

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E AMBIENTAL APLICANDO PROCESSOS DE RECICLAGEM.

PAULO CORREIA MAURO BERNI MÁRCIO ATHAYDE

ÁREA INTERDISCIPLINAR DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS
AIPSE
DPTO. DE ENERGIA / FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DE/FEM
NÚCLEO INTERDISCIPLINAR DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO
NIPE
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
UNICAMP

RESUMO

Este trabalho discute a reciclagem de papéis velhos como uma alternativa para o Setor Industrial de Papel e Celulose atuar na questão energética, contribuindo com a redução dos impactos ambientais, econômicos e sociais provocados pela geração de resíduos sólidos nas áreas urbanas. Partindo das possibilidades de oferta de aparas, das evoluções e restrições tecnológicas, dos investimentos necessários e da qualidade requerida para o produto final, analisa-se as possibilidades e alternativas de reciclagem através de modelos de programação linear e multicriterial. Através de análises multiobjetivas pondera-se entre as questões ambientais, energéticas e econômicas, minimizando o uso de polpa virgem, desta forma maximizando a utilização de "aparas" na produção de papéis, com a consequente diminuição da energia associada a cada tonelada de papel produzido e a minimização do custo da produção.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento industrial dos últimos cinquenta anos foi acompanhado por significativa perda da qualidade dos sistemas ambientais, devido à maneira acelerada com que este desenvolvimento se deu, ao emprego de processos tecnológicos que, além de explorar inadequadamente os recursos naturais consome grandes quantidades de matéria prima e energia.

Como consequência produz grande volume de rejeitos sem levar em conta sua correta destinação final. De forma semelhante na outra ponta estão os consumidores dos produtos industrializados gerando intensos volumes de rejeitos, ou "lixo", como resultado das atividades humanas e, muitas vezes, fruto de desperdícios para o qual, via de regra, não se tem uma correta disposição final.

Assim as decisões das últimas décadas têm levado ao estabelecimento de prioridades para as políticas ambientais, tanto nos países industrializados quanto naqueles em desenvolvimento.

Conforme o Banco Mundial a degradação ambiental tem três efeitos nocivos. É prejudicial à saúde humana, reduz a produtividade econômica e energética e leva à perda de "conforto", termo que designa as muitas outras formas pelas quais as pessoas se beneficiam da existência de um meio ambiente não poluído.

De uma forma geral, os governos dão justamente maior urgência aos problemas ambientais que prejudicam o potencial produtivo e a saúde humana. As prioridades a serem estabelecidas por países em desenvolvimento, como por exemplo o Brasil, com relação ao meio ambiente não serão necessariamente aquelas que os países industrializados adotarão (Banco Mundial, 1992).

Assim, embora nos países em desenvolvimento, certas culturas possam ter em alta conta o patrimônio natural, a maioria dos governos provavelmente dará menos prioridade ao conforto enquanto não tiverem sido atendidas as necessidades humanas básicas. Portanto, nesses países é de se esperar que ocorra uma compatibilização entre os objetivos de crescimento e desenvolvimento econômico e a não degradação do meio ambiente, de forma a se garantir o potencial produtivo¹ e a expansão das atividades econômicas.

Nesse sentido, a recente inclusão da variável ambiental nos processos decisórios e o aumento da complexidade dos problemas sócio, econômico e ambientais colocaram a sociedade e as administrações públicas diante de grandes desafios políticos e administrativos, que só poderão ser resolvidos a partir de uma abordagem intersetorial e forem incorporados pelos diversos segmentos da economia, especialmente o industrial.

No âmbito industrial, o setor de papel e celulose, desponta como aquele onde existem amplas possibilidades de se incrementar a reciclagem, podendo contribuir positivamente tanto com o meio ambiente quanto na alavancagem do desenvolvimento do país. A reciclagem de aparas além ser considerada um forma de se conservar energia, redundando em economias relacionadas ao próprio processo produtivo. Este fato tem sido verificado, em termos mundiais (D'Almeida, 1991).

No Brasil, o reaproveitamento de aparas através da reciclagem, ainda está muito aquém do seu real potencial e de suas reais possibilidades de ganhos econômicos (Figueiredo, 1992).

Considerando a questão energética envolvida, o problema ambiental associado, o potencial de oferta de aparas; as perspectivas de elevação do consumo interno de papel, o deslocamento de fibra virgem, o atual estágio tecnológico dos processos de reciclagem da indústria nacional de papel pode-se sugerir nesse trabalho, estudos quantitativos, de otimização através de programação linear e também a partir de um enfoque multicriterial como sugerido na metodologia apresentada por Amagai e Leung (1991).

Em uma economia de mercado, tendência observada hoje no mundo, estas análises podem gerar alternativas que possibilite a otimização dos objetivos de eficiência econômica, minimizando os custos energéticos e de utilização de matéria prima na produção de papel e de eficiência ambiental, maximizando a quantidade de aparas ou fibra secundária na produção de papel novo (Glasse et alii, 1970).

A RECICLAGEM DE PAPÉIS

No Brasil, a prática da coleta seletivas dos rejeitos é, infelizmente, pouca difundida. Os volumes reciclados de metais, vidros, e outros recicláveis é marginal comparativamente aos países desenvolvidos.

No caso da reciclagem de papéis velhos também é verdade a afirmativa. De acordo com a PPI (1992) e a ANFPC (1992), para o ano de 1991, consumiu-se cerca de 1,5 milhões de toneladas de aparas, para uma produção total de aproximadamente 4,9 milhões de toneladas de papel, correspondendo aproximadamente a 30% de reciclagem no volume total de papel produzido no país. Esta participação é relativamente pequena comparando-se, para o mesmo ano, com o volume de aparas recicladas, por exemplo nos EUA e Japão.

Os EUA, não obstante a reciclagem estar na mesma faixa do Brasil, cerca de 30%, o volume de aparas reciclado é muito superior, pois sua produção é de 72 milhões de toneladas e, no caso do Japão, este fato é muito mais destacado, pois para uma produção de papel 29 milhões de toneladas existe uma consumo de aparas da ordem de 15 milhões de toneladas, resultando uma taxa de reciclagem superior à 53%.

De uma forma geral, a reciclagem de aparas, além de possibilitar a produção de um papel novo, é menos danosa ao meio ambiente, com a vantagem de proporcionar economia de energia. (Correa, 1993)

¹ A degradação ambiental reduz a produtividade de muitos recursos naturais diretamente utilizados pelo homem assim como a saúde debilitada diminuir a produtividade humana..

Por outro lado, a relação entre uma tonelada de pasta celulósica obtida a partir de papel velho reciclado e o número de árvores não cortadas, depende do processo de produção empregado na obtenção da pasta celulósica, bem como das características dimensionais e densidade da matéria prima, principalmente se a mesma provém de reflorestamentos com a aplicação de biotecnologia. Entretanto, em termos médios, pode-se afirmar que uma tonelada de pasta celulósica obtida com papel velho reciclado equivale a 52 árvores de pinus ou 34 árvores de eucalipto, com 8 anos de idade, ou área plantada de 100 a 350 m² (D'Almeida, 1991).

Desta forma cada 30 kilos de papel velho transformado em papel novo evitaria que um eucalipto fosse cortado, ou ainda a cada 20 kilos uma árvore de pinus.

Em termos energéticos a reciclagem de aparas reduz o consumo de energia em torno de 50%, podendo chegar a 78% quando comparado com o de uma produção equivalentes de papel jornal a partir de pasta mecânica de refinador. A cada 12,5 toneladas de aparas reciclada, estima-se uma economia de 7 barris de petróleo (D'Almeida, 1991).

Para fins comparativos, em uma planta integrada, considerando-se a produção de pasta celulósica a partir de polpa virgem, consome-se em média cerca de 750 Kwh por tonelada de celulose e 1000 Kwh por tonelada de papel (IDAE, 1982). De acordo com dados do Balanço Energético Nacional - BEN (1992), considerando-se o conjunto do setor industrial, o setor de papel e celulose é o segundo mais intensivo em termos da relação consumo final de energia/PIB do setor e o terceiro no tocante ao consumo específico.

Cabe explicitar que a obtenção da pasta celulósica a partir de aparas causam um impacto ambiental substancialmente menor, do que aquele onde a pasta é obtida diretamente da madeira.

Apesar dos ganhos líquidos da conversão de aparas em papéis novos, existem algumas dificuldades que necessitam serem superadas, de forma a viabilizar esta prática no país. De uma forma geral, existe primeiramente desinformação das vantagens desta prática e, a ausência de maior poder coercitivo para uma maior penetração da alternativa de se recuperar materiais via reciclagem. Também a falta de estímulos para a produção e consumo de papéis sem materiais proibitivos visando evitar perdas de processo, desperdícios e danos ambientais, fatos que acabam onerando todo o conjunto da sociedade.

Ainda é incipiente no país uma estrutura formal que atue fortemente no sentido de se ampliar a oferta de papéis velhos, tanto em face de flutuações da demanda quanto pela falta de uma maior conscientização dos aparistas e interesse por parte das empresas produtoras de papel e celulose. Não menos grave são as relações entre quem vende e quem compra papéis velhos.

A atual condição econômica do país também não estimula uma economia de mercado, com livre concorrência, desta forma não resultando uma busca mais efetiva de eficiência no uso e reaproveitamento de materiais como o papel.

A PRODUÇÃO DE PAPEL

A fabricação de papel constitui-se basicamente de duas partes a preparação de massa e a máquina de papel.

Na preparação de massa, a pasta celulósica², previamente dispersa em água, é submetida ao tratamento mecânico de refinação, depuração e a aplicação de aditivos como cargas minerais, cola de breu e sulfato de alumínio, entre outros. Por seu turno, na máquina de papel ocorre a formação da folha, sua prensagem mecânica para a retirada de água

²A celulose é a principal matéria prima na fabricação do papel. Constitui-se num carboidrato polimérico encontrado na natureza associado a outros compostos orgânicos, tais como lignina, resinas, açúcares, corantes e alguns sais. Possui natureza fibrosa e de cor natural esbranquiçada, sendo obtida para produção de papel em plantas principalmente o pinus e o eucalipto. O rápido ciclo de desenvolvimento dessas plantas, face à condições climáticas favoráveis e ao uso intenso de biotecnologia, conferem ao Brasil grande competitividade nos mercados internacionais (ANFPC, 1991).

residual e a posterior secagem. Ainda na fase de secagem, pode-se adicionar produtos na superfície do papel a fim de conferir-lhe características específicas ao uso final. Finalmente, o papel em função de sua destinação final sofre operações de acabamento, onde destaca-se o rebobinamento e o corte em formatos .

No tocante a uma planta industrial que produza papel, com a utilização de aparas como matéria prima, tem-se que incorporar ao processo uma série de equipamentos necessários ao tratamento desta matéria prima. Na preparação de massa, dependendo da qualidade final desejada e do tipo do papel a ser produzido, introduz-se empilhadeiras, sistema de desagregação com peneiras para uma primeira separação das impurezas, depuradores centrifugos de alta densidade, sistemas de hidrocenrifulgadores, "cleeners" de alta e baixa consistências, sistema de destintamento e se necessário, sistema de retirada de plásticos à quente (ABTCP, 1983). Além disso, pode-se ter ainda alterações e adaptações tanto na forma operacional do processo quanto na própria máquina de papel.

No caso da máquina de papel, ressalte-se por exemplo, o sistema de formação que dependendo do tipo de papel terá uma ou duas camadas; as prensas que além do próprio sistema de prensagem também pode ter especificações especiais para os feltros a serem utilizados. Nos secadores, o perfil e o grau de secagem nas baterias, as temperaturas de operação, o tipo e especificação das telas, os sistemas de limpeza de máquina, dentre outras alterações são medidas que possibilitam trabalhar com aparas como matéria prima.

No acabamento, também são tomadas as providências necessárias para obter-se o produto final dentro das especificação técnica desejada e requerida pelo usuário.

Classificações da celulose, das aparas e do papel

A principal materia prima utilizada na fabricação de papel são as pastas celulósicas. Estas são encontradas na natureza e constituídas de fibras, dispostas em múltiplas camadas ligadas entre si por forças interfibrilares e ou pela lignina, que age como ligante. Assim podemos ter celulose virgem ou aparas de papéis velhos.

Celulose

As fibras, virgem ou não, podem ser classificadas em dois grupos, de acordo com seu comprimento: fibras longas - provenientes principalmente do pinus, bambu, línter de algodão, sisal e crotolária, e fibras curtas - provenientes sobretudo de eucalipto, gmelina, acácia, bagaço de cana e babaçu.

Na obtenção da pasta celulósica necessita-se dispende de energia, cuja quantidade dependerá do processo de produção empregado. Assim, de acordo com o processo de produção, as pastas celulósicas são classificadas em pastas mecânicas e químicas.

No processo mecânico utiliza-se muita energia elétrica e a pasta não sofre deslignificação. No processo químico ocorre deslignificação quase que total utilizando quantidade considerável de energia química e térmica. O principal processo químico é o método Sulfato cujo rendimento está numa faixa entre 40% e 60%. No Brasil o método mais comumente empregado é o Sulfato processando madeira de eucalipto.

Aparas

Os papéis velhos ou aparas podem ser classificados em vinte e um tipos diferentes mas podemos agrupa-los em seis grandes grupos - branco, kraft, cartolina, ondulado, mista e outros que podem ser subdivididos por sua natureza de qualidade em primeira, segunda e terceira quando for o caso. Também deve ser considerado na classificação das aparas, os materiais proibitivos, ou seja, materiais cuja presença em quantidade maior que a especificada tornam a matéria prima não utilizável para um tipo específico de papel e as impurezas (ANFPC, 1992).

Dessa forma, tem-se a seguir, a atual classificação das aparas, hoje adotada no Brasil:

Branco - Primeira - composta de papéis brancos sem impressão e revestimento, com teores máximos de umidade de 10%, impurezas 0% e 0% de materiais proibitivos. Segunda - composta de formulários contínuos de papel branco, sem carbono entre as folhas e sem revestimento. Deve apresentar teores máximos de umidade de 10%, impurezas 2% e de materiais proibitivos 0%. Terceira - composta por aparas de jornal e papel imprensa sem impressão. Deve apresentar teores máximos de umidade 10%, impurezas e quantidade de materiais proibitivos de 0%. Quarta - Aparas de papéis brancos de escritório, manuscritos impressos ou datilografados, cadernos e livros usados impressos em preto e sem capa. Deve apresentar teores máximos de umidade de 10%, impurezas de 5% e nenhuma quantidade de materiais proibitivos. Quinta - Aparas de branco com mínimo de impressão ou revestimento. Deve apresentar teores máximos de umidade de 12%, impurezas de 25% e nenhuma quantidade de materiais proibitivos.

Kraft - Primeira - é o próprio papel kraft natural usado na fabricação de sacos simples e multifolhados, refugados por defeito de fabricação ou não utilizados. Teores máximos de umidade 10%, impurezas 1% e nenhum material proibitivo. Segunda - compõem-se de sacos simples e multifoliados usados, com fibras e cores diversas, sem escolha ou seleção. Teores máximos de umidade 15%, impurezas 5% e nenhum material proibitivo. Terceira - composta de sacos multifoliados, principalmente de cimento, misturados e sem batimento, escolha ou seleção. Deve apresentar teores máximos de umidade de 15%, impurezas 17% e 3% de materiais proibitivos

Cartolina - Primeira - composta de cartões e cartolinas sem impressão, sem ou com revestimento, sem impressão de qualquer espécie. Provenientes de fabricações exclusivas com celulose virgem. Deve apresentar teores máximo de umidade 10%, impureza 0% e nenhum vestígio de materiais proibitivos. Segunda - composta de cartões e cartolinas com ou sem revestimento, podendo ter impressões e cores variadas, teores máximo de umidade de 12%, impurezas 10% e nenhum material proibitivo. Terceira - composta de cartões e cartolinas plastificadas, com ou sem impressão. Deve apresentar teores máximo de umidade de 12%, impurezas de 3% e materiais proibitivos na faixa de 7%.

Ondulado - Primeira - aparas obtidas de caixas de papelão ondulado, fabricadas com capas de alta resistência. Deverá apresentar teor máximo de umidade de 15 %, teor máximo de impureza de 3% e nenhum material proibitivo. Segunda - aparas provenientes de caixas e refugos de papelão ondulado, chapas, fabricados com capas de resistência média, menor que a de ondulado de primeira. Deve apresentar teores máximos de umidade de 15%, impurezas 5% e 0% de materiais proibitivos. Terceira - Aparas obtidas de caixas, chapas e refugos de papelão ondulado, fabricados com capa de baixa resistência e pontas de tubetes, podendo contar com até 20 % de outros tipos de papéis, que não sejam papelão ondulado Deve apresentar teores máximos de umidade de 20%, impurezas 5% e 3% de materiais proibitivos.

Mista - Primeira - composta de papéis usados mistos, restos de tipografia, provenientes em sua maior parte de escritórios, gráficas, aparas coloridas, resíduos de papéis e cartões diversos, misturados, provenientes de artefatos de papel. Teores máximo de umidade 12%, impurezas 5% e 1% de materiais proibitivos. Segunda - composta de papéis usados de residências, lojas comerciais, escritórios Teores máximo de umidade de 15%, impurezas de 10%, e de 3% de materiais proibitivos. Terceira - composta de papeis usados mistos, de todas as procedências . Teores máximo de umidade de 20%, impurezas 15% e 3% de materiais proibitivos.

Outras - No grupo "Outras" incluem-se as seguintes aparas : tipografia, hollerith (cartões perfurados), paraná (cartões de pasta mecânica), jornais e revistas. No caso da tipografia tem-se as aparas de recortes coloridos provenientes de gráficas e tipografias. Deve apresentar teores máximos de umidade de 10%, impurezas 1% e 0% de materiais proibitivos. O hollerith inclui cartões de material fibroso de alta qualidade usados na computação de dados, apresentando teores máximo de umidade de 10 %, máximo de impureza de 1 % e sem

materiais proibitivos. As aparas paraná são compostas de artefatos de papel, produzidos integralmente de pasta mecânica, teores máximo de umidade de 12%, impurezas 0% e 0% de materiais proibitivos. Os jornais são aparas de papéis velhos, limpos e encalhes de redação. Teores máximos de umidade 12%, impurezas 1% e nenhum material proibitivo, enquanto revistas compõem-se de aparas de revistas velhas, encalhadas ou com defeitos de impressão, impressas em papéis com ou sem revestimentos. Deve apresentar teores máximos de umidade de 12%, impurezas 2% e 1% de materiais proibitivos.

Finalmente, deve ser salientado que, impurezas são consideradas todos os papéis, cartões e papelão inadequados para a utilização em uma determinada finalidade. São ainda considerados impurezas : metal, corda, vidro, madeira, têxteis, pedra, areia, clips, plásticos, etc. Por outro lado, os materiais proibitivos são quaisquer materiais cuja presença em quantidade maior que a especificada tornam o fardo não utilizável para um tipo específico de papel. Entre os materiais proibitivos, pode ser citado : papéis vegetal ou glassine; papel e papelão encerado, parafinado, ou impregnado com substâncias impermeáveis à umidade; papel e papelão laminados, tratados ou revestidos com plásticos, betume ou camada metálica; colas a base de resinas sintéticas; fitas adesivas sintéticas.

Papel

De acordo com a Associação Nacional dos Fabricantes de Papel e Celulose / ANFPC, os papéis podem ser classificados em seis grandes grupos : i) papéis para impressão; ii) escrever; iii) embalagens; iv) fins sanitários; v) cartões e cartolinas; e vi) especiais.

Os papéis para impressão são os papéis utilizados para o processo gráfico. Neste grupo encontram-se o papéis jornal, revista, offset e couché. Os papéis para escrever destinam-se à utilização em lares, escolas e escritórios, sendo que suas aplicações incluem a fabricação de cadernos, impressos fiscais, envelopes e cartas, papéis para datilografia e formulários contínuos. Os papéis para embalagem incluem aqueles utilizados em sacarias, presentes, com ou sem impressão e o papelão ondulado, para caixas de grande porte, que acondicionam produtos que necessitam de proteção. Os papéis para fins sanitários incluem papel toalha e higiênico, lenços e absorventes, fraldas entre outros. Os cartões e cartolinas duplex, triplex ou multifolhados são produzidos principalmente para confecção de embalagens de frios, embalagens rústicas e brindes, embalagens de pequeno e médio porte, inclusive abrange os produtos feitos com polpa moldada, como por exemplo embalagem de ovos. Por último, tem-se os papéis especiais fabricados com alta tecnologia, como é o caso dos papéis fiduciário, abrasivo, filtro, autocopiativo, heliográfico e para cabos elétricos, entre outros.

Os papéis para impressão, escrever e especiais são fabricados basicamente com fibra ou polpa virgem branqueada ou não branqueada. Excetua-se os papéis jornais, revistas que eventualmente podem utilizar polpa derivada de aparas. Por outro lado, a fabricação dos papéis para embalagem, sanitários e, cartões e cartolinas é principalmente realizada a partir de fibra ou polpa secundária. A principal diferença produtiva entre estes grupos de papéis, ocorre face às restrições de qualidade e tecnologia. Desta forma podem existir quantidades diferenciadas de fibra secundária na fabricação desses grupos de papéis.

A seguir apresenta-se os nomes dos principais tipos de papeis que compõem cada grupo de papéis.

Impressão: Acetinados de 1ª, 2ª, Acetinado Cores, Ilustração, Bíblia, Bouffant 1ª, Bouffant 2ª, Base Couchê, Couchê Máquina, Couchê Fora Máquina, Imprensa, Jornal, Monolúcido 1ª, Monolúcido 2ª, Offset, Mimeógrafo.

Escrever: Apergaminhado com Marca, Apergaminhado, Super Bond, Bond, Correspondência Aérea, "Flor Post".

Embalagem: Estiva e Maculatura, Manilhinha, Padaria, Tecido, Manilha, HD, LD, Fósforo, Strongs 1ª e 2ª, Seda, Impermeáveis, Glassine, Granado, Fosco, Kraft natural, Kraft Sacos

Multifolha, Kraft Cores, Kraft 1ª, Kraft 2ª, Ondulado Capa 1ª, Ondulado Capa 2ª, Miolo de Ondulado.

Cartões e cartolinas: Cartões Duplex, Cartão Triplex, Cartão para Embalagens, Cartão para Copos, Cartões em Cores, Cartão para Impressos, Outros Cartões, Papelões, Papelão Madeira, Papelão Paraná, Papelão Cinza, Polpa Moldada, Caixas de Ovos.

Fins Sanitários: Folha Simples de Boa Qualidade, Folha Simples Alta Qualidade, Folha Dupla, Popular, Toalha, Guardanapo, Lenços, Toalha Popular.

Papeis Especiais: Cigarros e Afins, Cigarro, Ponteiros, Bastão, Crepados, Desenho, Heliográfico, Absorvente, Filtro, Mataborrão, Absorventes Base para laminados, Kraft Absorvente para Impregnação, Kraft Especial para Cabos Elétricos, Kraft para Fios de Telefone, Kraft Especial para Condensadores (ANFPC, 1992)

No Brasil, historicamente, os papéis para embalagem tem participado com mais de 45% da produção nacional. Percentual que agregado às participações dos papéis sanitários, cartões e cartolinas, atinge um patamar em torno de 65% de todo o papel produzido no Brasil. Participação altamente expressiva, tanto em termos da magnitude de produção e mercado, quanto das perspectivas do emprego de reciclagem, face ao grande potencial de oferta de papéis velhos ou aparas, que atualmente não tem uma destinação final adequada, sob o ponto de vista econômico e ambiental, bem como devido ao próprio volume de fibra secundária que ainda é pequeno comparativamente à demanda destes papéis. Com relação a este último aspecto, cabe salientar na atualidade, a fibra virgem vêm sendo utilizada em lugar onde a fibra secundária teria lugar garantido. Fato que, se por um lado, é decorrência da posição privilegiada do país na produção de celulose, por outro é um indicativo que não existe uma orientação adequada dos benefícios do incremento no uso de aparas.

Particularmente no Estado de São Paulo esta participação é muito mais expressiva pois o estado além de ser o maior consumidor de papel do país, e conseqüentemente o maior produtor de aparas, é o maior produtor de papel do país, com uma participação de 48 % no Brasil. Assim também é o grande consumidor de aparas. Dos tipos de papéis o que mais se destaca é o papel para Capa de 1ª com 18 % e o Miolo com 13 %, ambos para fabricação de papelão ondulado e caixas. O papel Offset tem uma participação de 16 %, e o Cartão Duplex 7 % sendo os outros com menores participação na produção total brasileira (ANAVE, 1991).

MODELAGEM

A necessidade de crescimento econômico e a sua adequação à questão energético-ambiental tende a tornar-se uma variável extremamente relevante nos processos decisórios, mesmo em países como o Brasil. Nesse sentido, o uso de técnicas multicriteriais são valiosas na medida em que determinam de que forma, e quantificam até que ponto as soluções dos diferentes objetivos estão relacionadas, possibilitando tomar uma decisão racional e consistente frente a possíveis objetivos conflitantes.

O modelo proposto trata simultaneamente dois objetivos: minimização dos custos de produção; minimização do uso de polpa virgem. Eles serão abordados através do método dos pesos, como será mostrado a seguir.

Considera-se o problema de Programação Linear Multiobjetiva (PLM)

$$\begin{array}{ll} \text{Min} & \begin{bmatrix} Zc(x) \\ Za(x) \end{bmatrix} \\ \text{s.a.} & Ax = b \\ & x \geq 0 \end{array} \quad (\text{PLM})$$

onde $Zc(x)$ e $Za(x)$ são as duas funções objetivas consideradas.

Com o método dos pesos o problema de PLM será convertido no problema de otimização mono-objetiva de Programação Linear - PL.

$$\begin{aligned} \text{Min } & \omega Z_c(x) + (1-\omega) Z_a(x) && \text{(PL)} \\ \text{s.a. } & Ax = b \\ & x \geq 0 \end{aligned}$$

onde $0 < \omega < 1$

Fazer ω variar no intervalo aberto $(0,1)$ corresponde a gerar todas as ponderações possíveis entre os dois objetivos originais. Isso permite obter o conjunto de soluções eficientes (não-dominadas) e construir a curva de *trade-off* correspondente. Ela quantifica o conflito entre os dois objetivos considerados. A seguir será detalhada a formulação do problema.

Formulação Matemática

No modelo multicritério apresentado são considerados dois objetivos : o da eficiência econômica e o da eficiência energético-ambiental, sendo dado por :

i) Econômico : Minimizar os custos na produção de papel (Z_c), em US\$/ton.

$$\text{Min } Z_c = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^7 C_{ij} \cdot X_{ij} \quad (01)$$

onde :

i = tipo de papel novo a ser fabricado.

j = tipo de matéria prima a ser utilizada.

C_{ij} = custo por tonelada da matéria prima j usada para produzir o papel novo i .

X_{ij} = quantidade em toneladas da aparas j para produzir o papel novo i .

ii) Ambiental : Maximizar o uso de aparas na produção de papel (Z_a), em toneladas.

$$\text{Max } Z_a = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 X_{ij} \quad (02)$$

As restrições funcionais do modelo incluem a eficiência do processo (03), as especificações dos papéis em termos das quantidades mínimas de fibra virgem (04), as limitações do potencial de suprimento de aparas ou fibras secundárias (05), as limitações de fibra virgem (06) e o balanço global de massa (07). As restrições implícitas (08), garantem a não negatividade das quantidades e valores monetários. Todas estas restrições são apresentadas a seguir.

iii) Eficiência do processo

$$\sum_{j=1}^6 X_{ij} \eta + X_{i7} = P_i, \quad (03)$$

onde :

$i = 1, 2, 3, 4, 5$ e 6 .

η = eficiência de processamento das aparas j por tipo de tecnologia utilizada na produção de papel novo i .

P_i = demanda de papel novo i

X_{i7} = quantidade de celulose consumida na produção do papel novo i .

iv) Quantidades mínimas de celulose ou fibra virgem por tipo de papel novo i , a ser fabricado.

$$\sum_{j=1}^6 X_{ij} \eta \leq (1 - \beta) \cdot P_i, \quad (04)$$

onde :

$i = 1, 2, 3, 4, 5$ e 6 .

β = fração mínima de celulose na produção do papel i .

v) Potencial de suprimento de aparas.

$$\sum_{i=1}^6 X_{ij} \leq S_j, \quad (05)$$

onde :

$j = 1, 2, 3, 4, 5$ e 6 .

S_j = capacidade de suprimento da apara j .

vi) Limitações da oferta de celulose.

$$\sum_{i=1}^6 X_{i7} \leq O, \quad (06)$$

onde :

O = oferta de polpa virgem para atender a produção de papéis.

vii) Balanço global de massa.

$$(1 - \alpha) \cdot \left(\sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 X_{ij} + \sum_{i=1}^6 X_{i7} \right) = \sum_{i=1}^6 P_i \quad (07)$$

onde :

α = eficiência global na fabricação dos papéis novos.

viii) Não negatividade das variáveis.

$$X_{ij}, P_i, X_{i7} \geq 0 \quad (08)$$

ESTUDO DE CASO

A presente modelagem foi aplicada para o conjunto do parque industrial papeleiro nacional, tendo-se com base os dados da demanda, do consumo e da produção de papel e celulose, para o mercado interno, publicados pela Associação Nacional de Papel e Celulose, para o ano de 1991, tendo-se em conta que o grande potencial da reciclagem encontra-se principalmente na região sul/sudeste, tanto em função do amplo mercado consumidor e gerador de aparas, quanto em face do estágio tecnológico que se encontram das empresas destas, tendo em vista o uso de fibras secundárias.

No tocante às aparas, estas foram agregadas em seis grupos: Branco, Kraft, Cartolina, Ondulado, Mista, incluindo as subdivisões de primeira, segunda e terceira, etc nas suas respectivas classificações e a sexta classificação é dada por "Outros" que agrega os tipos Hollerith, Tipografia, Aparas Paraná, Jornais e Revistas. Para estes grupos de aparas, considerou-se os custos médios por tonelada (US\$/tonelada), quais sejam: branco - 276, kraft - 150, cartolina - 250, ondulado - 110, mista - 150 e outras - 140 US\$/tonelada, valores estimados. No caso da celulose, utilizou-se o valor médio entre os custos da tonelada de fibra curta e longa em US\$ 450/tonelada.

Quanto aos tipos de papéis, foram agregados segundo a classificação da Associação Nacional dos Fabricantes de Papel e Celulose e, citados anteriormente.

Foram consideradas as quantidades mínimas de fibra virgem necessárias na fabricação de cada um dos tipos de papéis, resguardando-se a qualidade do produto final. A tabela 1 fornece os limites mínimo e máximo de celulose que podem entrar na fabricação de cada tipo de papel.

Tabela 1 Quantidades mínimas e máximas de celulose por tipo de papel, em %

Tipo de Papel	Limites	
	Mínimo	Máximo
Embalagem	0	100
Escrever	90	100
Impressão	80	100
Fins sanitários	0	100
Cartão/Cartolina	80	100
Especiais	50	100

Fonte : Elaboração própria

O potencial de suprimento de aparas, foi estimado a partir da participação dos papéis velhos nos resíduos urbanos e passíveis de utilização, conforme Figueiredo (1992) e em dados da PPI de julho 1992. Conforme esta mesma revista, no ano de 1991, o Brasil produziu 1,44 milhões de toneladas de aparas, consumiu 1,481 milhões, importou cerca de 0,51 milhões e exportou 0,1 milhões de toneladas.

Quanto as questões técnicas de equipamentos e de processos para remanufatura de papéis velhos, considerou-se apenas uma depuração mais grosseira, uma limpeza mais refinada e um processo de flotação e destintamento (tabela 2). Desta forma temos índices de perdas, levando em consideração estas restrições, que variam na faixa de 5% a 25%, sendo que quando utiliza-se a fibra virgem o rendimento considerado é de 100%, não sendo considerado os acréscimos com cargas e aditivos ao papel. Para efeito do balanço global de massa, considerou-se, que a eficiência na fabricação de papéis é da ordem de 97%, média verificada em 1991, no setor.

Tabela 2 Processos assumidos de tratamento de aparas por tipos de papéis

Tipo de papel	Depuração Grossa	Depuração Fina	Flotação	Perdas (%)
Embalagem	x	x	x	25
Escrever	x	x	-	05
Impressão	x	x	-	05
Fins Sanitário	x	x	x	15
Cartão e Cartolina	x	x	x	20
Especiais	x	x	-	05

Fonte : Elaboração própria

Considerou-se as seguintes hipóteses de reaproveitamento de aparas por tipos de papéis: i) heterogeneidade das instalações industriais quanto a sua capacitação tecnológica e ii) qualidade final de cada produto solicitada pelo mercado. Em decorrência, montou-se a

tabela 3, que indica as possibilidades de uso dos diversos tipos de matéria prima em função do tipo de papel produzido.

Tabela 3 Relação entre os papéis novos e as matérias primas

Tipo de papel	Tipos de aparas / matéria prima						
	Branco	Kraft	Cartolina	Ondulado	Mista	Outras	Polpa Virgem
Embalagem	X	X	X	X	X	X	X
Escrever	X	-	-	-	-	X	X
Impressão	X	-	-	-	-	X	X
Fins Sanitários	X	X	X	-	-	X	X
Cartão e Cartolina	X	X	X	X	X	X	X
Especiais	X	X	-	-	-	X	X

Fonte : Elaboração própria

RESULTADOS E CONCLUSÕES

Os resultados obtidos apontaram para a inexistência de conflito entre os dois objetivos, o que pode ser explicado pela diferença existente entre o preço da polpa virgem em relação ao das aparas. Ressalte-se que se ocorrerem modificações nos preços dos insumos (polpa virgem e aparas), motivados por força do mercado ou pela estabilização da economia, é possível que se passe a uma situação de conflito entre os dois objetivos. Tal constatação baseia-se na análise de sensibilidade dos resultados obtidos na modelagem empregada.

A inexistência de conflito é um resultado muito interessante. Ela indica que políticas de redução de custos de produção, podem levar, também, a redução dos impactos energético-ambientais. Isto significa uma conjunção de interesses das áreas financeira e marketing, indicando uma possível estratégia empresarial tanto ao nível de uma empresa específica quanto para o setor.

Este exemplo foi montado para um agregado do setor. No entanto, não haveria qualquer dificuldade de aplicá-lo no caso de uma planta específica, garantindo-se com isso uma análise mais adequada, por principalmente tratar-se de dados reais e não agregados. Nesse caso seria possível um maior refinamento da formulação e dos dados utilizados, o que levaria a resultados mais concretos para tomada de decisões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABTCP, Indústria Brasileira de Celulose e Papel, Associação Técnica Brasileira de Celulose e Papel, São Paulo, 1983.

AMAGAI, H. & LEUNG, P. The Trade-Off between Economic and Environmental Objectives in Japan's, In : The Energy Journal-IAEE, v.12, n.4, 1991.

ANAVE -Revista da Associação Nacional dos Profissionais de Venda em Celulose, Papel e Derivados, Ano XV, n.63, julho/agosto 1991, pp 11 a 21.

ANFPC, Relatório Estatístico da Associação Nacional dos Fabricantes de Papel e Celulose, vários anos.

ANFPC Consumo de Matéria Prima 1991, relatório interno da Associação Nacional dos Fabricantes de Papel e Celulose, 1992.

Banco Mundial, Relatório sobre o Desenvolvimento Mundial, 1992.

BEN, Balanço Energético Nacional, ano base 1991, 1992.

CORREA,P.B., BERNI,M.D.,ATHAYDE,M.A.P. Otimização na reciclagem de papel pela indústria papelreira, In Anais VI Congresso Brasileiro de Energia , UFRJ Rio de Janeiro, 1993

D'ALMEIDA, M.L.O. & CAHEN, R. " Reciclagem de papel " In: Revista O Papel, novembro/1991, pp. 131 a 135.

FIGUEIREDO, P.J.M. " Os resíduos sólidos e sua significação frente ao impasse ambiental e energético da atualidade ". Tese doutorado apresentanda à FEM/UNICAMP, 1992.

Glassey,C.Roger, Gupta,Virendra K. "A Linear Programming Analisis of Paper Recycling " STUDIES IN LINEAR PROGRAMMING, Studies in Management Science and Syastems, North-Holland/American Elsevier, USA 1970, pp 273 a 292.

IDAE-Instituto para la diversificacion y ahorro de la energia, Ministerio de Industria Y Energia, Vol.2, Madri, Espanha, 1982.

PPI Pulp and Paper International, July 1992