MODELO MATEMÁTICO PARA OTIMIZAÇÃO DA EXPANSÃO DINÂMICA DAS REDES INTERMODAIS DO TRANSPORTE DE SOJA PRODUZIDA NO ESTADO DE MATO GROSSO

Ana Paula C. Fajardo
Agência Nacional de Transportes Aquaviários – ANTAQ/Belém
José Manuel Viegas
Instituto Superior Técnico de Lisboa - IST
Amaranto Lopes Pereira
COPPE / Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

RESUMO
Este trabalho vem apresentar e discutir a proposta de um modelo de otimização das opções de transporte de soja, visando encontrar uma solução mais eficiente para o escoamento intermodal da soja produzida no Estado de Mato Grosso. Essa eficiência se traduz em minimizar o custo total de transporte e garantir que toda a produção seja escoada por um conjunto de caminhos que, uma vez construídos, garantidamente continuarão a pertencer às soluções ótimas correspondentes a níveis mais elevados de investimentos. Das contribuições mais significativas do presente trabalho têm-se: (i) a formulação das opções de expansão / modernização de cada nó ou arco da rede física e (ii) a escolha por implantar caminhos que nunca conduzirão a cenários desfavoráveis por se ter investido neles anteriormente, quando se chega em fases mais avançadas de investimento.

ABSTRACT
This work presents and discusses a mathematical optimization model applied to soy transportation, seeking a more efficient solution for the intermodal flow of the soy produced in the State of Mato Grosso. It means to minimize the total cost of transportation and to guarantee that all the production is drained by a options that once built will continue, certainly, to belong to the great solutions corresponding to higher levels of investments. On the more significant contributions of the present work one has: (i) the formulation of the expansion options / modernization of each node or arch of the physical network and (ii) the choice to introduce options that will never lead to disadvantageous settings because previously investment on them, when one reaches more advanced investment step.

1. INTRODUÇÃO

Embora a produção de soja tenha apresentado expressivo crescimento nas últimas décadas (EMBRAPA, 2003), esta ainda esbarra em limites que impedem o seu desenvolvimento e a redução dos custos de transporte. As regiões Norte, Centro-Oeste e Nordeste, do Brasil, dispõem de infra-estrutura precária e apresentam, de forma geral, baixa competitividade sistêmica. Observa-se nestas regiões vastas áreas próprias para o cultivo da soja e poucas opções de escoamento a baixo custo (Fajardo, 2001).

Para dar uma melhor visão de como a implementação de novas alternativas ou o acesso a novas tecnologias (aumento da capacidade dos portos, através da aquisição de equipamentos que apresentem maior produtividade) podem melhorar o sistema de transporte globalmente, este trabalho vem apresentar o modelo matemático desenvolvido para otimizar as opções de escoamento da soja, produzida em Mato Grosso, quer nos encaminhamentos, quer em investimentos para aumento de capacidade e redução de custos.

É importante dizer que não houve a intenção de desenvolver novos algoritmos, mas sim de encontrar a resposta ótima para o problema numa formulação muito próxima da realidade, considerando todos os modais e respectivas transferências, quer na configuração atual da rede, quer numa perspectiva evolutiva em que se admitem investimentos e se procuram configurações de maior eficiência global. Como se encontrou um código comercial robusto e disponível, o XPRESS, com tempos de cálculo muito aceitáveis, esse instrumento foi considerado adequado à resolução eficiente do problema em questão.

1.1. Objetivo

O objetivo deste trabalho, a partir da caracterização das alternativas de transporte da soja produzida no estado de Mato Grosso com destino aos portos exportadores, é definir um modelo matemático que englobe os investimentos necessários para montar e manter em exploração eficiente uma rede de transporte que permita enviar fluxo ao menor custo possível, levando-se em conta as restrições de capacidade dos terminais de transbordo, a capacidade de escoamento do tráfego nas eclusas e nas vias correspondentes aos vários modais. Fazendo-o não só para a configuração final dessa rede ótima, mas também num conjunto de configurações intermediárias, à medida que se vai concretizando o programa de investimentos.

1.2. Metodologia

A pesquisa começa por elaborar, através de um modelo matemático, uma rede intermodal de transporte da soja produzida no Estado de Mato Grosso que permita integrar, de forma mais eficiente, as várias modalidades de transporte (rodoviário, ferroviário e hidroviário). A partir desta rede, deverá ser possível selecionar as rotas de menor custo, que ofereçam capacidade para movimentação eficaz da soja.

Modelada a rede com todas as restrições especificadas, para a situação atual, parte-se para a descrição no modelo das expansões da capacidade dos terminais de transbordo (até um limite considerado como máximo possivelmente necessário) e das possíveis implantações de novos arcos viários nos vários modais. Em cada um desses arcos da rede será contabilizado o custo anualizado do investimento e o custo de transporte (ou de transbordo).

Com uma configuração de rede em que se permite todos os investimentos fisicamente possíveis, a corrida de um programa de otimização permite concluir quanto de investimento é realmente necessário (e onde deve-se investir) para a redução até ao mínimo dos custos totais de transporte. A partir desse momento começa-se a reduzir as porcentagens de investimento na rede, para verifica-se até que ponto vale investir, e quais os arcos que fazem parte de cada configuração intermediária. Foi desenvolvido um processo algorítmico em que se garantisse que, apesar dos custos um pouco maiores em algumas configurações intermediárias, não exista risco de investir em algo que não fará parte de soluções futuras, ou seja caminhos que uma vez construídos garantidamente continuarão a pertencer às soluções ótimas correspondentes a níveis mais elevados de investimentos.

2. MODELO MATEMÁTICO

Nesse capítulo será abordado superficialmente o programa XPRESS, em seguida será descrito o modelo matemático utilizado para a resolução do problema e mostrados alguns dos resultados encontrados com a aplicação deste modelo.

2.1. XPRESS

Se os algoritmos podem lidar com problemas de otimização semelhante como as pessoas lidam, então a formulação e a geração das fases do modelo devem ser relativamente fáceis. Na realidade existem muitas diferenças entre a forma que os humanos modelam um problema e a forma que os algoritmos os resolvem. A translação segura da "forma modelo" para a "forma algoritmo" é sempre consideravelmente custosa. (FOURER, 1999)

O *Mosel* é tanto uma linguagem quanto um ambiente computacional para expressar, resolver e analisar problemas de programação matemática (minimizar ou maximizar uma função que possua variáveis de decisão, sendo essas sujeitas a restrições), combinando os esforços dos dois conceitos.

XPRESS-MP é um software para modelagem matemática e solução de problemas de otimização: linear, quadrática, linear inteira, baseado na linguagem *Mosel*.

O *XPRESS* é formado por um conjunto de ferramentas que compreendem uma coleção de interfaces, objetivando atender necessidades de usuários diversos, para a solução de uma variedade de problemas e para a integração com outros produtos de software.

Os dois componentes principais do *XPRESS-MP* são o *XPRESS-Mosel* e o *XPRESS-Optimizer*, porém existem o *XPRESS–IVE*, o *Console XPRESS* e o *XPRESS -MP Libraries*.

2.2. Modelagem Matemática Adotada

Para a rede atual e para a rede completa (considerando introduzidas todas as expansões admitidas como potencialmente úteis) utilizamos a formulação baseada no problema de *Min-cost-flow*. Nessa formulação temos:

- Cada nó representa: (i) um ponto de geração de fluxo (centróide), (ii) de absorção de fluxo (porto), (iii) de simples passagem de fluxos (cruzamento viário ou interface entre modos);

- Cada nó tem a possibilidade de ter um balanço de carga positivo (centróide), negativo (porto) ou nulo (ponto de passagem).

Na Figura 2-1 o nó C é um simples nó de passagem, em que duas vias (hidrovias ou rodovias) se juntam, sem qualquer processamento das cargas.

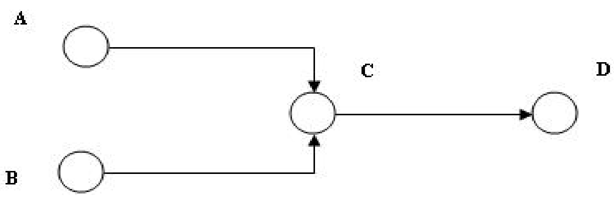

Figura 2-1: Formulação Simples

Aprimorando-se para uma formulação que passou a considerar o processamento de carga no nó C. O nó C é desdobrado em dois (aqui chamados C_in e C_out), sendo introduzido um arco que permite considerar as limitações e os custos desse processamento. Neste caso, o arco (C_in, C_out) é um arco de transbordo ou processamento de cargas (tracejado), enquanto os outros são arcos de transporte linear (cor negra), como visto na Figura 2-2. Para o problema, sem se considerar expansões, pode-se fazer o seguinte desdobramento nos nós de transbordo:

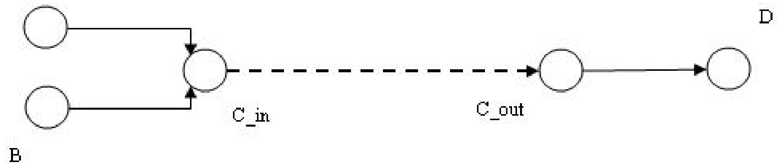

Figura 2-2: Formulação com Representação Interna do Nó

É importante considerar vários tipos de arcos, que vão ter diferentes características de custos e limites de capacidade, ainda que na formulação matemática geral todos apareçam descritos como arcos (i,j).

- Nessa formulação básica, pode-se aplicar as especializações do tipo de arco, mas sem considerar o problema de expansão, as variáveis de entrada são: (i) Para cada nó, o seu balanço de carga, B, em ton/ano; (ii) Para cada arco, o seu custo unitário de fluxo C(i,j) em R$/ton e o seu limite de capacidade de fluxo U(i,j), em tons/ano.

- As variáveis de saída são: (i) Para cada arco, o fluxo que aí passa X(i,j), em tons/ano; e (ii) O custo do fluxo em R$.

- Definem-se os conjuntos de nós N e de arcos A.

A formulação matemática é a seguinte:

$$F.O.: Minimiza \quad ... Z(X) = \sum_{(i,j)\in A} c(i,j) * X(i,j) \tag{1}$$

Sujeito a:
Balanço nos nós:

$$\sum_{j:(i,j)\in A} X(i,j) - \sum_{j:(j,i)\in A} X(i,j) = B(i) ... \ \forall\, i \in N \tag{2}$$

Capacidade nos arcos:

$$0 \le X(i,j) \le U(i,j) ... \ \forall\, (i,j) \in A \tag{3}$$

Esse problema foi rodado tanto no algoritmo out–of-kilter, programado pela autora, quanto no XPRESS, já referido.

Para se formular o problema com expansões surgem as seguintes dificuldades: (i) Variáveis binárias correspondentes a fazer ou não determinado investimento; e (ii) Combinação de custos de investimento com custos correntes.

Levando-se em consideração essas questões, verifica-se que o problema não pode mais ser resolvido em uma única corrida de um algoritmo de otimização de fluxo em redes, optando-se então por fazer uma corrida única de um programa de Otimização Inteira, o XPRESS. Para o problema de expansão estático temos as seguintes considerações:

- Os aumentos de capacidade numa via ou num equipamento e melhoramentos na via têm de ser formulados como mais um "caminho", sujeito a uma variável binária que corresponde a fazer ou não fazer o investimento correspondente.

- Para poder considerar conjuntamente os custos de investimento e os custos correntes, necessita-se: (i) Calcular, a montante da descrição deste problema, o custo anualizado equivalente a cada investimento. O custo anualizado é somado ao custo de operação corrente (custos unitários X quantidade anual de fluxo); (ii) Representar cada investimento por uma variável real de entrada K(i,j) (custo anualizado do investimento) e por uma variável binária de saída Y(i,j) (faz / não faz); e (iii) Tratar os arcos do "caminho" aberto com esse investimento (seja de uma nova via, de melhoramentos na via ou de um novo equipamento) como os arcos normais, apenas com a distinção de que na restrição de capacidade correspondente passa a figurar a expressão Y(i,j)*U(i,j) em vez de apenas o U(i,j), ou seja, se não fizer o investimento, a variável Y é zero e a capacidade também;

No problema em que se considera expansões devemos ter a configuração de desdobramento de nós, demonstrada na Figura 2-3. A formulação com representação interna do nó C, tal como na Figura 2-2, mas agora com dois tipos de equipamento, ou um desdobramento de equipamentos do mesmo tipo, um pré-existente (caminho E1) e outro correspondente a uma expansão de capacidade (caminho E2). Neste caso, os arcos (C_E1_in, C_E1_out) e (C_E2_in, C_E2_out) são arcos de transbordo ou processamento (tracejado), os arcos (C_in, C_E1_in), (C_in, C_E2_in), (C_E1_out, C_out) e (C_E2_out, C_out) são arcos fictícios correspondentes à utilização de um tipo de equipamento ou do outro, podendo ainda serem ambos utilizados (pontilhados).

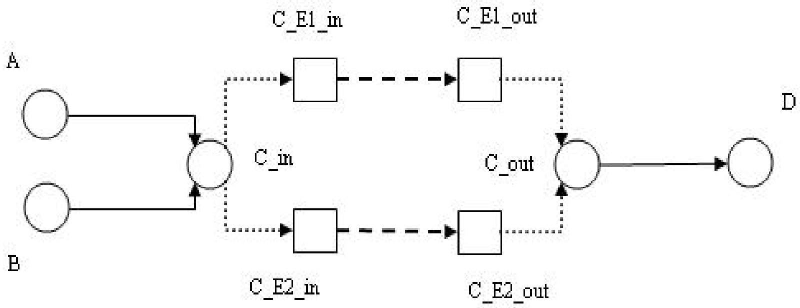

Figura 2-3: Formulação com representação interna do nó C com dois tipos de equipamento ou um desdobramento de equipamentos do mesmo tipo.

Para impor a sequência dos investimentos escalonados, deve-se escrever um conjunto de inequações sobre as variáveis Y e definir essas variáveis como binárias. Usando um exemplo semelhante ao usado acima, para equipamentos no nó C, mas agora com dois níveis de expansão possíveis, considera-se que o "caminho" por E1 já existe e os "caminhos" por E2 e por E3 (Figura 2-4) correspondem a investimentos escalonados, bastaria impor uma restrição.

$$Y(C\_E2\_in, C\_E2, out) \geq Y(C\_E3\_in, C\_E3, out) \quad (4)$$

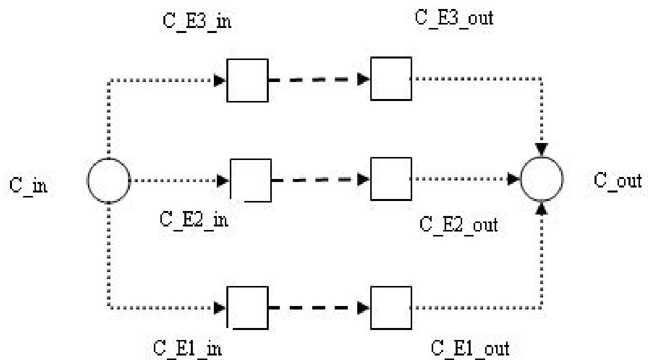

Figura 2-4: Sequência dos investimentos escalonados

Caso se trate se uma via adicional que é aberta entre dois nós (Figura 2-5), a formulação é igual a acima descrita para os equipamentos, implicando também a criação de nós fictícios C1 e C2, para não haver dois arcos diferentes com o mesmo par de nós de início e fim (A,B).

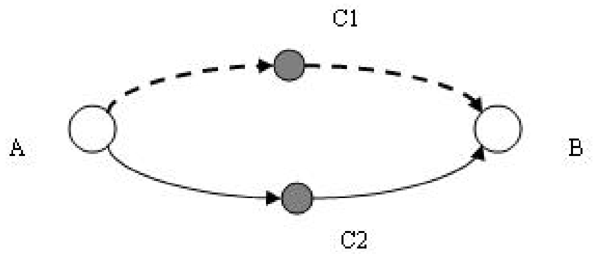

Figura 2-5: Abertura de via adicional

Se no entanto se tratar de um investimento de melhoria numa via, que lhe aumenta a capacidade e diminui custos (por exemplo alargar e pavimentar uma estrada), não se pode formular da mesma forma, porque a via deixa de funcionar no seu estado anterior. Utilizando-se como exemplo a Figura 2-5, tem-se que definir os custos e capacidade do caminho pintado a negro como sendo os do caminho não beneficiado e os valores do caminho tracejado como sendo os do caminho beneficiado. Deve-se impor que os dois caminhos não funcionem em simultâneo, para isso define-se uma variável binária Y também para esses arcos pré-existentes (com custo anualizado de investimento igual a zero) e adiciona-se restrições sobre as variáveis binárias de cada caminho e sobre a sua soma. Neste caso seria:

$$K(A,C2) = 0 \quad \text{e} \quad K(C2,B) = 0 \tag{5}$$

$$Y(A,C1) = Y(C1,B) \quad \text{e} \quad Y(A,C2) = Y(C2,B) \tag{6}$$

(tem de usar da mesma forma as duas metades do "caminho")

$$Y(A,C1) + Y(A,C2) = 1 \tag{7}$$

(só pode usar um destes dois "caminhos")

O custo de utilização de qualquer dos caminhos (A,B) pode ser concentrado num só dos arcos desse caminho, por exemplo entre A e C1 ou C1 e B / A e C2 ou C2 e B. Mas a capacidade tem de ser definida para as duas metades de cada sub-caminho com o mesmo valor.

Para o problema de expansão temos as seguintes considerações, de acordo com a natureza física dos arcos:

- Divide-se o conjunto dos arcos em quatro: A_{bf} (base pré-existente fixa), A_{bs} (base pré-existente com possível substituição), A_{ia} (investimento de acréscimo / melhoramento) e A_{is} (investimento de substituição / *upgrade*);

$$A = A_{bf} \cup A_{bs} \cup A_{ia} \cup A_{is} \tag{8}$$

- Variáveis de entrada: (i) Para cada nó, o seu balanço de carga, B(i), em ton/ano; (ii) Para cada arco já existente (em A_{bf} ou em A_{bs}), o seu custo unitário de fluxo C(i,j) em R$/ton e o seu limite de capacidade de fluxo U(i,j), em tons/ano; (iii) Para cada arco em A_{bs}, o custo anualizado de investimento K(i,j) = 0; e (iv) Para cada arco de expansão (em A_{ia} ou A_{is}), essas mesmas variáveis, mais o custo anualizado de investimento K(i,j).

- Variáveis de saída: (i) Para cada arco em A, o fluxo que aí passa X(i,j), em tons/ano; (ii) Para cada arco em $A_{bs} \cup A_{is} \cup A_{ia}$, a decisão de realizar ou não o investimento correspondente Y(i,j); e (iii) O Custo Total de Transporte em R$.

A partir das considerações feitas acima, a formulação completa é:

$$F.O.: Minimiza \ ...ZZ(X) = \sum_{(i,j)\in A} c(i,j) * X(i,j) + \sum_{(i,j)\in A_i} Y(i,j) * K(i,j) \qquad (9)$$

Sujeito a:

- Balanço nos nós:

$$\sum_{j:(i,j)\in A} X(i,j) - \sum_{j:(j,i)\in A} X(i,j) = B(i) ... \ \forall i \in N \qquad (10)$$

- Capacidade nos arcos:

$$0 \le X(i,j) \le U(i,j) ... \ \forall (i,j) \in A_{bf} \qquad (11)$$

(2 conjuntos de inequações)

$$0 \le X(i,j) \le Y(i,j) * U(i,j) ... \forall (i,j) \in (A_{bs} \cup A_{is} \cup A_{ia}) \qquad (12)$$

- Para os investimentos em escala:

$$Y(i,j_1) \ge Y(i,j_2) \ge Y(i,j_3) ... \ \forall (i,j_n) \in A_{ia} \qquad (13)$$

- Para os investimentos de substituição / *upgrade* (com nós fictícios "m"):

- Uso idêntico nas duas partes do mesmo arco real:

$$Y(i,m) = Y(m,j) ... \ \forall (i,m),(m,j) \in (A_{bs} \cup A_{is}) \qquad (14)$$

- Uso dos dois caminhos em alternativa (para melhoramentos na via):

$$Y(i,m) + Y(i,n) = 1 ... \forall (i,m),(i,n) \in (A_{bs} \cup A_{is}) \qquad (15)$$

- Investimentos em fase:

$$\sum_{(i,j)\in A_i} Y(i,j) * K(i,j) \le TOTINV \ * \left(1 - \left(\frac{it}{100}\right)\right) \qquad (16)$$

Em que: TOTINV: procentagem de investimento máximo
it: contador que varia de 0 a 100.

É importante dizer que por se tratar de um conjunto significativo de investimentos, não basta saber o pacote ótimo no final, sendo necessário também identificar a sequência ótima de investimentos parcelados.

A partir desse ponto, verificando-se que a dimensão física e econômica dos investimentos necessários para atingir a solução ótima são tais que não é concebível a sua realização toda de uma só vez, deve-se verificar quais são os passos intermediários para chegar nesse ótimo, evitando-se fazer investimentos que possam tornar-se ociosos mais adiante no tempo. Utilizou-se então, a formulação idêntica à anterior mas com limites variáveis da quantidade de investimento (especificados com incrementos de 1% - esse passo tão pequeno foi escolhido porque a velocidade de corrida do problema era muito rápida), do qual resultou o entendimento de que tem um pequeno conjunto de limites finais de investimento relevantes para a otimização do problema de expansão gradual da rede.

Este caso de estudo ocorreu com corridas independentes do problema de otimização para vários limites de investimento. Os arcos contidos nas soluções ótimas associadas aos diferentes limites não formaram um conjunto sucessivamente crescente, isto é, existem arcos que fazem parte, por exemplo do pacote ótimo do 2º limite de investimento, mas depois deixam de fazer parte do pacote ótimo do 3º e do 4º limites de investimento. Numa situação dessas, deixa de ser claro quais os passos intermediários na cadeia de decisões ao longo do tempo, que deveriam acabar por conduzir à configuração ótima da rede identificada na resolução do problema estático.

Para ultrapassar essa dificuldade, se adotou a partir desse momento, a classificação dos arcos como sendo do tipo “a”, “b”, “c”, “d” e “e”. Os arcos “e”, são arcos que só aparecem no último limite de investimento (100%), por isso não influenciam os resultados dos demais limites. Os arcos “c”, “d” são de interesse instável, pois só aparecem em intervalos pequenos do volume de investimento, sendo possível que existam alternativas quase tão boas quanto aquelas de que eles fazem parte, porém mais estáveis, caracterizadas pelos arcos de tipo “a” e “b”. Pode-se dizer que uma alternativa é totalmente estável, quando a mesma possui somente arcos do tipo “a”.

2.3. Aplicação do Modelo

Com o objetivo de tornar o modelo computacional mais eficaz, a malha de transporte utilizada para o escoamento da soja produzida no estado de Mato Grosso, foi baseada na divisão do estado em centróides geradores de carga. Segundo MIRANDA (2000), centróide de carga é definido como uma área que agrega a produção de vários municípios com características semelhantes, que tem uma localidade como pólo do centróide. A área de influência de um centróide considera também os obstáculos naturais (acidentes geográficos como serras, rios, ecossistemas, etc.), que estabelecem limites entre as localidades desse centróide e outros. A escolha do município indicado como pólo do centróide de carga não será necessariamente o maior produtor, mas sim o que oferece mais facilidades de transporte, infra-estrutura e apoio à produção regional.

Nesse trabalho modelou-se o escoamento da soja produzida no Estado de Mato Grosso, buscando otimizá-lo, para isso definiu-se sua função objetivo (minimização dos custos totais de escoamento) suas restrições e capacidades de cada um dos arcos que compõem a rede.

O problema aqui exposto constitui claramente um problema de afetação da produção de soja aos portos de exportação pelo caminho (ou caminhos) que permita (m) assegurar o escoamento de toda a oferta definida por um menor custo global de transporte, podendo-se utilizar algoritmos de otimização em redes para resolvê-lo semelhante ao ocorrido em Viegas, 1984. Optou-se pela resolução de um processo que consiste em, a partir da situação base atual e usando um processo de busca, expandir a rede atual, verificando que obras podem ser realizadas com o intuito de diminuir os custos de transporte, ou seja, que expansões na rede são as mais convenientes para diminuir os custos totais de transporte.

Os problemas de expansão são aqueles em que se busca estudar um caso em que a partir de uma rede atual, a qual suporta o transporte de soja com custos muito elevados, se vai acrescentar arcos a essa rede, proporcionando novas alternativas concorrentes em termos de menor custo de transporte, através de um aumento da capacidade de escoamento e ou redução destes custos, e assim poder-se-á verificar a melhor evolução do sistema.

É importante lembrar que a implementação destes empreendimentos implicará a realização de investimentos, sendo por isso a quantidade global de investimento mobilizável uma variável que vai definir até onde se pode ir na redução dos custos de transporte. Deve-se englobar no problema tanto as opções antigas, quanto as novas, esta consideração serve também para quando tratamos dos portos.

2.3.1. As três configurações de rede utilizadas

Para o transporte da soja produzida nos centróides do Estado de Mato Grosso e direcionada aos portos de exportação, consideramos as três configurações de rede que são explicadas abaixo:

- a configuração 1 é a rede atual, com sua capacidade atual, tendo-se obtido um custo total de R$ 3.629.615.050,57.

- a configuração 2 é a configuração "rede completa" existindo todas as expansões aqui consideradas possíveis e potencialmente interessantes e sem considerar custo de implantação, pretendendo-se com isso apenas conhecer qual seria o custo mínimo de circulação, já que não considerou-se custo de implantação de novas vias. Com essa rede obteve-se um custo total de R$ 1.264.883.352,87.

- A configuração 3 é a configuração "rede completa" em que se considera as mesmas expansões que na configuração 2, mas contabilizando o custo anualizado para implantação dessas melhorias e os custos de transporte. A rede nessa configuração obteve um custo total de R$ 2.257.566.952,53 (circulação + investimento anualizado).

A primeira configuração foi a que obteve maior custo total de escoamento, já que possui número limitado de vias e muitas opções de custo unitário elevado. A segunda configuração é a de menor custo total de transporte, pois considerou-se que todas as expansões podiam ser realizadas sem qualquer custo de implantação. É importante chamar a atenção para que esse custo mínimo de circulação com a rede completa (rede 2) representa apenas 35 % do custo mínimo possível com a rede atual. Já para a terceira configuração foi considerado custo de implantação para os arcos que não existem atualmente ou em que se realizam aumentos de capacidade, ficando naturalmente essa configuração com um valor ótimo intermediário de custos totais.

É importante dizer que mesmo com a rede 1 (atual) é possível escoar toda a produção, ainda que com custos muito elevados. O problema com a rede 2 é um problema artificial, que só foi definido para servir de baliza e interpretar melhor a solução do problema 3. Já na rede 3, onde os custos de investimento são considerados, existem menos arcos novos a serem utilizados, pois para utilizá-los o custo de deslocamento do fluxo é somado ao custo de investimento, muitas vezes inviabilizando o empreendimento.

A versão do programa utilizado foi o XPRESS 5.0, no computador Pentium III com 2.08 GHZ e 512 MB de memória RAM, levando poucos segundos para rodar a solução do problema.

2.3.2. Análise da redução gradual de investimentos

A partir dos resultados obtidos da corrida da configuração 3 (estática), que pedem investimentos de grande dimensões física e econômica, verifica-se que não é aceitável a sua realização toda de uma só vez, devendo-se ver quais são os passos intermediários para chegar na configuração ótima, procurando-se evitar fazer investimentos num passo que possam tornar-se ociosos mais adiante no tempo. Para uma melhor compreensão dessa situação montou-se a Figura 2-6 que representa a redução no custo obtida através de incrementos de 1% no custo de investimento. Essa análise é interessante para verificarmos para que porcentagem de investimento temos ganhos na redução de custo.

Nos resultados obtidos notamos que existem muitas áreas em que o investimento está liberado, mas ele não é incrementado, como por exemplo no trecho entre 2,5 e 11,8%, nos quais os investimentos anualizados ou os relativos não mudam, significando que pequenos investimentos além dos já feitos para a porcentagem 2,5 ou não existiam ou não produziam ganhos e por esse motivo não foram realizados.

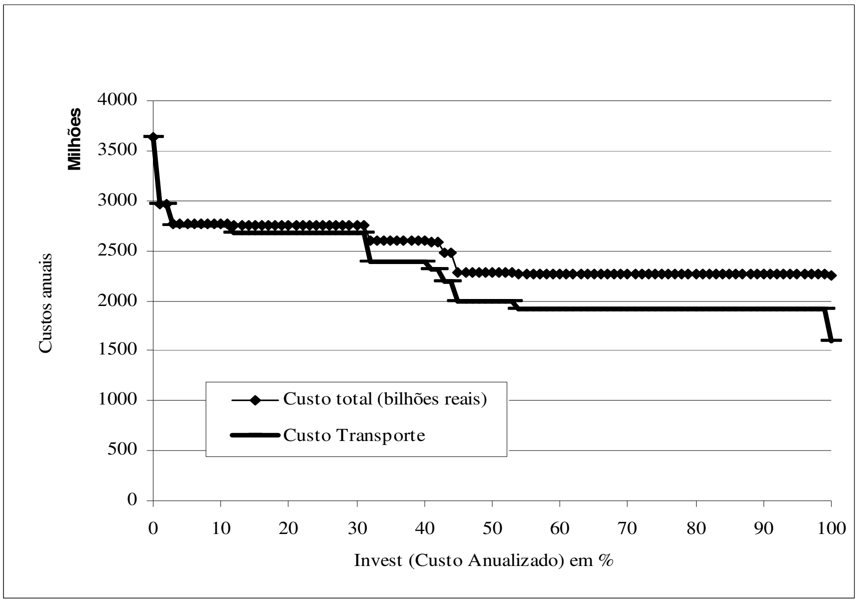

Figura 2-6: Redução dos Custos coma Intensidade de Investimentos

Pelos resultados obtidos notou-se que houve redução nos custos totais de transporte nas seguintes porcentagens de investimento: 0,4%, 2,5%, 11,8%, 31,2%, 40,5%, 42,2%, 44,3%, 53,6% e 100%. Essas porcentagens correspondem aos pontos ótimos de redução de custo.

A partir desse momento classificaremos os arcos como tipo “a”, “b”, “c”, “d” e “e”. Os arcos “e”, como só aparecem na última porcentagem de investimento, não influenciam os resultados das demais. Os arcos “c”, “d” são de interesse instável, pois só aparecem em intervalos pequenos de investimento, sendo possível que existam alternativas quase tão boas quanto eles, porém mais estáveis. Os arcos “b” são arcos de instabilidade intermediária e os arcos “a” são arcos totalmente estáveis.

2.3.3. Rede somente com arcos tipo “a”

Com o objetivo de tornar a rede mais estável, e observarmos que arcos são substitutos dos arcos tipo “c” e “d” devemos fazer corridas na rede onde esses arcos não são oferecidos, ou seja, sua variável binária Y é igual a zero. Outro procedimento adotado foi transformar todos os arcos tipo “b” em arcos do tipo “a”, e verificarmos quais são os acréscimos nos custos totais em uma rede formada somente por arcos totalmente estáveis. A rede com arcos tipo “a” possui o conjunto de arcos mais estáveis de todos os considerados. Comparando-se o resultado encontrado na rede sem restrições com o resultado encontrado na rede somente com arcos do tipo “a”, temos a Tabela 2-1:

Tabela 2-1: Custo total sem restrições X Custo total somente com arcos do tipo “a”

Soluções que continham estes arcos	Custo Total Anterior sem restrição	Custo Total – Rede com arcos tipo “a”	Acréscimo de Custo Total
0%=< investimento<0.4%	R$ 3.629.615.050,57	R$ 3.629.615.050,57	0,00%
0.4%<=Investimento<2.5%	R$ 2.968.985.695,59	R$ 2.968.985.695,59	0,00%
2.5%<=Investimento<11.8%	R$ 2.773.101.253,49	R$ 2.968.985.695,59	6,60%
11.8%<=Investimento<31.21%	R$ 2.760.245.285,27	R$ 2.760.245.285,27	0,00%
31.21%<=Investimento<40.49%	R$ 2.597.133.779,74	R$ 2.760.245.285,27	5,91%
40.49%<=Investimento<42.16%	R$ 2.584.262.951,95	R$ 2.584.262.951,95	0,00%
42.16%<=Investimento<44.31%	R$ 2.475.895.871,97	R$ 2.584.262.951,95	4,19%
44.81%<=Investimento<53.59%	R$ 2.280.011.429,87	R$ 2.584.262.951,95	11,77%
53.59%<=Investimento<100%	R$ 2.267.155.461,65	R$ 2.584.262.951,95	12,27%
Investimentos = 100%	R$ 2.257.566.952.53	R$ 2.257.566.952.53	0,00%

Notamos que houve acréscimo no custo total de investimento tanto nas porcentagens em que os arcos tipo “c” e “d” são impedidos de aparecerem, como também nas procentagens onde os arcos tipo “b” foram transformados em arcos tipo “a”.

Verificamos que para a rede sem restrições gastando apenas 53,6% se consegue um custo total muito próximo do ótimo. Nessa configuração existem muitos arcos instáveis, fato que dificulta no momento de escolher onde investir, caso se admita que o investimento se vai concretizando por fases.

Na rede em que só permitimos a existência de arcos tipo “a”, notamos que podemos investir pouco a pouco até 40% e que depois teremos que investir o montante correspondente a 100%, os arcos utilizados na solução ótima são todos arcos que entram e não saem mais dessas soluções. A Figura 2-7 abaixo mostra os vários níveis de investimento encontrados quando se considera a rede formada somente com arcos do tipo”a”.

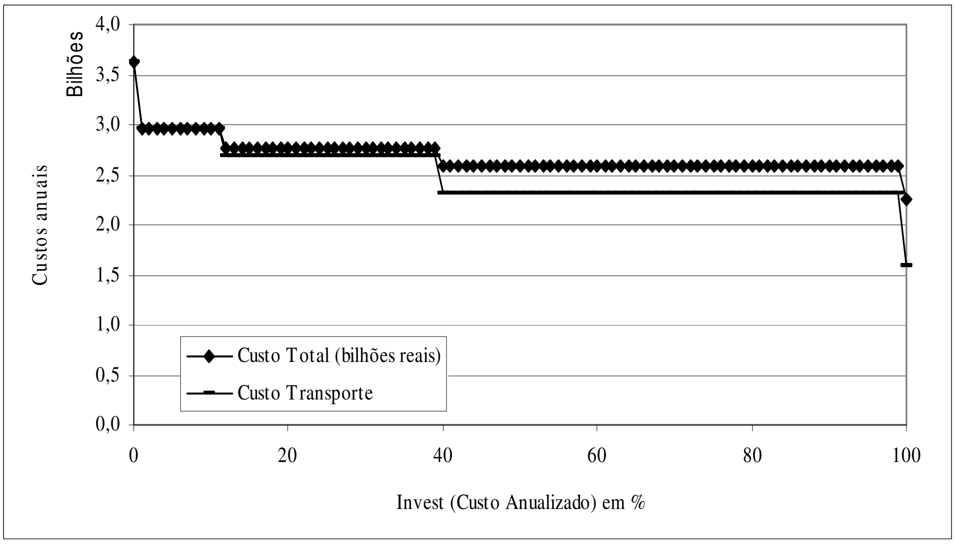

Figura 2-7: Redução dos Custos com a Intensidade de Investimentos - arcos do tipo “a”

De acordo com os resultados obtidos verificamos que houve redução de custos nas seguintes porcentagens de investimento: 0,4%, 11,8%, 40,49% e 100%.

A diferença entre os resultados obtidos nas Figuras 2-6 e 2-7 é que apesar de maiores custos encontrados nas soluções intermediárias na Figura 2-7, essa figura possui soluções totalmente estáveis, ou seja quando elas entram nas soluções ótimas, nunca mais saem, o que pode ser muito interessante, pois não se erra na hora de investir.

3. CONCLUSÕES

Nota-se que a produção de soja, ainda é realizada em função do modo rodoviário, o que causa um aumento do custo de transporte. O Estado de Mato Grosso é o maior produtor de soja do Brasil e extremamente prejudicado devido à precariedade ou até mesmo a inexistência de um sistema intermodal de transporte que vise a diminuição dos custos. Por este motivo, desenvolveu-se um modelo matemático das opções de escoamento da soja que assegure o escoamento de toda a oferta por um menor custo global de transporte. O processo consiste em verificar que obras podem ser realizadas visando a diminuição desses custos.

Primeiramente buscou-se caracterizar como é realizado atualmente o escoamento da soja (configuração 1). Posteriormente, caracterizou-se as alternativas de uma rede futura, caso houvesse capacidade de investimento disponível para implantar todas as possíveis alternativas, sem se considerar custo de impantação (configuração 2). A última possibilidade considerada foi a rede futura, contabilizando-se os custos de implantação em cada opção escolhida (configuração 3). Fez-se a expansão da rede de transportes, considerando a última configuração.

Obtidos os resultados da configuração 3 (estática), verificou-se que não é justificável a realização dos investimentos (grande dimensão física e econômica) de uma única vez, devendo-se adotar passos intermediários para se chegar a uma solução ótima. Rodou-se a rede com acréscimos de investimento de 1%, mostrando com isso a redução de custo obtida. Posteriormente deixou-se a rede somente com arcos estáveis, em que se garantisse que, apesar dos custos um pouco maiores em algumas configurações intermediárias, não exista risco de investir em algo que não fará parte de soluções futuras, ou seja caminhos que uma vez construídos garantidamente continuarão a pertencer às soluções ótimas correspondentes a níveis mais elevados de investimentos.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

EMBRAPA (2003) Tecnologias de Produção de Soja Região Central do Brasil – A Importância da Soja. Sistema de Produção. Disponível em: http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Soja/SojaCentralBrasil2003/index.htm.

FAJARDO, A.P.C (2001) *Estudo do Transporte da Soja Produzida nos Estados do Pará e Mato Grosso – Análise de Alternativas*. Dissertação de Mestrado. Programa de Engenharia Oceânica, COOPE/UFRJ. Rio de Janeiro.

FOURER R., GAY D.M. e KERNIGHAN B.W. (1999) *AMPL: A Modeling Language for Mathematical Programming*. Duxbury Press.

MIRANDA, L.M. (2000) *Estudo das Operações e o Ambiente Decisório dos Operadores de Transportes nos Corredores de Desenvolvimento da Amazônia Brasileira.* Dissertação de Mestrado. Programa de Engenharia Oceânica, COOPE/UFRJ. Rio de Janeiro.

VIEGAS, J.M. (1984) *Expansão de Capacidade em Redes de Equipamentos – Metodologia e Aplicações*. Tese de Doutorado. Instituto Superior Técnico de Lisboa. Lisboa, Portugal.

Ana Paula Cardoso Fajardo (ana.fajardo@antaq.gov.br)
José Manuel Viegas (viegas@mail.ist.utl.pt)
Amaranto Lopes Pereira (amaranto@pet.coppe.ufrj.br)