

# ANÁLISE DINÂMICA DE SISTEMAS DE COLHEITA E MANUSEIO DE BIOMASSA PARA UTILIZAÇÃO COMO FONTE DE ENERGIA<sup>1</sup>

BÁRBARA HELIODORA MACHADO MANTOVANI<sup>2</sup>, ROBERT M. PEART<sup>3</sup>  
e HARRY GIBSON<sup>3</sup>

**RESUMO** - Desenvolveu-se um modelo matemático, em SLAM II, para simular colheita e transporte de palhada de milho, feno e cavacos de madeira para abastecer continuamente uma unidade de processamento de biomassa. Usaram-se dez anos de dados climatológicos e de produção do estado de Indiana, EUA, para quantificar o efeito do clima no desempenho do sistema, que foi analisado em diferentes situações. O clima mostrou ser variável importante, especialmente na colheita de palhada de milho e feno. Houve casos em que foi preferível alugar equipamento do que comprar, para diminuir custos de produção. Foram produzidas, em média, 3,3 t/ha e 1,9 t/ha de palhada de milho e feno, respectivamente. Cavacos de madeira vindos de corte de florestas naturais totalizaram 86 t/ha, de desbaste, 53 t/ha, e de plantações, 40 t/ha (100, 20 e 5 anos de rotação respectivamente). Em ano de condições climatológicas médias, colheita e transporte de palhada de milho (fardos cilíndricos) custaram 71% mais caro que de cavacos de madeira (corte de florestas naturais). Fardos retangulares e cilíndricos equivaleram-se em custos de produção, mas transportar os cilíndricos custou 55% a mais. Custos para produzir e transportar cavacos mostraram-se cerca de duas vezes maiores em florestas naturais, quando comparados com corte de plantações de árvores.

Termos para indexação: simulação, modelos matemáticos, palhada de milho, cavacos de madeira, produção de etanol.

## DYNAMIC ANALYSIS OF HARVESTING AND HANDLING SYSTEMS FOR BIOMASS ENERGY FEEDSTOCKS

**ABSTRACT** - A SLAM II combination network discrete event model was developed to simulate harvest and transport of corn residue, hay and wood chips for continuous delivery to a biomass conversion plant. The model used ten years of climatological and production data of the state of Indiana, USA, in order to quantify the effect of weather on the system, analysed in many situations. Weather played an important role on system performance, especially on collection and transportation of corn residue and hay. There were situations when it was better not to buy forestry equipment, but to rent it, in order to decrease production costs. Corn residue yields averaged 3.3 t/ha and hay yields averaged 1.9 t/ha. Wood chips produced 86 t/ha for clear cut, 53 t/ha for thinning and 40 t/ha for plantations (100, 20 and 5 years rotation age respectively). On an average weather year it cost up to 71% more to collect and transport corn residue bales than wood chips from clear cut. Stacks and bales cost about the same to produce, but it cost 55% more to transport bales. Production and transportation costs were about twice as much for clear cut compared to plantation.

Index terms: simulation, energy, corn residue, wood chips, ethanol production.

## INTRODUÇÃO

Em uma época de discussão e controvérsias sobre produção de energia a partir de recursos renováveis, a possibilidade de se usar palhada de milho,

feno de baixa qualidade e cavacos de madeira como matérias primas para uma unidade de processamento de biomassa parece bastante atrativa. Resultados bastante promissores de pesquisas do Laboratório de Engenharia de Recursos Renováveis (LORRE) da Universidade de Purdue, EUA, indicam que a produção de combustíveis líquidos a partir de materiais celulósicos ora não utilizados, como restos culturais e de explorações florestais, poderia ser processada em escala comercial em futuro próximo.

Entretanto, o processo de conversão de material celulósico para etanol é mais complexo do que a obtenção de etanol a partir de grãos, em virtude da estrutura e composição química da biomassa. Outro fator extremamente importante é que a

<sup>1</sup> Aceito para publicação em 2 de setembro de 1985. Parte da tese apresentada pelo primeiro autor ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade de Purdue, West Lafayette, Indiana, EUA, para obtenção do grau de Doctor of Philosophy, (Ph.D) em 20 de janeiro de 1983.

<sup>2</sup> Eng. - Agr., M.Sc., Ph.D., EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo (CNPMS), Caixa Postal 151, CEP 35700 Sete Lagoas, MG.

<sup>3</sup> Eng. - Agrícola, M.Sc., Ph.D. Professor-Titular e Engenheiro Florestal, M.Sc., Prof.-Adj. Dep. de Engenharia Agrícola, Univ. de Purdue, West Lafayette, Indiana, EUA.

viabilidade econômica da conversão de biomassa em combustíveis líquidos é altamente dependente de fatores específicos do local, de custos de colheita e transporte de um material com baixa densidade e de efeitos climáticos que influenciam todas as fases de produção e transporte desse material para uma unidade central de processamento.

Neste trabalho estuda-se um sistema de colheita, transporte e armazenamento de três tipos de biomassa para abastecer uma unidade central de processamento que utilize este material continuamente durante o ano (Fig. 1). Estudos realizados por Ladisch (1979) e Ladisch & Dyck (1979) sugerem que as unidades de processamento de biomassa talvez sejam mais adequadas para operações em escala maior que ao nível de fazenda. Essas unidades requeririam enormes investimentos de capital e precisariam ser planejadas de maneira cuidadosa e apropriada. Não é difícil imaginar quão complexas e quão sujeitas a risco estas unidades poderão vir a ser, quando se pensa nos inúmeros fatores que podem afetar o comportamento geral do sistema, como clima, número, tipo e proporções de diferentes biomassas, tamanho da unidade, local, época, velocidade de produção, e custo de produção e transporte. A necessidade de armazenamento da matéria-prima pode causar enormes problemas de segurança (incêndios) e perdas quali-quantitativas, além de exigir enorme espaço físico para o armazenamento.

A fim de se analisar o sistema proposto, há dois caminhos alternativos a tomar: 1) experimentar com o sistema real; 2) selecionar alguma técnica de pesquisa operacional que permita a análise de um modelo matemático do sistema. Como o sistema proposto neste trabalho é hipotético e a construção de um somente para fins de estudo é inviável, tanto do ponto de vista prático como do econômico, propõe-se a analisar o sistema utilizando uma técnica de pesquisa operacional.

Quando o sistema pode ser descrito analiticamente, a programação matemática é usualmente utilizada para se achar um ótimo; ela constitui um método eficiente, na maioria das vezes (Savoie et al. 1981, Farrell et al. 1975 e Farrel 1977). À medida que os sistemas tornam-se mais complexos e envolvem maior número de decisões, a solução

ótima fica mais dependente de considerações e hipóteses simplificadoras, e algumas vezes é impraticável a implementação do sistema ótimo.

Nestes casos e naqueles em que é mais importante estimar o impacto de uma ou mais mudanças na dinâmica geral do sistema, a simulação é citada como sendo a melhor ferramenta a ser usada (Savoie et al. 1981). Outro fator que leva a pensar em simulação é a manipulação do tempo. De acordo com Dent & Blackie, citados por Schultz (1981), através de simulação podem-se estudar efeitos a longo prazo, e o modelo pode duplicar condições, variando-se apenas certas variáveis de cada vez.

Através de simulação, várias alternativas de sistemas podem ser examinadas realisticamente em uma fração de tempo e do custo que seriam necessários para um teste de campo. Segundo Scantland et al. (1980), nenhum modelo matemático, seja ele de programação linear, simulação ou outro, irá reproduzir exatamente a realidade, porque nem todas as variáveis são totalmente predizíveis. Entretanto, embora as soluções possam não corresponder perfeitamente à realidade, as mudanças estimadas podem prover uma indicação do que ocorreria nas mesmas condições no sistema real.

Com base nestas considerações, decidiu-se que o caminho a tomar era desenvolver um modelo matemático para simular a coleta e o manuseio de três tipos de biomassa: cavacos de madeira, palhada de milho, e palhada de feno. O sistema será analisado usando-se o modelo matemático para estudar a possibilidade de se ter uma unidade de processamento de biomassa trabalhando com diferentes combinações e proporções das três matérias-primas durante o ano. Serão determinados os efeitos de localização e o tamanho da unidade de processamento, a proporção de diferentes matérias-primas, os sistemas de produção de biomassa e os custos no desempenho do sistema.

## O SISTEMA

O sistema proposto neste trabalho consiste basicamente da unidade de processamento e das matérias-primas (Fig. 1), como será descrito a seguir.

### Unidade de processamento de biomassa

Assumiu-se que a unidade de processamento de biomassa está localizada no centro geográfico de uma área

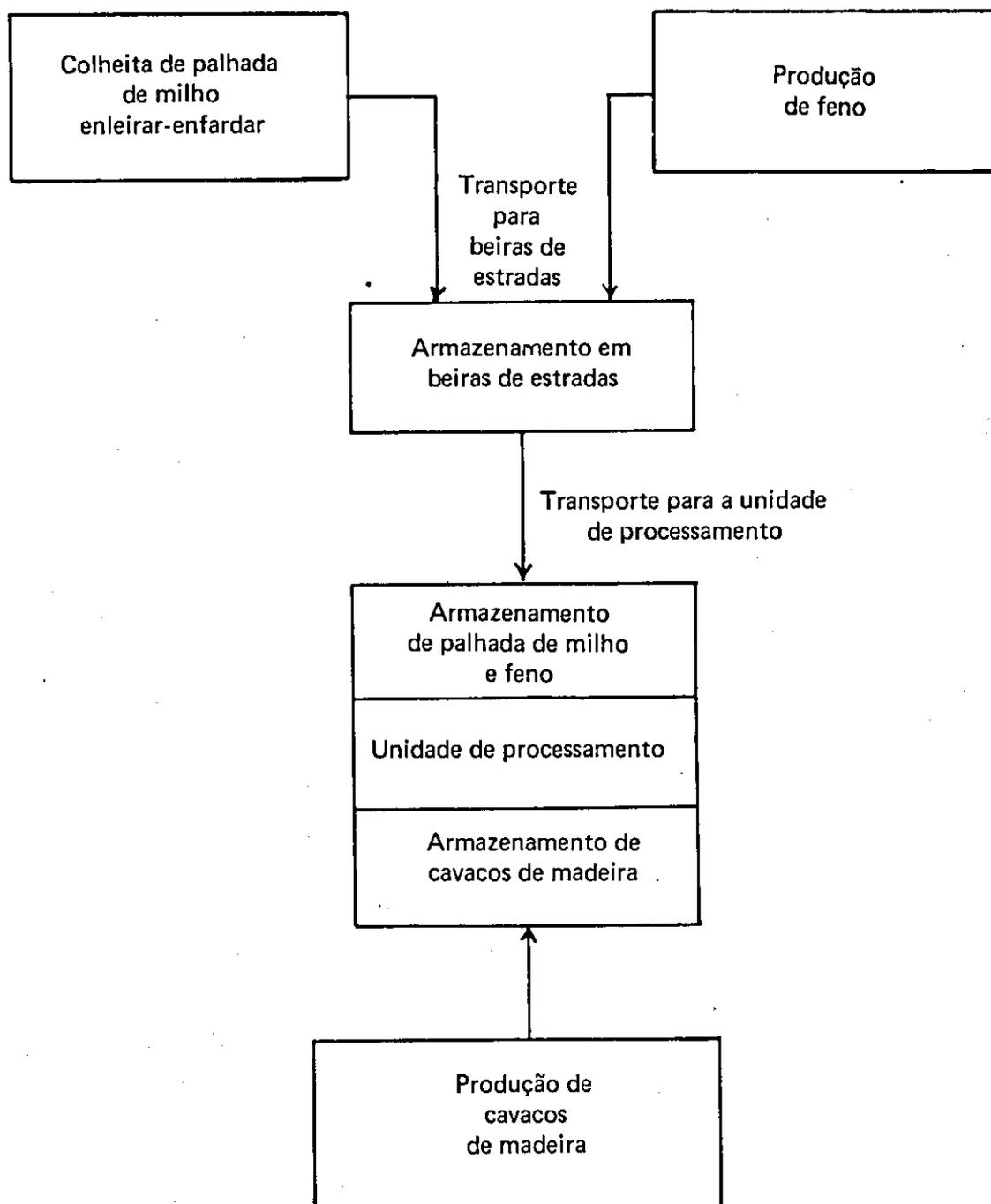


FIG. 1. Esquema do sistema proposto

que irá abastecê-la de matéria-prima-durante o ano todo. Esta área contém florestas comerciais e fazendas voltadas para o cultivo de milho e à pecuária. Esta unidade tem a capacidade técnica de converter biomassa celulósica em combustível líquido e pode usar diferentes tipos de matéria-prima seqüencialmente durante o ano. Neste trabalho, foi idealizada uma unidade com um cronograma fixo de operações, escolhido de acordo com a região do Estado de Indiana, o tipo de matéria-prima e as proporções de cada uma.

Para cada região estudada ou mesmo para cada combinação de matérias-primas, pode existir um tamanho de unidade mais ou menos adequado. A capacidade de armazenamento necessária está diretamente relacionada com o tamanho da unidade. Isto se torna especialmente crítico quando a unidade processa um único tipo de biomassa, como, por exemplo, palhada de milho, que tem um sistema de produção fortemente dependente de fatores climáticos, é produzida durante somente um pequeno período no ano e não pode ser transportada durante todas as épocas do ano. Em geral, considera-se que a quantidade de biomassa armazenada na unidade de processamento deve ser suficiente para cerca de 40 dias de produção.

Outra variável relacionada com tamanho da unidade de processamento é a distância de transporte, que deve ser mantida a níveis razoáveis a fim de não aumentar excessivamente os custos com o transporte. Distância média para transporte é função da concentração da matéria-prima na região e, de acordo com Richey et al. (1982), pode ser o fator decisivo na escolha do tamanho da unidade.

### Palhada de milho

Depois da colheita de milho com colheitadeira automotriz, a parte aérea da planta que fica no solo vai ser coletada e usada como matéria-prima para a unidade de processamento. O sistema de colheita e transporte de palhada de milho é baseado no que foi descrito por Richey et al. (1982) e envolve muitas operações.

A primeira operação no sistema é a formação de leiras, que são deixadas no campo para secar por alguns dias antes do enfardamento. O período de secagem no campo varia de acordo com o tipo de enfardadeira usada e com a época do ano, e está relacionado com o teor de umidade da palhada. A quantidade de palhada coletada depende da produtividade de milho, considerando-se que o peso seco total da palhada iguala-se ao peso do grão colhido. Alguma palhada deve ser deixada no solo como uma medida de controle de erosão. Esta quantidade é estimada em torno de 2,4 t/ha, dependendo de vários fatores. Além disso, têm de ser consideradas perdas associadas com quantidade de chuva e vento no período que vai da colheita do milho ao enfardamento, e também com a duração deste período. Estes fatores fazem a quantidade de palhada disponível para ser colhida variar de 22% a 75% do total deixado no solo após a colheita do milho. Um

ponto importante a ser considerado no sistema é referente à decisão de iniciar, ou não, a coleta de biomassa quando a colheita de milho foi tardia. Isto reflete o fato de o produtor de milho preferir preparar a terra atenciosamente para o plantio na primavera, quando ele sabe de antemão que o tempo que lhe resta antes do início do inverno talvez não seja suficiente para todas as operações de coleta de palhada. Os fardos de palhada podem ser cilíndricos, pesando cerca de 400 kg, ou retangulares, com cerca de 2.000 kg. Depois de feitos, os fardos são transportados para fora do campo, ficando armazenados temporariamente em beiras de estradas para posterior transporte para a unidade de processamento. A mesma enfardadeira que faz fardos retangulares transporta-os imediatamente para a beira da estrada, enquanto os fardos cilíndricos são lançados no campo. Posteriormente, estes são transportados para a beira da estrada em carretas apropriadas. O transporte dos fardos para a unidade de processamento é rodoviário, feito por carretas.

Antes de se começar qualquer operação no sistema, o primeiro passo é assegurar-se de que há equipamento disponível e de que as condições climáticas permitem a operação de campo. No caso específico de transporte da palhada de milho ou feno para a unidade de processamento, outra coisa a ser observada antes de se começar a atividade é se a capacidade de armazenamento na unidade foi atingida, caso em que o transporte deve parar, mesmo que o clima esteja bom e o equipamento disponível.

### Feno de baixa qualidade

O feno enfardado tardiamente ou que tenha sofrido ação do clima após o enfardamento talvez tenha tido sua qualidade tão prejudicada que é mais lucrativo transportá-lo para uma unidade de processamento do que usá-lo como alimentação para o gado. De acordo com a época de corte e a quantidade de precipitação no período, uma fração de feno é desviada para a unidade de processamento. O sistema envolve, então, somente o transporte de feno das beiradas de estradas até a unidade de processamento.

### Cavacos de madeira

Assumiu-se que são obtidos cavacos de madeira à partir de três sistemas básicos de exploração florestal, e que somente um sistema pode ocorrer na área de influência da unidade de processamento, a fim de simplificar o modelo:

1. Corte de plantações de árvores - Plantações do tipo idade homogênea, de árvores de uma única espécie, colhidas cinco anos após o plantio. As árvores são colhidas por uma colhedora automotriz, que numa só operação as transforma em cavacos.

2. Corte de florestas naturais - As operações são: derrubamento, arraste das árvores para uma área comum onde são separados os troncos de diâmetro maior que 0,30 m, e transformação do restante em cavacos.

3. Desbaste - Uma floresta natural é desbastada cortan-

do-se todas as árvores que possuam um diâmetro, à altura do peito, menor que 0,30 m. Todas as árvores desbastadas são arrastadas para uma área comum e transformadas em cavacos.

As operações florestais não são tão fortemente dependentes de fatores climáticos como as do sistema de coleta de palhada de milho. Considerou-se que, durante os meses de verão, as operações podem estender-se por 16 horas, enquanto no inverno este tempo se reduz a 12 horas. Os tempos gastos para se executar as diferentes operações foram obtidos na literatura, segundo Winsauer & Underwood (1980) e Biltonen et al. (1976).

### MODELO MATEMÁTICO

Entre as várias linguagens de simulação disponíveis, foi escolhida a SLAM II (Simulation Language for Alternative Modeling), desenvolvida por Pritsker & Pegden (1979), a única linguagem que permite a construção de modelos combinando eventos discretos ("networks") e modelos contínuos em uma única estrutura. Colheita, transporte e utilização de biomassa foram modelados como um sistema de "network" em combinação com eventos discretos.

A colheita de palhada de milho inclui os processos de enfileiramento, enfardamento, transporte para as beiradas das estradas e transporte para a unidade de processamento. A produção de cavacos de madeira compreende a derrubada, arrastamento e transformação em cavacos, e transporte destes para a unidade de processamento. No sistema de produção de feno, a única operação considerada é o transporte. Todas estas operações têm uma orientação de processo, e são controladas pela disponibilidade de recursos, representados pela maquinaria e por fatores climáticos que influenciam o processo discretamente, limitando a quantidade de dias de trabalho no campo. O modelo matemático com orientação de processo emprega a estrutura de "network". Cada uma das operações ou processos, como, por exemplo, enfardamento da palhada, tem elementos, como "filas" (onde a palhada espera para ser enfardada), "servidores" (enfardadeiras) e pontos de decisão ("já está muito tarde na estação de colheita para se começar o enfileiramento da palhada?"). O modelo de "network" representa o fluxo de entidades através do sistema. No modelo proposto, uma entidade representa uma área de terra da qual a biomassa é produzida. Características comuns às entidades, como, por exemplo, produtividade ou tempo gasto para se efetuar diferentes operações, são chamadas "atributos", e são armazenadas em forma vetorial dentro do modelo. Na Fig. 2, é mostrado um fluxograma onde podem ser visualizadas, de modo bastante geral, as operações do modelo matemático.

#### Entradas para o modelo

Os dados da percentagem da área de milho colhido e feno enfardado em diferentes períodos durante a safra

foram processados de modo a formar grupos de acordo com as regiões Norte, Centro e Sul de Indiana. Esses dados do progresso semanal da colheita das safras para cada distrito do estado são fornecidos anualmente pelo serviço de Estatística da Estação Experimental de Agricultura da Universidade de Purdue e para o presente estudo foram usados dados de 1972 a 1981. Dados o ano, o tamanho da unidade de processamento, a taxa de conversão em litros de etanol por tonelada de biomassa e as proporções desejadas da matéria-prima durante o ano, um programa calcula a área aproximada para abastecer a destilaria durante o ano, e a quantidade de biomassa usada por dia. Além disso, calcula o cronograma de início de atividades para as operações de enfileiramento de palhada de milho, derrubada de árvores e transporte de fardos de feno, que constituem as primeiras operações efetuadas em cada um dos subsistemas.

Outros dados que entram diretamente no "network" são a quantidade de biomassa armazenada no início de cada simulação e o número de máquinas para efetuar cada uma das operações do sistema. Estes números são escolhidos de maneira a fazer o sistema funcionar de maneira eficiente, balanceando ociosidade do equipamento com a não-execução do serviço por falta de equipamento e evitando pontos de estrangulamento.

O programa principal tem as funções de ler dados, calcular alguns parâmetros, imprimir cabeçalhos e chamar a sub-rotina SLAM, que executa a simulação. Neste programa, são lidos a região de Indiana e o ano que se quer simular, todos os dados de dias impróprios para o trabalho de campo, quantidades de precipitação e produtividades de milho e feno, para cada região e ano. As distâncias médias para transporte de biomassa são calculadas pelo método do círculo equivalente usado por Abdallah (1978) e Jenkins et al. (1982).

#### Saídas do modelo

Resumos completos da situação do sistema são apresentados com intervalos de tempo a critério do usuário. Estes resumos incluem informações sobre dezenove variáveis, como, por exemplo, as produtividades médias e os custos variáveis para se executar as diversas operações, a situação de todas as máquinas, de todas as filas e atividades no modelo.

#### Cálculo de custos

Os custos para efetuar as diversas operações do sistema foram calculados com base no número real de horas que cada máquina trabalhou, determinado em cada simulação, em vez de se usar o sistema tradicional, onde o número de horas de trabalho é estimado para condições ótimas. Os cálculos foram divididos em duas partes: 1) custos de combustível, lubrificante e mão-de-obra e 2) custos fixos, manutenção e reparos. Os primeiros foram calculados diretamente no modelo matemático e os segundos foram determinados após se conhecerem as percentagens de utilização de cada equipamento.

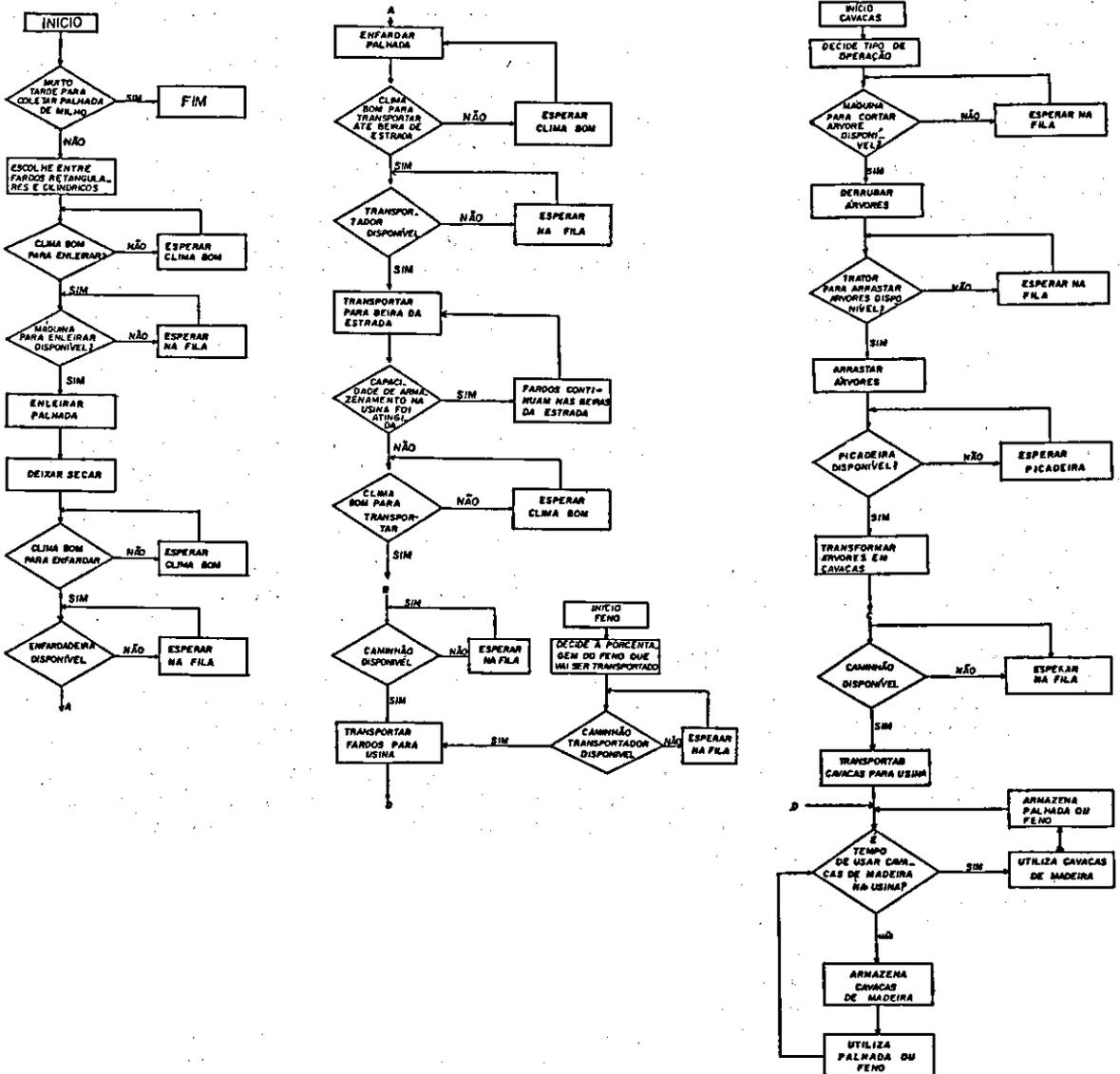


FIG. 2. Fluxograma visualizando as gerações do modelo matemático.

**RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Após o modelo matemático ter sido construído e testado, ele foi processado uma série de vezes no computador, a fim de se analisar o sistema. Os experimentos executados não abrangem, de modo algum, todas as combinações dos parâmetros do modelo. Eles foram escolhidos a fim de mostrar algumas das inúmeras situações que podem ocorrer num sistema real. Os parâmetros variados foram os

seguintes: ano, região, tamanho da unidade de processamento, tipos de operação, proporções e cronogramas de uso de matéria-prima e capacidade de equipamento.

Os anos de 1971 a 1980 foram escolhidos porque este era o período para o qual todos os dados necessários à construção do modelo estavam disponíveis. O estado de Indiana foi dividido em três regiões, a fim de se ter características mais uniformes, ao invés de se ter condições médias

para todo o estado. Os tamanhos de unidades de processamento foram escolhidos de modo que se tivesse uma unidade pequena, que utilizasse biomassa de uma área correspondente ao tamanho de um município (20 milhões de litros por ano) e uma unidade um pouco maior, que abrangesse de cinco a seis municípios (120 milhões de litros por ano). A maioria dos testes foi feita utilizando-se fardos cilíndricos, mas um teste com fardos retangulares foi executado a fim de comparação. Cortes de florestas naturais e artificiais foram estudados em maior número de testes, mas um teste com desbaste também foi feito. As proporções de biomassa variaram de acordo com a região. Para o Norte, região tipicamente produtora de milho, com pouca área de florestas, não foi testada uma unidade que processasse somente cavacos de madeira, mas sim unidades que utilizassem palhada de milho como principal fonte de biomassa. Para o Sul de Indiana, região de relevo mais acidentado, com intensa exploração florestal e pecuária, os sistemas foram baseados em maiores proporções de cavacos de madeira e feno.

Um grande número de testes preliminares foi feito com o objetivo de escolher qual a melhor combinação de número de máquinas de cada tipo que permitisse ao sistema trabalhar sem ociosidade, mas, ao mesmo tempo, sem pontos de estrangulamento. O seguinte resultado foi obtido como satisfatório: 2.330 ha/enleiradeira, 2.000 ha/enfardadeira, 2.800 ha/carreta, 610 ha/trator derrubador de árvores, 90 ha/trator arrastador de árvores, 610 ha/máquinas de transformação de árvores em cavacos, 230 ha/caminhão de cavacos e 1.750 ha/caminhão de palhada de milho ou feno. Este balanceamento foi apropriado para as condições estudadas, porém pode não o ser se alguns parâmetros forem mudados. Por exemplo, se a distância média de arrastamento de árvores diminui, o número de tratores para o arraste tem de decrescer. Ou se forem usadas no sistema máquinas de tamanho ou capacidade diferentes das que foram consideradas no modelo, o balanceamento tem de mudar de acordo.

A seguir, são apresentados alguns resultados como exemplos do tipo de informação que pode ser obtida com o uso de modelo matemático.

Maiores detalhes, com apresentação completa de resultados, encontram-se em Mantovani (1983).

#### Unidade processando três tipos de biomassa

A fim de estudar o efeito do clima no desempenho do sistema, o modelo foi usado para analisar uma unidade utilizando palhada de milho em fardos cilíndricos, cavacos de madeira obtida de corte de floresta natural, e fardos cilíndricos de feno de alfafa como matérias-primas para a produção de 20 milhões de litros de etanol por ano, na região central de Indiana, de 1971/72 a 1980/81.

Na Fig. 3, são apresentadas as taxas de utilização do equipamento nos diferentes anos. Uma utilização de 100% significa que a máquina trabalhou o maior tempo possível, depois de descontadas as paradas devidas a fins-de-semana, almoço, cafezinhos e reparos. A utilização está relacionada com o fato de a máquina não trabalhar por causa de mau tempo, uma decisão de ordem administrativa ou técnica (ex.: não transportar fardos porque a capacidade armazenadora na destilaria foi atingida), ou porque as máquinas não têm material para processar ou transportar. Para todos os anos, os números de máquinas de cada tipo foram os seguintes: 8 enleiradeiras, 12 enfardadeiras, 8 carretas, 16 caminhões para o transporte, 2 tratores para corte de árvores, 8 tratores para arraste de árvores, 2 máquinas para transformar cavacos e 4 caminhões para transportar cavacos. A unidade processadora utilizou cavacos de madeira de 1º de dezembro a 15 de maio e feno e palhada de milho no restante do ano.

Pode-se observar a variação na utilização do equipamento nos vários anos. Os anos agrícolas 1972/73 e 1974/75 sofreram os efeitos de mau clima. Em 1972, a produtividade do milho foi acima do normal, 6,63 t/ha no Centro de Indiana, mas somente 50% da produção foi colhida até o início de dezembro, por causa de mau tempo. Em 1974, a colheita também foi tardia, em virtude de um outono úmido, e a produtividade do milho foi muito abaixo da média: 4,52 t/ha na região central do estado. Como uma consequência da baixa produtividade de milho e/ou colheita tardia, a quantidade de palhada coletada é baixa, causando utilização ineficiente do equipamento que foi comparado, baseando-se em um ano com

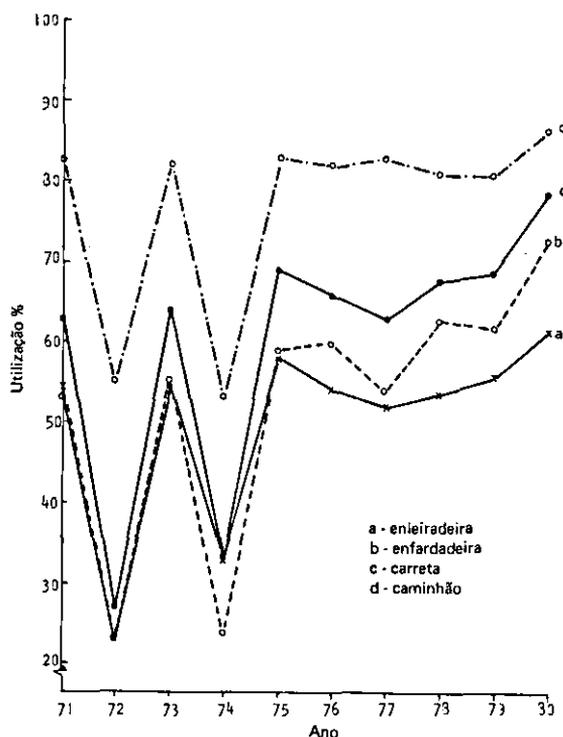


FIG. 3. Utilização de equipamento (%) em vários anos, para um sistema utilizando fardos cilíndricos de palhada de milho e feno e cavacos de madeira como matéria prima para abastecer uma unidade de processamento de 20 milhões de litros por ano.

condições médias de clima. Como não se considerou que operações florestais sofram efeito do clima de ano para ano, mas apenas dentro de um mesmo ano, as variações em utilização de equipamentos são devidas somente ao acaso. Tratores derrubadores de árvores tiveram 57% de utilização, tratores para arraste em torno de 80% e máquinas que transformam árvore em cavacos, 42%.

O custo de produção de palhada, incluído transporte a uma distância média de 11 km, foi em torno de US\$ 32,00/t em anos de condições médias, US\$ 55,00/t em anos de más condições climáticas e US\$ 29,00/t em anos melhores do que a média. O custo para produzir e transportar cavacos de madeira a uma distância média de 35,4 km foi US\$ 23,00/t, enquanto o custo para transportar feno a uma distância média de 20 km variou de US\$ 16,00/t a US\$ 25,00/t de acordo com o ano. Considerando-se as diversas operações

individualmente, notou-se que os custos para enleirar e enfardar foram mais afetados pela produtividade da palhada, enquanto os custos de transporte foram mais dependentes da distância e do peso transportado por viagem.

O tempo que uma determinada área tem que esperar para que uma atividade possa ser iniciada depende do número total de máquinas, do ano, e da variabilidade no tempo para execução do serviço. Quanto maior a taxa de utilização de um equipamento, maior é o tempo de espera, em razão da natureza estocástica do sistema. Em anos de clima ruim, o tempo de espera foi baixo porque havia menos material a ser processado, causando decréscimo na utilização do equipamento. Atividades sujeitas a menor variabilidade no tempo de execução, como por exemplo, as relacionadas com operações florestais, podem ser planejadas mais acuradamente, diminuindo o tempo de espera.

Várias outras condições foram estudadas, variando-se tamanho de unidade processadora, tipos de operações, regiões e anos (Mantovani 1983).

#### Unidade processando somente palhada de milho

Em um sistema baseado na utilização de palhada de milho como matéria-prima, as únicas regiões consideradas foram Norte e Centro do Estado de Indiana, porque, em razão das características de exploração agrícola no Estado, não parece ser razoável a construção de uma unidade deste tipo no sul. O programa foi processado para dois anos, 1974/75 (mau clima) e 1976/77 (condições médias de clima), dois tamanhos de unidade, 120 e 20 milhões de litros de álcool por ano, e dois métodos de enfardamento, fardos cilíndricos e retangulares. No ano agrícola 1974/75, a utilização do equipamento foi baixa, e a unidade processadora só poderia ter trabalhado a 47% da capacidade se a biomassa tivesse sido coletada da mesma área que em um ano de bom clima. A coleta de biomassa de uma área com o dobro do tamanho anterior, o que foi equivalente a aumentar a distância média de transporte em 41%, teve o efeito de melhorar a utilização do equipamento. Por exemplo, a utilização das enleiradeiras passou de 41% para 75%, que se provou excessivamente alta, levando-se em conta o grande número de dias

de espera na fila que causou, 16,33 em média. Mesmo dobrando a área, a unidade de processamento só conseguiria trabalhar a 76% da capacidade, com o sistema todo congestionado por falta de equipamento. Se o objetivo é fazer a unidade trabalhar a plena carga mesmo em um ano de condições climatológicas ruins, o administrador tem que planejar a colheita de palhada de uma área maior do que a requerida em um ano normal, mas, ao mesmo tempo, aumentar o número de máquinas. Por outro lado, esse número de máquinas seria excessivo num ano de condições médias, causando utilização ineficiente do equipamento, que causa o já discutido aumento no custo. O problema, então, é decidir o que é mais importante, ou o que é mais custoso para determinado sistema: ter a unidade processadora trabalhando ociosa em um ano ruim ou ter o custo adicional de subutilização de equipamento em anos de condições

médias. Estes fatos mostram a vulnerabilidade de um sistema trabalhando com somente uma matéria-prima, sendo a produção da mesma tão dependente de fatores climáticos. Na Fig. 4 ilustra-se mais uma vez o efeito de clima no sistema, quando se vê a quantidade de palhada de milho armazenada de acordo com a época do ano, na região central de Indiana, para uma unidade de 120 milhões de litros por ano. Em 1976/77, um ano de boas condições, houve sempre palhada de milho armazenada, seja em beiras de estradas ou nos terreiros da unidade processadora. O pico foi em 28 de fevereiro, quando todo o material coletado tinha sido transportado para as beiras das estradas. A menor quantidade de palhada armazenada foi 22.780 t em 30 de setembro e a maior foi 221.070 t em 28 de fevereiro. A unidade processadora terminou o ano com duas vezes mais resíduos do que quando começou. Em 1974/75, não havia palhada

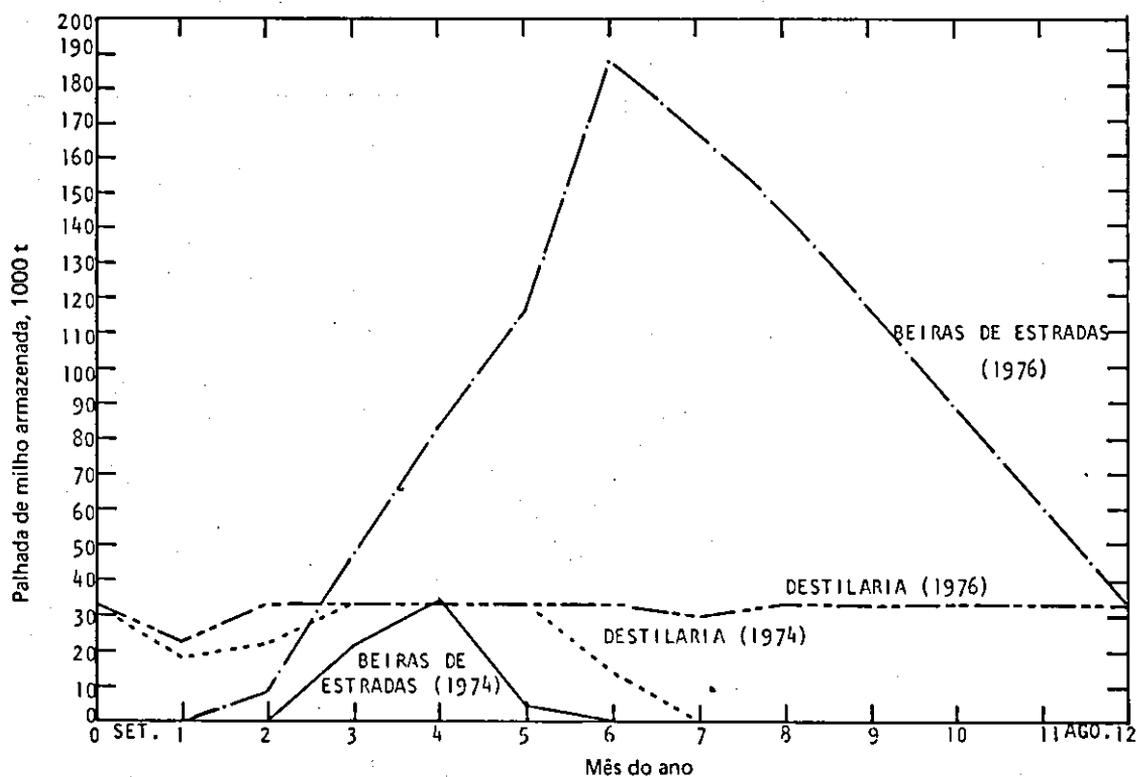


FIG.4. Palhada de milho armazenada em cada mês do ano, para uma unidade produzindo 120 milhões de litros por ano, utilizando somente palhada de milho como matéria-prima, na região central de Indiana, 1974-75 e 1976-77.

armazenada a partir de 30 de março; logo, a unidade teve que parar a produção. A quantidade máxima armazenada foi de 68.110 t em 31 de dezembro. Comparando-se os dois tipos de fardos, os cilíndricos custaram 25% mais que os retangulares.

#### Unidade processando somente cavacos de madeira

Como se assumiu que não há variação anual no cronograma de corte de árvores e também na concentração de florestas por unidade de área, os resultados da simulação não variam de ano para ano.

Para abastecer uma unidade produtora de 20 milhões de litros por ano no Sul de Indiana, cavacos de madeira teriam que ser transportados de distâncias médias de 31,2 km, 17,6 km e 19,7 km para operações de corte de floresta natural, desbaste e corte de plantações de árvores, respectivamente. O custo para produzir e transportar cavacos de madeira foi 100% maior para corte de florestas

naturais do que para corte de plantações de árvores (média de US\$ 22,00/t comparado com US\$ 11,00/t).

A Fig. 5 mostra a quantidade de cavacos de madeira armazenada em cada mês do ano, para a unidade processadora de 20 milhões de litros por ano, utilizando somente cavacos de madeiras como matéria-prima no sul de Indiana. A quantidade de biomassa produzida por operações de desbaste e corte de florestas naturais não é constante durante o ano, principalmente por três razões: 1) há menos produção durante os meses de inverno, ditada por redução na jornada de trabalho, de 16 para 12 horas e também pelo cronograma de corte; 2) durante o inverno, as árvores têm menor peso que no verão, e 3) há variações ao acaso no estande. Pode-se ver, pelas Fig. 3 e 4, que é mais fácil planejar um sistema de abastecimento de cavacos de madeira que um de palhada de milho e feno, por causa da menor dependência do clima no primeiro. Dentre os três sistemas de produção de cavacos de

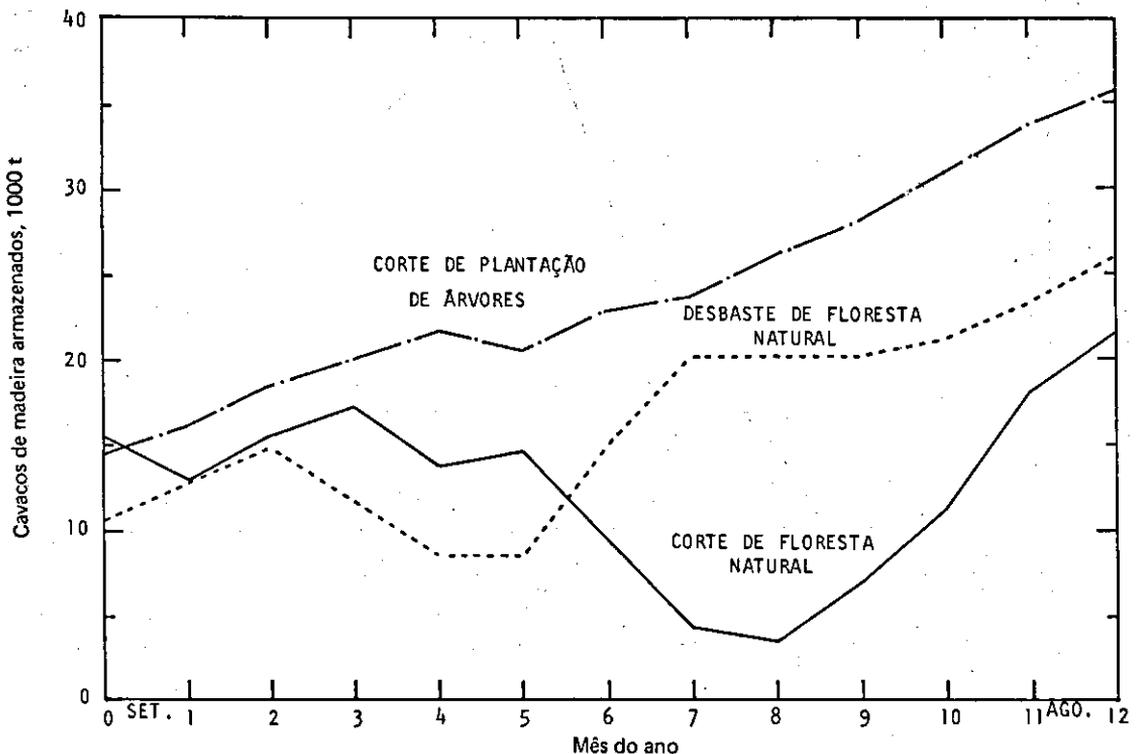


FIG. 5. Cavacos de madeira armazenados em cada mês do ano, para uma unidade produzindo 20 milhões de litros por ano utilizando somente cavacos de madeira como matéria-prima, no sul de Indiana.

madeira, o comportamento do sistema usando plantações de árvores é mais previsível que o dos outros dois.

#### Efeito de número de máquinas

Nas Fig. 6 e 7, mostra-se o efeito da percentagem de utilização do equipamento no custo de cada operação do sistema, para uma unidade produzindo 20 milhões de litros de álcool por ano, no Centro de Indiana, no ano agrícola 1976/77. A percentagem de utilização do equipamento é inversamente proporcional ao número de máquinas disponíveis para se efetuar cada operação. Com número insuficiente de máquinas, o custo de produção, por tonelada de biomassa, é menor, pois as máquinas estão sempre trabalhando. Entretanto, a quantidade de biomassa produzida não é suficiente para fazer a unidade processadora funcionar a plena carga durante todo o tempo, dado o grande con-

gestionamento existente em todas as fases do sistema.

#### Capacidade de armazenamento da unidade processadora

Foi simulada uma unidade produzindo 20 milhões de litros de combustível por ano, utilizando palhada de milho, cavacos de madeira, e feno, nas proporções de 50%, 45% e 5%, respectivamente, na região central de Indiana, em 1976/77. Foram estudadas capacidades armazenadoras correspondentes a 30, 40, 50 e 60 dias de funcionamento (8.220 t, 10.960 t, 13.700 t e 16.440 t). Considerando-se a densidade dos fardos como sendo 200 kg/m<sup>3</sup> e altura de pilha 10 m, a área necessária para armazenamento da palhada seria 0,41 ha, 0,55 ha, 0,69 ha ou 0,82 ha para armazenar um suprimento suficiente para as capacidades armazenadoras estudadas respectivamente. As Fig. 8 e 9

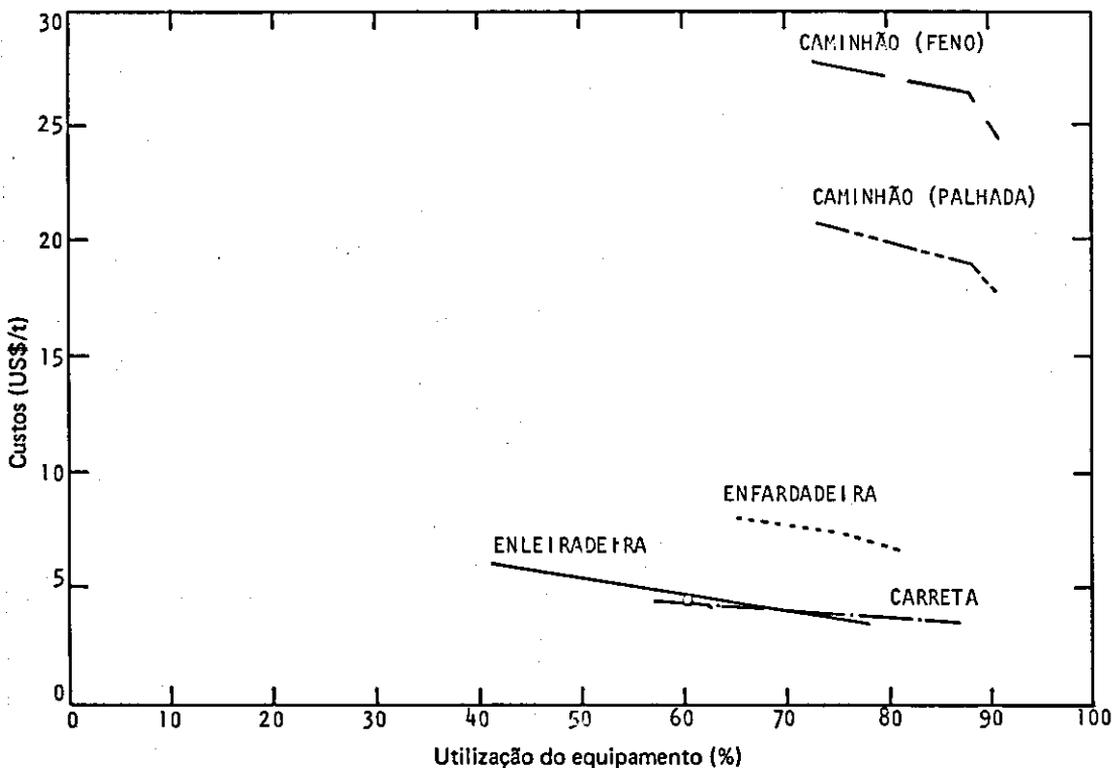


FIG.6. Custos de colheita e transporte de palhada de milho e feno em relação à utilização do equipamento num sistema utilizando cavacos de madeira, palhada de milho e feno para abastecimento de unidade produtora de 20 milhões de litros por ano, 1976-77.

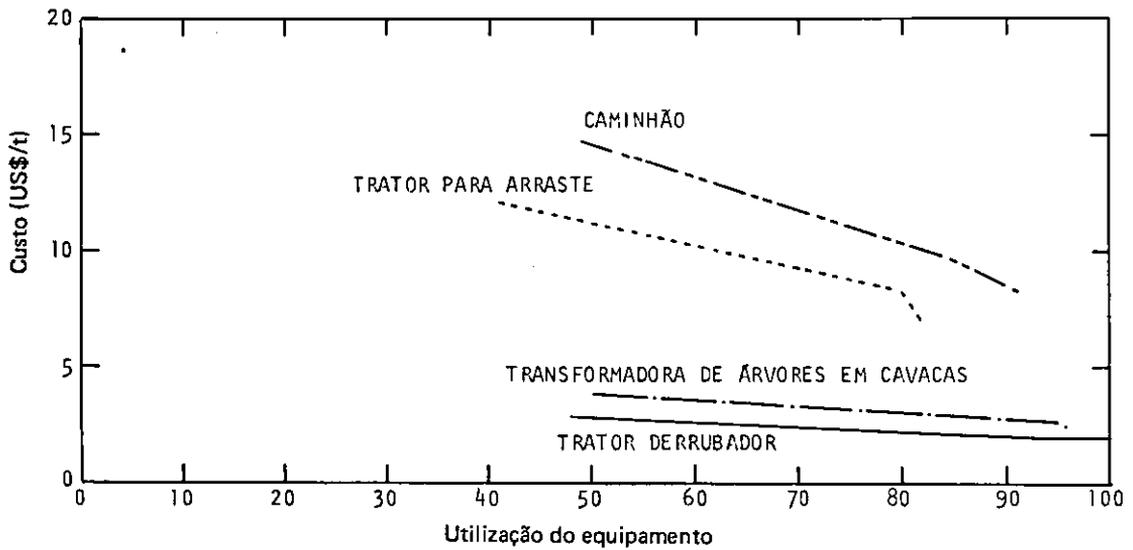


FIG. 7. Custos de produção e transporte cavacos de madeira em relação à utilização do equipamento em um sistema utilizando cavacos de madeira, palhada de milho e feno para abastecimento de unidade produtora de 20 milhões de litros por ano, 1976-77.

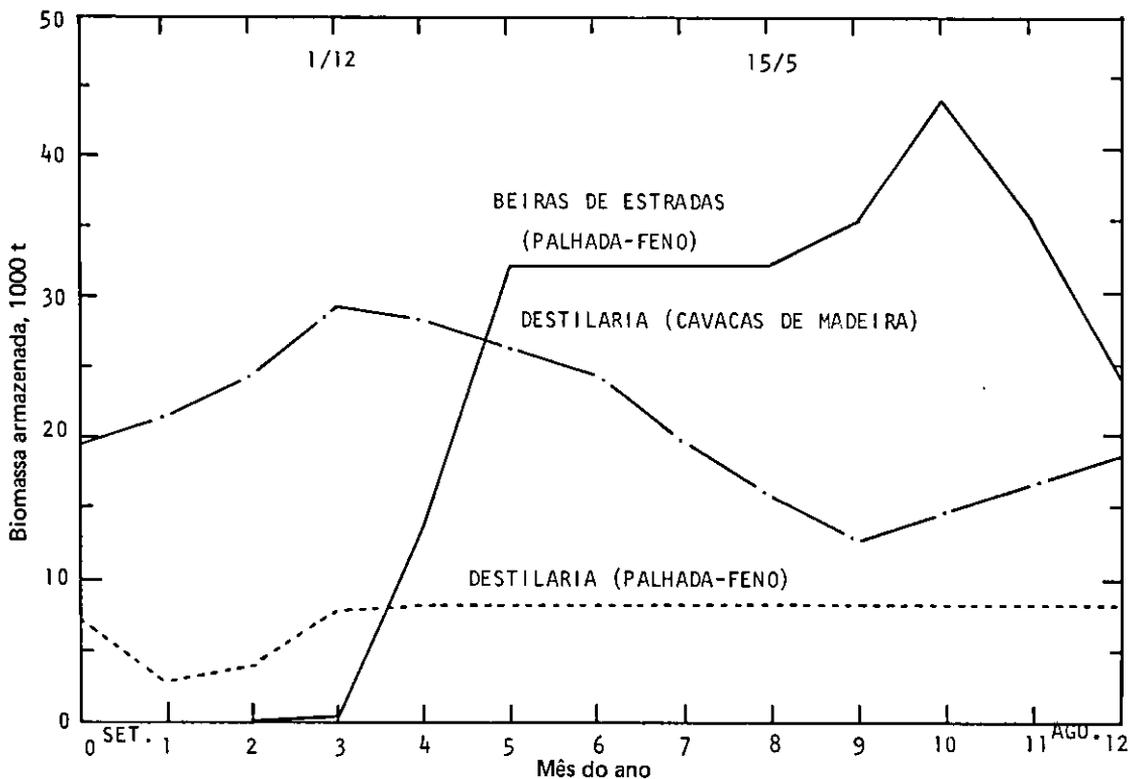


FIG. 8. Biomassa armazenada em cada mês do ano para abastecer uma unidade produzindo 20 milhões de litros por ano, utilizando palhada de milho, feno e cavacos de madeira como matéria-prima, com 30 dias de estoque máximo no terreiro da unidade, 1976-77, região central de Indiana, 1976-77.

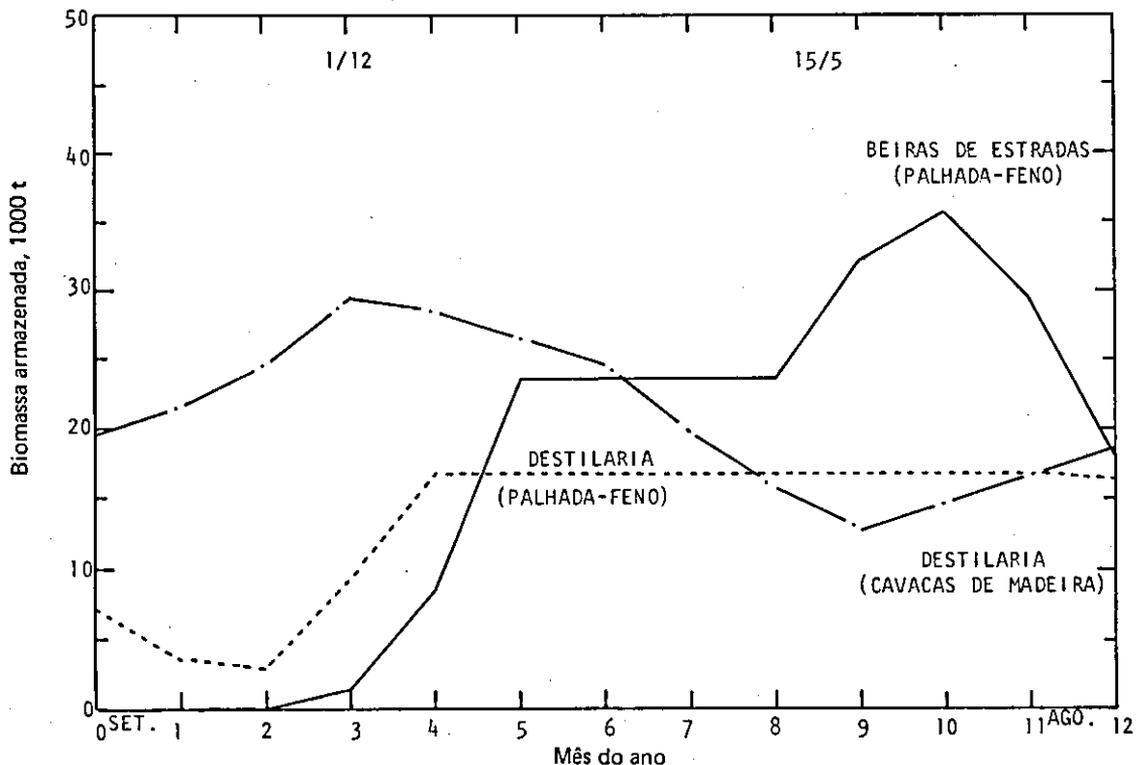


FIG. 9. Biomassa armazenada em cada mês do ano para abastecer uma unidade produzindo 20 milhões de litros por ano, utilizando palhada de milho, feno e cavacos de madeira como matéria-prima, com 60 dias de estoque máximo no terreiro da unidade, 1976-77, região central de Indiana, 1976-77.

mostram a quantidade de biomassa armazenada nos diferentes locais, de acordo com o mês do ano para duas capacidades armazenadoras, 30 e 60 dias. A quantidade de cavacos de madeira, armazenada no início do ano agrícola (1º de setembro) foi de 19.480 t para todos os casos. Os cavacos foram utilizados no período de 1º de dezembro a 15 de maio. Logo, de 1º de setembro a 1º de dezembro e 15 de maio a 31 de agosto houve um acúmulo de cavacos de madeira em estoque. A quantidade mínima estocada foi em torno de 12.000 t, em 15 de maio. Logo, a unidade poderia ter começado o ano com apenas 7.500 t em estoque e ainda ter quantidade suficiente de cavacos quando necessário. A quantidade máxima armazenada foi de 29.300 t, e seriam necessários 1,57 ha de área para estocar esta quantidade de material.

A quantidade de palhada de milho em estoque em 1º de setembro, quando começou a simulação,

era de 7.130 t. Durante o mês de setembro, a colheita de palhada de milho está começando e ainda é lenta; logo, a unidade processadora tem que utilizar o que está armazenado do ano anterior. Depois de 1º de outubro, a velocidade de colheita aumenta, o que resulta no acúmulo de palhada no terreiro da unidade de processamento, até atingir o máximo previsto, de 30 ou 60 dias no caso das Fig. 8 e 9.

Depois desse ponto, a quantidade de palhada nas beiras de estradas aumenta de maneira constante. No final de janeiro, todos os fardos coletados foram transportados para as beiras de estradas. De janeiro a 1º de maio não há nenhuma mudança nas quantidades de palhada armazenadas, porque a unidade processadora está utilizando cavacos de madeira como matéria-prima. No dia 1º de maio, o transporte de feno se inicia, e segue até 30 de junho. Em 15 de maio, a unidade começa a utilizar

palhada de milho e feno. Como depois de 30 de junho não há mais produção de biomassa, a quantidade armazenada decresce daí em diante.

### CONCLUSÕES

1. A SLAM II mostrou-se uma linguagem adequada para se construir um modelo de simulação de colheita, transporte e armazenamento de biomassa.

2. O clima é uma variável muito importante no sistema, especialmente na colheita e transporte de feno e palhada de milho.

3. Uma unidade de processamento que dependa somente da palhada de milho como matéria-prima provou ser mais vulnerável a problemas relacionados com o clima do que uma que trabalhe com outras matérias-primas também.

4. Para se trabalhar a mesma área, a utilização de equipamento pode ser até 170% melhor em um ano de condições climatológicas médias do que em um ano ruim.

5. A produtividade de palhada de milho foi, em média, de 3,3 t/ha, variando de 2,1 t/ha em 1974/75 até 3,8 t/ha em 1980/81. A medida que o milho é colhido mais cedo e quanto maior a produtividade do milho, maior é a produtividade da palhada.

6. Os custos das operações de enleiramento e enfardamento são mais afetados por baixa produtividade de palhada que os custos de transporte. Por outro lado, operações de transporte parecem ser mais sensíveis a variações em percentagem de utilização de equipamento do que qualquer outra operação.

7. Se o custo de manter a unidade de processamento de biomassa ociosa for maior do que o custo de subutilizar o equipamento de colheita e transporte, deve-se comprar equipamento suficiente para um ano de clima ruim, quando será necessário coletar material de uma área maior que em condições normais.

8. Nas regiões norte e centro de Indiana, embora o feno tenha sido utilizado em pequena proporção (5%), a distância média de transporte é 36% a 88% maior do que para transporte de palhada de milho. No sul de Indiana, esta diferença é menor, da ordem de 13% a 26%. O custo de transporte de

feno é 9% a 15% maior que o do transporte da palhada de milho no sul de Indiana, enquanto nas regiões centro e norte esta diferença chega a 31%.

9. O custo de produção de fardos retangulares e cilíndricos é mais ou menos o mesmo, mas custa 55% mais transportar fardos cilíndricos que os retangulares.

10. A produtividade de cavacos de madeira foi de 86 t/ha para corte de florestas naturais; 53 t/ha para desbaste de 40 t/ha para corte de plantações de árvores, para 100, 20 e 5 anos de rotação, respectivamente.

11. Os custos para produzir e transportar cavacos de madeira foram duas vezes maiores para corte de florestas naturais do que para desbaste ou corte de plantações de árvores.

12. Para abastecer uma unidade de processamento produzindo 20 milhões de litros de combustível por ano, as distâncias médias de transporte foram de 31,2 km para corte de florestas naturais, 17,6 km para desbaste, e 19,7 km para corte de plantações de árvores.

13. Uma unidade de processamento de 20 milhões de litros por ano, utilizando palhada de milho (50%), cavacos de madeira (45%), e feno (5%), na região central de Indiana, em 1976/77, precisaria de uma área de 1,47 ha para armazenar cavacos de madeira, e de 0,41 a 0,82 ha de área para armazenar palhada de milho e feno, dependendo do máximo de estoque na unidade.

### REFERÊNCIAS

- ABDALLAH, M.H. Economics of corn stover as a coal supplement in steam-electric power plants in the North Central United States. Columbus, Ohio State Univ., 1978. 173p. Tese Ph.D.
- BILTONEN, F.E.; HILLSTROM, W.A.; STEINHILB, H.M. & GODMAN, R.M. Mechanized thinning of northern hardwood pole stands; methods and economics. St. Paul, Estação Experimental Florestal do Norte, 1976. (USDA. For. Serv. Res. Pap., NC-137).
- FARRELL, W. Literature review and bibliography of simulation optimization. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, Los Angeles, EUA, 1977. Proceedings . . . Los Angeles, Society of Computer Simulation, 1977. p.116-24.
- FARRELL, W.; MCCALL JUNIOR, C.H. & RUSSEL, E.C. Optimization techniques for computerized simulation models. Los Angeles, CACI, 1975. 124p. (Technical Report, 1200-4-75).

- JENKINS, B.M.; ARTHUR, J.F. & EIBECK, P.A. Transportation model for selecting optimum biomass utilization sites. St. Joseph, ASAE, 1982. 20p. (ASAE Paper, 82-3090).
- LADISCH, M.R. Cellulosic residues (biomass) as a renewable source of fuels. St. Joseph, ASAE, 1979. 17p. (ASAE Paper, 79-4544).
- LADISCH, M.R. & DYCK, K. Dehydration of ethanol; new approach gives positive energy balance. *Science*, 205:899-900, 1979.
- MANTOVANI, B.H.M. Dynamic analysis of harvesting and handling systems for biomass energy feedstocks. West Lafayette, Purdue Univ., 1983. 253p. Tese Ph.D.
- PRITSKER, A.A.B. & PEGDEN, C.D. Introduction to simulation and SLAM. West Lafayette, J. Wiley, 1979. 588p.
- RICHEY, C.B.; LILJEDAHN, J.B. & LECHTENGERG, V.L. Corn stover harvest for energy production. *Trans. ASAE*, 25(4):834-9, 1982.
- SAVOIE, P.; ROTZ, C.A.; BLACK, J.R.; PARSCH, L.D. & BROOK, R.C. Analysis of forage systems. St. Joseph, ASAE, 1981. 14p. (ASAE Paper, 81-1523).
- SCANTLAND, D.A.; RIDDLE, W.E.; MCCLURE, T.A.; WOODFORD, P.G.; HONTON, E.J. & LIPINSKY, E.S. Development of sweet sorghum as an energy crop; integration concepts. Columbus, Battelle, 1980. v.3. (Research Report BMI, 2054).
- SCHULTZ, V. Evaluation of forage, animal and economic performance for a computer simulation of two cow-calf management systems with varying weather conditions and stocking rates. West Lafayette, Purdue Univ., 1981. 125p. Tese Mestrado.
- W. NSAUER, S.A. & UNDERWOOD, J.N. Computer simulation of forest harvesting systems, development and application. *Trans. ASAE*, 23(2):317-23, 1980.