação de outra situação com transferência das demandas, mas tomando a rodada C3 como referência;

TABELA IV. 4 Resultados obtidos e composição dos custos finais

	FO/FOat.	FO/FO*	Fj	M.O.	Transp	Inst. Abertas				
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	Total	E	R	D	
Rodadas da Série C ¹										
C1	100,0	103,5	6,1	19,1	74,8	15	4	3	8	
C2	98,3	101,7	3,8	19,4	76,8	12	3	3	6	
C3	97,9	101,3	3,9	19,5	76,6	10	2	3	5	
C4	96,7	100,0	3,7	19,8	76,5	11	2	3	6	

Obs.: (1) Tomando a melhor solução da série C como referência

Os gráficos IV.6 e IV.7 mostram os resultados absolutos e as composições da FO, respectivamente. Comentaremos aqui os resultados destas rodadas :

- Obtivemos uma redução de 1,7% na FO da solução ótima fechando dois depósitos independentes e uma empacotadora (sem fechar o depósito anexo);
- Outra alternativa, 0,4% mais barata que a solução ótima e com outra configuração de instalações, é obtida pela decisão de não fazer mais a distribuição do produto. As demandas CIF (MC) são então tratadas como sendo FOB;
- Os resultados da tabela também mostram que houve aumento do custo fixo na rodada C3 (2,8%), quando fizemos as transferências, sem o correspondente aumento no número de instalações. Esta situação ocorreu em consequência dos custos fixos serem função do local aonde deseja-se implantar a instalação;
- A solução que possui a menor FO é uma configuração intermediária entre as rodadas C2 e C3 (1,2% menor que C3). Esta alternativa difere da rodada anterior basicamente pelo fechamento de uma empacotadora em um local mais caro e a abertura de outra, com seu depósito anexo, em um local mais barato;
- Na rodada C4 observamos novamente a influência do aspecto geográfico na decisão, visto que, apesar do número de instalações por tipo aumentar, o custo fixo total diminui;
- Mesmo com as transferências, a participação do transporte no custo total - FO - continua elevada (em torno de 75%);
- A decisão de não fazer mais a distribuição do produto, transferindo a demanda dos mercados CIF (MC) para os mercados FOB (MF) correspondentes, pode ter um impacto comercial muito grande que não está no escopo do trabalho e, portanto, não será analisada.

FIGURA IV. 6 Custos absolutos da FO e suas parcelas principais

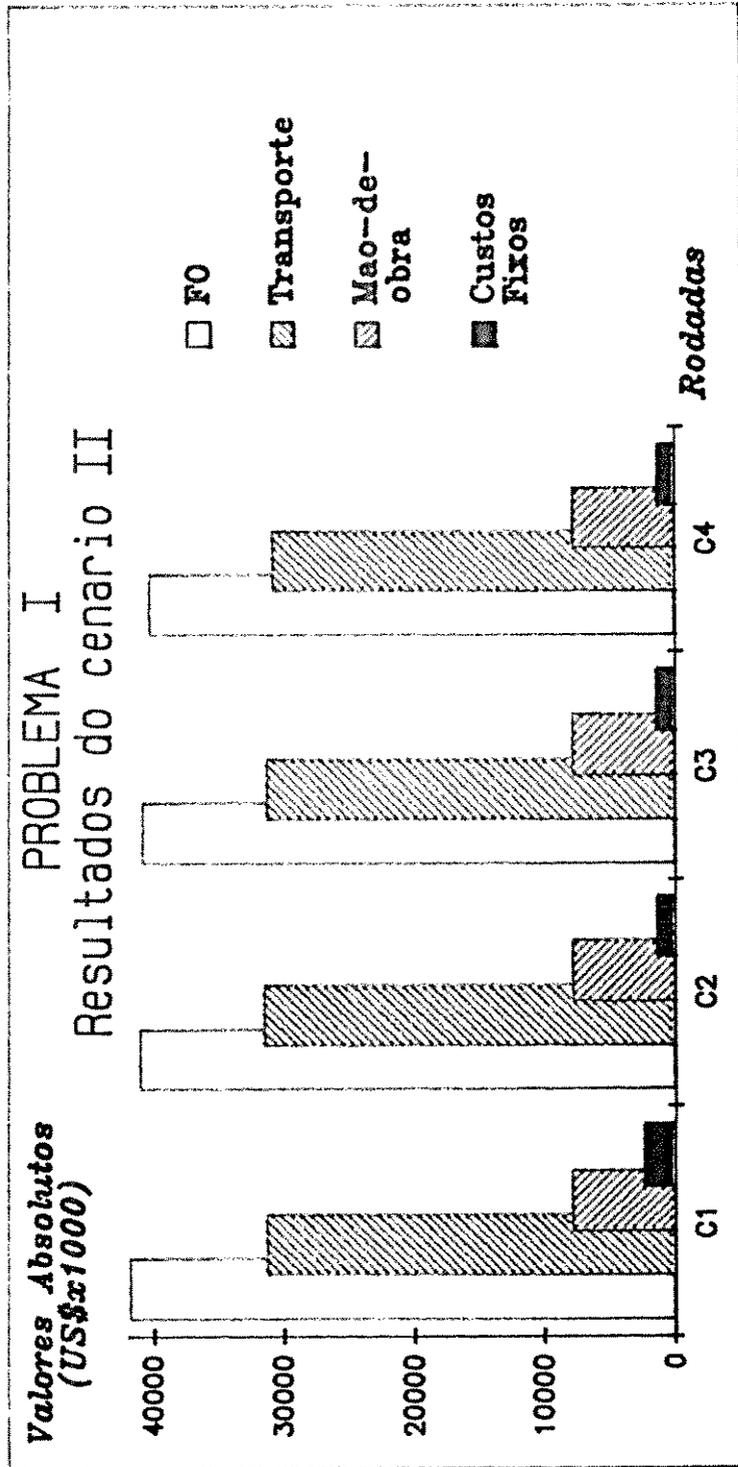
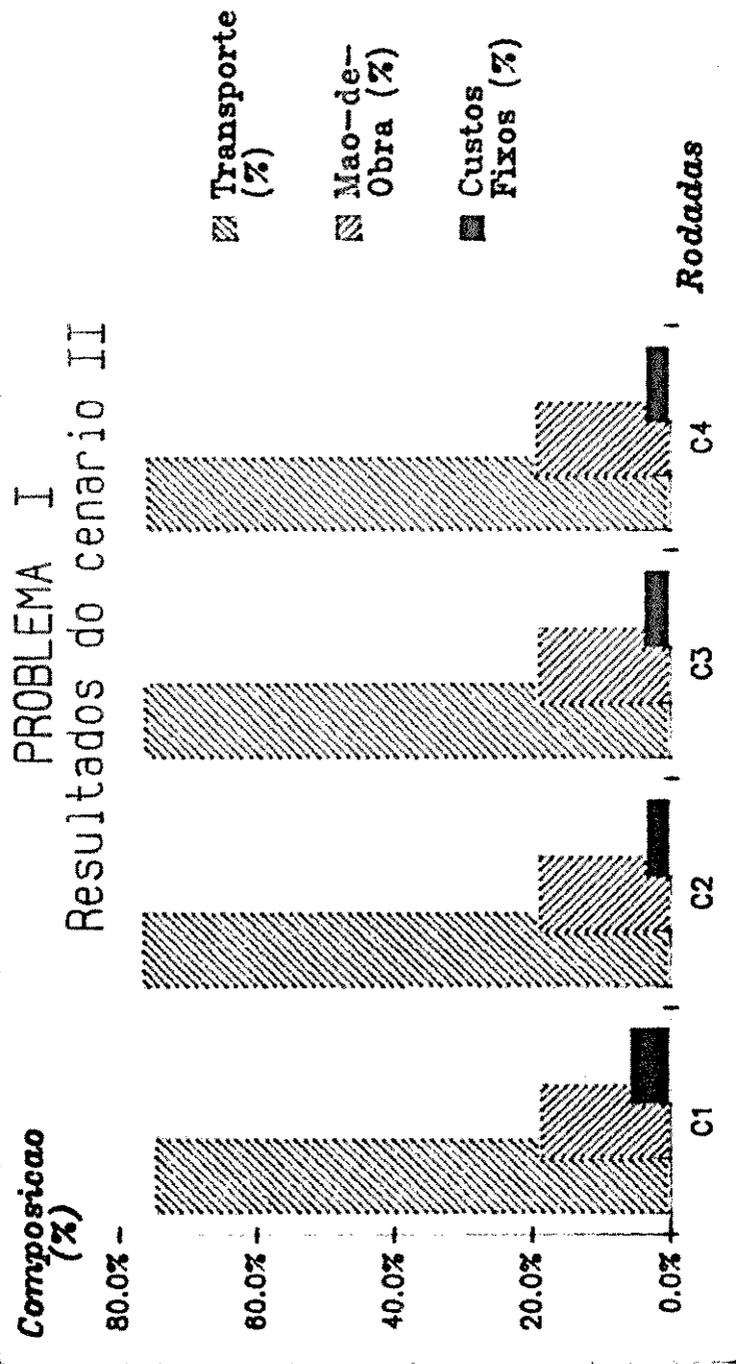


FIGURA IV.7 Composição percentual das parcelas da FO



IV.2 Segundo problema : Decisão do melhor sistema de distribuição

As alternativas de sistemas de distribuição consideradas são :

- Implantação de centrais de distribuição (CD);
- Implantação do uso de granel e/ou container como meio de unitização.

Em uma análise preliminar, os dados coletados demonstraram a inviabilidade das centrais de distribuição (CD) em relação aos silos verticais instalados na usina, pois, além de terem os mesmos custos de investimento em equipamentos e silos, as centrais (CD) ainda precisam de investimentos em infra-estrutura.

Considerando a melhor opção de silo vertical na usina tomada como referência, verificamos que as centrais de distribuição (CD), na melhor configuração, é pelo menos 10,0% mais cara (ver tabela abaixo). Esta situação é agravada porque as usinas que fazem parte do problema são suficientemente grandes para absorver a melhor opção dos silos verticais em usina (com capacidade para 1.000.000 sacos) e também porque os custos para as centrais (CD) na tabela não incluem o acréscimo da distância, devido ao deslocamento do açúcar para as centrais e destas para seu destino.

TABELA IV.3 Tabela de custos relativos de AUG e CD

Local Inst.	Capacidade (sacos)	Custo R. Invest. (A)	Custo R. Transb. Ad. (B)	Custo R. Inst. + Transb. (A + B)
U	1.000.000	1.00	-	1.00
	400.000	1.16	-	1.16
	200.000	1.20	-	1.20
	100.000	1.29	-	1.29
CD	7.000.000	1.11	0.02	1.13
	6.000.000	1.13	0.02	1.15
	5.000.000	1.08	0.02	1.10
	4.000.000	1.20	0.02	1.22
	3.000.000	1.27	0.02	1.29

A configuração do problema analisado aqui será de 50 usinas (U), 4 empacotadoras (E), 3 refinarias (R), 30 mercados de indústrias e comércio (I) e nenhuma central de distribuição (CD), aproveitando a solução do problema anterior e os resultados da análise sobre centrais (CD) acima. Além disso, analisamos o armazém horizontal em usinas (AUh) alternativamente ao armazém vertical (AUv). Os armazéns de aluguel (AUL e AUE) foram descartados porque em testes preliminares deste modelo observamos que as usinas (U) que tinham mais capacidade de armazenagem sempre seguravam as suas produções para a entressafra, em consequência, as usinas (U) que não tinham capacidade suficiente de armazenagem desovavam a sua produção na safra.

A tabela a seguir apresenta as condições de contorno das situações avaliadas.

TABELA IV.6 Descrição das condições de contorno

Descrição das rodadas	Tempo MPSX/MIP	Número de Iterações		Total Sol.Int.	
		1a.Sol.	Ótimo Total		
S C G D F A Outros					
D1 ● ● ¹ ● T H CONTAINER P/ I	38,90	3257	3321	3514	2
D2 ● ● ¹ ● T H	16,71	2491	2491	2500	1
D3 ● ● ² ● T V	-	-	-	-	2
D4 ● ● ² T	-	-	-	-	2
D5 ● T	-	-	-	-	1
D6 ● ● ² ● T V M. O. DOBRADA	-	-	-	-	2
D7 ● T V	0,88	668	668	668	1
D8 ● ● T V	1,13	632	632	632	1
D9 ● ● ² ● P V	-	-	-	-	1

Obs.:(-) indica informação ausente.

Descrição das colunas apresentadas na tabela IV.6 :

1)As colunas S, C e G indicam qual o tipo de unitização permitido na rodada, seja saco, em container ou a granel, respectivamente;

- 2) Os índices 1 e 2, na coluna C, indicam que o uso do container foi limitado a 200 e 120 mil sacos por usina, respectivamente;
- 3) a coluna D indica se foi dado um desconto para os mercados das indústrias e comércio (I), como forma de compensação pelo fato de não terem mais o saco para revender;
- 4) na coluna F, o T indica que foi utilizado o frete técnico e o P que foi utilizado o frete praticado no mercado, que corresponde à metade do frete técnico aproximadamente;
- 5) a coluna A indica qual o tipo de silo na usina (AUh ou AUg) permitido : H para o silo horizontal (AUh) ou V para o vertical (AUg). No caso do silo horizontal, adotamos um custo padrão anualizado de US\$100,000.00/ano e para o vertical aplicaremos a tabela IV.5 de acordo com a produção da usina;
- 6) A coluna Outros indica outros aspectos analisados em rodadas:
 - Na rodada D1 permitimos que o container pudesse ser enviado também para os mercados das indústrias e comércio (I);
 - Na rodada D5 todos os custos referentes a mão-de-obra tiveram seus valores dobrados.

As rodadas deste problema testam os seguintes aspectos :

- impacto de estender a utilização do container aos mercados de indústrias e comércio (I) paralelamente ao uso do silo horizontal na usina (AUh);
- viabilidade de implantar o silo horizontal na usina para atender as refinarias (AUh) e com possibilidade de usar container;
- decisão livre para implantar mini-silos (AUc), silos verticais (AUg) e as recepções de açúcar a granel nas instalações (RE, RR e RI);
- viabilidade de implantar mini-silos (AUc), permitindo somente uso de sacos (S) e containers (C);
- simulação da situação atual para referência, utilizando somente sacos (S);
- simulação da rodada anterior com os custos referentes à mão-de-obra (M.O.) dobrados;

- simulação da alternativa de granelização total, incluindo os investimentos;
- simulação da rodada anterior aplicando um aumento de custo ao granel, equivalente a um desconto que seria dado no preço do açúcar em sacos, com o propósito de convencer os clientes indústrias e comércio (I) a adotarem o sistema;
- simulação da rodada de referência com uma variação de 50% no frete.

Na tabela IV.7, onde mostramos os resultados obtidos, as colunas referem-se a :

- relação entre a FO da rodada e a FO da rodada considerada a situação atual (rodada D3) - $FO/FO_{at.}$;
- relação entre a FO da rodada e a FO da rodada considerada a solução da série (D1) - FO/FO^* ;
- participação do custo fixo (Fj) na FO - $F_j/FO \times 100.0$;
- participação da sacaria (S) na FO - $C_s/FO \times 100.0$;
- participação do container (C) na FO - $C_c/FO \times 100.0$;
- participação do granel (G) na FO - $C_g/FO \times 100.0$;
- participação dos outros custos (Outros) na FO, inclusive transporte e mão-de-obra - $C_o/FO \times 100.0$;
- total de mini-silos efetivamente abertos (AUC);
- total de silos verticais ou horizontais efetivamente abertos (AUG ou AUh);
- total de armazéns de sacos efetivamente utilizados (AUs);
- total de recepções para granel efetivamente implantados em empacotadoras (RE);
- total de recepções para granel efetivamente implantados em refinarias (RR);
- total de recepções para granel efetivamente implantados em mercados de indústrias e comércio (RI).

As figuras IV.8 e IV.9 ilustram os resultados em valores absolutos e percentuais.

TABELA IV.7 Resultados obtidos e composição dos custos finais

	FO/FOat.	FO/FO*	Fj	S	C	G	Outros	Inst. Abertas					
	(%)	(%)						(%)	(%)	(%)	(%)	g/h	g/h
Rodadas da Série D													
D1	87,1	100,0	7,0	6,3	2,0	0,3	84,5	50	34	22	-	2	-
D2	97,6	112,1	2,6	12,6	0,6	0,2	84,2	50	10	40	-	1	-
D3	99,3	114,1	0,7	18,2	0,8	-	80,3	50	-	43	-	-	-
D4	99,3	114,1	0,7	18,2	0,8	-	80,3	50	-	46	-	-	-
D5	100,0	114,9	-	18,7	-	-	81,3	-	-	41	-	-	-
D6	106,4	122,2	0,7	17,0	0,7	-	81,6	50	-	43	-	-	-
D7	130,3	149,7	25,8	-	-	0,7	73,6	-	50	-	4	3	30
D8	139,9	160,7	24,0	-	-	0,6	75,4	-	50	-	4	3	30
D9	64,1	73,6	-	29,2	-	-	70,8	-	-	44	-	-	-

Obs.: (-) indica valor nulo.

Comentários:

- A melhor alternativa (rodada D1) implanta silos horizontais (AUh) em 34 usinas (U) e utiliza container, até o limite máximo estipulado, em 49. A economia proporcionada por esta alternativa é de quase 15% considerando o investimento de 7%;
- A diferença entre as duas primeiras rodadas (D1 e D2) deve-se à extensão do uso do container para as indústrias (I), permitindo que o uso do granel seja ampliado (a tendência observada é que é feita mais de uma viagem com o saco, sendo uma delas para a refinaria, para diluir o custo de sua aquisição);
- A rodada D2, que considera a alternativa de implantar o silo horizontal, amplia o uso efetivo do container (considerado com limitação menor nas rodadas D3 a D9). A economia proporcionada é de 2,4% incluindo os investimentos de 2,6% da FO;

- A tendência do uso do container é observada na rodada D3, cuja solução é idêntica à da D4, onde só é permitido saco (S) e container (C). O granel não foi utilizado, mas o uso do container na safra e saco na entressafra possibilitou uma economia de 0,7%;
- Na rodada D5 observamos que a participação da mão-de-obra e do transporte juntos ultrapassa 80%;
- A influência da mão-de-obra no custo final, comparando as rodadas D4 e D6, é de 8,9% quando o valor da mão-de-obra dobra;
- A influência do frete no custo final, comparando as rodadas D5 e D9, é de quase 35% quando o valor do frete é reduzido à metade. A participação do saco cresce apenas 56%;
- A granelização total do sistema, se implantada (rodada D8), elevaria o custo do sistema em mais de 30%. Se fosse concedido aos mercados de indústrias e comércio (I) uma vantagem comercial equivalente ao preço de revenda do saco (S), para que adotassem o sistema de granelização em suas instalações, o aumento do custo seria de quase 40%;

FIGURA IV. 8 Custos absolutos da FO e suas parcelas principais

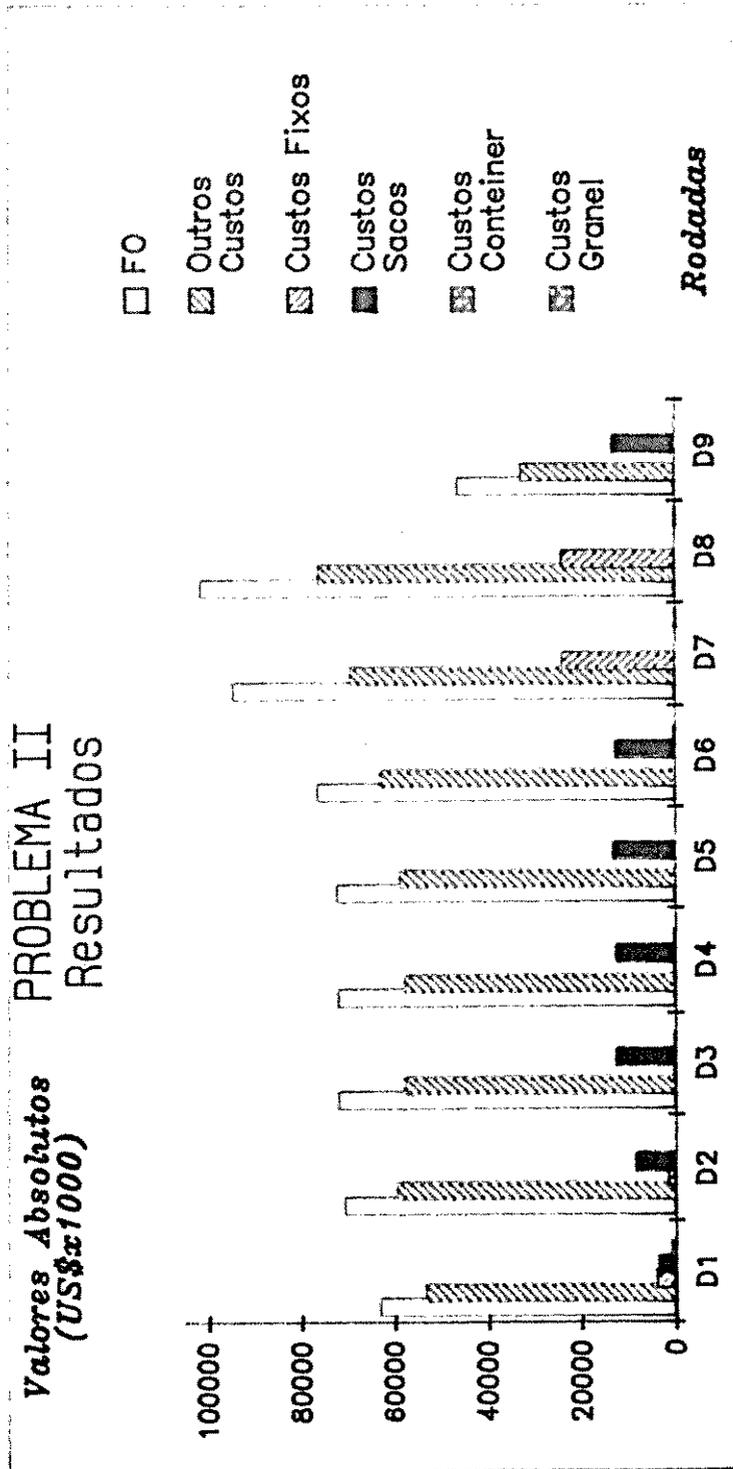
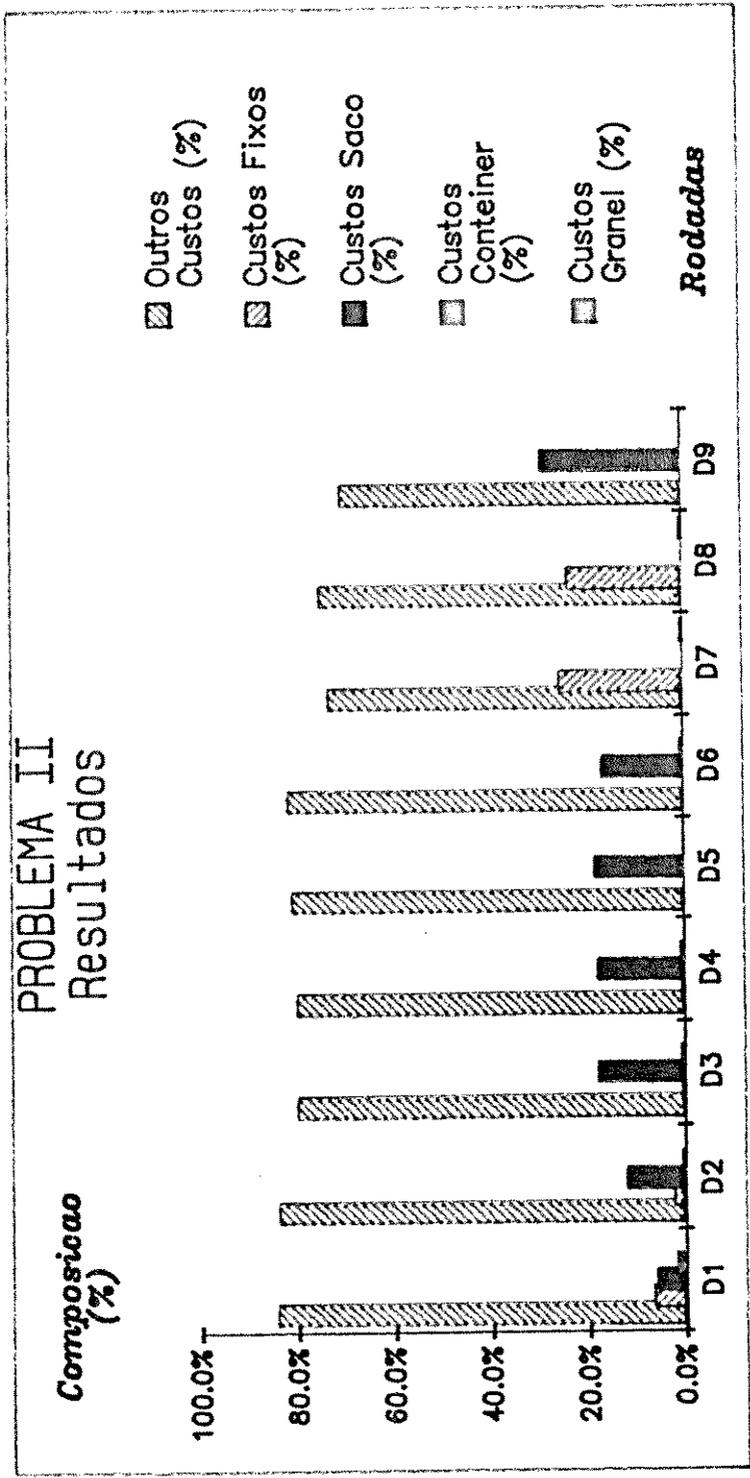


FIGURA IV.9 Composição percentual das parcelas da FO



IV.3 Aspectos operacionais e computacionais

Os procedimentos utilizados para a execução dos problemas, ilustrados na figura III.2, apresentaram alguns pontos fortes que enfatizamos :

- o programa gerador da matriz parametrizado mostrou-se bastante flexível em todas as simulações discutidas em IV.1 e IV.2 : apenas os arquivos de dados eram alterados em cada simulação;
- o programa gerador de mapas permitiu uma validação de resultados, validação dos fluxos, fácil e "amigável" porque :
 - permite uma visualização dos fluxos em mapa (ver figura III.3);
 - regiões com densidade de fluxos muito alta, "poluição visual", podem ser ampliadas (efeito "zoom");
 - em qualquer instante, para as instalações que aparecem na tela (ver figura III.4), pode-se consultar :
 - a) a origem dos fluxos que chegam;
 - b) o destino dos fluxos que saem;
 - c) as quantidades, os custos e os tipos de fluxos de entrada e saída;
 - d) o total de fluxo que passa pela instalação e
 - e) o custo total dos fluxos que passam pela instalação.

O esquema operacional utilizado da figura III.2, apresentou, entretanto, algumas desvantagens, inclusive devido ao ambiente computacional :

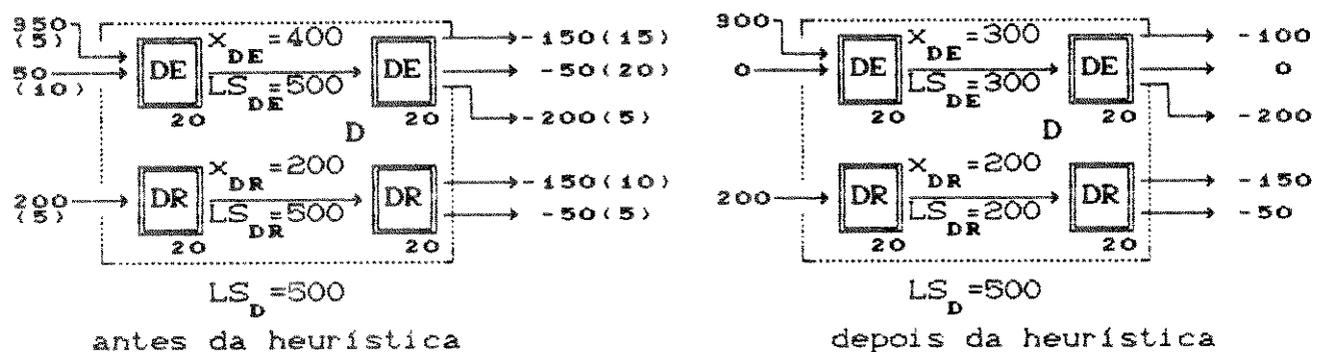
- ocorreram frequentes problemas de transferência de arquivos (quando as ligações entre o micro e o computador eram remotas, isto é, encontravam-se em locais distintos - São Paulo e Piracicaba), além do custo elevado de telefonia;
- o tempo de transmissão dos dados e recuperação dos resultados foram grandes, mesmo para simulações onde as decisões já estavam tomadas;
- pequenas simulações podem demorar horas para começar a processar, esperando na fila de processamento do computador.

As mudanças citadas acima aumentaram o número de arcos do problema I de 4440 para 4712, com 153 nós a mais.

Existe um problema quando usamos o micro : as restrições adicionais para controle da capacidade dos depósitos (D), que não aparecem no grafo porque são a soma de dois fluxos paralelos (de DE para DE' e de DR para DR'), fazem com que várias rodadas sejam executadas para uma mesma decisão y_j . Isto aumenta muito o tempo de resolução; para contornar o problema adotamos uma heurística que permite achar uma solução próxima do ótimo (erro de até 0,3% no teste com o problema I) utilizando no máximo duas rodadas.

A única situação que interessa à heurística é quando a soma dos fluxos que passam por DE e DR ultrapassa a capacidade de D, conforme a figura abaixo.

FIGURA IV.12 Exemplo de situação infactível no depósito D no TESEPFMCM

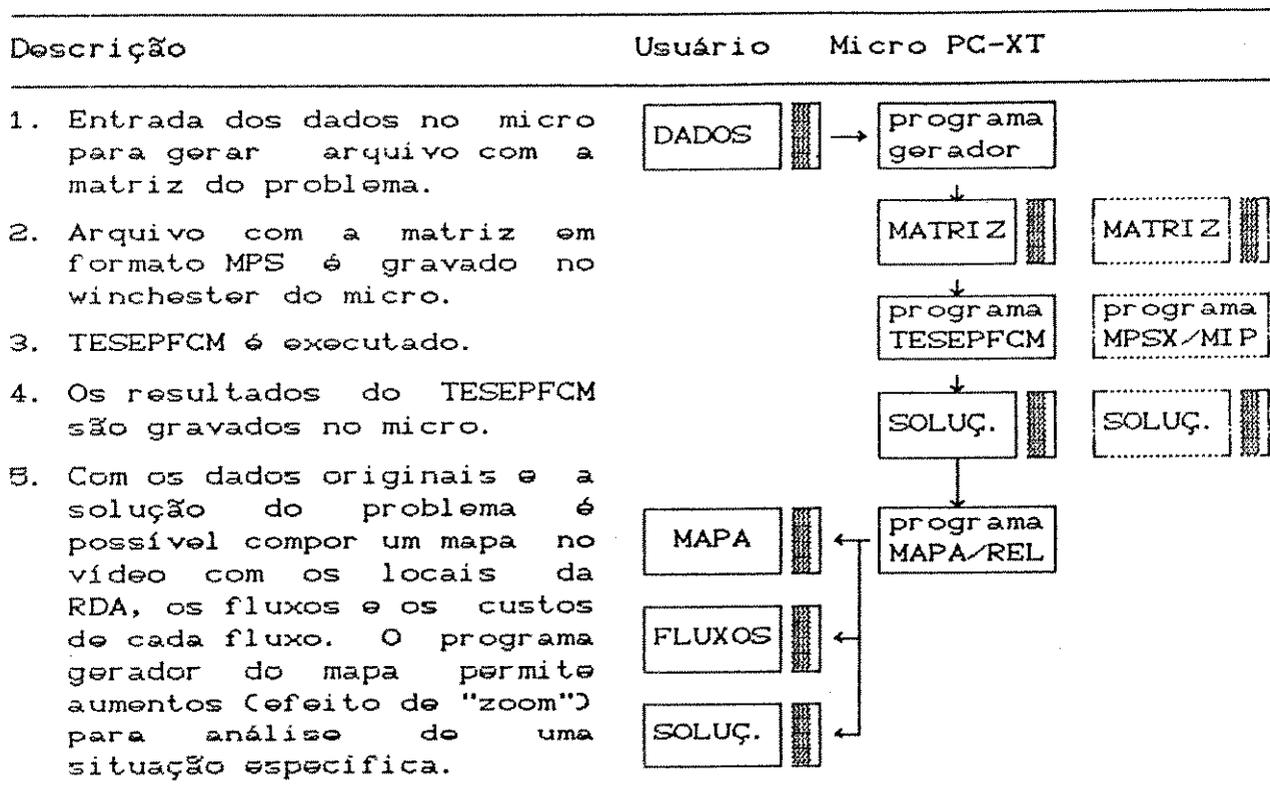


Obs.: O custo do arco está entre parentêses.

Os procedimentos são os seguintes :

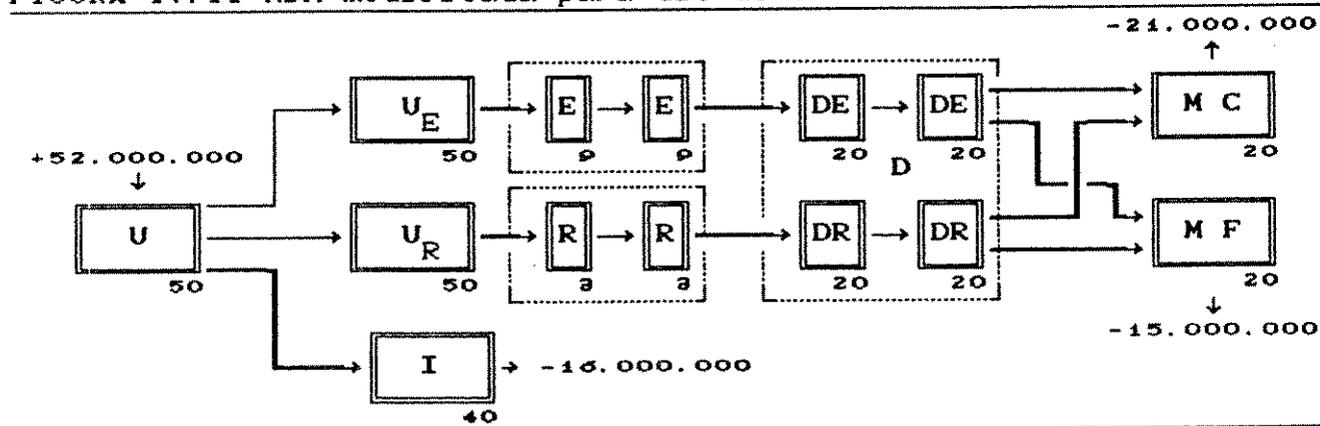
1. Calcule o excedente (no exemplo é 100 unidades);
2. Encontre o par de arcos com fluxo não nulo, um que chega em D e outro que parte de D, com a maior soma dos custos;
3. Subtraia do fluxo da parte do depósito correspondente, DE ou DR, o menor fluxo do par de arcos encontrados;

FIGURA IV.10 Sequência de operações para as rodadas com TESEPFM



Na figura IV.11, os arcos que ligam U a U_E e U a U_R representam o limite máximo de açúcar que a usina pode enviar para as empacotadoras e o mínimo a ser enviado para as refinarias, respectivamente. Os arcos que ligam E a E, R a R e D a D representam as capacidades de processamento e de armazenagem destas instalações.

FIGURA IV.11 RDA modificada para uso do TESEPFM

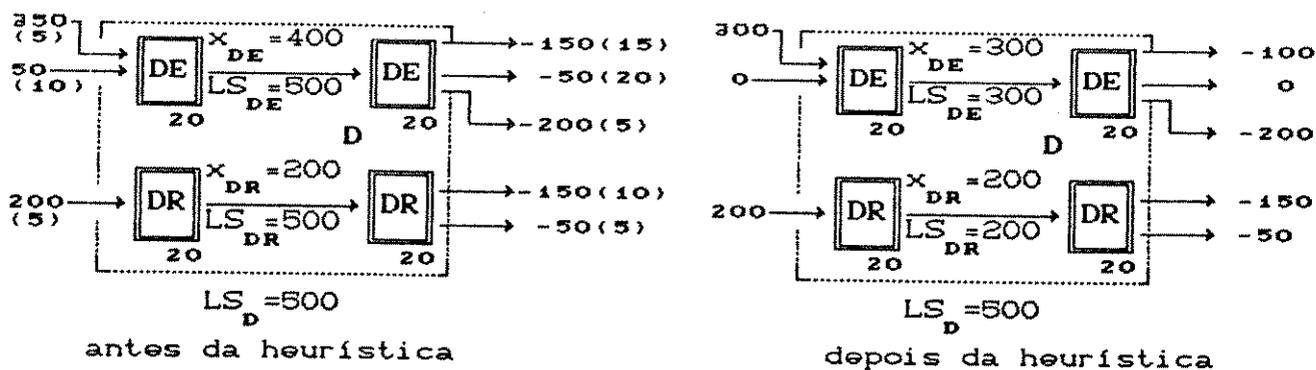


As mudanças citadas acima aumentaram o número de arcos do problema I de 4440 para 4712, com 153 nós a mais.

Existe um problema quando usamos o micro : as restrições adicionais para controle da capacidade dos depósitos (D), que não aparecem no grafo porque são a soma de dois fluxos paralelos (de DE para DE' e de DR para DR'), fazem com que várias rodadas sejam executadas para uma mesma decisão y_j . Isto aumenta muito o tempo de resolução; para contornar o problema adotamos uma heurística que permite achar uma solução próxima do ótimo (erro de até 0,3% no teste com o problema I) utilizando no máximo duas rodadas.

A única situação que interessa à heurística é quando a soma dos fluxos que passam por DE e DR ultrapassam a capacidade de D, conforme a figura abaixo.

FIGURA IV.12 Exemplo de situação infactível no depósito D no TESEPFM



Obs.: O custo do arco está entre parênteses.

Os procedimentos são os seguintes :

1. Calcule o excedente (no exemplo é 100 unidades);
2. Encontre o par de arcos com fluxo não nulo, um que chega em D e outro que parte de D, com a maior soma dos custos;
3. Subtraia do fluxo da parte do depósito correspondente, DE ou DR, o menor fluxo do par de arcos encontrados;

4. Repita os passos (2) e (3) até que a soma dos fluxos das partes do depósito destinado a empacotado e a refinado, respectivamente, seja igual ou inferior ao limite total do depósito;
5. Fixe as capacidades de cada uma das partes dos depósitos que estão no limite máximo (LS_{DE} e LS_{DR}) igual aos fluxos obtidos na rodada anterior, se não ultrapassarem os limites dos depósitos, ou igual aos fluxos obtidos com os passos 2 a 4, caso contrário;
6. Para os depósitos que apresentaram ociosidade, distribua entre os novos limites para empacotado e refinado a diferença entre o limite do depósito e os fluxos encontrados na rodada anterior ($LS_D - x_{DR} - x_{DE}$);
7. Execute o PFCM com os novos limites.

A heurística apresentada garante que :

- na segunda rodada não haverá "estouro" das capacidades dos depósitos (ver passo 6) e que
- a nova solução vai estar próxima do ótimo porque utiliza o máximo do resultado anterior, que era melhor do que o ótimo desejado.

O tempo de execução do problema I no micro PC-XT com 640Kb de RAM foi de uma hora e 45 minutos. Entretanto, este tempo melhora consideravelmente quando usamos um PC-AT286 com co-processador e 640Kb de RAM (10 minutos).

Com estes resultados, podemos pensar em aplicar o modelo para o planejamento diário da distribuição, desde que interfaces amigáveis sejam criadas para eliminar a necessidade de um especialista de pesquisa operacional.

É possível também estudar problemas regionais de localização, com um pequeno número de instalações possíveis, utilizando o algoritmo de enumeração completa do programa CRONOS desenvolvido também na FEE/UNICAMP (Carlson Filho (1984)).

CAPÍTULO V - RESULTADOS FINAIS, CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

V.1 Resultados finais e conclusões do trabalho

Os resultados obtidos com as rodadas serviram para indicar tendências do sistema de distribuição de açúcar e para delimitar o escopo dos cenários avaliados, além de responderem às questões iniciais detalhadamente. Já os procedimentos operacionais e computacionais necessários à execução das rodadas contribuíram para algumas inovações que resumimos a seguir.

V.1.1. Conclusões do primeiro problema : Localização das instalações industriais intermediárias

O sistema atual está superdimensionado. A configuração pode ser escolhida entre quaisquer das alternativas com 4 a 6 empacotadoras (E), com 2 refinarias (R) e com 9 a 10 depósitos (D), porque a variação na função objetivo (FO) é pequena. A alternativa da rodada A6 (pag.78) é a mais indicada.

Considera-se o fator local da instalação mais importante que a quantidade de instalações. Isto é decorrente da variação do custo de implantação em função de valorização dos terrenos.

O custo total dos investimentos tem pouca influência no sistema, comparado ao custo de transporte, devido às distâncias e às quantidades envolvidas. O custo do transporte (em torno de 75% do custo total) poderia ser reduzido se outra modalidade de transporte fosse viabilizada (ferrovias e hidrovias eficientes).

V.1.2. Conclusões do segundo problema : Decisão da melhor alternativa de distribuição

Não há economia de escala e de transporte que justifiquem as centrais de distribuição (CD). Esta posição deve ser revista caso haja a possibilidade de implantação de outras modalidades de transporte que sejam muito mais eficientes.

A granelização total na situação atual é inviável, mesmo que o custo da mão-de-obra dobre ou que o custo de investimento seja reduzido à metade.

Pode-se obter uma economia de até 15,9% apenas investindo em armazéns horizontais (AUh) e mini-silos (AUc), ampliando o uso de container para empacotadoras (E) e para mercados de indústrias e comércio (I) e o uso do granel apenas para refinarias (R), investindo o equivalente a 5,3% da situação atual.

Com menos investimento é possível reduzir o custo do sistema atual em 1,4% (equivalente a aproximadamente um milhão de dólares) modificando a política de tipos de unitização de forma a estimular o uso de container na safra e continuar a sacaria na entressafra.

V.1.3. Conclusões dos aspectos operacionais e computacionais :

Algumas inovações foram criadas especificamente para resolver estes problemas e acreditamos serem úteis para outras situações :

- Utilizamos o conceito de *classe de nós* para uma representação mais didática do problema, evitando assim uma "poluição visual" dos grafos apresentados, como também para uma redução do porte do problema, obtida pela redução do número de variáveis e restrições.

- Aplicamos uma heurística que utiliza os aspectos geográficos para reduzir o porte do problema, seja pela eliminação de alternativas de transporte desnecessárias, seja pela alocação de instalações possíveis para o atendimento das demandas;
- Utilizamos os conceitos de mercados CIF e mercados FOB para resolver problemas práticos específicos como é o caso do "frete de retorno";
- Desenvolvemos saídas gráficas, um programa gerador de mapas com possibilidade de "zoom" e de mostrar os valores dos fluxos e dos custos para cada instalação, como mídia para discussão e refinamento dos resultados ;
- Desenvolvemos, também, uma nova versão do programa de fluxo de custo mínimo (PFCMD para micro (denominado TESEPFCMD, com capacidade para 5300 arcos e 500 nós (a capacidade pode ser ampliada para quase 10000 arcos e 1000 nós se os números utilizados no grafo forem menores que 32768 unidades inteiras).

IV.2 Perspectivas de continuação do trabalho

As perspectivas de continuação do trabalho poderiam ser basicamente em quatro direções:

- Refinamento dos modelos para atender a distribuição a nível operacional, inclusive considerando o "problema de armazenamento em trânsito", ou seja, considerando a capacidade de armazenamento do transporte, que ocorre quando o produto está sendo transportado para seu destino. Este refinamento permitiria a introdução de técnicas mais produtivas como "Just-In-Time", por exemplo, tanto na distribuição quanto na produção das refinarias e das empacotadoras;
- Redefinição dos programas computacionais utilizados, para genericamente criar e implementar redes de distribuição sem a necessidade de programar (criar um programa de computador com interface amigável com o usuário);
- Exploração da capacidade dos microcomputadores para problemas grande porte que envolvam multifluxo, perdas em grafos e programação inteira, com utilização de estruturas compactas de dados;
- Exploração de heurísticas que limitem automaticamente as alternativas possíveis, considerando aspectos geográficos do problema e outros conhecimentos.

ANEXO A

FORMULAÇÕES DE ALGUNS MODELOS APRESENTADOS NO CAPÍTULO II.

Os modelos estão na ordem em que foram citados :

■ Problema de localização de instalações não capacitadas - PLINC

	$\text{Min } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{i \in I} F_i \cdot z_i \quad (1)$
(PLINC)	$\text{s. a. } \sum_{i \in I} x_{ij} = 1, \quad j \in J \quad (2)$
	$x_{ij} \leq z_i, \quad i \in I, \quad j \in J \quad (3)$
	$x_{ij} \geq 0, \quad i \in I, \quad j \in J \quad (4)$
	$z_i \in \{0,1\}, \quad i \in I \quad (5)$

onde:

x_{ij} é a fração da demanda do cliente j satisfeita pela instalação i ;

z_i é a variável de decisão de implantação de i que assume o valor 1, se for implantada, e 0, caso contrário(5);

C_{ij} são os custos de produção e distribuição para suprir toda a demanda do cliente j a partir da instalação i ;

F_i são os custos fixos de instalar i ;

I, J são o conjunto de locais candidatas à instalação de i e o conjunto de áreas de demanda dos clientes j , respectivamente.

■ Problema de localização de instalações não capacitadas 2 - PLINC'

Problema anterior, onde a variável x_{ij} é o fluxo de unidades do produto (PLINC'), ao invés de fração da demanda, modificando as equações (1),(2) e (3) e mantendo inalteradas (4) e (5).:

$$\begin{aligned} & \text{Min } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{i \in I} F_i \cdot z_i & (6) \\ \text{(PLINC')} & \text{ s.a. } \sum_{i \in I} x_{ij} = D_j, \quad j \in J & (7) \\ & \sum_{j \in J} (x_{ij}/D_j) \leq z_i, \quad i \in I & (8) \end{aligned}$$

onde:

x_{ij} é o número de produtos da instalação i que satisfazem a demanda do cliente j ;

c_{ij} é o custo unitário de produção e distribuição a partir da instalação i para o cliente j ;

D_j é a demanda do cliente j ;

As outras variáveis permanecem inalteradas.

■ Problema de localização de instalações não capacitadas 3 - PLINC''

Variante de PLINC' onde a variável x_{ij} é desdobrada em custos de produção e distribuição na função objetivo :

$$\text{(PLINC'')} \quad \text{Min } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (p_i + t_{ij}) \cdot x_{ij} + \sum_{i \in I} F_i \cdot z_i \quad (9)$$

onde:

p_i é o custo unitário de operação da instalação i (incluindo custos de produção e administrativos);

t_{ij} é o custo unitário de transporte da instalação i para o cliente j ;

■ Problema de localização de instalações capacitadas - PLIC

Problemas onde são considerados limites superiores para as capacidades das unidades.

$$\begin{aligned} & \text{Min } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{i \in I} F_i \cdot z_i & (10) \\ \text{(PLIC)} \quad & \text{s. a. } \sum_{i \in I} x_{ij} = 1, \quad j \in J & (11) \\ & \sum_{j \in J} D_j \cdot x_{ij} \leq L_i \cdot z_i, \quad i \in I & (12) \\ & x_{ij} \geq 0, \quad i \in I, \quad j \in J & (13) \\ & z_i \in \langle 0,1 \rangle, \quad i \in I & (14) \end{aligned}$$

onde:

- x_{ij} é a fração da demanda do cliente j satisfeita pela unidade i ;
- z_i é a variável da decisão de instalação de i que assume o valor 1, se for implantada, e 0, caso contrário (14);
- C_{ij} são os custos de produção e distribuição para suprir toda a demanda de j a partir de i ;
- F_i são os custos fixos de instalar i ;
- I, J são, respectivamente, os conjuntos de locais candidatos à instalação de i e de áreas de demanda j ;
- D_j é a demanda do cliente j ;
- L_i é a capacidade (limite) de i .

■ Problema de localização de instalações capacitadas 2 - PLIC'

Variação do PLIC proposto por Geoffrion & McBride(1978):

$$\begin{aligned} & \text{Min } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{i \in I} F_i \cdot z_i & (15) \\ \text{(PLIC')} \quad & \text{s. a. } \sum_{i \in I} x_{ij} = 1, \quad j \in J & (16) \\ & \underline{L}_i \cdot z_i \leq \sum_{j \in J} D_j \cdot x_{ij} \leq \bar{L}_i \cdot z_i, \quad i \in I & (17) \\ & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} a_{ijq} \cdot x_{ij} + \sum_{i \in I} b_{iq} \cdot z_i > r_q, \quad q \in Q & (18) \\ & x_{ij} \geq 0, \quad i \in I, \quad j \in J & (19) \\ & z_i \in \langle 0,1 \rangle, \quad i \in I & (20) \end{aligned}$$

onde:

\bar{L}_i é o limite superior de capacidade de i ;

\underline{L}_i é o limite inferior de capacidade de i ;

a_{ijq} , b_{iq} e r_q são constantes do conjunto de restrições lineares.

■ Problema de localização de instalações capacitadas estocástico - PLICE

$$\left. \begin{aligned} \text{Min } & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{i \in I} F_i \cdot z_i + \\ & + \sum_{j \in J} \left[h_j \int_0^{y_j} (y_j - v) \phi_j(v) dv + p_j \int_{y_j}^{\infty} (v - y_j) \phi_j(v) dv \right] \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

(PLICE) s.a. $\sum_{i \in I} x_{ij} = y_j$, $j \in J$ (22)

$$\sum_{j \in J} x_{ij} \leq S_i, \quad i \in I \quad (23)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad i \in I, j \in J \quad (24)$$

$$z_i \in \{0,1\}, \quad i \in I \quad (25)$$

$$y_j \geq 0, \quad j \in J \quad (26)$$

onde:

x_{ij} é o número de produtos da demanda do cliente j satisfeita pela instalação i ;

y_j é o total da demanda j satisfeita pelas instalações i ;

z_i é a variável de decisão de implantação de i que assume o valor 1, se for implantada, e 0, caso contrário (25);

c_{ij} são os custos unitários de produção e distribuição para suprir a demanda de j a partir de i ;

h_j e p_j são, respectivamente, os custos unitários de excesso do produto em j e de reposição do produto em j ;

F_i são os custos fixos para instalar i ;

I, J são os conjuntos de locais candidatos à instalação das unidades i e o de áreas de demanda dos clientes j , respectivamente;

S_i é a oferta de produtos em i ;

$\phi_j(v)$ é a função de densidade da demanda de j ;

■ Problema de localização de instalações modulares - PLIM

Modelo proposto por Kaufman, Eede & Hansen(1977) que adaptava a formulação do (PLINC) para incluir Instalações Modulares no sentido de se ter dois níveis de distribuição (produção e armazenamento) como é mostrada abaixo:

$$\text{Min } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_{ijk} \cdot x_{ijk} + \sum_{i \in I} F_i \cdot z_i + \sum_{j \in J} G_j \cdot y_j \quad (21)$$

$$\text{s.a. } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijk} = 1, \quad k \in K \quad (22)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ijk} \leq z_i, \quad i \in I, \quad k \in K \quad (23)$$

(PLIM)

$$\sum_{i \in I} x_{ijk} \leq y_j, \quad j \in J, \quad k \in K \quad (24)$$

$$z_i \leq y_i, \quad i \in I \quad (25)$$

$$x_{ijk} \geq 0, \quad i \in I, \quad j \in J, \quad k \in K \quad (26)$$

$$y_j, z_i \in \langle 0,1 \rangle, \quad i \in I, \quad j \in J \quad (27)$$

onde:

x_{ijk} é a fração da demanda do cliente k produzida pela unidade i e armazenada na unidade j ;

z_i é a variável de decisão de implantação da instalação de produção i que assume o valor 1 se for implantada e 0 caso contrário;

y_j é a variável de decisão de implantação da instalação de armazenagem j que assume o valor 1 se for implantada e 0 caso contrário;

C_{ijk} são os custos de produção e distribuição para suprir toda a demanda de k saindo de i passando por j ;

F_i são os custos fixos de instalar i ;

G_j são os custos fixos de instalar j ;

I, J, K são, respectivamente, o conjunto de locais candidatos à instalação das unidades de produção i , o conjunto de locais candidatos à instalação das unidades de armazenagem j e o

conjunto de áreas de demanda dos clientes k.

■ Problema de localização de instalações modulares 2 - PLIM'

Generalização do modelo anterior, proposto por Tcha e Lee (1984), que utiliza uma abordagem de fluxo em redes (PLIM') :

$$\text{Min } \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} C_{pk} \cdot x_{pk} + \sum_{j=1}^J \sum_{i(j) \in I(j)} F_{i(j)} \cdot z_{i(j)} \quad (28)$$

$$\text{s. a. } \sum_{p \in P} x_{pk} = 1, \quad k \in K \quad (29)$$

(PLIM')

$$x_{pk} \leq z_{i(j)}, \quad p \in P_{i(j)}, \quad k \in K, \quad i(j) \in I(j), \quad j=1..J \quad (30)$$

$$x_{pk} \geq 0, \quad p \in P, \quad k \in K \quad (31)$$

$$z_{i(j)} \in (0,1), \quad i(j) \in I(j), \quad j=1..J \quad (32)$$

onde:

x_{pk} é a fração da demanda do cliente k suprida através do caminho p;

$z_{i(j)}$ é a variável de decisão de implantação da unidade $i(j)$ que assume o valor 1, se for implantada, e 0, caso contrário;

C_{pk} são os custos de produção e distribuição para suprir toda a demanda do cliente k através do caminho p;

$F_{i(j)}$ são os custos fixos de instalar a unidade $i(j)$;

K é o conjunto de áreas de demanda;

J é o número de unidades;

$I(j)$ é o conjunto de todos os locais possíveis $i(j)$ para a unidade j;

P é o conjunto de todos os caminhos p (i.e. $P = \{ (i(1), i(2), \dots, i(J)) \mid i(j) \in I(j), j=1..J \}$);

$P_{i(j)}$ é o conjunto de todos os caminhos possíveis que passam pelo local $i(j)$ com j-ésima unidade;

■ Problema de localização de instalações não capacitadas com múltiplos produtos - PLINCMP

Modelo proposto por Warszawski(1973).

$$\text{Min } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} C_{ijp} \cdot x_{ijp} + \sum_{i \in I} \sum_{p \in P} F_{ip} \cdot z_{ip} \quad (33)$$

$$\text{s. a. } \sum_{i \in I} x_{ijp} = 1 \text{ se } D_{jp} \geq 0, j \in J, p \in P \quad (34)$$

$$\sum_{p \in P} z_{ip} \leq 1, i \in I \quad (35)$$

(PLINCMP)

$$\sum_{j \in J} x_{ijp} \leq z_{ip}, i \in I, p \in P \quad (36)$$

$$x_{ijp} \geq 0, i \in I, j \in J, p \in P \quad (37)$$

$$z_{ip} \in \langle 0,1 \rangle, i \in I, p \in P \quad (38)$$

onde:

x_{ijp} é a fração da demanda do cliente j pelo produto p satisfeita pela unidade i ;

z_{ip} é a variável de decisão de implantação de i para o produto p que assume o valor 1 se for implantada e 0 caso contrário;

C_{ijp} são os custos de produção e distribuição para suprir toda a demanda de j pelo produto p a partir de i ;

F_{ip} são os custos fixos de instalar i para produzir p ;

D_{jp} é a demanda de j por p ;

I, J, P são o conjunto de locais candidatos à instalação de i , o conjunto de áreas de demanda j e o conjunto de produtos p , respectivamente.

■ Problema de localização de instalações capacitadas com múltiplos produtos - PLICMP

Formulação do modelo anterior considerando o problema capacitado proposto por Elson (1972) :

$$\begin{aligned} \text{Min } & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} c_{ijp}^n \cdot x_{ijp} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{n \in N} \sum_{p \in P} c_{jknp}^t \cdot y_{jknp} + \\ & + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} c_{ip}^h \cdot x_{ijp} + \sum_{j \in J} (f_j^o + f_j^w) \cdot z_j + \\ & + \sum_{j \in J'} f_j^o \cdot z_j' + \sum_{j \in J} f_j^f \cdot w_j - \sum_{j \in J'} (f_j^x + f_j^o) \cdot z_j' \end{aligned} \quad (39)$$

$$\text{s.a. } \sum_{j \in J} x_{ijp} \leq S_{ip}, \quad i \in I, p \in P \quad (40)$$

$$\sum_{j \in J} y_{jknp} \leq D_{knp}, \quad k \in K, n \in N, p \in P \quad (41)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ijp} = \sum_{k \in K} \sum_{n \in N} y_{jknp}, \quad j \in J, p \in P \quad (42)$$

(PLICMP) $\sum_{i \in I} \sum_{p \in P} x_{ijp} < L_j + E_j \cdot z_j' - L_j \cdot z_j + w_j, \quad j \in J' \quad (43)$

$$(F_j - E_j) \cdot z_j - w_j \geq 0, \quad (44)$$

$$z_j + z_j' \leq 1, \quad j \in J' \quad (45)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{p \in P} x_{ijp} \leq L_j \cdot z_j + w_j, \quad j \in J' \quad (46)$$

$$F_j \cdot z_j - w_j \geq 0, \quad j \in J' \quad (47)$$

$$x_{ijp} \geq 0, \quad i \in I, j \in J, p \in P \quad (48)$$

$$y_{jknp} \geq 0, \quad j \in J, k \in K, n \in N, p \in P \quad (49)$$

$$z_j, z_j', z_j'' \in (0,1), \quad j \in J \quad (50)$$

onde:

x_{ijp} é o número de produtos p , a partir da unidade produção i para a unidade de distribuição j ;

y_{jknp} é o número de produtos p , a partir da unidade de distribuição j para o cliente k com o nível de serviço n ;

z_j, z_j', z_j'' são as variáveis de decisão para implantar, expandir por um valor mínimo ou fechar, respectivamente, a unidade de distribuição j , que assumem o valor 1 se for implantada e 0 caso contrário;

c_{ijp}^n, c_{jknp}^t são os custos unitários de transporte;
 f_j^v, f_j^o são os custos fixos de implantação e operação das instalação
 de distribuição k , respectivamente;
 f_j^e, f_j^f são os custos de expansão mínima e subsequentes,
 respectivamente;
 f_j^x é a economia devido ao fechamento da unidade de distribuição j ;
 c_{jp}^h é o custo de passagem do produto p pela unidade de distribuição
 j ;
 w_j é o número de unidades extras (além do mínimo) de expansão da
 unidade de distribuição k ;
 S_{ip}, D_{knp} são a oferta e a demanda do produto p ;
 L_j é a capacidade da unidade de distribuição k ;
 E_j, F_j são o menor e o maior aumento de capacidade na unidade de
 distribuição j ;
 I, J, K, N e P são os conjuntos de locais candidatos à instalação
 das unidades de produção i , das unidades de distribuição j , de
 áreas de demanda dos clientes k , de nível de serviço n e o
 conjunto de produtos p , respectivamente.
 J', J'' são os conjuntos de unidades de distribuição candidatos a
 instalação e de unidades existentes, respectivamente, onde
 $J = J' \cup J''$.

■ Problema de localização de instalações capacitadas com múltiplos produtos 2 - PLICMP'

Formulação de Geoffrion-Graves-Lee(1978) para o modelo anterior que permite a representação de, por exemplo:

- origem única de produtos é imposta a apenas alguns itens similares;
- permissão da violação das capacidades dos armazéns com multas;
- limites inferiores e superiores nas capacidades para controlar parcialmente as economias de escala;
- e custos diferenciados de passagem de cada produto por uma determinada unidade de distribuição.

O modelo é apresentado a seguir:

$$\left. \begin{aligned} \text{Min } & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} c_{ijkp} \cdot x_{ijkp} + \\ & + \sum_{j \in J} \left[f_j \cdot z_j + \sum_{k \in K} \sum_{b \in B_k} \sum_{p \in P_k(b)} v_{jp} \cdot D_{kp} \cdot y_{jkb} \right] + \\ & + \sum_{j \in J} \left[\underline{P}_j \cdot \underline{1}_j + \bar{P}_j \cdot \bar{1}_j \right] \end{aligned} \right\} \quad (51)$$

$$\text{s. a. } \sum_{i \in I} x_{ijkp} \leq \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} x_{ijkp} \leq \bar{S}_{ip}, \quad i \in I, p \in P \quad (52)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ijkp} = D_{kp} \cdot y_{jkb}, \quad j \in J, b \in B_k, p \in P_k(b) \quad (53)$$

$$\sum_{j \in J} y_{jkb} = 1, \quad k \in K, b \in B_k \quad (54)$$

$$\text{(PLICMP')} \quad \underline{L}_j \cdot z_j - \underline{1}_j \leq \sum_{k \in K} \sum_{b \in B_k} \sum_{p \in P_k(b)} \beta^p \cdot D_{kp} \cdot y_{jkb} \leq \bar{L}_j \cdot z_j - \bar{1}_j, \quad (55)$$

$$\underline{1}_j, \bar{1}_j \geq 0, \quad j \in J \quad (56)$$

$$x_{ijkp} \geq 0, \quad i \in I, j \in J, k \in K, p \in P \quad (57)$$

$$z_j \in (0,1), \quad j \in J \quad (58)$$

onde:

x_{ijkp} é o número de produtos p , a partir da unidade produção i para o cliente k passando pela unidade de distribuição j ;

z_j é a variável de decisão de implantação da unidade de distribuição j , que assume o valor 1, se for implantada, e 0, caso contrário;

y_{jkb} é a variável de decisão pela passagem do conjunto de produtos b , para o cliente k passando pela unidade de distribuição j ;

c_{ijkp} é o custo unitário de produção e distribuição do produto p , a partir da unidade produção i para o cliente k passando pela unidade de distribuição j ;

f_j é o custo fixo de implantação da unidade de distribuição j ;

v_{jp} é o custo unitário variável pela passagem do produto p pela unidade de distribuição j ;

D_{kp} é a demanda do cliente k pelo produto p ;

$\underline{P}_j, \bar{P}_j$ são os custos adicionais ('penalty costs') que penalizam a

violação dos limites inferiores e superiores, respectivamente, das capacidades das unidades de distribuição j ;

\underline{S}_{ip} , \bar{S}_{ip} são as capacidades mínima e máxima, respectivamente, de oferta do produto p pela unidade i ;

\underline{l}_j , \bar{l}_j são as capacidades extras inferior e superior, respectivamente, de passagem pela unidade de distribuição j ;

\underline{L}_j , \bar{L}_j são as capacidades mínima e máxima, respectivamente, de passagem dos produtos pela unidade de distribuição j ;

B_k é o conjunto de índices de agrupamento dos produtos do cliente k ;

$P_k(b)$ é o conjunto de índices dos produtos correspondentes ao agrupamento b para o cliente k ;

β^p é o fator de agrupamento do produto p usado para calcular a utilização da capacidade de passagem pela unidade de distribuição;

ANEXO B

TERMINOLOGIA DA CLASSIFICAÇÃO DO AÇÚCAR

AÇÚCAR - [do sânscrito *çarkara*, 'grãos de areia', prácrito *sakkar*, através do árabe *as-sukkar*] Produto alimentar fabricado industrialmente, de sabor doce, solúvel na água, extraído sobretudo da cana-de-açúcar e da beterraba;

COR ICUMSA - Valor numérico da cor de uma solução açucarada, medido através da International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis;

REFLECTANCIA - Porcentagem de luz refletida por uma superfície de amostra de cristais, medida em um fotômetro de reflexão, ou seja, é a expressão numérica da brancura do açúcar;

PONTOS PRETOS - Partículas escuras visíveis a olho nu;

RESÍDUOS INSOLÚVEIS - Impurezas insolúveis contidas no açúcar provenientes da cana-de-açúcar;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIKENS, C. H. (1985) ; "Facility location models for distribution planning.", European Journal of Operational Research, 22, 263-279, Elsevier Science Publishers B.V. (North Holland).
- AKINC, U. e KHUMAWALA, B. M. (1977) ; "An efficient branch and bound algorithm for the capacitated warehouse location problem", Management Science, vol. 23, 585-594, The Institute of Management Sciences.
- ASHFORD, R. W. e DANIEL, R. C. (1988) ; "A note on evaluating LP software on personal computers for industrial applications", European Journal of Operational Research, 35, 160-164, North Holland Publishing Company.
- ASSAD, A. A. (1978) ; "Multicommodity network flows - a survey", Networks, vol. 8, 37-91.
- AURÉLIO B. de H. F. (1986) ; Novo Dicionário da língua portuguesa, Ed. Nova Fronteira, 2a. ed.
- BAKER, B. M. (1986) ; "A partial dual algorithm for the capacitated warehouse location problem", European Journal of Operational Research, 23, 48-56, Elsevier Science Publishers B.V. (North Holland).
- BEASLEY, J. E. (1988) ; "An algorithm for solving large capacitated warehouse location problems", European Journal of Operational Research, 33, 314-325, Elsevier Science Publishers B.V. (North Holland).
- BILDE, O. e KRARUP, J. (1977) ; "Sharp lower bounds for the simple location problem", Annal of Discrete Mathematics, 1, 79-97.
- BITRAN, G. R., CHANDRU V., SEMPOLINSKI, D. E. e SHAPIRO, J. F. (1981) ; "Inverse Optimization : An application to the capacitated plant location problem", Management Science, vol. 27, n. 10, (October), 1120-1141, The Institute of Management Sciences.

- BOOKBINDER, J. H. e REECE, K. E. (1988) ; "Vehicle routing considerations in distribution system design", European Journal of Operational Research, 37, 204-213, Elsevier Science Publishers B. V. (North Holland).
- CARLSON FILHO, C. M., Fernandes, J. F. R., Tavares, H. M. F., Neves Filho, A. (1984); "Cronograma de implantação de estações telefônicas : manual técnico do programa CRONOS II", CTO24A/83, RT-31 Aditivo 1, FEC-UNICAMP (setembro).
- CARLSON FILHO, C. M., Fernandes, J. F. R., Tavares, H. M. F., Neves Filho, A. (1984); "Cronograma de implantação de estações telefônicas : manual do usuário do programa CRONOS II", CTO24A/83, RT-32 Aditivo 1, FEC-UNICAMP (setembro).
- CHRISTOFIDES, N. e BEASLEY, J. E. (1983) ; "Extensions to Lagrangean relaxation approach for the capacitated warehouse location problem.", European Journal of Operational Research, 12, 19-28, North Holland Publishing Company.
- CROWDER, H., JOHNSON, E. L. e PADBERG, M. (1982) ; "Solving large-scale zero-one linear programming problems", Operations Research, 31, n.5, 803-834.
- DEARING, P. M. e NEWRUCK, F. C. (1979) ; "A capacitated bottleneck facility location problem", Management Science, 11, 1093-1104, The Institute of Management Sciences.
- EFROYMSON, M. A. e RAY, T. L. (1966) ; "A branch-bound algorithm for plant location", Operations Research, (May-June) 361-368, Operations Research Society of America.
- ELSON, D. G. (1972) ; "Site location via integer-mixed programming", Operational Research Quaterly, 23, 31-43.
- ERLENKOTTER, D. (1978) ; "A dual-based procedure for uncapacitated facility location", Operations Research, 26, 992-1009, Operations Research Society of America.

- FELDMAN, E., LEHRER, F. A. e RAY, T. L. (1966) ; "Warehouse location under continuous economies of scale", Management Science, vol.12, no.9 (May), 670-684, The Institute of Management Sciences.
- FLORES, R. A. A. (1985) ; "Método de partição primal para redes multifluxo : Uma aplicação a problemas de localização de armazéns agrícolas", Tese de mestrado, FEE-UNICAMP (julho).
- FRANÇA, P. M. (1979) ; "Problemas de localização : Solução por decomposição", Tese de doutorado, FEE-UNICAMP (março).
- GARCIA-DIAZ, A., HOGG, G. L., PHILLIPS, D. T. e WORREL, E. J. (1983) ; "Combined simulation and network optimization analysis of a production/distribution system", Simulation (February), 59-66.
- GARFINKEL, R. S. e RAO, M. R. (1971) ; "The bottleneck transportation problem", Naval Research Logistics Quarterly, 18, 465-472.
- GEOFFRION, A. M. e GRAVES, G. W. (1974) ; "Multicommodity distribution system design by Benders decomposition", Management Science, vol.20, 822-844, The Institute of Management Sciences.
- GEOFFRION, A. M., GRAVES, G. W. e LEE, S. (1978) ; "A portable management support system for distribution planning", artigo não publicado, Graduate School of Management, UCLA.
- GEOFFRION, A. M. e McBRIDE, R. (1978) ; "Lagrangian relaxation applied to the capacitated facility location problem.", AIIE Transactions, 10, 40-47.
- GRAHAM, N. (1979) ; Artificial Intelligence, Tab Books, Inc.
- IDE, B. Y., ALLEONI, L. R. F., CARDOSO, S. P. e OLIVEIRA, C. S. (1988) ; "Planejamento da colheita da cana-de-açúcar", anais do IV Seminário de Tecnologia Agrônômica, 305-314, Copersucar.
- JENSEN, P. A. e BARNES, J. W. (1980); Network Flow Programming, John Wiley & Sons, Inc.

- KARKAZIS, J. e BOFFEY, T. B. (1981) ; "The multicommodity facilities location problem", Journal of Operational Research Society, 32, 803-814.
- KAUFMAN, L. , EEDE, M. V. e HANSEN, P. (1977) ; "A plant and warehouse location problem", Operational Research Quaterly, 28, 547-554.
- KENNINGTON, J. L. e HELGASON, R. V. (1980) ; Algorithms for network programming, John Wiley & Sons, Inc.
- KHUMAWALA, B. M. (1972) ; "An efficient branch and bound algorithm for the warehouse location problem", Management Science, vol.18, n.12 (August), B718-B731.
- KHUMAWALA, B. M. e NEEBE, A. W. (1978) ; "A note on Warszawski's multi-commodity location problem", Journal of Operational Research Society, 6, 171-172.
- KLINCEWICZ, J. G. (1985) ; "A large-scale distribution and location model", AT&T Technical Journal, vol.64, n.7 (September), AT&T Bell Laboratories.
- KLINCEWICZ, J. G. , LUSS, H. e YU, C-S. (1988) ; "A large-scale multilocation capacity planning model", European Journal of Operational Research, 34, 178-190, Elsevier Science Publishers B. V. (North Holland) .
- KRARUP, J. e PRUZAN, P. M. (1983) ; "The simple plant location problem : Survey and synthesis.", European Journal of Operational Research 12, 36-81, North Holland Publishing Company.
- KUEHN, A. A. e HAMBURGER, M. J. (1963) ; "A heuristic program for locating warehouses", Management Science, vol.10 (July), The Institute of Management Sciences.
- LASDON, L. S. (1970) ; Optimization theory for large systems, The MacMillan Company.

- LEE, S-B e LUSS, H. (1987) ; "Multifacility-type capacity expansion planning : algorithms and complexities", Operations Research, vol.35, n.2 (Mar-Apr), 249-253.
- LUSS, H. (1982) ; "Operations research and capacity expansion problems : A survey", Operations Research, vol.30, n.5, 907-947, O. R. S. A.
- LYRA F., C. (1984) ; "Contribuição ao planejamento da produção de energia em sistemas de potência", Tese de doutorado, FEE-UNICAMP (maio).
- MORRIS, J. G. e NORBACK, J. P. (1983) ; "Linear facility location-Solving extensions of the basic problem.", European Journal of Operational Research, 12, 90-94, North Holland Publishing Company.
- NAKAGAWA, J. M. (1984) ; "Planejamento de sistemas telefônicos : Alocação de centros de fios", Tese de mestrado, FEE-UNICAMP (julho).
- NAUSS, R. M. (1978) ; "An improved algorithm for the capacitated facility location problem", Journal of Operational Research Society, 29, 1195-1201.
- NEEBE, A. W. e KHUMAWALA, B. M. (1981) ; "An improved algorithm for the multicommodity location problem", Journal of the Operational Research Society, 32, 143-169.
- NOVAES, A. G. (1988) ; Sistemas logísticos e transportes - Notas de aula (janeiro).
- SALKIN, H. M. (1975) ; Integer programming, Addison-Wesley Publishing Company.
- SHYCON, H. N. e MAFFEI, R. B. (1963) ; "Remarks on the Kuehn-Hamburger paper", Management Science, vol.10 (July), The Institute of Management Sciences.
- SPIELBERG, K. (1969) ; "Algorithms for the simple plant location problem with some side conditions", Journal of O.R.S.A., vol.17, 85-111.

- SPIELBERG, K. (1969) ; "Plant location with generalized search origin", Management Science, vol.16, n.3 (November), 165-178, The Institute of Management Sciences.
- STADTLER, H., GROENVELD, M. e HERMANNSEN, H. (1988) ; "A comparison of LP software on personal computers for industrial applications", European Journal of Operational Research, 35, 146-159, North Holland Publishing Company.
- SZMRECSÁNYI, T. (1979) ; O planejamento da agroindústria canavieira do Brasil (1930-1975), Editora HUCITEC.
- TAPIERO, C. S. e SOLIMAN, M. A. (1972) ; "Multicommodities Transportation Schedules Over Time", Networks, 2, 311-327, John Wiley & Sons, Inc.
- TCHA, D. e Lee, B. (1984) ; "A branch-and-bound algorithm for the multi-level uncapacitated facility location problem", European Journal of Operational Research, 18, 35-43, Elsevier Science Publishers B.V.(North Holland) .
- Transporte Moderno (1988); "Do improviso à profissionalização", n.294, 34-41, Editora TM Ltda.
- Transporte Moderno (1989); "Terminais agilizam o transporte de soja", n.305, caderno regional, 4-6, Editora TM Ltda.
- VAN ROY, T. J. e ERLINKOTTER, D. (1982) ; "Dual-based procedure for dynamic facility location", Management Science, 28, 1091-1105, The Institute of Management Sciences.
- VENTURA, E. (1982) ; "Location problems - Theoretical and practical approaches", Material Flow, 1, 29-33, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- WARSZAWSKI, A. (1973) ; "Multidimensional location problems", Operational Research Quarterly, 24, 165-179.
- XAVIER, R. C. (1983) ; "Problema de localização de centrais telefônicas urbanas : Uma nova abordagem", Tese de mestrado, IMECC (Novembro).