

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Liziane da Luz Seben

ESTUDO EXPLORATÓRIO DE EXTRAÇÃO DE CELULOSE
A PARTIR DE RESÍDUOS VEGETAIS DO PROCESSO
PRODUTIVO DE CONSERVA DE PALMITO
(*ARCHONTOPHOENIX ALEXANDRAE*)

Porto Alegre

2011

LIZIANE DA LUZ SEBEN

Estudo Exploratório de extração de celulose a partir de resíduos vegetais do processo produtivo de conserva de palmito (*Archontophoenix alexandrae*)

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, modalidade Acadêmica, na área de concentração em Sistemas de Qualidade.

Orientador: Prof^a. Istefani Carísio de Paula,
Dr^a.

Porto Alegre

2011

LIZIANE DA LUZ SEBEN

Estudo exploratório de extração de celulose a partir de resíduos vegetais do processo produtivo de conserva de palmito (*Archontophoenix alexandrae*)

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção na modalidade Acadêmica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof^ª. Istefani Carísio de Paula, Dr^ª.

Orientador PPGEP/UFRGS

Prof^ª. Carla Schwengber ten Caten, Dr^ª.

Coordenadora PPGEP/UFRGS

Banca Examinadora:

Professora Carla Schwengber ten Caten, Dr^ª. (PPGEP/UFRGS)

Professora Mariliz Gutterrez Soares, Dr^ª. (DEQUI/UFRGS)

Professora Rosane Rech, Dr^ª. (ICTA/UFRGS)

Aos meus pais e ao Jonas Scheffler, sempre
presentes e motivadores das minhas
conquistas.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção – PPGEPP, pela oportunidade de realização do Curso de Mestrado em Engenharia de Produção.

Aos meus pais, pelo carinho e incentivo que resultaram na minha formação.

Ao Jonas Scheffler, pelo apoio, motivação e companheirismo, sempre trazendo alegrias na minha vida.

À minha orientadora, Prof. Dra. Istefani Carísio de Paula, pela atenção e contribuições para este trabalho.

Aos professores, pelos conhecimentos transmitidos.

Aos colegas deste curso de Pós-Graduação, pela amizade, pela parceria e ajuda prestada ao longo desta dissertação.

Aos amigos e familiares, presentes para dar alegrias e motivação.

À FEPAGRO na figura de Maria Helena Fermino e Ricardo P. Silveira, pela disponibilização do laboratório para realização de experimentos mostrados nesta pesquisa.

Ao Alceu Silva, por colaborar com este estudo ao dispor dados de sua empresa a realização desta pesquisa.

Ao CNPq pelo patrocínio do projeto, no qual esta pesquisa está inserida.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para este trabalho, o meu sincero

MUITO OBRIGADO.

RESUMO

No Brasil, tanto o agronegócio quanto a fabricação de celulose trazem resultados relevantes para a economia. Sob uma perspectiva de sustentabilidade, as indústrias beneficiadoras de materiais vegetais geram grande volume de resíduos, os quais podem servir de fonte de celulose, configurando-se numa alternativa atraente para gerar lucros e diminuir impactos ambientais negativos. O objetivo geral desta dissertação é realizar um estudo exploratório de extração de celulose a partir de resíduo do processo produtivo de empresa beneficiadora de material vegetal, sob perspectiva das dimensões ambiental e econômica da sustentabilidade. O estudo foi desdobrado em cinco etapas: *i*) identificação na literatura das diretrizes para os processos produtivos sustentáveis, por meio das abordagens que tratam da sustentabilidade; *ii*) identificação dos processos industriais de extração de celulose e suas características operacionais; *iii*) definição da empresa para realização do estudo, a sazonalidade e o volume disponível dos resíduos vegetais provenientes do processo de beneficiamento de vegetais; *iv*) adaptação do processo industrial de extração de celulose para uso com resíduos vegetais e atendimento às restrições da fábrica definida para o estudo e *v*) realização de testes de extração com o uso de projeto de experimentos para posterior caracterização da polpa de celulose obtida do resíduo. Neste último, foi empregado um Projeto Fatorial Composto de Segunda Ordem (PSCO) com Metodologia de Superfície Resposta (MSR) para analisar a influência dos fatores controláveis sobre as variáveis de resposta. Os fatores controláveis foram definidos de acordo com dados da literatura específica e foram analisadas as variáveis de resposta que caracterizam polpa de celulose, aplicáveis a fins sanitários, como Número Kappa, capacidade de absorção, velocidade de absorção e densidade. Resultados indicaram que limitações quanto ao uso de altas temperaturas no processo de extração é um fator relevante, para atingir maiores teores de deslignificação. Os estudos mostraram a influência do uso de aditivo de processo, antraquinona, carga alcalina e tempo de polpeamento, bem como, tratamento de hidrólise ácida no resíduo na qualidade da polpa.

Palavras chaves: Sustentabilidade; processos de extração de celulose; resíduos vegetais; projeto de experimentos (DOE).

ABSTRACT

Agribusiness and pulp production bring both relevant results to the Brazilian economy. In a sustainable perspective, the wastes of Industries that benefit vegetable materials may serve as pulp's source, configuring itself as an attractive alternative for profit generation and reduction of negative environmental impacts. The aim in this dissertation is to carry out an exploratory study of pulp extraction from the waste of productive process of a firm which processes vegetal material, under the perspective of environmental and economic dimensions of sustainability. The study was unfolded in five steps: i) identification, in literature, the guidelines for sustainable productive processes, through approaches that embrace sustainability; ii) identification of industrial processes of pulp extraction and respective operational features; iii) definition of an industrial unit to perform the study, as well as the seasonality and the availability of vegetal wastes coming from the vegetable process; iv) adaptation of the industrial process of pulp extraction for using with vegetable wastes, and attendance to constraints of the current process in the industrial unit chosen for the study; and v) the performance of extraction tests using a project of experiments for further characterization of the cellulose pulp resulting from the waste. It was employed a Factorial composite second-order design in a Surface Response Methodology (SRM) in order to analyze the influence of the controlled variables over the response variables. Variables of the extraction process were defined according with the specific literature's data, and response variables, adequate to the cellulose pulp characterization as Kappa Number, capability, absorption speed and apparent density were analyzed. Results indicate that constraints related to the high temperature used in the equipment available for extraction is a relevant factor in the process for obtaining higher contents of delignification. Studies show the influence of using additive process, anthraquinone, load time and alkaline pulping, as well as treatment of hydrolysis in the waste of pulp quality. The remarkable difference in the quality of vegetable waste after hydrolysis treatment indicates that a pretreatment stage of such waste is interesting, since the fiber is resistant and requires high alkali and additive charges.

Keywords: Sustainability; pulp extraction processes; vegetable wastes; Design of Experiments (DOE).

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	9
Comentário iniciais.....	9
Tema e objetivos.....	12
Justificativa do tema	13
Método	14
Estrutura do trabalho	17
Delimitações do trabalho	18
EXTRAÇÃO DE CELULOSE DE RESÍDUOS VEGETAIS: SELEÇÃO DE PROCESSO FRENTE A CRITÉRIOS AMBIENTAIS E ECONÔMICOS DA SUSTENTABILIDADE	19
ANÁLISE DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DA PALMEIRA REAL DA AUSTRÁLIA (PALMITO EM CONSERVA) PARA DETERMINAÇÃO DAS VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM AS OPERAÇÕES DE VALORIZAÇÃO DE SEUS RESÍDUOS.....	58
PRODUÇÃO DE POLPA DE CELULOSE A PARTIR DE RESÍDUOS DA PALMEIRA REAL DA AUSTRÁLIA: ANÁLISE EXPERIMENTAL DE FATORES QUE AFETAM AS CARACTERÍSTICAS DA POLPA PARA FINS ABSORVENTES	90
COMENTÁRIO FINAIS	123

1. INTRODUÇÃO

1.1. Comentários Iniciais

Um dos papéis associados à engenharia de produção é estudar a adequação de alternativas em materiais e métodos que proporcionem maior desenvolvimento aos negócios e aos produtos, originando valor para o mercado. O aumento populacional e restrições quanto ao uso de recursos naturais para a produção de fibras, faz com que resíduos vegetais lignocelulósicos de atividades da agroindústria se tornem alternativas atraentes para a geração de fibras e produtos, como materiais compósitos e materiais substitutos à celulose (LOPES et al., 2007).

As fibras de resíduos têm composição, propriedades e estrutura que as tornam viáveis para diversas aplicações industriais, como a fabricação de produtos têxteis, compósitos, cosméticos, polpas de celulose, entre outros (YOUNGQUIST et al., 1996; GEETAMMA et al., 1998; LIM et al., 2001; REDDY e YANG, 2005; SILVA et al., 2007). Dentre as propriedades dos resíduos vegetais se incluem: são renováveis, biodegradáveis, disponíveis em abundância e variedades de acordo com as diferentes regiões geográficas (REDDY e YANG, 2005). A maior parte dos resíduos da agroindústria é utilizada como fonte de combustível ou alimentação animal, não oferecendo desta maneira alto valor agregado aos mesmos. Entretanto, em países desenvolvidos, é estimulado o uso destes para a produção de fibras, combustíveis e químicos (WORLD BANK GROUP, 1998).

Os materiais fibrosos, oriundos de diferentes espécies vegetais, são constituídos de três componentes principais: celulose, hemicelulose e lignina (RAJARATHNAM et al., 1992). Entretanto, a celulose é o polímero natural mais abundante nos resíduos vegetais. Por seu turno, o valor agregado do resíduo dependerá da qualidade das fibras obtidas e de seu potencial de uso final, não apenas do teor de celulose contido neste (REDDY e YANG, 2005).

No Brasil a produção de fibras vegetais é diversificada e gerada em grandes volumes, colocando o país em uma posição de destaque frente aos países da América Latina, visto que tem uma área de aproximadamente 8,5 milhões de km², dos quais cerca de 5 a 6% são terras aráveis, 22% pastagens permanentes e 58% mata e regiões arborizadas (SATYANARYANA et al., 2005). Isto mostra o potencial brasileiro de exploração de seus recursos naturais, com destaques para materiais fibrosos substitutos à madeira, tanto no cenário nacional, quanto internacional (SATYANARAYANA et al., 2007). Um setor atraente para o beneficiamento

de diferentes fibras é o de papel e celulose, porque é relevante para a economia do Brasil. O setor de celulose e papel é um dos segmentos industriais mais competitivos do País, com um padrão de qualidade equivalente aos melhores do mundo e atuando num mercado globalizado extremamente ativo (SOUZA et al., 2008). Em 2008 o Brasil passou de sexto para quarto lugar entre os produtores mundiais de celulose (BRACELPA, 2010 (a)), posição que ocupa até hoje com 113,3 milhões de toneladas produzidas com faturamento superior a oito milhões de reais (BRACELPA, 2010 (b)).

Este setor apresenta grande relevância ambiental, econômica e social, sendo caracterizado pela forte base florestal, fator que influi fortemente no meio ambiente e comunidade (LINS e OUCHI, 2007). A busca pela sustentabilidade corporativa no setor de papel e celulose apresenta-se como tendência natural da concepção do negócio, já que se trata de uma atividade produtiva bastante dependente de recursos naturais, com grande potencial de impacto no meio ambiente e com longos ciclos de produção, frutos de investimentos de longo prazo de maturação (LINS e OUCHI, 2007; SOUZA et al., 2008). Além disso, o setor promove relevantes interferências nas questões sociais, por requerer grandes espaços de terras e por ser intensivo em mão-de-obra. A principal categoria de fornecedores das indústrias de celulose é formada por produtores do campo, já que estes fornecem a madeira, que é a principal matéria-prima da celulose. Mesmo que nos últimos anos tenha ocorrido aumento nos programas de fomento florestal, no Brasil a maior parte da madeira utilizada pelas indústrias de produção de celulose é proveniente de áreas de reflorestamento (LINS e OUCHI, 2007).

O Setor Florestal Brasileiro conta com 4,8 milhões de hectares de Florestas Plantadas com pinus, eucalipto e acácia-negra para suprimento de matéria-prima para as indústrias de papel e celulose, siderurgia a carvão vegetal entre outras (EMBRAPA, 2010). No Brasil, as duas principais fontes de madeira utilizadas para a produção de celulose são as florestas plantadas de pinus e de eucalipto, responsáveis por mais de 98% do volume produzido. No entanto, a celulose também pode ser obtida de outros tipos de plantas, não-madeiras, como bambu, babaçu, sisal e resíduos agrícolas como o (bagaço de cana-de-açúcar) (BRACELPA, 2010 (c)).

Os impactos causados pelas áreas de reflorestamento podem incluir: inutilização de vastas áreas para cultivo de eucaliptos e pinus, as quais poderiam ter destinações diferentes; redução de biodiversidade nas áreas plantadas; consumo elevado de água de irrigação pelos cultivares; possibilidade de incêndios florestais, gerando emissões atmosféricas, resíduos sólidos e possíveis danos a comunidades; uso de maquinário pesado para extração da madeira,

com potencial de compactação do solo e alto uso de fertilizantes e defensivos agrícolas, com riscos para, fauna, solo e águas subterrâneas. Embora esses impactos possam ser contornados pelo emprego de práticas de manejo sustentável da floresta, estes geram custos excessivos aos produtores.

Em países em desenvolvimento, que envolvem os sul americanos e do leste asiático, estima-se que 60% da fibra celulósica venha de insumos agrícolas como bagaço de cana, palha de cereais, bambu, juncos, gramíneas, jutil, sisal e outros (WORLD BANK GROUP, 1998). Todavia, no Brasil, a quase toda totalidade da produção de celulose se dá a partir de fibras obtidas de madeiras de área de reflorestamento. Entretanto, numa perspectiva produtiva atual, não basta apenas otimizar os processos de beneficiamento da celulose para diminuir os impactos ambientais, mas encontrar soluções efetivamente sustentáveis que beneficiem toda a cadeia produtiva nas dimensões ambiental, econômica e social. Neste sentido, identificar matérias-primas alternativas de baixo custo, alta produtividade e baixo impacto ambiental, a exemplo dos resíduos agroindustriais, pode representar um grande passo para a indústria brasileira de celulose. Já se observa a evolução do setor em rever os processos para economizar e reusar água, poupar energia, adotar fontes alternativas de matéria-prima e reduzir o consumo de recursos naturais (LINS e OUCHI, 2007; SOUZA et al., 2008; LINS e ZYLBERSTAJN, 2010).

Face à problemática de adequação de práticas que gerem melhor desempenho, está a valorização de resíduos gerados dentro de um processo produtivo. O volume e o tipo de resíduo gerado pelo agronegócio traduzem a natureza e o tamanho de suas operações. Para que a gestão de resíduos seja efetiva, o primeiro passo é entender a quantidade e o tipo de resíduo que é gerado no local e as operações envolvidas, para então prevenir e reduzir a geração do resíduo. Desta forma, o impacto ambiental associado à geração pode ser reduzido por uma proposta de valorização sustentável (DEMIRBAS, 2010). Alguns subprodutos da agroindústria historicamente já se transformaram em produto com elevado valor agregado, abrindo caminho para a exploração auto-sustentável e ecológica, como casca do coco para geração de fibras (SANTIAGO e SALVAM, 2007; ROCHA et al., 2010). Mas o país conta com diversidade de subprodutos agrícolas como palha de milho, palha de trigo e palha de arroz, materiais florestais, resíduos de cítricos e da mandioca, os quais têm potencial para diversas e inovadoras aplicações industriais na área de químicos e combustíveis (LEITÃO et al., 2010).

Do processo de beneficiamento do arroz tem-se como resíduo a casca de arroz, que possui alto poder calorífico e custo praticamente nulo, logo, vem sendo usada como biomassa usada nas caldeiras para geração de calor e de vapor. Os resíduos do arroz são apropriados para reações de combustão, pirólise e gaseificação (LEITÃO et al., 2010). Ampliando o conceito de aplicações do uso de resíduos agrícolas lignocelulósicos, mais possibilidades economicamente viáveis se revelam, tais como obtenção de açúcares reduzidos, enzimas, biocombustíveis, ácidos orgânicos, resíduo para compostagem, biocompósitos, nutrientes, bioadsorventes, etc (MTUI, 2009).

Em meio aos aspectos sustentáveis, profissionais do meio buscam condições de processo de extração com enfoque nas dimensões da sustentabilidade, que atendam as diretrizes de menor impacto ambiental negativo e ganhos econômicos. Desta forma, a adequação de novos processos e o uso de diferentes matérias-primas são visualizados e estudados para que as práticas sustentáveis sejam difundidas. Entretanto, as grandes empresas do setor de papel e celulose não têm investido no uso de resíduos vegetais como matéria-prima para seus processos, por questões de escalabilidade, mas se observa o uso de papel reciclado, bem como alternativas tecnológicas de melhoria nos processos vigentes. Pesquisas acerca de uso de resíduos vegetais para produção de celulose provavelmente serão direcionadas para pequenos e médios produtores que estão dispostos a investir em novos projetos.

1.2. Tema e Objetivos

Em face à relevância do setor de papel e celulose no mercado brasileiro e mundial e tendências de melhoria e desenvolvimento das empresas, o investimento em estudos de extração de celulose a partir de resíduos vegetais lignocelulósicos apresenta-se como uma alternativa alinhada com os princípios econômicos e ambientais da sustentabilidade. Os estudos podem contribuir para o aumento da competitividade de pequenas e médias empresas que usam nos seus processos materiais vegetais e se deparam com a geração de resíduos vegetais lignocelulósicos. Frente a essa problemática, a delimitação do tema desta dissertação é o aproveitamento de resíduos vegetais lignocelulósicos sob as perspectivas econômicas e ambientais da sustentabilidade.

O objetivo geral é realizar um estudo exploratório da extração de celulose a partir de resíduo do processo produtivo de empresa beneficiadora de material vegetal, sob perspectiva das dimensões ambiental e econômica da sustentabilidade. Como objetivos específicos, se

apresentam: *i*) identificar na literatura as diretrizes para desenvolver processos produtivos sustentáveis por meio das abordagens que tratam da sustentabilidade; *ii*) identificar os processos industriais de extração de celulose e suas características operacionais; *iii*) adaptar processo industrial de extração de celulose para aplicação em resíduos vegetais, com enfoque nas diretrizes econômica e ambiental da sustentabilidade; *iv*) realizar estudo prático do processo adaptado.

1.3. Justificativa do Tema

A principal justificativa para a escolha do tema está em contribuir com o desenvolvimento sustentável do país e suas regiões, agregando valor para resíduos provenientes das atividades agrícolas e transformando-os em matérias-primas para a indústria de bens de consumo. Existe uma tendência atual dos setores produtivos em transformar passivos ambientais em ativos que aumentem a riqueza das organizações. O Brasil é um país de setor agrícola intenso, com uma produção de aproximadamente de 149,5 milhões de toneladas de cereais, leguminosas e oleoginosas, numa área plantada que supera os 61 milhões de hectares. Sendo que na região Sul a produção gira em torno de 64 milhões de toneladas de cereais, leguminosas e oleoginosas, com área plantada superior a 17 milhões de hectares (IBGE, 2008).

Em 2004, através do projeto n°. 507245/2004-0 do edital CNPq 014/2004 desenvolvido no Programa de Pós Graduação da Engenharia de Produção (PPGEP) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pela professora Lia Buarque de Macedo Guimarães, foi visualizada uma oportunidade de pesquisa relativa ao desenvolvimento de produtos a partir de resíduos provenientes do Rio Grande do Sul (RS). Este projeto gerou distintos resultados, entre eles a identificação de oportunidade de aproveitamento de resíduo lignocelulósico para produção de fraldas biodegradáveis. Em 2008, o subprojeto n° 570628/2008-3 do edital jovem pesquisador CNPq 06/2008 do mesmo programa de Pós – Graduação sob a coordenação da professora Istefani Carísio de Paula deu continuidade ao estudo da extração da celulose dos resíduos.

Os resíduos vegetais lignocelulósicos predominantes no RS são palha e casca da soja, casca e palha do arroz, sabugo e palha do milho, palha do trigo e palha e bagaço da cana de açúcar (VIDALES et al, 2010). No entanto, estudos já vêm sendo conduzidos com vistas a aproveitar estes resíduos, como no caso de uso de bagaço da cana para a geração energética (ANSELMO FILHO e BADR, 2003) ou na produção de polímeros biodegradáveis

(SATYANARYANA et al.,2009). Ao longo do projeto, ao qual esta dissertação pertence, foi identificada a possibilidade de utilizar o resíduo do beneficiamento do palmito produzido no interior do estado do RS por empresa alimentícia de pequeno porte. Trabalhos realizados no país apontam a valorização dos resíduos da palmeira usada no processo de palmito em conserva (TONINI, 2004; ISRAEL, 2005; ADENESKY FILHO, 2007).

O processo produtivo de palmito gera grande volume de resíduos vegetais lignocelulósicos que não tem aplicabilidade industrial até o momento, em vista disso, a empresa beneficiadora estava disposta a avaliar alternativas tecnológicas para a valorização dos mesmos. A empresa mostrou-se disposta a atender pressupostos do projeto de sustentabilidade e a realização de testes de extração de celulose de seus resíduos.

Se por um lado a tecnologia de extração de celulose proveniente da madeira está consolidada, os processos extrativos de celulose para resíduos vegetais ainda requerem estudos específicos conforme o tipo de material empregado. Assim, justifica-se a realização de testes preliminares e estudos a partir de adequações das tecnologias vigentes. Partir para uma tecnologia inovadora de extração de celulose demanda altos investimentos iniciais, inviáveis para a realidade de um produtor de celulose nacional de pequeno ou médio porte. Por outro lado, os volumes limitados de resíduos vegetais podem não atrair investidores de grande porte do setor, que buscam atender grandes demandas produtivas e não mostram interesse de realizar tais pesquisas. Processos efetivamente inovadores no tocante a extração de celulose ainda estão em escala piloto ou pequena escala, enquanto as grandes empresas nacionais e multinacionais têm apostado em melhorias de seus processos, considerando a tecnologia de extração mais difundida e utilizada.

Do ponto de vista acadêmico, a discussão em torno das dimensões econômicas e ambiental da sustentabilidade e abordagem que tratam deste conceito é um tema relevante, que tem atraído a atenção dos pesquisadores da engenharia da produção. Trabalhos indicam melhorias com base nos pilares da sustentabilidade como estratégias para os negócios (CATAPAN et al., 2010; NUINTIN et al., 2010; MESQUITA e COSTA, 2010; KURTZ, 2010; FIGUEIREDO et al., 2010).

1.4. Método

Quanto à natureza, esta pesquisa classifica-se como pesquisa aplicada, pois pretende gerar conhecimentos para aplicação prática voltados à solução de problemas específicos (GIL, 2008). Tanto os processos de extração de celulose, quanto as abordagens que tratam de

sustentabilidade podem ser melhor compreendidos e adaptados para gerar melhorias nos resultados de negócios relacionados.

Quanto aos seus procedimentos, esta pesquisa classifica-se como pesquisa experimental. A pesquisa experimental envolve a determinação de um objeto de estudo e seleção de variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, com a definição das formas de controle e de observações dos efeitos que a variável produz no objeto (GIL, 2008). O desenvolvimento dos estudos experimentais foi viabilizado em função do contato com uma empresa produtora de palmito em conserva e da necessidade de gerar a criação de valor para os resíduos gerados nas atividades da mesma. Além disso, foi necessário formar parcerias com laboratórios para a realização de testes de extração e posterior caracterização das amostras.

Considerando-se que o objetivo geral deste trabalho é realizar um estudo exploratório da extração de celulose a partir de resíduo do processo produtivo de empresa beneficiadora de material vegetal, sob perspectiva das dimensões ambiental e econômica da sustentabilidade, e que o estudo trata de melhoria incremental de processos extrativos tradicionais, surgem algumas questões:

- Quais critérios devem ser usados para avaliar os processos de extração de celulose frente às dimensões econômica e ambiental?;
- Qual processo tradicional de extração de celulose melhor se alinha com as dimensões mencionadas?;
- Qual processo tradicional de extração de celulose é mais flexível aos diferentes tipos de material vegetal?;
- Quais variáveis podem influenciar na obtenção de polpa com alto teor de deslignificação e capacidade de absorção?

Para que estas e outras questões fossem respondidas foi proposto método de trabalho organizado em quatro etapas. Na primeira etapa, de levantamento de informações, o objetivo era identificar e selecionar processo tradicional de extração de celulose que melhor se alinhasse com as dimensões ambiental e econômica da sustentabilidade. Para tanto, foi necessário primeiramente definir critérios para comparação dos mesmos. Como fontes secundárias, abordagens que tratam de sustentabilidade como Berço a Berço, ZERI, Ecodesign e outros foram consultados em busca de diretrizes para ajustar processos industriais a uma perspectiva produtiva sustentável. Estas diretrizes serviram de critérios para elaboração de um instrumento de análise dos processos. Na seqüência, o instrumento foi

utilizado por especialistas do setor de celulose, identificados por conveniência, para analisar o processo de extração de celulose de seu domínio. Em virtude do grau de especialização típico da área de celulose, foram questionados três profissionais: um deles gerente de tecnologia de unidade gaúcha de empresa brasileira líder mundial de produção de celulose branqueada de eucalipto que utiliza processo alcalino; outro é gerente de produção da única empresa brasileira que utiliza processo ácido nas suas operações; e o terceiro é importante consultor do setor de papel e celulose, com formação na área. O instrumento foi enviado por email para os mesmos. Além da análise dos especialistas, a pesquisadora aplicou o instrumento de análise para cada processo de extração de celulose: Sulfito Ácido, Soda e Kraft, a partir de informações obtidas de um levantamento detalhado na literatura especializada a respeito de tais processos. Por fim, o processo que melhor atendeu aos critérios apresentados foi selecionado.

Na segunda etapa, análise de cenário e identificação de variáveis do processo, foram realizadas as seguintes atividades: *i)* definição da empresa e do resíduo vegetal; *ii)* mapeamento do processo produtivo da empresa; *iii)* identificação de operações de processo e variáveis associadas, a partir de referências literárias; e *iv)* realização de testes preliminares realizados nas instalações da empresa. No local foram identificadas fraquezas ao ser aplicado o processo extrativo, relacionadas aos equipamentos disponíveis, controle de emissões e efluentes e outros recursos tecnológicos que são citados na literatura. Além disso, é notável a falta de mão-de-obra especializada, melhorias quanto às condições de trabalho que não serão abordadas neste estudo.

Na terceira etapa, planejamento e execução do desenho experimental, foi definido um delineamento experimental e realizados ensaios laboratoriais de acordo com o desenho experimental. Os ensaios de extração de celulose de resíduo foram realizados nas instalações da FEPAGRO (Fundação Estadual de Pesquisas Agropecuária) e as amostras obtidas submetidas à análise realizadas por empresas especializadas em celulose.

Na quarta etapa, resultados e perspectivas futuras, procedeu-se a análise dos resultados laboratoriais para concluir sobre a validade do processo de extração em gerar uma polpa celulósica, com características adequadas às aplicações comerciais previstas no planejamento experimental, respeitadas as restrições produtivas que limitam seu alinhamento com as dimensões ambiental e econômica da sustentabilidade.

1.5. Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado no formato de artigos, adotado pelo programa de pós-graduação de Engenharia de Produção (PPGEP) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). No primeiro capítulo apresenta-se uma introdução ao tema, justificando a relevância dos aspectos da sustentabilidade e da valorização de resíduos vegetais através de processos industriais de extração de celulose. Este capítulo também apresenta os objetivos, o método de trabalho, a estrutura e as limitações do estudo.

O segundo capítulo apresenta um artigo contendo as abordagens que tratam de sustentabilidade e suas diretrizes com enfoque ambiental e econômico, a fim de gerar informações para a avaliação de processos. Neste artigo foram mostrados os processos industriais de extração de celulose descritos na literatura, identificando suas variáveis e características mais marcantes. A partir das informações levantadas foi elaborada uma tabela que mostrava as diretrizes com enfoque econômico e ambiental descritas em abordagens sobre sustentabilidade, que proporcionaram a determinação de critérios de avaliação dos processos extrativos. De posse destes critérios, foi proposta a avaliação dos processos industriais de extração de celulose quanto ao atendimento ou não dos critérios apresentados. O artigo serviu de base para o planejamento do estudo de extração de celulose.

O Capítulo 3 apresenta o segundo artigo, onde é apresentada a empresa alvo do estudo, o mapeamento do processo produtivo de palmito em conserva e a proposta para aproveitamento dos resíduos gerados no mesmo. Para que a proposta fosse testada, o processo de extração de celulose foi adaptado segundo as limitações impostas pelas instalações da unidade fabril, ainda que permeando os aspectos das abordagens sustentáveis com enfoque ambiental e econômico. As condições experimentais de processos de extração para materiais vegetais lignocelulósicos, foram estudadas a fim de definir as variáveis associadas ao mesmo, e para a posterior aplicação no cenário proposto de valorização do resíduo vegetal.

O quarto capítulo mostra o terceiro artigo, o qual apresenta a aplicação experimental do estudo exploratório desenvolvido para extração de celulose de resíduo vegetal. As condições e restrições experimentais são abordadas, expondo o processo desenvolvido para a extração da celulose. Foi aplicado um Projeto de Experimentos para a definição dos pontos experimentais. Neste artigo são apresentadas as características da polpa obtida para cada condição experimental, considerando a obtenção de polpas com capacidade absorvente e baixo teor de lignina residual. A análise estatística foi feita para mostrar a influência dos fatores controláveis sobre as variáveis de resposta.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas a partir do trabalho desenvolvido, esclarecendo as limitações da pesquisa. Neste capítulo também são propostas sugestões para trabalhos futuros, que possam dar continuidade ao trabalho desenvolvido.

1.6. Delimitações do trabalho

O estudo realizado limitou-se a identificar as abordagens que tratam de sustentabilidade, as quais sugerem diretrizes para aplicação em processos industriais. As abordagens apresentadas neste trabalho são provenientes de bases de dados como Google acadêmico, Science Direct, Scielo, entre outras e literatura especializada. Foram analisados nesta pesquisa os processos de extração de celulose aplicados industrialmente, que são processos químicos que atendem às delimitações de qualidade do mercado nacional e internacional.

Os estudos experimentais de extração de celulose de resíduo vegetal foram desenvolvidos a partir das restrições da unidade industrial em que foi realizado, e limitando-se à aplicação da matéria-prima disponível como resíduo. O resíduo estudado neste trabalho é composto das bainhas da Palmeira Real da Austrália que envolvem o palmito a ser beneficiado na unidade fabril. Desta forma, este estudo não tem a pretensão de propor um processo de extração de celulose, mas indicar alternativas para obtenção de polpa de celulose com qualidade adequada para aplicações industriais, propiciando nova oportunidade de negócio para subprodutos do processo de palmito em conserva, através da valorização de seus resíduos. Para a execução desta pesquisa foram consideradas apenas as etapas de obtenção, preparo e tratamento da matéria-prima até a obtenção da polpa, não entrando no escopo deste trabalho as etapas referentes ao tratamento da polpa, tratamento de efluentes e distribuição do produto acabado. Todavia, trabalhos futuros deverão ser realizados para analisar estas etapas a fim de aumentar o grau de alinhamento com as dimensões da sustentabilidade.

Aprofundamentos referentes a equipamentos de preparo e tratamento da matéria-prima foram realizados apenas para padronizar as condições de processo. Da mesma forma, a análise das propriedades da polpa de celulose foi feita a fim de definir critérios para seu uso em produtos acabados. Cenários diversificados, por exemplo, que proponham o uso de outros resíduos vegetais como fonte de matéria prima, ou ofereçam o uso de outros reagentes, equipamentos e condições de trabalho não serão abordadas neste caso e servem de referência para pesquisa em trabalhos futuros.

2. PRIMEIRO ARTIGO

Extração de celulose de resíduos vegetais: seleção de processo frente a critérios ambientais e econômicos da sustentabilidade

Resumo

A preocupação por melhoria nos processos existentes e desenvolvimento de novos processos desencadeia a procura por materiais e processos que proporcionem tais avanços. Todavia, para a adequação destes avanços, é relevante aliar as questões sobre sustentabilidade. O objetivo deste estudo é selecionar um processo químico de extração de celulose, flexível ao uso de resíduos vegetais lignocelulósicos, a partir da determinação de critérios econômicos e ambientais. Logo, este estudo mostra as abordagens que tratam da sustentabilidade e que podem ser aplicáveis aos processos produtivos e desenvolvimento de produtos. A partir destas abordagens foram descritas diretrizes que serviriam de critérios para a análise de processos de extração de celulose com enfoque no caráter ambiental e econômico dos mesmos. Logo, a avaliação quanto ao uso destes critérios foi feita ao analisar processos industriais de extração de celulose através de pesquisa em material bibliográfico e da opinião de especialistas do meio. A análise dos processos industriais de extração de celulose mostrou as práticas desenvolvidas no setor frente aos requisitos de sustentabilidade e as tendências para a melhoria de processos a fim de torná-los mais sustentáveis, bem como levou à seleção do mais flexível a diferentes materiais vegetais.

Palavras chaves: Sustentabilidade; abordagens sustentáveis; processos de extração de celulose; celulose; análise de impactos ambientais.

Abstract

The improvement in current processes and in new processes triggers the search for materials and practices that can enable such advancement. However, in order to suit these improvements, it is relevant to consider sustainable issues. This paper presents sustainable approaches for processes and product development. From these approaches it was possible to derive guidelines that may be used as criteria for the analysis of pulp extraction processes, with focus on their environmental and economic features. Therefore, the assessment regarding these criteria use was done from the analysis of industrial processes of pulp extraction through

bibliographic research and through opinion of experts from this field. The analysis of industrial processes of pulp extraction have shown practices developed in this sector vis-à-vis sustainable requirements and the trends for processes improvement in order to make them more sustainable.

Keywords: Sustainability; sustainable approaches; pulp extraction processes; cellulose; environmental impacts assessment.

1. INTRODUÇÃO

No contexto atual as empresas que almejam inovações ou melhorias no desenvolvimento de produtos ou processos com ênfase em sustentabilidade, se deparam com exigências de caráter técnico, econômico e também ambiental. Conceitos de redução de impacto ambiental negativo, associados a ganhos econômicos têm aparecido como premissas para o início do projeto de desenvolvimento de produtos e processos. Segundo a World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) o termo eco-eficiência trata exatamente da entrega de mercadorias a preços competitivos e serviços que satisfaçam as necessidades humanas e tragam qualidade de vida, paralelamente à redução progressiva de danos ambientais e da intensidade de recursos ao longo do ciclo de vida, para um nível que o ambiente consiga suportar (SCHMIDHEINY, 1992). A eco-eficiência combina os benefícios econômicos com o uso mais eficiente dos recursos e a prevenção de emissões, baseada na idéia de “produzir mais com menos” (WBCSD, 1998).

Em busca da eco-eficiência os gestores necessitam de suporte, seja no formato de diretrizes, ferramentas, métodos ou estratégias, para transformar seus processos produtivos. São muitas as abordagens que tratam de sustentabilidade que mencionam tanto os aspectos econômicos quanto o impacto ambiental negativo associado aos processos produtivos ou desenvolvimento de produtos. As abordagens mais abrangentes contemplam a cadeia produtiva do negócio e seus efeitos na sociedade, enquanto outras abordagens estão limitadas pelas operações dentro de uma cadeia, de um setor ou de um processo específico (MANZINI e VEZZOLI, 2002; GUIMARÃES, 2010). Segundo Manzini e Vezzoli (2002), ao se aplicar uma estratégia ambiental consciente desde as fases do início do projeto, torna-se possível limitar os problemas para não causar perda de recursos na reparação de danos ambientais já causados. Os autores ainda citam que de modo geral é pouco provável que uma única

estratégia seja a melhor para atender a todos os requisitos ambientais, por isso aconselham uma combinação de práticas e estratégias ambientais para atingir os objetivos de melhoria.

Estudo realizado por Brezet e Van Hemel (1997) destaca que é necessário definir diretrizes para a adoção de práticas geradoras de ganhos para o negócio. Partindo desde pensamento, a associação de diretrizes de redução de impacto ambiental com diretrizes econômicas viáveis e soluções sociais atraentes conduz à eco-eficiência (MANZINI e VEZZOLI, 2002).

Dentre as abordagens que tratam de sustentabilidade, discutidas tanto nas organizações quanto na academia, estão: Método ZERI (Zero Emissions Research & Initiatives) (PAULI, 1996; PAULI, 1998), Berço a Berço (McDONOUGH e BRAUNGART, 2002), Produção Limpa (GREENPEACE, 1997), Engenharia Verde (ANASTAS e ZIMMERMAN, 2003), Química Verde (ANASTAS e WARNER, 1998), Produção mais Limpa (P+L) (CNTL, 2003), Design for Environment (DfE) ou Ecodesign (FICKSEL, 1993; KAZAZIAN, 2005; VEZZOLI e MANZINI, 2008) e Cadeia de Suprimentos Verde (EPA, 2000; SRIVASTARA 2007). As abordagens que vão além das fronteiras de uma fábrica têm caráter estratégico, pois apresentam uma visão sistêmica do negócio, e suas aplicações envolvem esforços múltiplos (GUIMARÃES, 2010).

Um caso para avaliação de sustentabilidade é o setor de papel e celulose, que no Brasil apresenta grande relevância ambiental, econômica e social (LINS e OUCHI, 2007). Em função do seu impacto ambiental direto, devido à emissão de gases do efeito estufa, à geração de resíduos e ao descarte de efluentes, os Órgãos Reguladores no país impõem fortes exigências ambientais às empresas do setor. Por isso, observa-se um esforço do setor em rever os processos com vistas à economia e reuso de água, economia de energia e adoção de fontes alternativas de matéria-prima e reduzir o consumo de recursos materiais (LINS e OUCHI, 2007; SOUZA et al., 2008; LINS e ZYLBERSTAJN, 2010). Os processos químicos de extração de polpa celulósica são a maior fonte de impactos ambientais na indústria de polpa e papel (EPA, 1995). As condições de processo e matérias-primas utilizadas são fatores que influenciam no bom desempenho do mesmo, desde a escolha da matéria-prima, que pode vir de resíduos de outro processo, quanto o reuso de energia e materiais, são itens que colaboram para ganhos econômicos e ambientais.

O conhecimento e a compreensão dos processos químicos de extração de celulose que utilizam materiais lignocelulósicos, bem como a identificação de diretrizes para minimização de impacto ambiental negativo e ganhos econômicos devem ser conhecidos para a análise de processos. O levantamento de diretrizes econômicas e ambientais citadas pelas abordagens sustentáveis faz-se necessário, pois os materiais e processos usados para extração de celulose são caros e requerem grande concentração de substâncias químicas que são difíceis de serem tratadas posteriormente (XU, 2009). Logo, a partir delas, verifica-se a possibilidade de projetar um processo industrial de extração de celulose mais eficiente sob o ponto de vista ambiental e econômico, considerando o uso de resíduos vegetais lignocelulósicos ao invés da madeira. A melhoria em sustentabilidade passa a ser feita de modo incremental, a partir de testes e adaptação de processos extrativos existentes para aplicação em diferentes materiais vegetais lignocelulósicos.

Colaborando com o comentado, já se observam estudos realizados no mundo com o objetivo de buscar matérias-primas que sejam substitutas à madeira como fonte de celulose. Pereira e colaboradores (2003) obtiveram celulose da polpa do Buriti, demonstrando que especificamente esta fonte fornece fibras com bons índices de resistência. O mesmo grupo em 2004 utilizou celulose derivada da polpa de Tucum (*Bactris Inundata* Martius) chegando a resultados semelhantes ao estudo de 2003 (Pereira et al., 2004). Wanrosli e colaboradores (2007) exploraram a grande quantidade de biomassa residual formada na produção de óleo de Palma para obtenção de polpa de celulose, para isso eles investigaram a forma de obtenção da polpa e as características da fibra de celulose obtida. Estes autores concluíram que a extração de celulose utilizando o processo Soda era adequada para ser usada como reforço mecânico para a produção de papel para jornal. Ainda, outros trabalhos indicam o uso de resíduos vegetais para extração de celulose: raque da Tamareira (KHRISTOVA et al., 2004; KHIARI et al., 2009), palha de arroz (RODRÍGUES et al., 2010), palha de trigo (DENIZ et al., 2003) e bagaço de cana de açúcar (KHRISTOVA et al., 2005).

As empresas crêem na ecologia como um modo de inovação que as auxilia a reposicionar suas estratégias relativas ao respeito pelo meio ambiente (KAZAZIAN, 2005). Os projetos que contemplam tanto os aspectos econômicos quanto ambientais dentro do desenvolvimento de produtos tendem a apresentar maior competitividade no mercado (MANZINI e VEZZOLI, 2002; BACK et al., 2008). O objetivo deste trabalho é selecionar um processo químico de extração de celulose, flexível ao uso de resíduos vegetais

lignocelulósicos, a partir da determinação de critérios econômicos e ambientais. Estes critérios foram desenvolvidos com base nas diretrizes contidas nas abordagens que tratam de sustentabilidade em processos produtivos. Este trabalho não tem a pretensão de criar um novo processo industrial de extração e está limitado a analisar a etapa de transformação da matéria-prima até a obtenção da polpa (polpeamento), resíduos e emissões geradas e *set ups* no caso de processos descontínuos. A análise será realizada de acordo com o atendimento ou não dos critérios de interesse. Neste trabalho o aspecto de ganhos econômicos considera a possibilidade de reaproveitar recursos e energia dentro do processo, além do uso eficiente destes recursos com mínimo de desperdício evitando o acúmulo de resíduos para tratamento posterior.

O trabalho está dividido em cinco seções. Primeiramente é apresentada a introdução ao tema de estudo. A segunda seção mostra uma revisão teórica sobre processos químicos de extração de celulose disponíveis na literatura e comumente aplicados nas empresas e a identificação das diretrizes presentes nas abordagens que tratam de sustentabilidade. Na terceira seção é apresentada a descrição do método de pesquisa que foi desenvolvido neste estudo permitindo a análise dos resultados. Na quarta seção são apresentados os critérios de avaliação dos processos para minimização de impacto ambiental e ganhos econômicos segundo as abordagens sustentáveis citadas na literatura e a análise qualitativa dos processos em relação aos impactos ambientais negativos e aspectos econômicos. Finalmente, na quinta seção, são apresentadas as considerações finais sobre o estudo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta etapa são mostrados os processos de extração de celulose e as abordagens que tratam de sustentabilidade

2.1 Processos industriais de extração de celulose

Celulose é o carboidrato mais comumente encontrado nas plantas, entretanto, sua fonte são os materiais lignocelulósicos, onde estão presentes também outros compostos tais como: hemiceluloses, lignina, extrativos e compostos inorgânicos (D'ALMEIDA, 1988). As múltiplas camadas de fibras da celulose devem separar-se da lignina, que é a substância ligante. Logo, no processo extrativo, os reagentes e as condições de processo são determinadas visando promover a remoção da lignina sem a degradação excessiva das fibras de celulose.

Os processos de extração de celulose para a geração de fibras podem empregar dois tipos de ação: mecânica ou química (seja digestão ou cozimento), além dos processos mistos. De forma ampla, pode-se dividir os processos de produção de celulose em: processos mecânicos, semi-químicos; alcalinos (Soda e Kraft) e ácidos (Sulfito ácido e Bissulfito) (EPA, 1995, SIXTA, 2006). Nos processos químicos as variáveis de processo de polpeamento são: temperatura; tempo e concentração de reagentes no licor de cozimento. A concentração do agente químico ativo no licor de cozimento é a variável mais importante que afeta a taxa da reação, pois o aumento da concentração propicia o aumento na velocidade da reação (CASEY, 1960; D'ALMEIDA, 1988).

Os processos químicos são os mais usados industrialmente, com maior relevância para o processo alcalino Kraft, mas a escolha do processo de polpação depende do tipo de matéria-prima e das qualidades desejadas para o produto final (EPA, 1995). Com a evolução das tecnologias aplicáveis aos diversos processos químicos, são permitidos ajustes das variáveis de processo que conduzam à otimização do processo em caráter econômico e ambiental.

Uma variedade de tecnologia e produtos químicos é usada na produção da polpa, mas a maioria dos sistemas emprega a seguinte seqüência de processos de preparação da matéria-prima: polpeamento, tratamento da matéria polpeada para posterior branqueamento e fabricação de produtos. Acima de tudo, a maior parte dos poluentes emitidos pelas operações industriais de fabricação de polpa e de papel ocorre nas etapas de polpeamento e branqueamento, onde há uso de vários componentes químicos, sendo que esta última operação não pertence ao escopo deste trabalho. Devido às diferentes propriedades físicas e químicas das matérias-primas, alguns processos de extração são mais eficientes que outros de acordo com o tipo de material lignocelulósico usado. Após a polpação, a polpa é lavada para a remoção de impurezas.

A recuperação dos componentes químicos é um fator relevante no processo de polpeamento químico: ele recupera os reagentes químicos do processo a partir do licor de cozimento para serem reusados. O processo de recuperação dos reagentes químicos tem importantes benefícios econômicos e financeiros para as indústrias de polpas e papel. Benefícios econômicos incluem menores despesas na compra de reagentes devido às taxas de regeneração dos agentes químicos do processo e a geração energética a partir do resíduo da polpa que é queimado na caldeira de recuperação. Ambos os processos químicos – Kraft e

sulfito – utilizam o sistema de recuperação química, embora comercialmente estes sistemas sejam diferentes.

A polpa gerada pode ser analisada quanto a diferentes variáveis de resposta que indicam a qualidade e aplicações mais convenientes para a mesma: classificação do tamanho das fibras, número kappa, que indica o grau de deslignificação ou teor de lignina residual na polpa (ABNT, 2005), densidade, viscosidade, capacidade de absorção, velocidade de absorção, determinação de extrativos, rendimento da polpa, entre outras.

As polpas de celulose podem ser aplicadas industrialmente para fabricação de uma variedade de papéis, de acordo com tamanho de suas fibras: fibra longa, originária de espécies coníferas como o pinus têm comprimento médio de 2 a 5 milímetros; e fibra curta, com 0,5 a 2 milímetros de comprimento, deriva principalmente do eucalipto. O primeiro tipo é utilizado na fabricação de papéis que demandam mais resistência, como os de embalagens, e nas camadas internas do papel cartão. As fibras curtas por sua vez, são ideais para a produção de papéis de impressão, de escrever e de fins sanitários (papel higiênico, toalhas de papel, guardanapos). Elas têm menor resistência, com alta maciez e boa absorção (BRACELPA (a), 2010).

2.1.1 Processos ácidos

O processo sulfito de polpação baseia-se no emprego de soluções ácidas de íons sulfito (SO_3^{2-}) ou bissulfito (HSO_3^-), que caracterizam a solução aquosa com dióxido de enxofre (SO_2) livre e dióxido de enxofre em forma combinada. A preparação do licor consiste em reagir SO_2 em contracorrente com soluções de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), hidróxido de sódio (NaOH), hidróxido de amônio (NH_4OH) ou hidróxido de magnésio ($\text{Mg}(\text{OH})_2$). O SO_2 é borbulhado em excesso na solução de base alcalina, a fim de se ter o SO_2 livre. O licor de cozimento tem a finalidade de degradar as ligações de lignina entre as fibras do material lignocelulósico (CASEY, 1960; EPA, 1995, SIXTA, 2006). O processo sulfito é definido de acordo com a faixa de pH do licor de cozimento resultante, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1: Caracterização do licor de acordo com a faixa de pH (acidez) (Fonte: Adaptado de SIXTA, 2006)

Nomenclatura	Faixa inicial de pH a 25°C	Bases permitidas	Reagentes ativos
Sulfito Ácido	1-2	Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , NH_4^+	H^+ , HSO_3^-
Bissulfito	3-5	Mg^{2+} , Na^+ , NH_4^+	H^+ , HSO_3^-
Sulfito Neutro	6-9	Na^+ , NH_4^+	HSO_3^- , SO_3^{2-}
Sulfito Alcalino	10-13,5	Na^+	SO_3^{2-} , OH^-

Como o SO_2 reage com os hidróxidos, estabelece-se um equilíbrio entre bissulfito, sulfito e SO_2 livre. A caracterização do licor de cozimento é realizada pelos teores de SO_2 total, combinado e livre. A acidez do licor de cozimento expressa em termos de concentração de SO_2 livre, determina tanto a taxa de remoção da lignina quanto a extensão da degradação da celulose. Para uma certa concentração de SO_2 total, a acidez do licor de cozimento é controlada pela concentração do íon HSO_3^- (SO_2 combinado, proporcional à concentração da base alcalina). A composição do licor de cozimento em termos de SO_2 livre e SO_2 combinado (HSO_3^-) deve ser equilibrada, de modo a assegurar a suficiente deslignificação e a ocorrência limitada de reações indesejáveis (SIXTA, 2006). Outras variáveis de processo na polpação sulfito para uma carga de matéria- prima no digestor são temperatura e tempo de cozimento, adaptadas de acordo com os teores de SO_2 livre e SO_2 combinado no licor. Uma vez que o agente ativo de cozimento é o SO_2 livre no licor, a concentração mais elevada deste provoca a maior sulfonação da lignina, dissolvendo esta molécula no licor de cozimento, produzindo polpas de mais fácil branqueamento (CASEY, 1960; D'ALMEIDA, 1988; SIXTA, 2006). O tempo ótimo de cozimento é função do ácido de cozimento, tipo de material lignocelulósico, tipo de polpa desejada, e mais relevante ainda, a temperatura de operação (CASEY, 1960; D'ALMEIDA, 1988).

Além de $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ que foi a primeira solução alcalina utilizada no processo, são permitidos o uso de NaOH , NH_4OH e $(\text{Mg}(\text{OH})_2)$ por serem mais solúveis, produzirem subprodutos com maior valor de mercado, permitirem o uso de maiores fontes de celulose e ainda auxiliarem na redução considerável no tempo de cozimento, na recuperação facilitada dos reagentes químicos e de calor e na redução da poluição (D'ALMEIDA, 1988). Além disso, é menor o risco de queima da polpa e proposição de maior alvura nas polpas branqueáveis. No entanto a solução alcalina mais aplicada comercialmente é a $(\text{Mg}(\text{OH})_2)$, por ter o sistema de recuperação facilitado, tanto para energia quanto para reagentes químicos. Porém, o processo sulfito apresenta alta sensibilidade aos tipos de matéria-prima. Ressalta-se que uma quantidade limitada de espécies da madeira podem ser usadas, como as madeiras duras que apresentam baixo teor de resinas e alta densidade. A maioria das madeiras moles, com exceção do pinus, são consideradas menos sucessíveis para a polpeamento ácido (SIXTA, 2006).

Os aspectos positivos do processo sulfito baseiam-se no fato deste produzir uma polpa clara, de branqueamento facilitado e desta polpa poder ser refinada mais rapidamente e com

menor gasto de energia mecânica. Entretanto, o processo tem as grandes desvantagens de não poder ser aplicado a toda e qualquer espécie vegetal, necessitar de maiores períodos de tempo de cozimento e a gerar uma pasta menos resistente devido à maior degradação da celulose (EPA, 1995; SIXTA, 2006). Em vista disto, o processo sulfito é predominante indicado para produção de celulose solúvel (dissolução), comumente usada para produção de *rayon*, celofane, acetato, explosivos, entre outros. Esta celulose é intensamente refinada e contém um alto teor de fibras puras de alfa-celulose (BRACELPA, 2009 (b)).

2.1.2 Processos alcalinos

Existem dois processos principais de polpeamento alcalino, que são o processo soda e o processo sulfato, este último chamado de Kraft. Em ambos, o hidróxido de sódio (NaOH) é o reagente em maior quantidade no licor de cozimento e no processo sulfato, sulfeto de sódio (Na₂S) também está presente, numa proporção de aproximada de 75% de Na₂S e 25% de NaOH. Além desses, em nível industrial, também estão presentes pequenas quantidades de Na₂CO₃, Na₂SO₄, Na₂S₂O₃, NaCl e CaCO₃ (GULLICHSEN, 1999). Este licor é chamado de licor branco, que atua na separação das fibras de celulose (polpa) e após o processo de polpeamento forma o licor negro, caracterizado por um líquido que contém a lignina dissolvida numa solução de reagentes químicos que não reagiram no processo, além de material degradado. O licor negro por sua vez é encaminhado ao sistema químico de recuperação para regenerar o licor branco que será usado novamente no início do processo (EPA, 1995; SIXTA, 2006). O processo Kraft teve seu uso mais difundido do que o soda devido aos benefícios econômicos da recuperação dos agentes químicos, evitando liberação destes para o meio ambiente, melhorias de rendimento e qualidade da polpa (polpa produzida por percentual de matéria-prima) (EPA, 1995). Todavia, o processo soda é recomendado na produção de celulose a partir de palhas, bagaços e outros resíduos agrícolas.

A superioridade do processo sulfato sobre o processo soda é devido à presença do Na₂S no licor de cozimento, que proporciona o aumento significativo da taxa de deslignificação e benefícios quanto à qualidade e resistência da polpa. A seletividade do processo é maior, isto é, apresenta maior habilidade de remover a lignina sem ataque prolongado à fração de carboidratos da madeira (SMOOK, 1994). A desvantagem do uso do sulfeto no licor Kraft consiste na liberação de compostos orgânicos malcheirosos e tóxicos, tais como de metilmercaptanas (CH₃SH), dimetilssulfeto (CH₃SCH₃), dimetildissulfeto (CH₃SSCH₃) e outros compostos reduzidos de enxofre, referidos como “*total reduced sulfur*”

(TRS) que são formados na deslignificação (D'ALMEIDA, 1988; SIXTA, 2006). Tais compostos são rigorosamente controlados nas indústrias de celulose, pois têm que atender exigências ambientais (SIXTA, 2006).

O aumento da carga alcalina acelera a deslignificação, mas também influencia no aumento da taxa de remoção dos carboidratos (BASSA, 2002). Foi indicado que o sulfeto acelera a deslignificação, mas como este composto não está presente no licor de cozimento do processo soda, tais pastas são submetidas a uma carga maior de NaOH por tempos mais longos e temperaturas mais elevadas. Assim, as pastas soda são menos resistentes que as pastas Kraft para um dado teor de lignina (CASEY, 1960). O mesmo autor cita que assim como a carga alcalina, relatada como concentração de NaOH ou óxido de sódio (Na_2O), as variáveis tempo e temperatura de deslignificação são de extrema importância, pois influenciam diretamente a taxa de remoção de lignina e a qualidade da pasta obtida.

O processo de cozimento Kraft é seletivo no seu ataque aos constituintes do material lignocelulósico e as polpas produzidas são notadamente mais resistentes do que aquelas produzidas por outros processos. Este processo é também flexível, pois é adaptável a vários tipos distintos de matéria prima, além de possibilitar a recuperação de reagentes químicos para formação do licor de cozimento e geração de energia (GOMIDE, 1980; EPA, 1995). Os principais motivos que levam a idéia de aprimoramento e modificações no processo Kraft são de caráter ambiental: diminuir as emissões de compostos de enxofre ou obter polpas com maior teor de deslignificação que necessitem de menor carga química para o branqueamento (TEDER e AXEGARD, 1995). Para Gomide (1980) as modificações teriam que propiciar redução de custos das instalações, obtenção maiores rendimentos, polpa de alta qualidade, e por fim, ser compatível com os equipamentos e operações realizadas em nível industrial de modo a gerar o mínimo de alterações na planta. Sixta (2006) cita também aspectos relacionados com a diminuição de recursos energéticos e materiais, além de um eficiente sistema de recuperação dos licores de cozimento para geração de produtos com valor agregado.

2.1.3 Processos alcalinos com uso de aditivos químicos

Frente ao comportamento das variáveis, reagentes utilizados e modo de condução do processo Kraft, o qual surgiu como um aprimoramento do processo soda, são estudadas modificações e uso de aditivos que conduzam a benefícios ambientais e econômicos. Para

Gomide et al. (1987) o uso de aditivos que aumentem a eficiência das reações de polpação, permitindo a redução da carga alcalina e compostos de enxofre, seguida da menor poluição odorífica, é uma alternativa que apresenta grande potencial para aplicação, que foi posteriormente desenvolvida pelas empresas.

O uso da antraquinona ($C_{14}H_8O_2$) como aditivo nos dois principais processos alcalinos impacta nas reações de deslignificação promovendo uma maior taxa de deslignificação e menor degradação dos carboidratos, agindo assim, contra alguns dos principais mecanismos responsáveis pelo baixo rendimento da polpação alcalina (SILVA JÚNIOR et al., 1998). Além de benefícios relacionados ao rendimento da polpação Kraft, resultados de Vasconcelos (2005) indicam que a adição de antraquinona provocou maior grau de deslignificação para uma mesma carga alcalina usada.

O resultado revela que o efeito da antraquinona é mais pronunciado na polpação soda quando comparado com a polpação Kraft (HOLTON, 1977). Para Gomide e Oliveira (1979) o efeito da aplicação de pequenas quantidades de antraquinona como aditivo para polpação é mais acentuado em processos sem enxofre, o que coincide com a afirmativa de Holton (1977) de que os efeitos da antraquinona são mais notórios em deslignificações com menor teor de sulfidez.

2.2 Abordagens que tratam de sustentabilidade

Mesmo ao se considerar uma única empresa ou setor, cada uma das etapas da criação de um produto gera *inputs* (energia, recursos) e *outputs* que terão impactos no meio ambiente, além dos produtos. Tais etapas devem ser analisadas desde a concepção do produto, pois cada uma contém potencial de melhoria ambiental, que incluem a escolha das matérias-primas, das tecnologias e dos processos de fabricação e valorização dos resíduos do produto. Na busca do melhor arranjo entre a viabilidade técnica, o controle de custos e o meio ambiente, o projetista seleciona e define soluções a respeito de todo o ciclo de vida do produto, juntando o conjunto dos impactos ambientais (KAZAZIAN, 2005). Para auxiliar as escolhas feitas pelos mesmos, é pertinente buscar abordagens que tratam de sustentabilidade e conhecer as diretrizes para melhoria de processos rumo à sustentabilidade ou desenvolvimento de produtos. Dentre as abordagens estão: Método ZERI, Berço a Berço, Ecodesign, Produção Limpa, entre outras.

2.2.1 Método ZERI

Esta abordagem sistêmica, proposta por Pauli (1996) defende que ao projetar produtos e desenvolver sistemas produtivos, os resíduos de uma atividade devem ser considerados matéria-prima para outra (PAULI, 1998). Tem por objetivo emissão zero nos sistemas, baseando-se em projetos com ênfase no ciclo de vida e estratégias econômicas, ecológicas, de metabolismo no sistema e ecoliteracy, que representa o quanto o indivíduo entende sobre o sistema natural em que vive integrado com a natureza. A abordagem traz a idéia de biomimetismo, na qual um resíduo é aproveitado ou metabolizado por outro reino, distinto do reino que é proveniente, a fim de ser valorizado (PAULI, 1996; PAULI, 1998; GUIMARÃES, 2006).

A abordagem apresenta informações de condução do processo, conforme mostrado no Quadro 1:

Quadro 1: Diretrizes para implementação do método ZERI (Fonte: Adaptado de PAULI, 1996; PAULI, 1998)

Passos	Diretrizes
1	Criar modelos de aproveitamento total dos inputs em relação aos outputs
2	Realizar busca criativa de valor agregado baseado nos modelos criados na etapa anterior
3	Desenvolver modelos de conglomerados industriais
4	Identificar avanços tecnológicos
5	Planejar políticas industriais

2.2.2 Cadeia de suprimentos verde

Para Vachon e Klassen (2006) a cadeia de suprimentos verde é definida como a interação entre as organizações, dentro da cadeia de produção, com relação à prevenção da poluição na fonte, o que pode ocorrer à montante, em negociações com fornecedores, ou à jusante, no contato com consumidores. Esta abordagem trata da integração do meio-ambiente e da gestão da cadeia de suprimentos, para atividades relacionadas à concepção do produto, definição e seleção das fontes de matéria-prima, entrega do produto final ao consumidor e gestão do fim-de-vida do produto após seu uso (SRIVASTARA, 2007). Este tipo de interação contribui para gerar resultados significativos de melhoria de desempenho ambiental e econômico, ao longo da cadeia (EPA, 2000; VACHON e KLASSEN, 2006).

Para o melhor desenvolvimento da cadeia de suprimentos, grandes e pequenas empresas estão se empenhando em melhorar o gerenciamento de materiais e logística, considerando o impacto ambiental e a economia do negócio (EPA, 2000). As informações a respeito de meio-ambiente servem de base para aumentar o desempenho econômico dos negócios, para isso os autores sugerem diretrizes para as empresas melhorarem seus desempenhos econômicos e ambientais abordando explicitamente os custos ambientais, conforme Figura1 (EPA, 2000).

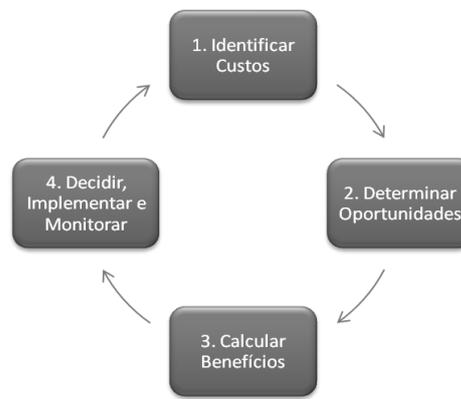


Figura 1: Estrutura de decisão (Fonte: Adaptado de EPA, 2000)

A estrutura sugere que gestores envolvidos nos negócios produtivos considerem oportunidades de redução de custos desde o início da cadeia, mesmo que para isso, tenham que implementar melhorias previamente avaliadas. Investimentos em projetos ou mudança de fornecedores são melhorias consideradas para gerar ganhos econômicos e redução de danos ambientais nas operações realizadas.

2.2.3 Berço a Berço

Esta abordagem, do mesmo modo que o método ZERI prevê o metabolismo tecnológico, no qual os resíduos de um processo devem servir de matéria prima para outro, como em um ciclo da natureza (PAULI, 1998; McDONOUGH e BRAUNGART, 2002). A abordagem, que também atua como uma certificação de materiais e práticas relacionadas ao uso destes, consiste em gerar produtos do “berço ao berço” contrapondo o conceito do “berço ao túmulo”. Desta forma um produto deveria ser concebido considerando as melhores condições para ser reutilizado com suas propriedades inalteradas no âmbito de um

metabolismo tecnológico, ou de voltar à natureza, porém não mais como poluente e sim como nutriente. Há conseqüências importantes no desenvolvimento de produtos: a propriedade não será apenas aquela de reduzir impactos e sim também aquela de gerar valor do resíduo futuro, favorecendo literalmente sua desconstrução (SMERALDI, 2009). De acordo com El-Hagar (2007) o ciclo proposto pela abordagem e algumas diretrizes podem ser representadas como mostrado na Figura 2 e Quadro 2.

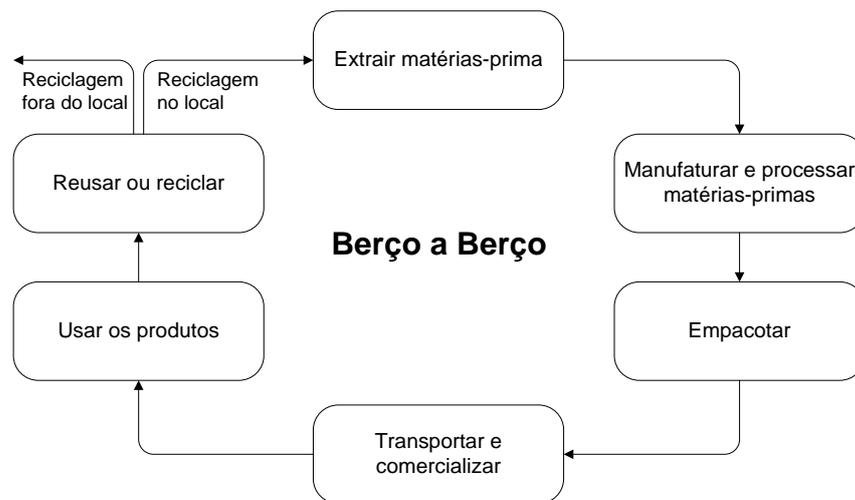


Figura 2: Análise do ciclo de vida baseada no conceito de berço a berço (Fonte: Adaptado de El Hagggar, 2007)

Quadro 2: Diretrizes para adoção de práticas referentes ao Berço ao Berço (Fonte: Adaptado de McDonough e Braungart , 2002)

Estágios rumo à adoção de uma produção circular	Diretrizes
1	Investir no desenvolvimento de produto livre de substâncias reconhecidas pelo grande público como perigosas, ou mesmo práticas malvistas
2	Manter a transparência perante a cadeia sobre propriedades, impactos e processos envolvidos na produção de seus produtos ou serviços
3	Realizar uma lista pró-ativa de práticas positivas, além da minimização dos impactos, adotando sistemas de gerenciamento apropriados
4	Buscar ciclos tecnológicos mais avançados, implementando a lista positiva, tratando os atributos ambientais como objetivos em vez de restrições e alterando desempenho, vida útil e funcionalidade do produto ou serviço
5	Adaptar conceitos fundamentais, abandonando aquele de vida útil e criando um modelo circular com fases de uso, transformação e fertilização (da própria natureza, no caso de produtos orgânicos, ou das cadeias relevantes nos demais casos)

Esta abordagem apresenta nível alto de complexibilidade, pois restringe o uso de produtos que possam causar qualquer dano à natureza, desta forma, ela também promove certificações aos elementos do sistema (materiais, reutilização de materiais, energia, água e responsabilidade social) (MBDC, 2007). A certificação Berço ao Berço tem por finalidade desenvolver projetos para agregar mais valor ao meio ambiente durante e após o uso dos materiais, ao invés de projetar para minimizar o impacto ambiental (McDONOUGH e BRAUNGART, 2002).

2.2.4 Engenharia verde

A Engenharia Verde (EV) trata do desenvolvimento e comercialização de processos industriais que apresentam viabilidade econômica, ao passo que reduzem o risco para a saúde humana e para o meio ambiente. A EV cita doze diretrizes aos projetistas para alcançar o proposto (ANASTAS e ZIMMERMAN, 2003; GRAEDEL e HOWARD-GRENVILLE, 2005), conforme Quadro 3:

Quadro 3: As doze diretrizes da Engenharia Verde (Adaptado de Anastas e Zimmerman, 2003)

	Diretrizes da EV
1	Garantir que materiais e energia utilizados ou gerados sejam inerentemente não perigosos tanto quanto possível
2	Optar pela minimização da geração de resíduos do que seu tratamento posterior
3	Projetar operações de separação e purificação para minimizar o consumo energético e uso de recursos materiais
4	Projetar produtos, processos e sistemas para maximização da eficiência de materiais, energia, espaço e tempo
5	Focar mais no resultado (<i>output</i>) de produtos, processos e sistemas e não apenas no insumo (<i>input</i>), ao se tratar do uso de energia e materiais
6	Projetar opções de reciclagem, reutilização ou descarte benéfico
7	Projetar para maior vida útil
8	Projetar soluções que não apresentem atributos ou capacidades desnecessárias
9	Mínimizar diversidade de materiais em produtos com multicomponentes, para promover fácil desmontagem e retenção de valor
10	Integrar a avaliação de fluxos de energia e materiais no projeto de produtos, processos e sistemas
11	Projetar produtos, processos e sistemas visando o desempenho também no término de seu ciclo de vida
12	Utilizar recursos materiais e energia renováveis

As diretrizes apontadas por Anastas e Zimmerman (2003) conduzem à eficiência no uso de materiais, pois propõem a minimização de geração de resíduos, além do reaproveitamento de recursos dentro dos processos.

2.2.5 Química verde

Química Verde (QV) refere-se à utilização de um conjunto de princípios com a finalidade de reduzir ou eliminar o uso e a geração de substâncias perigosas no projeto de produtos e processos químicos. Profissionais do setor químico sempre se esforçam para desenvolver processos e métodos eficientes, uma vez que eficiência é importante tanto para medir a qualidade de um processo de transformação da matéria-prima quanto para analisar a viabilidade técnica e econômica do mesmo. Considerações econômicas desempenham papel principal no projeto de processos, pois a seleção de matérias-primas está de acordo com a maior disponibilidade ou o menor custo (ANASTAS e WARNER, 1998; MACHADO, 2004; GRAEDEL e HOWARD-GRENVILLE, 2005). No Quadro 4 tem-se as diretrizes da QV.

Quadro 4: As doze diretrizes da Química Verde (Fonte: Adaptado de Anastas e Warner, 1998)

Diretrizes QV	
1	Optar por prevenir a formação de resíduos a ter que de tratá-los, depois de terem sido criados, para eliminar as suas propriedades tóxicas
2	Projetar métodos sintéticos de modo a maximizar a incorporação no produto final de todas as substâncias usadas ao longo do processo
3	Projetar os métodos sintéticos, sempre que possível, de modo a usar e produzir substâncias não tóxicas (ou pouco tóxicas) para a saúde humana e ecoesfera
4	Projetar os produtos químicos em nível molecular de modo a cumprir as funções desejadas e a minimizar a sua toxicidade
5	Evitar, sempre que possível o uso de substâncias auxiliares (solventes, agentes para promover separações, entre outras); quando usados, essas substâncias devem ser inócuas
6	Reconhecer os impactos econômicos e ambientais dos requisitos energéticos dos processos químicos e minimizá-los; quando possível, os métodos sintéticos devem ser realizados à temperatura e pressão ambientes ou próximas destas
7	Usar matérias-primas e recursos renováveis, sempre que for técnica e economicamente praticável, ao invés dos não renováveis
8	Minimizar ou, se possível, evitar derivações, porque estas requerem reagentes adicionais e podem produzir resíduos
9	Preferir reagentes catalíticos (tão seletivos quanto possível) a reagentes estequiométricos
10	Projetar os produtos químicos em nível molecular de modo que, no fim do seu uso, não persistam no ambiente e se decomponham em produtos de degradação inócuos
11	Procurar usar métodos analíticos que permitam a monitoramento direto dos processos de fabricação em tempo real e controlo precoce da formação de substâncias perigosas
12	Usar substâncias e as suas formas de utilização nos processos químicos de fabricação a fim de minimizar o potencial de ocorrência de acidentes químicos, tais como fugas, explosões e incêndios

As diretrizes apontadas por Anastas e Warner (1998) levam a escolha de materiais que promovam a eficiência nas reações químicas com a mínima geração de resíduos.

2.2.6 Ecodesign/ Design for Environment

O Ecodesign tem sua origem no trabalho de Victor Papanek, originalmente publicado em 1971. A aplicação das diretrizes do Ecodesign foi proposta por Platcheck (2003) através de um método seqüencial de gerenciamento de projetos de desenvolvimento de produtos sustentáveis. O método contempla quatro fases gerenciais (Proposta, Desenvolvimento, Detalhamento e Comunicação). O Eco-Design e o Design for Environment (DfE) são conceitos muito próximos que neste artigo serão tratados como sinônimos, sendo que este último pertence a uma família de diretrizes de projeto conhecida como Design for X (DfX). O Ecodesign prioriza a integração de considerações econômicas e ecológicas nos processos de planejamento, projeto e desenvolvimento do produto (DIEHL e BREZET, 2004). Trata-se de uma abordagem que consiste em reduzir os impactos de um produto, mantendo a mesma qualidade de uso (funcionalidade, desempenho) e agregando valor à qualidade de vida dos usuários atuais e futuros. Através dessa prática, os projetos recebem importâncias equivalentes tanto no aspecto ambiental, em exequibilidade técnica, em controle de custos e em demandas do mercado (FUAD-LUKE; 2002; KAZAZIAN, 2005, VEZZOLI e MANZINI, 2008). De acordo com Back et al. (2008) o requisito fundamental do desenvolvimento de produtos é minimizar a utilização de recursos naturais, a geração de resíduos, os riscos à segurança, à saúde e a degradação ecológica. Portanto, os princípios de projeto aliam práticas do DfE com o intuito de gerar produtos mais amigáveis ecologicamente e de maior vida útil.

Estudos mostram que o DfE preconiza primeiramente prever o futuro do produto, verificando a possibilidade de reciclagem ou reuso do material após seu descarte, reintegrando os recursos em novos ciclos ou diferentes ambientes. Posteriormente, o projeto do produto visa reduzir os impactos ambientais em todo o ciclo de vida, dando preferência pela utilização de recursos de baixo impacto. (VEZZOLI e MANZINI, 2008; SCHENDEL e BIRKHOFFER, 2007). Segundo Guimarães (2006) a aplicação das práticas de DfE e Ecodesign nas indústrias estão voltadas para incrementos e melhorias de produtos e processos existentes para que através de ganhos na qualidade ambiental, estas melhorem sua competitividade no mercado. A adoção de práticas referentes à prevenção da poluição e da geração de resíduos, ao gerenciamento ambiental de materiais; à análise de riscos; ao custo do ciclo de vida e ao

design orientado ao sistema prevendo a eco-eficiência dos bens de consumo promovem melhorias ao desenvolvimento de produtos (FIKSEL,1993; FIKSEL, 1996).

A Figura 3 mostra uma visão ampla sobre “As Dez Regras de Ouro” sugeridas pelos autores Luttrupp e Lagerstedt (2006), as quais são pertinentes às diretrizes do Ecodesign conforme descritas no Quadro 5:

Quadro 5: As Dez Regras de Ouro do Ecodesing (Fonte: Adaptado de Luttrupp e Lagerstedt, 2006)

	Diretrizes
1	Reduzir ou eliminar o uso de substâncias tóxicas no produto
2	Minimizar o consumo de energia pelo aprimoramento do housekeeping
3	Minimizar o consumo de energia
4	Propiciar reparo e upgrading para produtos que dependem de sistema de serviço
5	Projetar para propiciar longa vida útil
6	Minimizar o peso
7	Proteger das agressões do meio
8	Estabelecer previamente o upgrading do produto, reparo e reciclagem – Prover informações
9	Promover upgrading pelo uso de materiais simples
10	Usar poucos elementos de união

A figura 3 integra as etapas do ciclo-de-vida dos produtos e as práticas recomendadas.



Figura 3: As Dez Regras de Ouro organizadas de acordo com o ciclo de vida de um produto (Fonte: Adaptado de Luttrupp e Lagerstedt, 2006)

Conforme mostrado na Figura 3 o Ecodesign trata das diversas fases de melhoria do processo ou produto durante todo ciclo de vida, desde a concepção com materiais livre de substâncias tóxicas até promoção de reuso no fim-de-vida.

2.2.7 Produção Limpa

O conceito Produção Limpa (PL) foi proposto pela organização ambientalista não-governamental Greenpeace, em 1990, para representar o sistema de produção industrial que considerasse a auto-sustentabilidade, suas diretrizes são descritas no Quadro 6.

Quadro 6: Diretrizes da Produção Limpa (Fonte: Adaptado de Greenpeace, 1997)

Diretrizes
Os sistemas de Produção Limpa para produtos manufaturados devem ser:
Não-tóxicos
Eficientes no uso de energia
Feitos usando-se materiais renováveis, rotineiramente reaproveitados e extraídos de forma a manter a viabilidade do ecossistema
Feitos de materiais não-renováveis, mas passíveis de reprocessamento de forma não-tóxica e eficiente em termos de energia.
Os produtos devem ser:
Duráveis e reutilizáveis
Características relevantes dos sistemas de Produção Limpa:
Devem ser não poluentes em todo seu ciclo de vida útil

O ciclo de vida útil inclui:
Fase de projeto de produto/tecnologia
Fase de seleção e produção de matéria prima
Fase de fabricação e montagem de produto
Gerenciamento social dos materiais ao fim da vida útil do produto

A PL é um sistema de produção que se destina a eliminar os resíduos tóxicos e insumos e, finalmente, promove o uso criterioso de energia e materiais renováveis (MELLO e NASCIMENTO, 2002; CLEAN PRODUCTION ACTION, 2010). A PL questiona a real necessidade de um produto e observa como esta necessidade poderia ser melhor satisfeita ou reduzida, promove a redução ou economia do uso de materiais, água e energia e admite a necessidade da participação pública na tomada de decisão política e econômica (CNTL, 2003). De acordo com estudos realizados por Thorpe (1999), a PL é baseada numa visão circular da economia. A Figura 4 mostra o modo de conduzir os processos segundo a PL.



Figura 4: Processos via PL (Adaptado de Thorpe, 1999)

A Figura 4 ilustra que a abordagem valoriza o reaproveitamento de recursos e prevê que resíduos tóxicos não sejam gerados.

2.2.8 Produção Mais Limpa

Segundo a UNIDO (United Nations Industrial Development Organization) (1989) e UNEP (United Nations Environmental Program) (1989), Produção mais Limpa (P+L) é a aplicação contínua de uma estratégia ambiental preventiva integrada aos processos, produtos e serviços, a fim de aumentar a eco-eficiência e reduzir os riscos para os seres humanos e para o

meio ambiente. A abordagem propõe a economia de energia e matérias-primas, minimização ou reciclagem dos resíduos gerados, e controle de poluição e ainda ganhos relacionados à melhoria de trabalho dos envolvidos, que são fatores que contribuem para o melhor desempenho ambiental e econômica para os processos produtivos, mesmo que tais fatores mereçam esforços conjuntos (desde a alta administração até setor de produção) para serem alcançados. Aplica-se a processos produtivos, a produtos e a serviços (WBCSD, 1996; GUNNINGHAM e SINCLAIR, 1997; MELLO e NASCIMENTO, 2002; CNTL, 2003).

A P+L refere-se ao gerenciamento do processo que busca eliminar as causas de poluição na fonte, geração de resíduos e consumo de recursos nas suas respectivas fontes. Suas diretrizes estão voltadas para redução ou substituição de materiais tóxicos no processo produtivo ou uso do produto, para prevenção da poluição, reciclagem de materiais dentro dos processos, projeto de produtos que sejam fáceis de desmontar para promover o reuso e a reciclagem e meios mais eficientes de uso de recursos e energia nos processos e tecnologias de produção, onde as considerações ambientais formam o componente central dos processos de decisão (WBCSD, 1996).

Os processos que empregam as práticas de P+L visam oferecer também melhoras na produtividade e benefícios econômicos, através de sistemas flexíveis, que envolvem metas de emissão zero, melhoria contínua em direção a um circuito fechado e agregação de valor ao longo da cadeia do produto (GUNNINGHAM e SINCLAIR, 1997; SOUZA et al., 2008). Desta maneira, a P+L pode ser definida como “um processo que não apenas polui menos, mas diminui os custos de produção ou aumenta a qualidade do produto” (PORTER, 1991).

As empresas podem aliar seus sistemas de gestão com as práticas da P+L de modo a obter redução de custos através de: melhor gerenciamento de energia, de matérias-primas e de resíduos; reduzidos requerimentos de armazenamento para resíduos e materiais tóxicos e menor gasto no controle da poluição (GUNNINGHAM e SINCLAIR, 1997). Enquanto a PL propõe produtos atóxicos e o uso de fontes de energia renováveis, a P + L estimula a redução da toxicidade e o uso mais eficiente da energia (MELLO e NASCIMENTO, 2002).

Uma vez identificadas as diretrizes de melhoria de sustentabilidade de processos e desenvolvimento de produtos, é possível definir critérios de avaliação dos métodos de extração de celulose tendo em vista a criteriosa avaliação de diretrizes aplicáveis a processos.

3. MÉTODO

Este artigo faz parte de uma pesquisa aplicada, na qual se pretende realizar um estudo da extração de celulose a partir de resíduo do processo produtivo de empresa beneficiadora de material vegetal. Para atingir este objetivo, é necessário selecionar um método extrativo adequado. Optou-se pela pesquisa bibliográfica, visto que a extração de celulose é um processo clássico e documentado na literatura. Desta forma, a abordagem adotada é qualitativa, empregando tanto a análise bibliográfica para comparações de processos industriais, quanto entrevistas.

Neste estudo fez-se uma revisão em diversas fontes sobre as abordagens que tratam de sustentabilidade e também a respeito dos processos industriais de extração de celulose. O método de trabalho do artigo foi realizado a partir de seis etapas descritas a seguir:

i) Levantamento bibliográfico

O levantamento bibliográfico se dividiu em duas etapas: levantamento das características dos processos de extração de celulose Kraft, Soda e Sulfito Ácido e levantamento de diretrizes para melhoria da sustentabilidade de processos e desenvolvimento de produtos, em abordagens relacionadas. Para o levantamento das informações, foram consultadas as seguintes bases de dados: bibliotecas dos professores do PPGE, biblioteca da Escola de Engenharia da UFRGS, Google Livros (books.google.com.br), Google Acadêmico (scholar.google.com.br), Scielo (scielo.br) e Science Direct (sciencedirect.com). As palavras-chave consultadas incluíram: processos de extração de celulose (cellulose extraction process), polpamento químico (chemical pulping), extração alcalina (alkaline extraction), processo ácido (acid process), processo Soda (Soda process), processo kraft (kraft process), deslignificação (deslignification) e aditivos de processo. Na segunda etapa, as palavras-chave pesquisada foram: Método ZERI (ZERI method), Cadeia de Suprimentos Verde (Green Supply Chain), Berço a Berço (Cradle to Cradle), Engenharia Verde (Green Engineering), Química Verde (Green Chemistry), Ecodesign/Design for Environment, DfE, Produção Limpa (Clean Production) e Produção mais Limpa (Cleaner Production).

Foram identificados mais de 100 artigos que tratavam de processos de extração de celulose. Foram identificadas oito abordagens descritas anteriormente, mais citadas na literatura, que tratam da melhoria da sustentabilidade de processos produtivos. Foram identificados aproximadamente 200 artigos e 50 livros que tratam do assunto, porém foram

escolhidos aqueles mais citados para embasar este trabalho através da análise de citações na literatura.

ii) Análise dos textos bibliográficos

Os textos das abordagens foram compilados e analisados com respeito à existência de diretrizes norteadoras da melhoria dos processos produtivos. As diretrizes foram catalogadas por abordagem/fonte, conforme informações retiradas da literatura da maneira proposta por fontes de referência.

iii) Definição de critérios para avaliação dos métodos de extração de celulose

O conjunto de diretrizes gerado na fase anterior foi reorganizado e as redundâncias eliminadas, gerando uma lista de diretrizes única. Estas diretrizes foram convertidas em critérios para avaliação dos processos de extração de celulose e compiladas em quadro, no qual cada critério está associado às abordagens de origem e autores. Os critérios definidos para análise dos processos foram avaliados e agrupados em três categorias: critérios de seleção de recursos materiais e energéticos; preparação da produção e adequação de processos; gestão do fim de vida. Além disso, foi avaliada a flexibilidade dos processos frente ao diferentes tipos de material vegetal.

iv) Elaboração de instrumento de análise dos métodos de extração de celulose

Os critérios definidos para análise dos processos de extração de celulose foram submetidos a avaliação. O instrumento elaborado contempla os blocos de critérios, uma escala de dois níveis para avaliação subjetiva de cada critério (atende, não atende) e um espaço para comentários do avaliador caso o critério não fosse atendido. O instrumento também contém um campo para o avaliador indicar o grau de conhecimento que tem a respeito do processo de extração analisado e instruções de preenchimento, uma vez que o espaço de análise compreende apenas as operações relacionadas à etapa de polpeamento, a preparação do licor de cozimento e aos recursos energéticos usados.

v) Análise dos processos de extração de celulose

A partir do material bibliográfico sobre os processos de extração de celulose, apresentado no item *(i)* do método, foi possível analisar cada processo frente aos critérios

propostos no instrumento de análise do item (iv). Após avaliação do próprio pesquisador, especialistas definidos por conveniência, realizaram análise dos processos frente aos critérios, para confirmar os resultados obtidos com a análise realizada previamente a partir de informações da literatura. Foram questionados três profissionais: um deles gerente de tecnologia de unidade gaúcha de empresa brasileira líder mundial de produção de celulose branqueada de eucalipto que utiliza processo alcalino; outro é gerente de produção da única empresa brasileira que utiliza processo ácido nas suas operações; e o terceiro é importante consultor do setor de papel e celulose, com formação na área.

vi) Seleção do método

A partir da análise dos processos, aquele que fosse mais flexível às matérias-primas usadas para extração de celulose e ainda atendesse aos critérios propostos gerando polpas favoráveis a diferentes aplicações, foi o selecionado.

4. RESULTADOS

Os resultados apresentados neste artigo estão baseados no método de trabalho proposto. Primeiramente foi feito o levantamento bibliográfico em duas etapas, contemplando materiais bibliográficos a respeito das características dos processos de extração de celulose Kraft, Soda e Sulfito Ácido e outro a respeito de diretrizes para melhoria da sustentabilidade de processos. Este levantamento gerou informações para a seqüência do trabalho.

Os materiais pesquisados permitiram a extração de diretrizes que conduzem a melhorias nos aspectos econômicos e ambientais da sustentabilidade em processos produtivos e desenvolvimento de produtos. Os aspectos econômicos foram considerados direta ou indiretamente pela possibilidade de se evitar o desperdício de recursos materiais ou energéticos, tempo e espaço para a realização das operações. Além disso, foi verificada a capacidade de reuso ou máxima eficiência no uso de recursos materiais e energéticos, com minimização da geração de resíduos. Estas diretrizes revelam aspectos econômicos, pois permitem a redução de custos no processo. Logo, foram selecionadas as diretrizes aplicáveis a processos produtivos segundo as abordagens sustentáveis pesquisadas no levantamento bibliográfico. Tais foram arranjadas conforme o aspecto ambiental ou econômico, abordagem relacionada e fonte, como mostrado no Quadro 7.

Quadro 7: Relação de diretrizes para processos originados das abordagens de sustentabilidade e seus autores de referência

ASPECTO DA SUSTENTABILIDADE	DIRETRIZES	ABORDAGENS	AUTOR/ORGANIZAÇÃO
E	Usar matérias-primas mais viáveis economicamente	Cadeia de Suprimentos Verde, Ecodesign, Química Verde e Produção mais Limpa	12, 30, 2, 18, 19, 29
A	Usar matérias-primas de fontes renováveis	Produção Limpa, Química Verde e Engenharia Verde, Ecodesign	16, 8, 7, 13, 32, 10, 29
A e E	Capacidade de usar menor quantidade de energia (uso eficiente)	Produção Limpa, Produção mais Limpa, Química Verde, Engenharia Verde, Ecodesign e ZERI	20, 16, 8, 7, 13, 32, 17, 6, 2, 3, 21, 4
A	Usar o mínimo de materiais diferentes	Produção Limpa, Engenharia Verde e Ecodesign	16, 21, 7, 29
A	Reduzir ou eliminar o uso de substâncias tóxicas (teratogênicas, carcinogênicas, etc.)	Cadeia de Suprimentos Verde, Berço ao Berço, ZERI, Produção Limpa, Produção mais Limpa, Engenharia Verde, Química Verde e Ecodesign	21, 27, 12, 14, 26, 8, 16, 7, 10, 6, 2, 3, 21, 29, 4, 9, 5
A	Escolher reagentes catalíticos, tão seletivos quanto possível	Química Verde	8
A	Escolher matérias-primas que sejam biodegradáveis	Química Verde	8
A	Escolher ou substituir matérias primas capazes de não gerar resíduos e/ou emissões tóxicas	Cadeia de Suprimentos Verde, Berço ao Berço, ZERI, Produção Limpa, Produção mais Limpa, Engenharia Verde, Química Verde e Ecodesign	5, 9, 22, 27, 12, 14, 26, 16, 8, 7, 13, 32, 10, 6, 28, 25, 2, 3, 21, 29, 4
A	Escolher substâncias inerentemente mais seguras quanto à prevenção de acidentes químicos (explosões, incêndios, fugas, etc.)	Química Verde	8
A	Minimizar o uso de substâncias auxiliares nas reações químicas, ou usar apenas aquelas não nocivas	Química Verde	8
A	Gerenciar o final de vida do produto	Engenharia Verde, Berço ao Berço e Produção Limpa, Ecodesign	14, 24, 16, 7, 28, 25, 29
E	Prover a máxima integração das matérias-primas no produto final –	Química Verde	8

	eficiência		
A e E	Evitar etapas adicionais nos processos, evitando assim, o uso adicional de reagentes químicos	Química Verde, Ecodesign	8, 29
A	Projetar produtos com maior vida útil	Produção Limpa, Berço ao Berço, Engenharia Verde e Ecodesign	14, 16, 7, 21, 29
A	Monitorar os processos de fabricação em tempo real a fim de se controlar previamente a formação de substâncias nocivas	Química Verde e Berço ao Berço	14, 8
E	Prover maior eficiência em tempo e espaço para a realização dos processos	Engenharia Verde	16
E	Projetar operações de separação e purificação com a minimização de recursos energéticos e de matéria-prima	Engenharia Verde	16
A	Capacidade de propiciar melhorias no produto	Berço ao Berço, ZERI e Ecodesign	5, 9, 23, 21
A	Usar energia oriunda de recursos renováveis	Produção Limpa, Engenharia Verde e Química Verde, Ecodesign	16, 8, 10, 29
A e E	Reusar energia dentro do processo	Produção Limpa, Berço ao Berço, ZERI, Produção mais Limpa e Engenharia Verde	5, 9 16, 7, 13, 32, 10
E	Diminuir consumo de energia durante a produção do produto	Produção Limpa, Produção mais Limpa, Engenharia Verde, Química Verde e Ecodesign	16, 8, 13, 32
A e E	Minimizar o fluxo de resíduos gerados no processo produtivo	Cadeia de Suprimentos Verde, Produção mais Limpa, Engenharia Verde, Química Verde e Ecodesign	8, 10, 6, 13, 17, 2, 3, 29, 4
A e E	Reciclar ou reusar materiais dentro ou fora do processo, agregando valor aos mesmos	Cadeia de Suprimentos Verde, Berço ao Berço, ZERI, Produção Limpa, Produção mais Limpa, Engenharia Verde e Ecodesign	5, 9, 23, 14, 24, 16, 7, 10, 11, 6, 13, 21, 28, 25, 29, 4
A	Reduzir ou eliminar a presença de resíduos e/ou emissões tóxicas	Cadeia de Suprimentos Verde, Berço ao Berço, ZERI, Produção Limpa, Produção mais Limpa, Engenharia Verde,	22, 16, 8, 7, 10, 6, 13, 17, 1, 20, 28, 25, 15, 2, 3, 21, 29, 4

		Química Verde e Ecodesign		
A e E	Capacidade de reprocessar resíduos a fim de agregar valor aos mesmos (reciclar ou reusar)	Berço ao Berço, Produção mais Limpa, Ecodesign e ZERI		
	Legenda:	1. Porter (1991)	2. Fiksel (1993)	3. Fiksel (1996)
4.	5. WBCSD (1996)	6. Pauli (1996)	7. Gunningham e Sinclair (1997)	8. Greenpeace (1997)
9.	10. Anastas e Warner (1998)	11. Pauli (1998)	12. Thorpe (1999)	13. CNTL (1999)
14.	15. EPA (2000)	16. Mello e Nascimento (2002)	17. McDonough e Braungart (2002)	18. Fuad-Luke (2002)
19.	20. Anastas e Zimmerman (2003)	21. CNTL (2003)	22. Machado (2004)	23. Graedel e Howard-Grenville (2005)
24.	25. Kazazian (2005)	26. Luttrupp e Lagerstedt (2006)	27. Vachon e Klassen (2006)	28. Guimarães (2006)
29.	30. El-Haggar (2007)	31. Schendel e Birkhofer (2007)	32. MBDC (2007)	33. Srivastara (2007)
34.	35. Vezzoli e Manzini (2008)	36. Back et al. (2008)	37. Souza et al. (2008)	38. Smeraldi (2009)
39.	40. Clean Production Action (2010)	Ambiental: A	Econômico: E	

O conjunto de diretrizes geradas foi então reorganizado a fim de eliminar redundâncias e propor uma lista única de diretrizes para processos que tenham os aspectos econômicos e ambientais alinhados com a sustentabilidade. Tais diretrizes foram convertidas em critérios de avaliação dos processos de extração de celulose, os quais se subdividiram em três subgrupos. Os critérios originados das diretrizes estão apresentados no Quadro 8.

Quadro 8: Relação dos critérios originados das diretrizes de sustentabilidade nos aspectos ambientais e econômicos

Critérios	
Seleção de recursos materiais e energéticos	Usar matérias-primas mais viáveis economicamente
	Usar matérias-primas de fontes renováveis
	Usar o mínimo de materiais diferentes
	Reduzir ou eliminar o uso de substâncias tóxicas (teratogênicas, carcinogênicas, etc.)
	Escolher reagentes catalíticos, tão seletivos quanto possível
	Escolher matérias-primas biodegradáveis
	Escolher ou substituir matérias primas capazes de não gerar resíduos e/ou emissões tóxicas
	Escolher substâncias inerentemente mais seguras quanto à prevenção de acidentes químicos (explosões, incêndios, fugas, etc.)
	Minimizar o uso de substâncias auxiliares nas reações químicas, ou usar apenas as não nocivas
	Usar energia oriunda de recursos renováveis
Preparação da produção e adequação dos processos,	Capacidade de usar menor quantidade de matéria-prima (uso eficiente)
	Prover a máxima integração das matérias-primas no produto final - eficiência
	Monitorar os processos de fabricação em tempo real a fim de se controlar previamente a formação de substâncias nocivas

considerando o controle de resíduos e emissões	Prover maior eficiência em tempo e espaço para a realização dos processos
	Projetar operações de separação e purificação com a minimização de recursos energéticos e de matéria-prima
	Reusar energia dentro do processo
	Diminuir consumo de energia durante a produção do produto
	Minimizar o fluxo de resíduos gerados no processo produtivo
	Reduzir ou eliminar a presença de resíduos e/ou emissões tóxicas
Gestão fim de vida	Evitar etapas adicionais nos processos, evitando assim, o uso adicional de reagentes químicos
	Projetar produtos com maior vida útil
	Reciclar ou reusar materiais dentro ou fora do processo, agregando valor aos mesmos
	Gerenciar o final de vida do produto

Os critérios definidos para avaliação dos processos foram colocados em um instrumento de análise a fim de questionar profissionais do meio quanto ao atendimento ou não destes nos processos de extração de celulose. Este instrumento é mostrado no Apêndice 1. A pesquisadora também aplicou o instrumento para a análise dos processos de extração de celulose Kraft, Soda e Sulfito Ácido, com base nas informações da literatura. Além da avaliação dos processos frente aos critérios, estes foram avaliados quanto à flexibilidade em se usar diferentes tipos de materiais vegetais.

Posteriormente, ao recebimento das respostas comentadas após a aplicação do instrumento e estudo e entendimento dos processos feito pela pesquisadora, foi possível a análise dos processos empregados. Para tanto, as questões mostradas no Apêndice 1 foram dispostas no Quadro 9, sendo que os itens marcados como não avaliados pelos profissionais do meio são comentados no texto. Neste quadro encontra-se o resumo da análise realizada pelos entrevistados e pela pesquisadora.

O processo ácido foi avaliado segundo o profissional que trabalha em indústria que usa tal processo, sendo que os processos Soda e Kraft foram avaliados pelo profissional que atua em empresa que emprega processos alcalinos, devido ao seu conhecimento amplo. O consultor avaliou os itens de modo geral, argumentando que *“para analisar o uso de práticas sustentáveis de recuperação de reagentes e minimização de emissões, convém analisar o quanto a empresa está apta a dispor capitais e recursos em tecnologia”*. O consultor argumenta que os itens variam de acordo com as tecnologias adotadas pelas empresas.

Segundo resposta de especialistas e análise da pesquisadora, a avaliação do processo alcalino aplicado industrialmente com uso de aditivo indicou que a maior parte dos critérios

mencionados são atendidos. Segundo especialista, gestor do setor de celulose, os critérios apresentados *“são itens de gestão do processo para atendimento das questões de sustentabilidade norteadoras da concepção de novos projetos industriais”*. As instalações industriais existentes visam à recuperação dos reagentes usados no licor de cozimento e demais compostos, assim como a recuperação da energia térmica. O estudo e o questionamento indicaram que *“as emissões atmosféricas são monitoradas de acordo com a legislação vigente, a fim de se enquadrarem dentro dos padrões exigidos”*. Estes padrões são mostrados no Anexo 1.

A pesquisa indica que o processo Soda não emprega enxofre no licor de cozimento, logo é menos seletivo que o Kraft no ataque a lignina, uma vez que apenas o NaOH é o agente deslignificante para o polpeamento. Entretanto, segundo especialista questionado *“o processo soda tem menor uso de sulfeto de sódio, mas ainda assim contém o sal, que se forma a partir do acúmulo de enxofre dos combustíveis auxiliares nos ciclos de processo”*. Na opinião do especialista *“o processo Soda não apresenta diferenças significativas em termos de sustentabilidade em relação ao Kraft, pois o processo com uso de enxofre tem apresentado altos investimentos em tecnologias mais eficientes de recuperação e filtração dos compostos odoríferos do enxofre”*. Todavia, ressalta-se que a viabilidade de ter sistemas de filtração de gases eficazes depende do capital investido nas instalações industriais, portanto, ao utilizar o processo Soda livre de enxofre é garantida a não geração de compostos odoríferos de enxofre.

Na avaliação completa do instrumento, apenas os itens referentes ao projeto de produtos com maior vida útil e gestão de fim-de-vida dos produtos foram avaliados como não atendidos. Especialista do setor alegou que *“a fabricação de celulose tem seu ciclo de vida definido a partir de seu uso final, não sendo gerido pelas etapas de processo de extração”*. No Quadro 9 estes itens são mostrados como não atendidos, gerando tais comentários e justificativas.

Quadro 9: Análise dos processos de extração de celulose frente a aspectos econômicos e ambientais da sustentabilidade sob ponto de vista dos entrevistados e pesquisadora

Critérios / Processos		Sulfito		Kraft		Soda	
		Atende	Não atende	Atende	Não atende	Atende	Não atende
Seleção de recursos materiais e energéticos	Usar matérias-primas mais viáveis economicamente	x		x		x	
	Usar matérias-primas de fontes renováveis	x		x		x	
	Usar o mínimo de materiais diferentes	x		x		x	
	Reduzir ou eliminar o uso de substâncias tóxicas (teratogênicas, carcinogênicas, etc)	x		x		x	
	Escolher reagentes catalíticos, tão seletivos quanto possível		x	x			x
	Escolher matérias-primas que sejam biodegradáveis	x		x		x	
	Escolher ou substituir matérias primas capazes de não gerar resíduos e/ou emissões tóxicas	x			x	x	
	Escolher substancias inerentemente mais seguras quanto a prevenção de acidentes químicos (explosões, incêndios, fugas, etc)	x		x		x	
	Minimizar o uso de substâncias auxiliares nas reações químicas, ou usar apenas aquelas não nocivas		x	x		x	
	Usar energia oriunda de recursos renováveis	x		x		x	
Preparação da produção e adequação dos processos, considerando o controle de resíduos e emissões	Capacidade de usar menor quantidade de matéria-prima (uso eficiente)	x		x		x	
	Prover a máxima integração das matérias-primas no produto final - eficiência	x		x		x	
	Monitorar os processos de fabricação em tempo real a fim de se controlar previamente a formação de substâncias nocivas	x		x		x	
	Prover maior eficiência em tempo e espaço para a realização dos processos	x		x		x	
	Projetar operações de separação e purificação com a minimização de recursos energéticos e de matéria-prima	x		x		x	
	Reusar energia dentro do processo	x		x		x	
	Diminuir consumo de energia durante a produção do produto	x		x		x	
	Minimizar o fluxo de resíduos gerados no processo produtivo	x		x		x	
	Reduzir ou eliminar a presença de resíduos e/ou emissões tóxicas		x		x	x	
	Evitar etapas adicionais nos processos, evitando assim, o uso adicional de reagentes químicos	x		x		x	
Gestão fim de vida	Projetar produtos com maior vida útil		x		x		x
	Reciclar ou reusar materiais dentro ou fora do processo, agregando valor aos mesmos	x		x		x	
	Gerenciar o final de vida do produto		x		x		x
Seleção do processo							
	Ser flexível ao uso de diferentes materiais vegetais		x	x		x	

Durante a avaliação do processo Sulfito ácido, tanto por parte do estudo feito pela pesquisadora, quanto pela resposta do especialista verifica-se que não se faz uso de aditivos ou catalisadores de processos e que as soluções alcalinas são definidas conforme a maior eficiência e facilidade de recuperação dentro do processo. Ainda, do mesmo modo que ocorre

nos processos alcalinos, as emissões gasosas são monitoradas sob padrões da legislação vigente. Colaborando com os aspectos econômicos e ambientais dos processos, são empregadas tecnologias para lavagem dos gases e reincorporação dos mesmos no processo.

Durante a avaliação do processo ácido, os itens referentes ao projeto de produtos com maior vida útil e gestão de fim-de-vida dos produtos foram avaliados pelo especialista do processo ácido como não atendidos. De acordo com entrevistado “*o destino da aplicação da polpa celulósica e o fim-de-vida desta será definido, não ficando sob responsabilidade da indústria que opera o processo extrativo*”. Com base na literatura pesquisada e no entrevistado, as soluções alcalinas mais indicadas para uso no processo sulfito ácido foram Ca (OH)_2 e Magnésio (Mg (OH)_2). Segundo especialista, consultor de empresas do setor, “*quando há o uso de solução alcalina com Ca no licor de cozimento, o licor residual rico em Ca e lignossulfonados é vendido para aplicação em outros produtos de alto valor agregado. Só assim é viável o uso de Ca, pois os reagentes não podem ser recuperados no processo devido a problemas de incrustações*”. O estudo em material bibliográfico mostrou que entre os materiais constituintes do licor de cozimento estão: a lignina dissolvida, lignossulfonados, carboidratos degradados, sulfato de cálcio e de magnésio, extrativos, resinas, entre outros.

No caso de aplicação do processo bissulfito com solução de Mg (OH)_2 é viável a recuperação deste pela queima em caldeira de recuperação do óxido de magnésio (MgO) e dióxido de enxofre (SO_2), cuja recombinação permite formar o licor de cozimento. A pesquisa literária indicou que o uso de soluções alcalinas com Na ou NH_4^+ é inviabilizado devido a dificuldades de recuperação dos reagentes e ao alto custo destes. Como relatado acima, as emissões atmosféricas de ambos processos são monitoradas via legislação vigente. Nos processo alcalino kraft, os compostos que são mais críticos ao controle são os compostos reduzidos de enxofre, enquanto nos processos ácidos, o controle mais rígido se volta ao gás sulfídrico (H_2S).

A pesquisa bibliográfica também indicou a maior flexibilidade quanto ao uso de diferentes matérias-primas para a extração de celulose por meio dos processos alcalinos. Estes ainda permitem o uso de aditivos de processo que auxiliam na seletividade das reações e preservação da celulose. Adicionalmente, os aspectos econômicos e ambientais da sustentabilidade são reforçados pelo fato do processo permitir o reaproveitamento do licor de cozimento tanto para formação de novo licor, quanto para a geração de energia. Além de que,

é notável o uso energético eficiente. O processo ácido, por seu turno, também prevê eficiência energética, e polpas com alto grau de deslignificação, no entanto é restrito a escolha de materiais e reagentes.

Face ao exposto, constata-se o empenho do meio industrial na busca de tecnologia e seleção de reagentes para a adequação dos processos nos requisitos da sustentabilidade. O atendimento dos diversos critérios levantados mostra que o desempenho do setor vem crescendo para estar de acordo com as práticas sustentáveis. Um aspecto a ser ressaltado é de que as tecnologias para controle de emissão de gases, bem como recuperação de reagentes e energia dentro do processo estão cada vez mais elaboradas. Entretanto a incorporação destas novas tecnologias pelas indústrias do setor, depende do capital investido pela indústria. A partir das informações coletadas e pesquisadas em diversas fontes bibliográficas e profissionais do meio, foi possível juntar as informações em um quadro resumo dos processos, a fim de selecionar o mais flexível aos diferentes materiais vegetais e alinhado aos aspectos sustentáveis abordados.

A análise dos processos de extração para seleção do mais adequado segundo os critérios abordados é uma tarefa subjetiva e difícil de ser realizada, pois depende de investimentos em tecnologia e disponibilidade de capital para obtenção das mesmas. Mas, considerando os materiais pesquisados e especialistas questionados, a análise conduziu à escolha do processo Soda como o mais adequado para a aplicação em extração de celulose em diferentes fontes vegetais lignocelulósicas. O processo é aplicável a diversas fontes vegetais, e com uso de aditivos pode ter sua seletividade aprimorada, não apresentando o inconveniente de geração de compostos odoríferos.

5. CONCLUSÃO

Conceitos provenientes do desenvolvimento sustentável levam a definição de diretrizes para a condução de processos visando à redução do impacto ambiental negativo e aumento de ganhos econômicos. O objetivo deste trabalho foi selecionar um processo químico de extração de celulose flexível ao uso de resíduos vegetais lignocelulósicos a partir da determinação de critérios econômicos e ambientais. Estes foram desenvolvidos com base nas diretrizes contidas nas abordagens que tratam de sustentabilidade.

Neste trabalho foram levantadas as principais abordagens que tratam de sustentabilidade aplicáveis ao desenvolvimento de produtos e processos. Também foram investigados os processos industriais de extração de celulose. Em vista das diretrizes determinadas pelas abordagens, definiram-se critérios de análise para os processos vigentes industrialmente. Estes foram analisados quanto aos critérios a partir de estudos em material bibliográfico por parte da pesquisadora e questionamento com profissionais do meio.

As abordagens da sustentabilidade, com enfoque econômico e ambiental, listam práticas a fim de reduzir o impacto ambiental negativo, como: controle de emissões, eficiência no uso de recursos materiais e energéticos e minimização ou reaproveitamento de resíduos. Alinhadas a tais diretrizes, as empresas vêm empenhando esforços para o atendimento de tais fatores. A análise dos processos de extração para seleção do mais adequado conduziu à escolha do processo Soda por atender a maior parte dos critérios de sustentabilidade definidos e ainda ser aplicável a diferentes fontes vegetais lignocelulósicas. Uma vez que o processo não usa compostos de enxofre no licor de polpeamento, mas apenas NaOH, o uso de aditivos pode aprimorar a seletividade do processo, sem haver o inconveniente de geração de compostos odoríferos emitidos na atmosfera.

Na seleção de processos e verificação do atendimento a critérios sustentáveis, vale lembrar que muitas vezes as melhorias dependem da empresa ter recursos financeiros para aplicar em seus projetos e processos com aquisição de tecnologias e materiais. Do mesmo modo, clientes aos quais se destinam os produtos devem estar cientes de práticas sustentáveis para que os resultados sejam otimizados. Oportunidades de melhorias podem estar no caminho da maior recuperação energética e controle de emissões, já que a recuperação de material dentro do processo já é bem representativa.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) pelo fornecimento de bolsa de pesquisa. Também agradecemos aos profissionais do setor de papel e celulose que contribuíram ao responder questionamentos referentes ao estudo e com a disponibilização de informações.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR ISO 302. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Pasta celulósica - Determinação do número kappa**, 2005.

ANASTAS, P. T.; WARNER, J. C. **Green chemistry: theory and practice**. New York: Oxford University Press, 1998.

ANASTAS, P. T.; ZIMMERMAN, J. B. Design through the twelve principles of green engineering. **Environmental Science and Technology**, [s.l.], v.37, n.5, p. 94A-101A, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL (BRACELPA). **Tipos e aplicações**. Disponível em: <<http://www.bracelpa.org.br/bra2/?q=node/181>>. Acesso em: 11 dez. 2010. a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL (BRACELPA). **Relatório Anual, 2009/2010**. Disponível em:

<<http://www.bracelpa.org.br/bra2/sites/default/files/estatisticas/rel2009.pdf>>. Acesso em: 1 fev. 2011. b.

BACK, N. et al. **Projeto integrado de produtos: planejamento, concepção e modelagem**. Barueri: Manole, 2008.

BASSA, A. **Processos de polpação kraft convencional e modificado com madeiras de E. grandis e híbrido (E. grandis x E. urophylla)**. 2002. 103 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

BREZET, H.; VAN HEMEL, C. **Ecodesign: a promising approach to sustainable production and consumption**. Paris: UNEP, 1997.

CLEAN PRODUCTION ACTION. Green Chemicals. Disponível em: <<http://www.cleanproduction.org/Home.php>>. Acesso em: 10 jun. 2010.

CASEY, J. P. **Pulp and paper: chemistry and chemical technology**. 2.ed. New York: Interscience, 1960. v.2.

CENTRO NACIONAL DE TECNOLOGIAS LIMPAS (CNTL). **Cinco fases da implantação de técnicas de produção mais limpa, série manuais de produção mais limpa**. Porto Alegre: SENAI-RS, 2003. Disponível em: <<http://www.senairs.org.br/cntl/>>. Acesso em: 24 dez. 2009.

D'ALMEIDA, M. L. O. **Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica**. 2.ed. São Paulo: SENAI; IPT, 1988. v.1.

DIEHL, J. C.; BREZET, H. Design for sustainability: an approach for international development, transference and local implementation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ENVIRONMENTAL MANAGEMENT FOR SUSTAINABLE UNIVERSITIES – EMSU, 2004, Monterrey. **Proceedings...** Monterrey: [s.n.], 2004.

EL-HAGGAR, S. **Sustainable industrial design and waste management: cradle to cradle for sustainable development**. San Diego: Elsevier, 2007.

ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY (EPA). **Profile of the pulp and paper industry: relatório**. Disponível em: <<http://www.cluin.org/download/toolkit/pulppasn.pdf>>. Acesso em: 08 maio 2010.

ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY (EPA). **The lean and green supply chain: a practical guide for materials managers and supply chain managers to reduce cost and improve environmental performance**, 2000. Disponível em: <<http://www.epa.gov/oppt/library/pubs/archive/acct-archive/pubs/lean.pdf>>. Acesso em: 01 dez. 2009. Environmental Accounting Project.

- FIKSEL, J. Design for environment: an integrated system approach. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRONICS AND THE ENVIRONMENT. 1993, Arlington. **Proceedings**... Arlington: [s.n], 1993. p.126-131.
- FIKSEL, J. Achieving eco-efficiency through design for environment. **Environmental Quality Management**, New York, v.5, n.4, p. 47-54, summer 1996.
- FUAD-LUKE, A. **Manual de diseño ecológico**. Palma de Mallorca: Cartago S.L., 2002.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 1991.
- GOMIDE, J. L. Antraquinona: um eficiente aditivo para a polpação alcalina de Madeiras. **Boletim Técnico da Sociedade de Investigações Florestais**, Viçosa, n. 6, p. 1-27, 1980.
- GOMIDE, J. L., OLIVEIRA, R.C. Eficiência da antraquinona na polpação alcalina de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v.3, n. 2, p. 208-220, 1979.
- GOMIDE, J. L.; VIVONE, R. R.; MARQUES, A. R. Utilização do processo soda/antraquinona para produção de celulose branqueável de *Eucalyptus* spp. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ABCP, 20., 1987, São Paulo. **Trabalhos publicados**. São Paulo: [s.n], 1987. p.35-42.
- GRAEDEL, T. E.; HOWARD-GRENVILLE, J.A. **Greening the industrial facility: perspectives, approaches, and tools**. New York: Springer XII, 2005. 617p.
- GREENPEACE. Greenpeace report. **O que é produção limpa?** 1997. Disponível em: <www.greenpeace.org.br/toxicos/pdf/producao_limpa.doc>. Acesso em: 04 maio 2010.
- GUIMARÃES, L. B.de M. (Org). **Design e sustentabilidade**: Brasil: produção e consumo, design sociotécnico. 1ed. UFRGS, Porto Alegre: FEEng, 2010.
- GUIMARÃES, L. B. de M. Pela sustentabilidade de um design brasileiro. **Revista D: Design, Educação, Sociedade e Sustentabilidade**, Porto Alegre, n.1, p. 2006.
- GULLICHSEN, J. Fiber line operations. In: GULLICHSEN, J.; FOGELHOLM, C.-J. (Ed.). **Chemical pulping**. Jyväskylä: Gummerus Printing, 1999. chap.2, p. A18-A243. (Papermaking Science and Technology).
- GUNNINGHAM, N.; SINCLAIR, D. **Barriers and motivators to the adoption of cleaner production practices**. Canberra: Australian National University, 1997.
- HOLTON, H. H. Better cooking with anthraquinone. **Pulp and Paper International**, [s.l.], v.20, n.8, p. 49-52, 1977.
- KAZAZIAN, T. **Haverá a idade das coisas leves: design e desenvolvimento sustentável**. Tradução Eric Roland Rene Heneault. São Paulo: Editora Senac São Paulo, 2005.
- KHIARI, R. et al. Chemical composition and pulping of date palm rachis and *Posidonia oceanica* – a comparison with other wood and non-wood fibre sources. **Bioresource Technology**, [s.l.], v.101, p.775–780, 2009.
- KHRISTOVA, P. et al. Alkaline pulping with additives of date palm rachis and leaves from Sudan. **Bioresource Technology**, [s.l.], v.96, p.79–85, 2004.
- KHRISTOVA, P. et al. Environmentally friendly pulping and bleaching of bagasse. **Industrial Crops and Products**, [s.l.], v.23, p.131-139, 2005.
- LINS, C.; OUCHI, H. C. **Sustentabilidade corporativa: papel e celulose**. Rio de Janeiro: Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável, 2007.

- LINS, C.; ZYLBERSTAJN, D. **Sustentabilidade e geração de valor: a transição para o século XXI**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.
- LUTTROP, C.; LAGERSTEDT, J. Ecodesign and the ten golden rules: generic advice for merging environmental aspects into product development. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v.14, n.15 – 16, p.1396 – 1408, 2006.
- MACHADO, A. S. C. Química e desenvolvimento sustentável - QV, QUIVES, QUISUS. **Boletim da Sociedade Portuguesa de Química**, Porto, n. 95, 2004.
- MALHOTRA, N. K. **Pesquisa de marketing: uma orientação aplicada**. 4 ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 720p.
- MANZINI, E. VEZZOLLI, C. **O desenvolvimento de produtos sustentáveis: os requisitos ambientais dos produtos industriais**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2002. 367 p.
- MCDONOUGH BRAUNGART DESIGN CHEMISTRY (MBDC). **Cradle to cradle certification program**. Charlottesville: LCC, 2007. Disponível em: <www.mbd.com>. Acesso em: 19 out. 2010.
- MCDONOUGH, W.; BRAUNGART, M.. DESIGN CHEMISTRY (MBDC). **Remaking the way we make things: cradle to cradle**. New York: North Point Press, 2002.
- MELLO, M. C. A. de; NASCIMENTO, L. F. Produção mais limpa: um impulso para a inovação e a obtenção de vantagens competitivas. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 22.,2002, Curitiba. **Anais...** Porto Alegre: UFRGS, 2002.
- PAULI, G. **Emissão zero: a busca de novos paradigmas: o que os negócios podem oferecer à sociedade**. Tradução José W. M. Kaehler, Maria T. R. Rodriguez. Porto Alegre: EDIPUCRS, 1996.
- PAULI, G. **Upsizing: como gerar mais renda, criar mais postos de trabalho e eliminar a poluição**. Porto Alegre: L&PM, 1998.
- PLATCHECK, E. R. **Metodologia de ecodesign para o desenvolvimento de produtos sustentáveis**. 2003. 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental e Tecnologias Limpas) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- PEREIRA, S. et al. Celulose de buriti (*Mauritia vinifera* Martius). **Scientia Forestalis**, [s.l.], n.63, p.202-213, jun. 2003.
- PEREIRA, S. et al. Celulose de tucum (*Bactris inundata* Martius). **Scientia Forestalis**, [s.l.], n.65, p.130-140, jun. 2004.
- PORTER, M. E. America's green strategy. **Scientific American**, [s.l.], 264, n. 4, apr. 1991.
- RODRÍGUEZ, A. et al. Feasibility of rice straw as a raw material for the production of soda cellulose pulp. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v.18, p.1084-1091, 2010.
- SCHENDEL, C.; BIRKHOFFER, H. Implementation of design for environment principles and methods in a company: practical recommendations. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN – ICED, 2007. **Proceedings...** Paris: Darmstadt University of Technology, 2007.
- SCHMIDHEINY, S. **Changing course: a global business perspective on development and the environment**. Massachusetts: MIT, 1992.

- SILVA JÚNIOR, F. G.; DURAN, N.; MEI, L. I. Avaliação do efeito da antraquinona e surfactante sobre a polpação kraft de Eucalyptus sp. **O Papel**, São Paulo, v. 59, n. 5, p. 60-65, 1998.
- SIXTA, H. **Handbook of pulp**, v.1. Lenzing: Wiley-VCH, 2006.
- SMERALDI, R. **O novo manual de negócios sustentáveis**. São Paulo: Publifolha, 2009.
- SMOOK, G. A. **Handbook for pulp & paper technologists**. Vancouver: Angus Wide Publications, 1994. 419 p.
- SOUZA, A. H. C. B. et al. **Guia técnico ambiental da indústria de papel e celulose**. São Paulo: CETESB, 2008.
- SRIVASTARA, S. K. Green supply-chain management: a state-of-the-art literature review. **International Journal of Management Reviews**, [s.l.], v.9, p. 53-80, 2007.
- TEDER, A. & AXEGÄRD, P. Recent development in pulping and bleaching chemistry and technology. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON WOOD AND PULPING CHEMISTRY, 8., 1995, Helsink. **Proceedings...** Helsink: [s.n.] 1995, v. 1, p. 37-55.
- THORPE, B. **Citizen's guide to clean production**. Lowell, MA: University of Massachusetts Lowell, 1999. Disponível em: <<http://sustainableproduction.org/downloads/C+Guide+Text.pdf>>. Acesso em: jun. 2010.
- VACHON, S.; KLASSEN, R. D. Green project partnership in the supply chain: the case of the package printing industry. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v.14, n. 6-7, p. 661-671, 2006.
- VASCONCELOS, F. S. R. **Avaliação do processo SuperBatch™ de polpação de Pinus taeda**. 2005. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais com opção em Tecnologia de Produtos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- VEZZOLLI, C.; MANZINI, E. **Design for environmental sustainability**. Tradução Kristjan Pruul. London: Springer, 2008.
- WANROSLI, W. D. et al. Pulp from oil palm fronds by chemical processes. **Industrial Crops and Products**, [s.l.], v.25, p.89-94, 2007.
- WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE (WBCSD). cleaner production and eco-efficiency - complementary approaches to sustainable development. In: UNEP's INTERNATIONAL HIGH LEVEL SEMINAR ON CLEANER PRODUCTION, 5., 1998, **Anais...** República da Coréia: WBCSD, 1998.
- WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE (WBCSD). **Eco-efficiency and cleaner production: charting the course to sustainability**. New York: WBCSD, 1996.
- XU, W.; REDDY, N.; YANG, Y. Extration, characterization and potential applications of cellulose in corn kernels and Distillers' dried grains with solubles (DDGS). **Journal of Carbohydrate Polymers**, [s.l.], p.521-527, 2009.

ANEXO 1

PARÂMETROS	LIMITE DE EMISSÃO
MP (caldeira de recuperação)	100 mg/Nm ³
MP (tanque de dissolução)	0,1 kg/tSS*
MP (forno de cal)	100 mg/Nm ³
ERT (caldeira de recuperação)	15 mg/Nm ³
ERT (tanque de dissolução)	0,008 kg/tSS*
ERT (forno de cal)	30 mg/Nm ³
SOx (caldeira de recuperação)	100 mg/Nm ³
NOx (caldeira de recuperação)	470 mg/Nm ³
NOx (forno de cal)	470 mg/Nm ³

*tSS – toneladas de sólidos secos

Fonte: Resolução CONAMA N° 382/2006

APÊNDICE 1

Análise dos métodos de extração de celulose quanto aos critérios econômicos e ambientais da sustentabilidade				
Como você considera seu grau de conhecimento a respeito do processo de extração de celulose?		Baixo	Moderado	Alto
<p>Orientação: os critérios listados abaixo devem ser avaliados e respondidos quanto ao atendimento ou não, considerando a etapa de polpeamento, com as entradas e saídas relacionadas a esta, a lavagem e obtenção da polpa não branqueada (licor de cozimento, energia, resíduos e emissões).</p> <p>Modo de preenchimento: para cada critério NAO ATENDIDO deve ser brevemente descrita a razão do não atendimento. Para os critérios atendidos basta marcar um "X".</p>				
Critérios	Atendido	Não Atendido	Comentários	
Seleção de recursos materiais e energéticos	Usar matérias-primas mais viáveis economicamente			
	Usar matérias-primas de fontes renováveis			
	Usar o mínimo de materiais diferentes			
	Reduzir ou eliminar o uso de substâncias tóxicas (teratogênicas, carcinogênicas, etc)			
	Escolher reagentes catalíticos, tão seletivos quanto possível			
	Escolher matérias-primas que sejam biodegradáveis			
	Escolher ou substituir matérias primas capazes de não gerar resíduos e/ou emissões tóxicas			
	Escolher substancias inerentemente mais seguras quanto a prevenção de acidentes químicos (explosões, incêndios, fugas, etc)			
	Minimizar o uso de substâncias auxiliares nas reações químicas, ou usar apenas aquelas não nocivas			
	Usar energia oriunda de recursos renováveis			
Preparação da produção e adequação dos processos, considerando o controle de resíduos e emissões	Capacidade de usar menor quantidade de matéria-prima (uso eficiente)			
	Prover a máxima integração das matérias-primas no produto final - eficiência			
	Monitorar os processos de fabricação em tempo real a fim de se controlar previamente a formação de substâncias nocivas			
	Prover maior eficiência em tempo e espaço para a realização dos processos			
	Projetar operações de separação e purificação com a minimização de recursos energéticos e de matéria-prima			
	Reusar energia dentro do processo			
	Diminuir consumo de energia durante a produção do produto			
	Minimizar o fluxo de resíduos gerados no processo produtivo			
	Reduzir ou eliminar a presença de resíduos e/ou emissões tóxicas			
	Evitar etapas adicionais nos processos, evitando assim, o uso adicional de reagentes químicos			
Gestão fim de vida	Projetar produtos com maior vida útil			
	Reciclar ou reusar materiais dentro ou fora do processo, agregando valor aos mesmos			
	Gerenciar o final de vida do produto			

3. SEGUNDO ARTIGO

Análise do processo de beneficiamento da Palmeira Real da Austrália (palmito em conserva) para determinação das variáveis que influenciam as operações de valorização de seus resíduos

Resumo

Contemplando os aspectos econômicos e ambientais da sustentabilidade, a valorização de resíduos vegetais provenientes de outros processos produtivos mostra-se um meio de gerar ganhos econômicos para empresas geradoras destes materiais e também ganhos para o meio ambiente. Entretanto, para desenvolver o processo de valorização de um resíduo é necessário explorar o processo de geração do mesmo. O objetivo deste artigo é analisar o processo produtivo de unidade industrial beneficiadora de palmito em conserva para determinação das variáveis que influenciam as operações de valorização de seus resíduos. Para a análise do cenário foi escolhida uma empresa beneficiadora de palmito e seu processo produtivo foi mapeado. A partir da análise dos resíduos da palmeira e de referências literárias acerca de métodos de extração, foram realizados ensaios para verificar a qualidade da fibra gerada a partir dos resíduos, quando submetidos a processos extrativos em condições distintas. Os testes auxiliaram na determinação das variáveis controláveis do processo que podem influenciar o comportamento das polpas obtidas, bem como a proposição do cenário que envolve beneficiamento do material residual para produtos de alto valor agregado. Assim, verificaram-se diferenças significativas na qualidade da polpa obtidas pelos processos testados. A partir dos resultados, foi possível propor modificações nos processos a fim de se verificar a influência das variáveis controláveis sobre as variáveis de resposta.

Palavras chaves: Palmeira Real da Austrália (*Archontophoenix alexandrae*); palmito; valorização de resíduos, resíduos vegetais; processos de extração de celulose.

Abstract

Regarding the economic and environmental dimensions, the recovery of vegetal wastes coming from another productive processes arises as a mean for generating economic assets to firms which produce these materials, and environmental earnings as well. This study presents

a proposal of a scenery that involves the pulp extraction productive process correlated with the process of canned heart palms, inserting wastes' recovering. For the scenery proposal it was chosen a processing firm of canned heart palms, and its productive process was mapped. From the generated wastes and from the literary references about extraction methods, there were carried out essays in order to check out the fiber behaviour while submitted to extractive processes under different conditions. Tests were the basis for the definition of controllable variables that can influence the behaviour of the resulting pulps, as well as the proposition of the scenery which involves the processing of residual material into high aggregate value products. Significant differences were observed in the quality of the resulting pulp from the processes tested. From the results, it was possible to propose changes in the processes in order to check out the influence of the controlled variables on the response variables.

Keywords: King Alexander palm (*Archontophoenix alexandrae*); palmetto; wastes valuation; vegetable wastes; pulp extraction processes.

1. INTRODUÇÃO

O agronegócio no Brasil é uma atividade relevante para a economia, pois o país conta com grande diversidade de espécies vegetais e vasta extensão territorial (MAPA, 2010; CEPEA, 2010; CASTRO e GUEDES, 2010). O Brasil tem 388 milhões de hectares de terras férteis, propícias à agricultura, dos quais 90 milhões ainda não foram explorados (MAPA, 2010; BRASIL, 2011). Na região Sul predominam os produtos agrícolas soja, arroz, milho, trigo, cana-de-açúcar, mandioca, representando mais que 80% do volume produzido de fontes vegetais (IBGE, 2008). Entretanto, um mercado recente vem ganhando espaço nesta região, principalmente no estado de Santa Catarina, que é o cultivo de Palmeira Real da Austrália (*Archontophoenix alexandrae*) para produção de palmito em conserva (RODRIGUES e DURIGAN, 2007). A exploração econômica do palmito é recente, pois até o início da década de 1990 a atividade era predominantemente extrativa e pouco organizada. A partir deste período, entretanto, o agronegócio do palmito passou a ser uma atividade relevante e com alto potencial em termos produtivos e econômicos.

A partir da década de 1990 começaram a surgir políticas públicas voltadas inteiramente para a agricultura familiar. A produção agroecológica e outras culturas alternativas com valor agregado diferenciado acabaram se tornando um atrativo devido ao aumento de lucratividade. Cabe aqui, mencionar a formação de cooperativas, fato que sempre

acaba fortalecendo o setor agrícola conduzido por pequenos produtores (SCHNEIDER et al., 2004; TEIXEIRA et al., 2009). Para atender a demanda nacional, o setor apresentou aumento do cultivo de espécies nativas e exóticas, sendo regulado por normas ambientais e de controle de qualidade. Frente a isso, a atividade tem gerado renda em regiões menos favorecidas economicamente com populações excluídas da economia formal (RODRIGUES e DURIGAN, 2007). O cultivo de Palmeira Real da Austrália como alternativa para extração de palmito favoreceu a economia de diversas regiões, como norte e sul do país. Uma vez que este tipo de lavoura se adapta melhor ao clima tropical ou subtropical, as lavouras são preferidas por agricultores menos capitalizados, em amplitude maior de localidades do Centro – Sul do país.

Devido ao incentivo produtivo, atualmente a economia do palmito é relevante em caráter nacional, mesmo que com valor monetário inferior às principais commodities do agronegócio (soja, milho, café), porém superiores a diversas frutas como abacate, figo e pêra (SIDRA, 2006). Seu cultivo está difundido nos estados de Santa Catarina (SC), Paraná (PR), Rio de Janeiro (RJ) e Espírito Santo (ES), nos municípios de região litorânea ou serrana onde ocorrem temperaturas mais baixas, gerando renda e crescimento para estas regiões. O estado de SC é o maior produtor de Palmeira Real da Austrália, com uma área plantada de 1500 ha, ainda que 12% desta área representa palmito de pupunha (RODRIGUES e DURIGAN, 2007).

No RS, a atividade extrativista iniciou a ser desenvolvida, já que o clima é semelhante ao de SC. Na região do Vale do Rio Pardo, a produção de palmito em conserva tornou-se uma alternativa para o desenvolvimento da região, por meio da formação de cooperativa de produtores de Palmeira Real da Austrália (RODRIGUES e DURIGAN, 2007). O produto gerado atende o mercado próximo da região, auxiliando diversas famílias a aumentar suas rendas. Entretanto, o processo de palmito em conserva gera um montante de resíduos e hoje ele é depositado no local de colheita, a fim de serem incorporados com matéria-orgânica. Ainda que a prática na empresa beneficiadora estudada neste trabalho seja esta, trabalhos vêm sendo realizados para propor reaproveitamento de tais resíduos. A valorização dos mesmos pode representar ganhos econômicos e ambientais para os produtores, uma vez que o acúmulo torna-se um passivo ambiental.

Entre os trabalhos desenvolvidos para a valorização do resíduo estão: a aplicação das bainhas medianas da palmeira para produção de enzimas hidrolíticas por fungos do gênero

Polyporus (ISRAEL, 2005) usadas tanto em indústrias de alimentos e bebidas quanto indústrias têxteis e de produtos de limpeza. Trabalhos também indicam o uso dos resíduos para a obtenção de produtos alimentícios (VIEIRA, 2006) (biscoitos fibrosos), os resíduos utilizados como substratos no cultivo de fungos das espécies *Pycnoporus sanguineus* (BORDERES, 2006) e *Lentinula edodes* (TONINI, 2004) usados para fins comestíveis biorremediação ou tratamento de efluentes. Entretanto, nenhum destes trabalhos aborda o processo de extração de celulose como alternativa para a valorização dos resíduos.

Alguns subprodutos da agroindústria historicamente já se transformaram em produto com elevado valor agregado, abrindo caminho para a exploração auto-sustentável e ecológica, como casca do coco para geração de fibras (SANTIAGO e SALVAM, 2007; ROCHA et al., 2010). Do processo de beneficiamento do arroz tem-se como resíduo a casca de arroz, que possui alto poder calorífico e custo praticamente nulo, logo, vem sendo usada como biomassa usada nas caldeiras para geração de calor e de vapor. Os resíduos do arroz são apropriados para reações de combustão, pirólise e gaseificação (LEITÃO et al., 2010)

Estudos têm sido realizados pela Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária (FEPAGRO) com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) em parceria com empresa de pequeno porte, privada, cuja atividade é a produção de palmito em conserva. Os trabalhos citam o aproveitamento dos resíduos gerados na extração de palmito de plantas nativas e exóticas a partir da formação de diferentes subprodutos. Uma das pesquisas indicou a possibilidade de obtenção de inulina a partir das bainhas da Palmeira Real da Austrália. O procedimento proposto na referida pesquisa de produção de inulina tem caráter de inovação, visto que na Europa esta é obtida da raiz da chicória. O método proposto para geração de inulina é inovador e ainda se encontra em estudo, mas em 2008 deu origem a uma patente.

A inulina é um nutriente funcional, composto por frutose, e considerado uma fibra alimentar solúvel (PI 0606063-3, 2008). Mesmo após a produção da inulina, processo que se encontra em desenvolvimento tecnológico, visto que ela está presente no meio líquido ácido, e necessita tratamento de purificação, ainda resta material vegetal como subproduto desta reação. Tal subproduto tem potencial para gerar polpa celulósica visto que contém fibras. Assim, surge a questão: seria possível a realizar a valorização do resíduo da extração de inulina para produção de celulose empregando as mesmas operações do processo da inulina e

processo de extração alcalina? Desta forma, as bainhas da Palmeira Real da Austrália, que são os resíduos do beneficiamento do palmito poderiam gerar pelo menos dois produtos com valor agregado, em primeiro plano a inulina e em segundo plano a polpa de celulose. Para responder estas questões faz-se necessário identificar as propriedades vegetais da bainha da Palmeira Real da Austrália e compreender as operações de produção de inulina deste resíduo. A compreensão do processo de produção de inulina passa a ser importante visto que o seu resíduo se configura em matéria-prima para obtenção de celulose.

Partindo-se da premissa de que o resíduo da produção de inulina de bainhas da Palmeira Real da Austrália possa servir de fonte para obtenção de polpa de celulose, bem como o resíduo *in natura*, o objetivo deste trabalho é analisar o processo produtivo de unidade industrial beneficiadora de palmito em conserva para determinação das variáveis que influenciam as operações de valorização de seus resíduos.

Entende-se como limitação deste trabalho sua aplicação ao estudo de um único processo. Justifica-se tal decisão pelo fato de se tratar de um estudo exploratório sobre a obtenção de celulose de resíduos e pelo fato de que o gestor da empresa tem especial interesse no estudo de aproveitamento do resíduo tanto para obtenção de inulina (a empresa é detentora da patente de extração da mesma) quanto para obtenção de celulose.

O trabalho está dividido em cinco seções. Primeiramente é apresentada a introdução ao tema de estudo. A segunda seção apresenta uma revisão teórica sobre as características da Palmeira-Real que é a fonte vegetal para a produção de palmito em conserva neste estudo; a caracterização dos resíduos do processo e abordagens sobre extração alcalina de celulose de diversas fontes vegetais. Na terceira seção é apresentada a descrição do método de pesquisa que foi desenvolvido neste estudo permitindo a análise dos resultados. Na quarta seção são apresentados: o mapeamento do processo aplicado na empresa alvo do estudo, o cenário produtivo proposto para a valorização dos resíduos em paralelo com as atividades desenvolvidas na empresa e a obtenção de inulina, os testes de extração propostos e as diferenças entre as polpas obtidas diante das diferentes condições de processo. Por fim é feita a proposição de testes de extração considerando condições distintas de processo a partir das variáveis controláveis. Na quinta seção, são apresentadas as considerações finais sobre o estudo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A mata Atlântica abriga nove gêneros e trinta e nove espécies de palmeiras. O gênero *Euterpe*, família *Palmae*, constitui a palmeira mais usada para a exploração de palmito no Brasil. Na atividade extrativista do palmito no Brasil, predominam as espécies nativas conhecidas como Palmeira Juçara (*Euterpe edulis Mart.*) e a Palmeira Açai (*Euterpe oleracea Mart.*), que são plantas perenes e de grande porte pertencentes à Mata Atlântica ou Floresta Amazônica (BOVI, 1998; VIEIRA, 2006).

O produto oferecido pela palmeira Juçara apresenta boa qualidade, entretanto desde a década de 1970, vem aumentando o interesse em outras espécies além da Juçara (*Euterpe edulis Mart.*) e do Açai (*Euterpe oleracea*) como uma alternativa para a produção de palmito em conserva. Plantas da família *Palmae* do gênero *Archontophoenix spp.* vêm ganhando destaque com alternativa à extração de espécies nativas. Este gênero engloba as espécies de palmeiras originárias do leste da Austrália, que no Brasil são comumente chamadas de Palmeira Real da Austrália, sendo que existem seis espécies distintas da planta, embora as de maior interesse para a extração do palmito são a *Archontophoenix alexandrae* e a *Archontophoenix cunninghamiana* (BOVI et al., 2003; RAMOS e HECK, 2003).

2.1. PALMEIRA REAL DA AUSTRÁLIA (*ARCHONTOPHOENIX ALEXANDRAE*)

A constante e crescente necessidade de suprir matéria-prima para as indústrias de palmito em conserva no mercado nacional e internacional, despertou interesse para o cultivo da Palmeira Real da Austrália (*Archontophoenix alexandrae*). Ela representa importante alternativa agroecológica para diversificação vegetal e geração de fonte de renda para sistemas produtivos em diversas regiões do país, pois gera palmito de boa qualidade em curto prazo, a partir da busca por plantas nativas (SANTOS et al., 2003; RODRIGUEZ JÚNIOR, 2005). As espécies desta planta são palmáceas amplamente cultivadas em todos os trópicos e subtropicais como plantas ornamentais. Seu rápido crescimento, resistência a diversas doenças, adaptação a diversos tipos de solos e a qualidade do palmito gerado impulsionaram a expansão desta cultura (UZZO et al., 2004; RODRIGUEZ JÚNIOR, 2005).

O clima favorável para o cultivo da espécie pode ser tropical ou subtropical, quente e úmido; temperatura média anual propícia entre 20 e 22°C, não tolerando a ocorrência de

geadas. Obedecendo as condições climáticas favoráveis, o cultivo voltado para a produção de palmito foi desenvolvido primeiramente na região litorânea de Santa Catarina (RAMOS e HECK, 2001). Segundo Bovi (1998) a espécie se adapta facilmente às áreas planas ou onduladas e distintos tipos de solos. O florescimento inicia-se no outono, enquanto a formação do fruto até a maturação ocorre do outono ao verão.

No cultivo da Palmeira Real da Austrália, a extração do palmito inicia-se a partir de dois anos após o plantio, desde que plantadas em regiões aptas e com adubação adequada (BOVI et al., 2001), enquanto as espécies tradicionais levam de oito a doze anos para formar o palmito (UZZO et al., 2004). Entretanto, a alta produtividade da Palmeira Real da Austrália conduz à geração de grande quantidade de resíduo vegetal do processamento. O processo de extração do palmito exige o corte da palmeira, pois somente uma pequena parte interna do caule é utilizada para comercialização e consumo alimentício (BORDERES, 2006). Assim, a valorização do resíduo gerado apresenta-se como uma alternativa atraente para gerar desenvolvimento nos negócios do setor alinhado com conceitos de sustentabilidade, como princípios de não geração de resíduos (PAULI, 1996; McDONOUGH e BRAUNGART, 2002).

A parte do caule da Palmeira Real da Austrália que fornece o palmito é constituída por três camadas (bainhas): externa, mediana e o coração do palmito. A camada externa que envolve o palmito é fibrosa e tem por função proteger as folhas que estão em formação. São de cor esverdeada ou marrom e não são utilizadas na industrialização do palmito. Representa de 25 a 35% do seu peso seco, dependendo da espécie de palmito. A segunda camada de cor mais clara e que apresenta de 25 a 30%, é a bainha mediana ou semifibrosa. Esta camada é usada para proteger o palmito no transporte até a industrialização e, também, não é utilizada, sendo descartada no início do beneficiamento. Por fim, encontra-se o miolo, também denominado coração do palmito, que contém baixo teor de fibras. Esta parte é que produz o palmito em conserva (LIMA e MARCONDES, 2005). O palmito pode ser definido como o produto comestível, de formato cilíndrico, macio e tenro, extraído da extremidade superior do estipe e bainhas foliares de certas palmeiras (BOVI, 1998). A retirada do palmito das áreas de cultivo se dá pelo corte total da palmeira (ISRAEL, 2005). As duas primeiras camadas têm potencial para servir de fonte para celulose, por serem fibrosas.

2.2. RESÍDUOS

Os resíduos de matérias vegetais, podem ser considerados uma fonte abundante e renovável de produtos naturais. A biomassa característica das plantas constitui-se essencialmente de lignina, hemicelulose e celulose (RAJARATHNAM et al.,1992). A grande quantidade destes materiais na biomassa tem inspirado muitos pesquisadores, biotecnologistas e engenheiros a desenvolver processos para sua utilização. Grandes quantidades de um determinado resíduo agrícola, concentrados em uma única região, podem justificar seu emprego como matéria prima para obtenção de outros produtos (VIEIRA, 2006).

Somente o resíduo gerado na indústria de palmito produz muitas toneladas em termos de bainhas medianas e externas, materiais que até o momento, são descartados do processo industrial. A prática usual para estes resíduos é o depósito no local de colheita, a fim de serem incorporados com matéria-orgânica, porém como se trata de um material rico em fibras, sua degradação é lenta, tornando-se um passivo ambiental. O resíduo gerado na área de processamento, não apresenta também aplicação prática, sendo que na área industrial de preparação do palmito em conserva, chega o palmito revestido das bainhas, com peso médio de 5 kg, do qual aproximadamente 95% é resíduo. Como alternativas de valorização das partes não reaproveitáveis das palmáceas cultivadas para a produção de palmito, se incluem o reaproveitamento para extração de açúcares e celulose.

A viabilidade técnica se relaciona com o fato de que o material destinado a resíduo no processo de extração do palmito é fibroso e rico em celulose e hemicelulose. Trabalhos apontam para o uso destes resíduos agroindustriais como substratos para plantas (ROSA et al., 2002, FERMINO et al., 2010) e substratos para cultivo de fungos (ISRAEL, 2005; BORDERES, 2006).

2.3. PROCESSOS ALCALINOS DE EXTRAÇÃO DE CELULOSE

Os processos de extração de celulose em meio alcalino são os mais flexíveis para o tratamento de diferentes matérias-primas, desde madeiras como eucalipto e pinus, até resíduos vegetais lignocelulósicos (EPA, 1995, SIXTA, 2006). Os dois processos comumente utilizados nas indústrias são a soda e kraft, sendo que o kraft difere do anterior pelo uso de sulfeto de sódio (Na_2S) no licor de cozimento (solução aquosa que contém os reagentes que atuam no polpamento, isto é, na deslignificação) por este atuar como agente deslignificante.

Entretanto, a adição de Na_2S no licor provoca a liberação de compostos reduzidos de enxofre na atmosfera, promovendo problemas odoríferos (GOMIDE et al., 1987; D'ALMEIDA, 1988). Como alternativa ao uso de compostos de enxofre, é proposto o uso de aditivos de processo que auxiliem na etapa de deslignificação, os quais são consumidos no processo de polpeamento, sem risco de toxicidade e geração de efluentes indesejáveis (SOUZA et al., 2008).

Os reagentes e as condições de processo são determinadas visando promover a remoção da lignina sem a degradação excessiva das fibras de celulose, já que determinam o rendimento e qualidade da polpa. As variáveis associadas com a operação de deslignificação são: temperatura de cozimento; tempo de cozimento; relação licor/material utilizado para polpeamento; concentração do licor de cozimento. A concentração do agente químico ativo no licor de cozimento é a variável mais importante que afeta a taxa da reação, pois o aumento desta propicia ao aumento na velocidade da reação (D'ALMEIDA, 1988). Os licores são preparados em tanques que suprem os digestores, onde ocorre a deslignificação do material vegetal rico em celulose.

Estudos realizados com cavacos de madeira de eucalipto indicam que o uso de aditivos como a antraquinona (AQ) no licor de cozimento destes processos mostra-se uma alternativa favorável para aumentar rendimento, favorecendo a deslignificação e preservando a celulose, uma vez que a carga alcalina pode ser reduzida (SILVA JÚNIOR, 1997; JERÔNIMO, 1997; JERÔNIMO et al., 2000; BASSA e SACON, 2002; SANTOS E SANSÍGOLO, 2002). Aplicação dos processos alcalinos soda e kraft para cavacos de madeira de pinus também indicaram os efeitos positivos em relação ao maior teor de deslignificação quando adicionada a antraquinona, considerando mesma carga alcalina (FRAGA et al., 2002; VASCONCELLOS, 2005).

Nos processos de extração alcalina, as concentrações de AQ utilizadas variaram entre 0,05 e 1% em relação à matéria seca (JERÔNIMO et al., 2000; BASSA e SACON, 2002; SANTOS e SANSÍGOLO, 2002; KHRISTOVA et al., 2004; KHIARI et al., 2009; RODRÍGUES et al., 2010), enquanto para de carga alcalina (álcali ativo) representada por NaOH as concentrações estão entre 15 e 29% em relação à matéria seca a ser polpeada (SILVA JÚNIOR, 1997; SANTOS SANSÍGOLO, 2002; KHRISTOVA et al., 2004; VASCONCELOS, 2005; KHIARI et al., 2009). Estes autores empregaram temperaturas de

cozimento de 170°C para um tempo de cozimento que pode variar de 45 a 120 minutos. A relação licor/material utilizada para madeira é de 4:1 ou 5:1, entretanto, para materiais mais volumosos com densidade menor esta relação pode ser alterada para valores maiores (D'ALMEIDA, 1988).

O processo alcalino de extração de celulose foi testado para vários resíduos com o intuito de caracterização da polpa e aplicabilidade da mesma. Entre os resíduos utilizados se incluem raque da Tamareira (KHRISTOVA et al., 2004; KHIARI et al., 2009), palha de arroz (RODRÍGUES et al., 2010), palha de trigo (DENIZ et al., 2003), bagaço de cana de açúcar (KHRISTOVA et al., 2005). Os estudos apontam diferenças na qualidade da polpa de acordo com as condições de processo, que envolvem concentração de carga alcalina, uso de aditivos e tempo de polpeamento na temperatura estipulada para o polpeamento.

As principais operações de extração de celulose em relação ao processo alcalino envolvem a preparação do licor de cozimento, que é enviado ao digestor onde está o material a ser polpeado, aquecimento do digestor e posterior liberação de gases. O material que deixa o digestor é lavado, e o licor resultante é reaproveitado para futuros licores de cozimento e queima de material rico em lignina nas caldeiras de geração de vapor (SMOOK, 1982; SOUZA et al., 2008).

3. MÉTODO

Este artigo faz parte de uma pesquisa de natureza aplicada, envolvendo procedimentos experimentais e fins exploratórios sobre obtenção de celulose a partir de resíduos. A pesquisa aplicada visa gerar conhecimentos para aplicação prática dirigidos à solução de problemas específicos (GIL, 2008). A etapa da pesquisa que consiste no escopo deste artigo teve como problema: seria possível realizar a valorização do resíduo da extração de inulina para produção de celulose empregando as mesmas operações e variáveis do processo de extração da inulina? A investigação deste problema foi abordada de forma qualitativa, tendo como fontes de evidência: entrevistas, observação, levantamento de informações documentais e da literatura. A pesquisa qualitativa considera a interpretação dos fenômenos e a atribuição de significados aos mesmos, ao passo que não requer o uso de métodos e técnicas estatísticas. O ambiente natural é a fonte direta para coleta de dados, onde os pesquisadores tendem a

analisar os dados indutivamente. O processo e seu significado são os focos principais de abordagem (SILVA e MENEZES, 2005).

Para a operacionalização deste trabalho foram necessárias as seguintes etapas:

i) definição, por conveniência, da empresa alvo do estudo, beneficiadora de materiais vegetais;

ii) identificação do resíduo vegetal relacionado com a atividade fim da empresa escolhida, que beneficia o palmito da Palmeira Real da Austrália;

iii) levantamento de informações na literatura a respeito do vegetal Palmeira Real da Austrália (*Archontophoenix alexandrae*) e sobre os resíduos resultantes da atividade de fabricação de palmito em conserva e descartados na empresa;

iv) levantamento dos referenciais teóricos sobre extração de celulose a partir de madeira e outras fontes. As variáveis de processo foram identificadas como referência para a proposição de método extrativo voltado para resíduos;

v) mapeamento do processo de fabricação de palmito em conserva vigente na empresa, a fim de se identificar o potencial de valorização dos resíduos gerados e o destino dado para estes atualmente na empresa. O mapeamento foi realizado através da coleta de dados com o proprietário do negócio, por ter visão global do processo, visitas orientadas e observação do processo no local. O roteiro usado nas entrevistas encontra-se no Apêndice 1, enquanto no Apêndice 2 estão os registros fotográficos do local;

vi) nesta etapa, além do mapeamento e observações no processo produtivo foi consultada a patente de extração de inulina PI 0606063-3 A, do ano de 2008. Do resíduo da bainha da palmeira é extraída, por hidrólise ácida a inulina que fica no licor e resta o material vegetal da bainha. As operações do processo de extração da inulina foram mapeadas e serviram de cenário para extração de celulose do material vegetal resultante da obtenção de inulina;

vii) realização de testes preliminares de extração de celulose a partir do material vegetal do processo de obtenção de inulina, além do material vegetal destinado a resíduo no beneficiamento do palmito. Os materiais vegetais foram tratados com hidróxido de sódio (NaOH), segundo concentrações indicadas na etapa (iv), e submetidas à extração nas instalações do processo de beneficiamento do palmito.

viii) as amostras obtidas pelo polpamento da etapa (vii) foram submetidas a análise da coloração e do teor de deslignificação ou lignina residual na polpa, a partir da análise do número kappa (ABNT, 2005) e

ix) análises finais, após realização dos testes preliminares em campo foi possível identificar diferenças nas características da polpa obtida. Estes resultados serviram de fonte para futuro delineamento experimental, que não faz parte do escopo deste artigo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A empresa escolhida para a realização deste estudo foi definida por conveniência, visto haver disposição do proprietário em relação à busca de alternativas para seu negócio com ênfase na sustentabilidade. A empresa já é detentora de patente de extração de inulina a partir de resíduo da bainha (PI 0606063-3, 2008) e a celulose surgiu como nova oportunidade de negócio. O proprietário também demonstrou disposição para ajustar seu processo produtivo às exigências da sustentabilidade, que são premissas desta pesquisa.

A empresa tem seu negócio voltado ao beneficiamento de palmito para produção de conservas, por isso conta com uma Cooperativa formada por 170 famílias no RS responsáveis por 60 ha de cultivo de Palmeira Real da Austrália para fornecer matéria-prima para a comercialização. A empresa alvo localiza-se no município de Vale do Sol, região do Vale do Rio Pardo. Nas localidades de Candelária, Vale do Sol, Santa Cruz do Sul, Montenegro, Osório, Maquiné, Praia do Pinhal e Torres estão as áreas destinadas para plantação de palmeira. Na unidade industrial a área é de 4 ha de terras destinadas às instalações. A empresa funciona de segunda a sexta-feira, das 7:15 às 11:30h e das 13:00 às 17:30h. Seu quadro funcional é composto por dez encarregados de produção e três sócios que administram o negócio e auxiliam eventualmente a mão-de-obra.

A matéria-prima que chega na empresa é composta apenas das bainhas, sendo que as folhas e o estipe da planta permanecem no campo, onde a palmeira é cultivada (estes resíduos não foram considerados no escopo deste estudo). As bainhas ficam armazenadas em galpão até que sejam descascadas para obtenção do palmito. Nesta etapa foi confirmada a possibilidade de valorização de resíduos, uma vez observado o alto volume de resíduo gerado proveniente do descascamento. As bainhas externas ao palmito tornam-se passivo ambiental, já que são deixadas no campo da empresa beneficiadora. Por esta razão, outros trabalhos realizados por pesquisadores da FEPAGRO nesta mesma unidade fabril, identificaram oportunidade das

bainhas da Palmeira Real da Austrália para geração de inulina através de reação de hidrólise ácida. O estudo gerou a Patente 0606063-3, que estimulou a empresa a investir na valorização de seus resíduos. A fonte vegetal alvo deste estudo são as bainhas medianas da Palmeira Real da Austrália que envolvem o palmito. Este material é rico em fibras, como comentado na literatura. Além disso, 95% do peso do material que chega à empresa beneficiadora de palmito é destinado a resíduo.

Na etapa de estudo de processos de extração de celulose, foram identificados os processos comumente utilizados nas indústrias, indicando que processos alcalinos são os mais flexíveis às distintas fontes vegetais. Ainda, foram identificadas que as variáveis, temperatura, tempo de polpamento, concentração de álcali ativo, expresso como concentração de NaOH, e concentração de aditivos no licor de cozimento foram as variáveis que influenciam na qualidade da polpa. A tabela 2 mostra as condições trazidas na literatura pesquisada.

Tabela 2 – Condições de cozimento para a curva de cozimento

Parâmetros	Condições	Autores
Álcali ativo (como NaOH), %	15-29*	D'Almeida, 1988; Silva Júnior, 1997; Santos e Sansígolo, 2002; Khristova et al, 2004; Vasconcelos, 2005 e Khiari et al., 2009
Relação licor/madeira, Litros/kg	4 a 5	
Temperatura máxima, °C	170	
Tempo de cozimento, minutos	45 a 120	
Carga de antraquinona, %	0,05 a 1*	Jerônimo et al, 2000; Bassa e Sacon, 2002; Santos e Sansígolo, 2002; Khristova et al, 2004; Khiari et al., 2009 e Rodrigues et al., 2010.

* Relação massa seca

O estudo foi realizado acompanhando a produção de palmito em conserva nas condições atuais que envolvem: transporte das bainhas da Palmeira Real da Austrália vindas do interior do RS, descascamento e corte do palmito com geração de resíduos, lavagem e envase do palmito, tratamento térmico do material, rotulagem e estocagem para posterior venda. Para mapeamento do processo foram coletados dados a partir de entrevista com o proprietário da empresa beneficiadora ao longo de visitas ao local, utilizando questionário do Apêndice 1. No total foram realizadas três visitas no período de junho a novembro de 2010. O processo foi observado para fins de mapeamento, e registros fotográficos estão apresentados no Apêndice 2. Na figura 1 é está apresentado o mapeamento do processo de beneficiamento

de palmito. O processo é composto por 12 etapas, além do descarte do resíduo. As etapas são brevemente descritas de modo a ilustrar a seqüência do processo e tecnologia empregada.

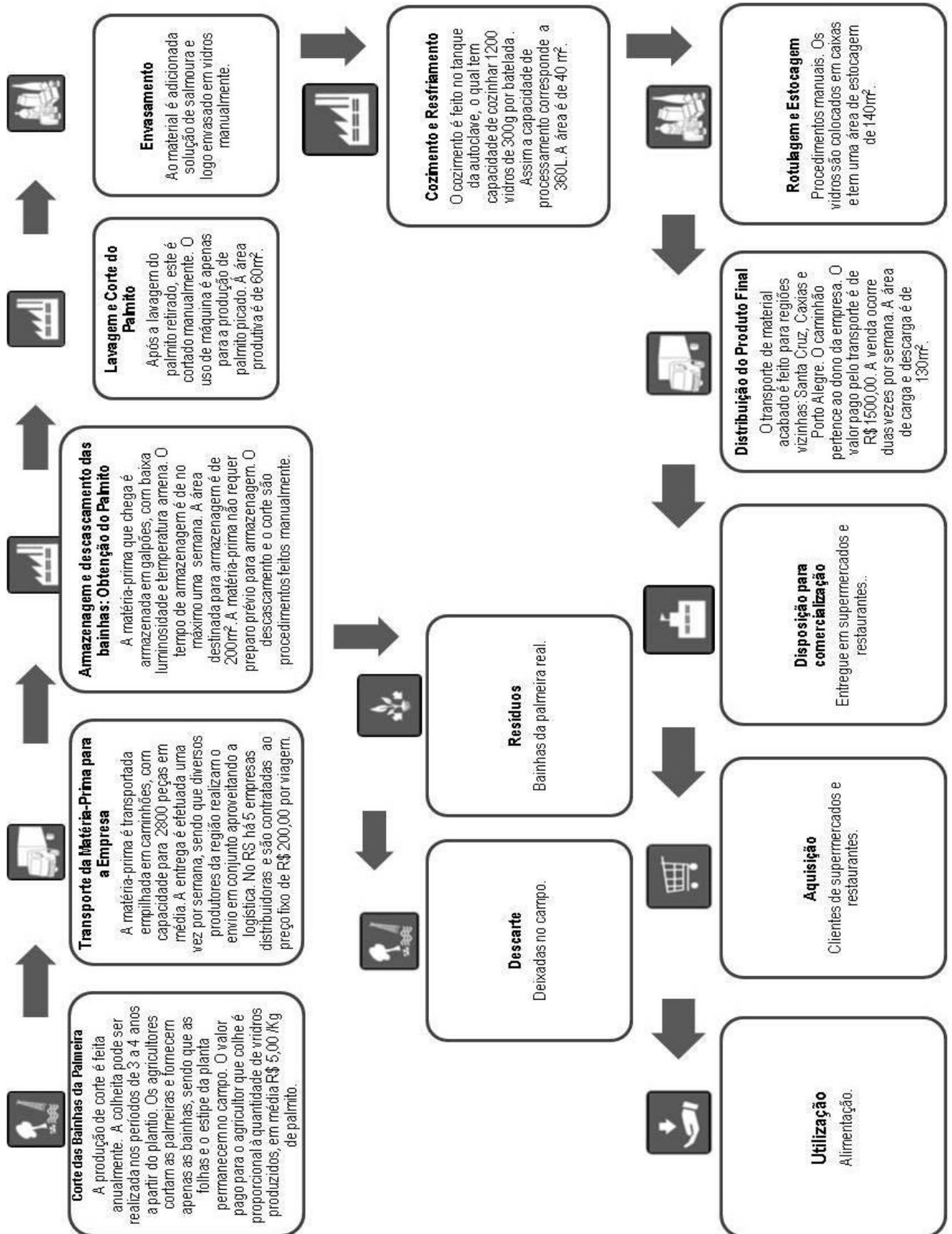


Figura 1: Etapas de beneficiamento de palmito em conserva

Na etapa de Cozimento e Resfriamento mostrada na figura 1, cabe ressaltar que após o preparo das conservas, o cozimento é feito no tanque da autoclave, o qual tem capacidade de autoclavar 1200 vidros de 300 g por batelada. Para suprir a demanda de vapor para cozimento, a empresa tem caldeira categoria B com capacidade de geração de calor de 163840Kcal/h e a água é tratada pela prefeitura do município do Vale do Sol.

No decorrer do estudo foram identificadas fraquezas e potencial de empregar melhorias no processo existente, porém estas não entrarão no escopo deste trabalho, podendo ser alvo para estudos futuros. A valorização do resíduo dentro do processo de fabricação de palmito em conserva, proposta nesta pesquisa, contemplou dois possíveis cenários: apenas extração de celulose, diretamente do resíduo (cenário 1- figura 2) e a geração de inulina e posterior extração de celulose (cenário 2- figura 3). Para a construção do caminho 2, após produção de inulina, foi necessário inserir etapas de neutralização e secagem, visto que o resíduo é submetido a hidrólise acida e portanto, precisa ser seco e neutralizado antes da adição do álcali para a extração da celulose. Para a etapa de secagem propriamente, não existe nenhum tipo de equipamento disponível na instalação industrial, sendo que estes deveriam ser incorporados ao processo. Para a trituração da matéria vegetal, entretanto, contou-se com um triturador com motor movido a óleo diesel.

Após mapeamento do processo, identificação de equipamentos e oportunidades de valorização do resíduo, foi possível propor cenários de aproveitamento do resíduo, integrados com o processo existente. A partir de pesquisa literária dos processos de extração e suas variáveis controláveis, foi possível propor os processos integrados de valorização, contemplando a obtenção de celulose sem obtenção de inulina ou com obtenção de inulina. A figura 2 e a figura 3 mostram estes cenários, respectivamente.

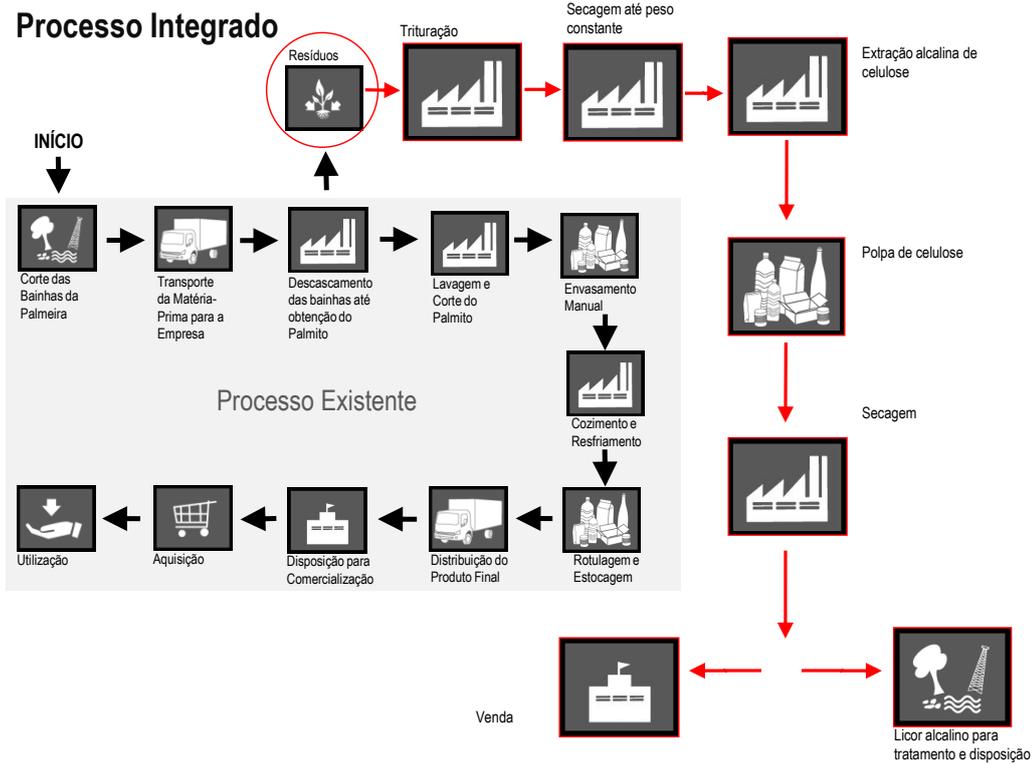


Figura 2: Processo integrado de valorização do resíduo por extração alcalina (cenário 1)

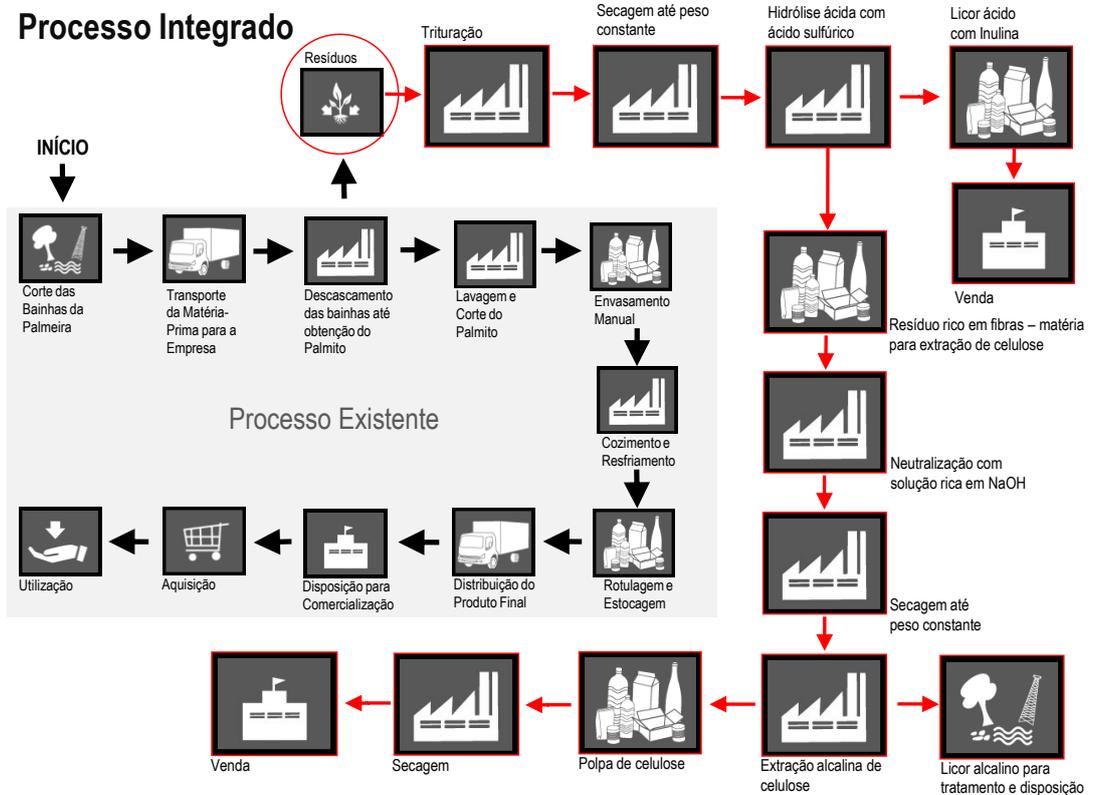


Figura 3: Processo integrado de valorização do resíduo com hidrólise ácida e extração alcalina (cenário 2)

Uma vez propostos os cenários de valorização, foi feita a análise da capacidade de processamento de polpa, considerando a produção de resíduos conforme a produção de palmito em conserva. Considerando que na Cooperativa existem 170 famílias responsáveis por 60 ha de cultivo de Palmeira Real da Austrália, para fornecer matéria-prima para a fábrica de palmito em conserva, e que em cada hectare são plantadas em média 15000 palmeiras, foi informado que anualmente são cortadas 5000 palmeiras por hectare. Assim, 300000 plantas por ano são cortadas para gerar as bainhas que servirão para a retirada do palmito.

O corte é feito a partir de plantas de aproximadamente 3 metros, sendo que o caule e bainhas e folhas pesam aproximadamente 20 kg. Entretanto, apenas as bainhas são transportadas e chegam à unidade fabril. A partir da massa das bainhas, pode se calcular a quantidade de material destinado a resíduo. Através de serviço terceirizado realizado no laboratório de Central Analítica da Universidade de Santa Cruz (UNISC) foram realizados ensaios para determinação de umidade das bainhas da Palmeira Real da Austrália, as quais foram coletadas em novembro de 2010 nos arredores da empresa alvo deste estudo.

As bainhas foram trituradas no local de coleta e enviadas no mesmo dia ao laboratório. Cada amostra foi composta por três bainhas de palmeiras distintas, as quais foram trituradas e misturadas para formar uma amostra representativa. A média de três repetições de cada amostra indicou o teor de umidade. Foram determinadas as umidades de três amostras como mostrado na tabela 2.

Tabela 2: Determinação da umidade das amostras de bainhas da Palmeira Real da Austrália

<i>Amostra</i>	<i>Umidade (g/100g)</i>
Amostra 1	82,08
Amostra 2	82,90
Amostra 3	79,83

A média dos três valores de umidade indicou um valor de umidade de 81,60 g/100g. De posse destes valores, na tabela tem se a quantidade de palmito extraído e resíduo gerado por planta, conforme mostrado na tabela 3.

Tabela 3: Determinação da massa de resíduos gerados para beneficiamento do palmito extraído da Palmeira Real da Austrália

<i>Componente</i>	<i>Peso (kg)</i>
Bainha (81,60g/100g umidade)	5
Palmito extraído	0,5
Resíduo sem umidade	0,828

Conforme dados para resíduo livre de umidade, a quantidade total gerada anualmente pelas 300000 palmeiras é de cerca de 248400 kg.

Amostras de resíduos foram submetidas ao processo de hidrólise ácida conforme condições descritas na Patente (PI 0606063-3, 2008), e a testes de extração alcalina dentro das condições de processo visualizadas nas instalações da fábrica de palmito em conserva e com incremento da etapa de secagem. O processo de extração proposto deveria atender às restrições impostas pelas instalações, que apresentavam limitações quanto ao uso de altas temperaturas, controle de emissões atmosféricas e tratamento de efluentes, já que o processo de fabricação de palmito em conserva por si só não gera efluentes e emissões que precisem de tratamento.

O primeiro processo (1) foi o de hidrólise ácida, o qual manteve as condições apresentadas na patente. Os processos (2) e (3) contemplaram apenas extração alcalina ou extração alcalina seguida de hidrólise respectivamente. Nestes dois últimos foram utilizadas a concentração de carga alcalina definida de acordo com o levantamento bibliográfico mostrado na Tabela 2, porém não foram usados aditivos de processo. A relação licor/material ficou em 10:1, pois o material é volumoso e precisa ser totalmente recoberto com solução. Todos os experimentos foram realizados à temperatura máxima admitida nos equipamentos de 127°C e pressão de 1,5 atm. Na Tabela 4 são mostradas as condições experimentais dos três testes.

Tabela 4: Condições experimentais para testes de hidrólise ácida e de extração alcalina dos resíduos gerados no beneficiamento do palmito extraído da Palmeira Real da Austrália

Experimento	Massa seca (g)	Concentração reagente	Relação licor: material	Tempo na temperatura definida (min)
(1) Hidrólise ácida	100	3% v/v de H ₂ SO ₄	10:1	30
(2) Extração Alcalina	50	20% m/m de NaOH	10:1	60
(3) Extração alcalina pós hidrólise ácida	50	20% m/m de NaOH	10:1	60

Todas as polpas obtidas foram levadas a uma estufa Biomatic na temperatura de 68°C para secagem e permaneceram 24 horas até atingir peso constante. A reação de hidrólise ácida apresentou rendimento de 54%, e a extração alcalina de 50% depois da etapa de secagem, sendo que o processamento do material nas duas etapas teve rendimento de 27%.

A figura 4 apresenta as polpas obtidas pelo processo de hidrólise ácida e extração alcalina respectivamente.



Figura 4: Material após tratamento de hidrólise ácida (a) e material após extração alcalina (b)

No licor ácido está presente a inulina, que até o momento presente deverá ser submetida a estudos de purificação e posterior venda. Assim, para o montante de 248400 kg, tem-se 134136kg de material residual restante, já que o produto de interesse descrito na patente é a inulina, que ainda não possui produtores em nível nacional.

Este subproduto da hidrólise ácida foi então neutralizado com solução de NaOH até pH neutro, a seguir foi destinado à extração alcalina, a qual apresentou rendimento de 50%, gerando 67068 kg de polpa de celulose. Logo, o rendimento do processo considerando os dois tratamentos do material vegetal é de 27%.

Se o montante de 248400 kg de resíduos gerados na etapa de descascamento até obtenção de palmito fosse submetido diretamente ao processo de extração alcalina, considerando o rendimento de 50%, a geração de polpa é de 124200Kg. De posse destes dois resultados, verificam-se os rendimentos em polpa de 27 ou 50%, no entanto, mesmo com

rendimento inferior de polpa, ao se aplicar a reação de hidrólise ácida é possível a obtenção de inulina.

Na etapa seguinte aos testes, as polpas obtidas foram analisadas em laboratório terceirizado a fim de se comparar o teor de deslignificação apresentado pelas mesmas, medido pelo número kappa (ABNT, 2005). O laboratório contatado está em empresa gaúcha produtora de polpa de celulose por processo ácido. Os resultados de número kappa são mostrados na tabela 5. As amostras estão numeradas de acordo com os testes (1,2 e 3) da tabela 5.

Tabela 5: Determinação do número kappa das amostras segundo experimentos de hidrólise ácida e de extração alcalina

<i>Amostras referentes aos testes</i>	<i>Número Kappa</i>
Amostra 1	50,45
Amostra 2	55,45
Amostra 3	28,15

Com base nas diferenças observadas para as polpas obtidas nos três testes realizados, e com o intuito de obtenção de polpa de celulose para fins comerciais, é provável que testes com diferentes condições de processamento indiquem resultados distintos para qualidade da polpa segundo o teor de deslignificação. Segundo a norma NBR 302:2005 da ABNT o número kappa indica o teor de lignina residual ou capacidade de branqueamento da pasta celulósica, logo quanto menor for o valor do número kappa obtido, mais facilitada é a etapa de branqueamento da polpa, pois esta já sofreu maior deslignificação. O número kappa para polpa não branqueável esta entre 58 ± 2 , enquanto para polpa branqueável fica entre 28 ± 2 (VASCONCELOS, 2005). Assim, polpas submetidas à hidrólise ácida antes da extração alcalina, são mais adequadas para se obter polpas branqueáveis para fabricação de diversos tipos e papéis, inclusive aos de fins sanitários.

Entre as condições propostas para as variáveis do processo de extração, apenas a variável temperatura ficou limitada em 127°C , por ser a temperatura máxima de operação na autoclave disponível no local. Para compensar tal limitação, o tempo de polpeamento (cozimento) foi maximizado. As concentrações de NaOH e tempo de cozimento poderiam estar no seu limite superior, entretanto, por serem testes experimentais, valores médios foram

utilizados. No momento de realização destes, não foi possível testar o uso de aditivos, por não estarem disponíveis e a compra não ser viável no momento.

Por fim, é proposto que a partir de experimentos com condições distintas das variáveis controláveis, como concentração de carga alcalina, concentração de aditivo de processo (que neste estudo não foi estudada) e tempo através de um projeto de experimentos seja possível obter polpas com qualidade distintas. Os níveis de deslignificação para polpas que sofreram apenas um tratamento (amostras 1 e 2) são elevados, enquanto a amostra que teve dois tratamentos apresentou número kappa adequado para fins de polpas branqueáveis.

A partir da análise das características da qualidade da polpa, indicadas por variáveis de resposta, pode se determinar a influência das variáveis controláveis (tempo de reação, concentração de reagentes no licor) sobre as mesmas através de análises estatísticas.

5. CONCLUSÃO

A valorização de resíduos gerados em um processo produtivo apresenta-se como um meio eficaz de proporcionar o desenvolvimento do mesmo e ainda beneficiar o meio ambiente. Estudos indicam que de acordo com as propriedades dos resíduos, estes podem gerar produtos de alto valor agregado. Frente a isso, o objetivo deste trabalho foi analisar o processo produtivo de unidade industrial beneficiadora de palmito em conserva para determinação das variáveis que influenciam as operações de valorização de seus resíduos.

Neste estudo uma empresa beneficiadora de material vegetal foi selecionada a fim de desenvolver seus negócios com a inserção da valorização dos resíduos vegetais gerados no processo vigente na unidade. A proposição de cenários integrando o processo vigente e os processos de valorização de resíduos foram mostrados após mapeamento da empresa. Para proposição dos mesmos, foram estudados na literatura os processos de extração de celulose comumente empregados industrialmente e condições de operação dos mesmos.

O estudo em campo indicou que resíduos podem ser valorizados por diferentes caminhos processuais, gerando produtos com propriedades distintas. Ainda, foram levantadas limitações nas instalações industriais que afetam no processo, que deverão ser submetidas a estudos visando realizar melhorias e aumentar a eficiência nas operações. Outro resultado obtido remete sobre a possibilidade de testar diferentes condições de extração de celulose do material vegetal, uma vez identificados as variáveis controláveis que podem ter efeito sobre a polpa produzida pelos processos testados.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) pelo fornecimento de bolsa de pesquisa. Também agradecemos à empresa que permitiu a realização deste estudo auxiliando com informações para a pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR ISO 302. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Pasta celulósica - Determinação do número kappa**, 2005.
- BASSA, A.; SACON, V. M. Polpação kraft convencional e modificada para madeiras de *Eucalyptus grandis* e híbrido (*E. grandis* x *E. urophylla*). In: CONGRESSO E EXPOSIÇÃO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 35., 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 2002.
- BORDERES, J. **Produção de *Pycnoporus sanguineus* em resíduos do processamento da palmeira-real-da-australia**. 2006. 9p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Ciências Biológicas) – Fundação Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2006.
- BOVI, M. L. A. Cultivo da palmeira real australiana visando à produção de palmito. Campinas, SP. **Instituto Agrônomo de Campinas – Boletim Técnico**, Campinas, SP, n. 172, abr. 1998.
- BOVI, M. L. A. et al. Adequate timing for heartof-palm harvesting in King palm. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.19, n.2, p.135-139, jun. 2001.
- BOVI, M. L. A. et al. Características físicas e produção de palmito de palmeira real australiana. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE OLERICULTURA, 43, 2003. Recife. **Anais...** Brasília: SOB, 2003, 4p. (CD-ROM).
- BRASIL. Disponível em: < <http://www.brasil.gov.br/sobre/geografia/terra/potencial-de-exploracao.%20Acesso%2004/04/2011>>. Acesso em: 20 fev. 2011.
- CASTRO, M. C. D.; GUEDES, C. A. M. Inovações implementadas pela Embrapa para a promoção do desenvolvimento sustentável do agronegócio e do novo ambiente rural. In: CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO, 6., 2010, Niterói. **Anais...** Niterói: [s.n.], 2010.
- CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA (CEPEA). **Valores do pib do agronegócio brasileiro, 1994 a 2009, em R\$ milhões de 2009**. Disponível em: <http://www.cepea.esalq.usp.br/pib/other/Pib_Cepea_1994_2009.xls>. Acesso em: 20 fev. 2011.
- D'ALMEIDA, M. L. O. **Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica**. 2.ed. São Paulo: SENAI; IPT, 1988. v.1.
- DENIZ, I.; KIRCI, H.; ATES, S. Optimisation of wheat straw *Triticum drum* kraft pulping. **Industrial Crops and Products**, [s.l.], v.19, p.237-243, 2004.

ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY (EPA). **Profile of the pulp and paper industry**: relatório. Disponível em: <<http://www.cluin.org/download/toolkit/pulppasn.pdf>>. Acesso em: 08 maio 2010.

FERMINO, M. H. et al. Aproveitamento dos resíduos da produção de conversa de palmito como substrato para plantas. **Horticultura Brasileira**, Porto Alegre, v.28, p.282-286, 2010.

FRAGA, D. G. et al. Avaliação da polpação soda de *pinus taeda* com adição de antraquinona. In: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE INVESTIGACIÓN EN CELULOSA Y PAPEL, 2., 2002, Campinas. **Anais...** Campinas: [s.n.], 2002.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Porto Alegre, RS). Reinaldo Simões Gonçalves. **Processo de produção por hidrólise ácida a partir da planta de palmeira de inulina e substrato para plantas**. BR n. PI 0606063-3A, 27 dez. 2006, 19 ago. 2008.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6 ed. São Paulo: Atlas, 2008

GOMIDE, J. L.; VIVONE, R. R.; MARQUES, A. R. Utilização do processo soda/antraquinona para produção de celulose branqueável de *Eucalyptus* spp. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ABCP, 20., 1987, São Paulo. **Trabalhos publicados**. São Paulo: [s.n.], 1987. p.35-42.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Produção agrícola municipal 2008**: culturas temporárias e permanentes 2008. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pam/2008/tab2.pdf>>. Acesso em: dez. 2010.

ISRAEL, C.M. **Utilização do resíduo do processamento do palmito para a produção de enzimas hidrolíticas por fungos do gênero *Polyporus***. 2005. 136p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Ambiental) - Fundação Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2005.

JERÔNIMO, L. H. **Adição de antraquinona na polpação alcalina e sua influência na branqueabilidade de celulose de *Eucalyptus saligna* Smith**. 1997. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Florestal) – Área de Tecnologia de Produtos Florestais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1997.

JERÔNIMO, L. H. Adição de antraquinona na polpação alcalina de *Eucalyptus salign*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.10, n.2, p.31-37, 2000.

KHIARI, R. et al. Chemical composition and pulping of date palm rachis and *Posidonia oceanica* – a comparison with other wood and non-wood fibre sources. **Bioresource Technology**, [s.l.], v.101, p.775–780, 2010.

KHRISTOVA, P. et al. Alkaline pulping with additives of date palm rachis and leaves from Sudan. **Bioresource Technology**, [s.l.], v.96, p.79–85, 2005.

LEITÃO, V. F. et al. Biomass residues in Brazil: availability and potential uses. **Waste Biomass Valor**, [s.l.], v.1, p.65-76, 2010.

LIMA, L.R.; MARCONDES, A.A. Farinha de palmito. In: ENCONTRO NACIONAL DE PRODUTORES DE PALMITO DA PALMEIRA-REAL, 3, 2005, Balneário Camboriú. **Anais...** Florianópolis: Abrapalmer; EPAGRI, 2005.

MCDONOUGH, W.; BRAUNGART, M.. DESIGN CHEMISTRY (MBDC). **Remaking the way we make things**: cradle to cradle. New York: North Point Press, 2002.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). **Projeções do agronegócio: Brasil 2009/2010 a 2019/2020**. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/MAIS%20DESTAQUES/Proje%C3%A7%C3%B5es%20Agroneg%C3%B3cio%202009-2010%20a%202019-2020.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2011.

PAULI, G. **Emissão zero**: a busca de novos paradigmas: o que os negócios podem oferecer à sociedade. Tradução José W. M. Kaehler, Maria T. R. Rodriguez. Porto Alegre: EDIPUCRS, 1996.

RAJARATHNAM, S.; SHASHIREKA, M. N.; BANO, Z. Biopotentialites of the basidiomycetes. **Advances in Applied Microbiology**, [s.l.], v.37, p.223-361, 1992.

RAMOS, M. G.; HECK, T. C. Cultivo da Palmeira Real da Austrália para produção de palmito. **Boletim didático**, Florianópolis, n.40. Florianópolis, 2001.

RAMOS, M.G.; HECK, T.C. Cultivo de palmeira-real-da-austrália para produção de palmito. **Boletim Didático**, Florianópolis, n.40, 2.ed., 2003. 32p.

ROCHA, F. B. de A. et al. Gestão de resíduos como ferramenta aplicada ao beneficiamento do coco verde. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 30., 2010, São Carlos, SP. **Anais...** São Carlos: ABEPRO, 2010.

RODRIGUES, A. S.; DURIGAN, M. E. **O agronegócio do palmito no Brasil**. Londrina: IAPAR, 2007. p.133.

RODRÍGUEZ, A. et al. Feasibility of rice straw as a raw material for the production of soda cellulose pulp. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v.18, p.1084-1091, 2010.

RODRIGUES JÚNIOR, O. **PALMEIRA REAL AUSTRALIANA: Viabilidade econômica em propriedades localizadas no sudeste do estado de Minas Gerais**. 2005. 103p. Dissertação (Pós-Graduação em Ciências Contábeis) - Fundação Instituto Capixaba de Pesquisas em Contabilidade, Economia e Finanças (FUCAPE), Vitória, 2005.

ROSA, M. F. et al. Utilização da casca de coco como substrato agrícola. **Documentos**, Fortaleza, p.1677-1915, maio 2002.

SANTIAGO, B. H.; SELVAM, P.V.P. **Tratamento superficial da fibra do coco**: estudo de caso baseado numa alternativa econômica para fabricação de materiais compósitos. Natal: Grupo de Pesquisa em Engenharia de Custos e Processos, Universidade Federal do Rio Norte, 2008.

SANTOS, Á. F. et al. Ocorrência de curvularia senegalensis em pupunheira e palmeira. **Fitopatologia Brasileira**, v.28, n.2, p.204, mar./abr. 2003.

SANTOS, S. R.; SANSÍGOLO, C. A. Deslignificação e resistências de polpas obtidas pelos processos Kraft, Kraft-AQ, Soda-AQ e soda de madeira de Eucalyptus grandis, In: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE INVESTIGAÇÃO EM CELULOSE E PAPEL, 3., 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo: [s.n], 2002.

SCHNEIDER, S. et al. Histórico, caracterização e dinâmica recente do Pronaf. In: SCHNEIDER, S. et al (Org.). **Políticas públicas e participação social no Brasil rural**, Porto Alegre, p. 21-50, 2004.

SILVA JÚNIOR, F. G. **Polpação kraft do eucalipto com adição de antraquinona, polissulfetos e surfactante**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

SILVA, E. L. da; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4.ed. Florianópolis: Editora UFSC, 2005.

SISTEMA IBGE DE RECUPERAÇÃO AUTOMÁTICA (SIDRA). **Produtos da extração vegetal**. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/agric/default.asp?t=3&z=t&o=11&u1=1&u2=1&u3=1&u4=1&u5=1&u6=1>. Acesso em: nov. 2010.

SIXTA, H. **Handbook of pulp**, v.1. Lenzing: Wiley-VCH, 2006.

SMOOK, G.A. **Handbook for pulp and paper technologists**. Atlanta, TAPPI. 1982, 395p.

SOUZA, A. H. C. B. et al. **Guia técnico ambiental da indústria de papel e celulose**. São Paulo: CETESB, 2008.

TEIXEIRA, S. et al. Caracterização da produção agroecológica do sul do Rio Grande do Sul e sua relação com a mecanização agrícola. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, n.1, jan./mar. 2009.

TONINI, R.C.G. **Utilização da bainha mediana de palmito (*Euterpe edulis* Mart. Arecaceae) como substrato para cultivo de *Lentinula edodes* (Beck.) Pegler**. 2004. 125p. Dissertação (Mestrado de Engenharia Ambiental) – Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2004.

UZZO, R. P. et al. Coeficiente de caminhamento entre caracteres vegetativos e de produção de palmito da palmeira-real australiana. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.22, n.1, p.136-142, 2004.

VASCONCELOS, F. S. R. **Avaliação do processo SuperBatch™ de polpação de Pinus taeda**. 2005. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais com opção em Tecnologia de Produtos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

VIEIRA, M.A. **Caracterização de farinhas obtidas dos resíduos da produção de palmito da palmeira-real (*Arcontophoenix alexandrae*) e desenvolvimento de biscoito fibroso**. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

APÊNDICE 1

Roteiro da Entrevista

O objetivo desta entrevista é conhecer as operações envolvidas na preparação de palmito em conserva e equipamentos utilizados. A partir dos dados coletados visa-se a definição do destino e volume de resíduo gerado.

1. Questões gerais – caracterização do entrevistado

- Nome do entrevistado: Alceu da Silva
- Função na empresa: Dono
- Tempo de experiência: 10 anos

2. Questões específicas

2.1 Aspectos sobre localização, cultivo e fornecedores

- Onde se localiza a empresa beneficiadora? Vale do Sol.
- Existem quantas empresas beneficiadoras no negócio? Apenas a Empresa Natusol.
- Quantos hectares de matéria prima são cultivados no Rio Grande do Sul? 60
- Quantos hectares de matéria prima são cultivados em Santa Catarina? 140
- Quais são as regiões envolvidas no fornecimento da matéria prima no Rio Grande do Sul? Candelária, Vale do Sol, Santa Cruz do Sul, Montenegro, Osório, Maquiné, Praia do Pinhal, Torres.
- Quais são as regiões envolvidas no fornecimento da matéria prima em Santa Catarina? Ourinhos do Sul, Praia Grande, Tubarão, Imaruí, Luis Alves.
- Quantas plantas são cultivadas por hectare? 15.000 plantas.
- Quantas plantas são cortadas por hectare no ano? Em média 5.000 plantas.
- Com que frequência é feita a colheita? A colheita é feita anualmente, pode ser feita 4 anos a partir do plantio.

2.2 Aspectos o produto e logística-distribuição

- Quanto pesa a bainha e quanto é tirado de palmito para usar como matéria prima e para fazer o produto final? Pesa em média 5 kg e são removidos 0,5kg de palmito para uso nas conservas.
- Quem transporta é quem colhe? Não, a colheita é feita pelo agricultor da Cooperativa
- Como é transportada a matéria prima? É transportada por meio de caminhões.
- O transporte utiliza serviços terceirizados? Sim.
- Quantas empresas terceirizadas têm no Rio Grande do Sul para transportar a matéria prima? Há 5 empresas no Rio Grande do Sul.

- Quantas empresas terceirizadas têm em Santa Catarina para transportar a matéria prima? Há 30 em Santa Catarina.
- Qual a capacidade máxima de matéria prima que pode ser transportada por viagem? Capacidade é de 14 toneladas.
- Qual a frequência de entrega da matéria prima no inverno? No inverno a entrega é feita uma vez por semana.
- Qual a frequência de entrega da matéria prima no verão? No verão é feita duas vezes por semana.
- Onde e em quais condições é armazenada a matéria prima? É armazenada em um galpão, com baixa luminosidade e temperatura amena.

2.3 Aspectos da produção, sazonalidade e gestão

- Como é feito o processamento da matéria prima? O processo é manual, inclusive o descascamento e o corte. O uso de máquinas é apenas para a produção de palmito picado.
- Como é feito o processo de fabricação do produto final? O cozimento é feito em uma autoclave.
- Onde é feita a estocagem do produto final? Em galpão da unidade fabril.
- Qual é a capacidade do estoque? Área de 140m².
- O transporte do produto final, também utiliza serviços terceirizados? Sim.
- Como é cobrado o transporte pelas empresas terceirizadas? O preço é fixo por viagem.
- O produto final é transportado apenas pra regiões próximas ou se expande? Apenas para regiões próximas a Santa Cruz, Caxias do Sul e Porto Alegre.
- Quais são as distancias percorridas no transporte no Rio Grande do Sul? Em média 100Km.
- Quais são as distancias percorridas no transporte em Santa Catarina? Em média 700Km.
- Quais as instalações e os investimentos da empresa? Carga e descarga; produção (preparação das conservas); cozimento, utilidades (caldeira); depósito de produto acabado, terreno de plantação; galpão de matéria prima; muda de Palmeira-Real; preparo da terra; energia elétrica; telefone; água; transporte (saída de produto); caixas de papelão; vidros de 5 kg, vidros de 300g, lenha (para caldeira); triturador (conjunto de três facas); diesel para o motor; triturador e autoclave.
- Quais são os custos fixos e os custos variáveis da empresa? Custos fixos com matéria – prima (bainhas), água, materiais para preparação da salmoura, pagamento de funcionários e manutenção das instalações. Custos variáveis com transportes, manutenção do caminhão e energia.
- Quais são os insumos desse processo? Insumos do processo de palmito em conserva (salmoura): ácido cítrico 5%, sal 3% e água; insumos do processo de inulina: ácido sulfúrico 3% em água.

- Qual o horário de funcionamento da empresa? Segunda a sexta-feira das 7h15 às 11:30 e das 13:00 às 17:30.
- Qual o número total de funcionários? 10 funcionários e 3 sócios.
- Qual é o salário base? É R\$ 540,00 por funcionário, ou R\$ 900,00 com todos os encargos (férias, 13º, FGTS).
- De quanto em quanto tempo é feita a inspeção e desmontagem dos equipamentos? Ocorre uma vez por ano.
- Qual a produção no inverno? Dá um total de 33.900 vidros, que equivale a 10.170 kg de palmito.
- Qual a produção no verão? Total de 25.638 vidros, que corresponde a 7691,4 kg de palmito.
- Em relação ao produto final, qual o preço pago para o produtor e qual o preço para a venda? O produtor recebe em média R\$ 5,00/Kg de palmito retirado das bainhas. Os preços dos vidros de 300g de palmito variam entre R\$ 3,50 a R\$ 6,00, sendo que os vidros de palmito em toletes são os mais caros e os picados os mais baratos.
- Como é feito o cálculo do lucro do produtor? O do produtor é feito de acordo com o rendimento em relação ao material fornecido. O material entregue pelo mesmo será pesado, e de acordo com o produto final obtido, o produto será pago.

3. Comentários Adicionais

APÊNDICE 2

Fotos do processo



(1) Plantação de Palmeira Real da Austrália em Vale do Sol



(2) Bainhas da Palmeira Real da Austrália que chegam à fábrica



(3) Palmito após descascamento das bainhas



(4) Equipamento usado para triturar o resíduo das bainhas



(5) Autoclave disponível na empresa

4. TERCEIRO ARTIGO

Produção de polpa de celulose a partir de resíduos da Palmeira Real da Austrália: análise experimental de fatores que afetam as características da polpa para fins absorventes

Resumo

A produção comercial de palmito em conserva gera um montante de resíduos oriundos das bainhas que envolvem o palmito, os quais podem ser usados para produção de celulose. A polpa de celulose proveniente de resíduos tem se mostrado uma alternativa atraente para agregar valor aos mesmos e reduzir impactos ambientais, entretanto, processos de extração devem ser desenvolvidos para o tratamento destes resíduos. O objetivo deste estudo é verificar a viabilidade de extração de celulose das bainhas da Palmeira Real da Austrália para a obtenção de fibra com capacidade absorvente e baixo teor de lignina residual, bem como revelar a influência dos fatores controláveis de processo sobre as variáveis de resposta analisadas. As variáveis de resposta foram selecionadas a fim de se caracterizar a fibra obtida quanto ao grau de deslignificação, capacidade e velocidade de absorção e densidade aparente. Com o auxílio de ferramentas estatísticas foram determinadas as influências dos fatores controláveis do processo sobre as variáveis de resposta através da geração de equações e superfícies n-dimensionais que permitiram a otimização das variáveis de interesse. Os resultados indicaram que as polpas produzidas pelos processos propostos neste estudo não atendem as características da qualidade requeridas para polpas absorventes. Os valores encontrados para as variáveis de absorção são inferiores aos estabelecidos nas hipóteses de pesquisa.

Palavras chaves: Resíduos vegetais; palmito; Projeto de Experimentos; Metodologia Superfície Resposta (MSR); processos de extração de celulose.

Abstract

The use of vegetable wastes as raw material for cellulose fibers production has shown itself as an attractive alternative in order to aggregate value to such wastes, entailing environmental impact, as well. Canned heart palms production generates an amount of wastes coming from the sheaths (cartridge) which settles around the marketed palmetto. With the aim

to get a pulp extraction method applied to the wastes' processes of the canned heart palms, this study objective is to develop a Response Surface Methodology (RSM) to test the influence of the process controlled variables over the cellulose pulp characteristics. Response variables selected include the degree of delignification, capability and speed of absorption, and fiber density. With the help of statistical tools, it was determined the influences of controlled variables over the response variables through the formulation of n-dimensional equations and surfaces which allowed the optimization of the interest variables. The results indicated that the pulps obtained from proposed processes didn't reach the quality characteristics required for pulp absorbent. The values for the absorption variables are lower than those established in the research hypotheses.

Keywords: Vegetable wastes; palmetto; Design of experiments; Response Surface Methodology (RSM); pulp extraction processes.

1. INTRODUÇÃO

As abordagens de projeto que enfatizam as dimensões econômica, social e ambiental, associadas com os avanços da tecnologia, potencializam os esforços pela busca de soluções sustentáveis. Um aspecto referido pelas abordagens sustentáveis é o reaproveitamento de resíduos de processos, bem como a minimização de geração dos mesmos (PAULI, 1996; PAULI, 1998; McDONOUGH e BRAUNGART, 2002; CNTL, 2003). A valorização de resíduos para geração de novos produtos tem sido alvo de pesquisas, visto que existe grande variabilidade na qualidade dos mesmos, além da necessidade de se projetar processos capazes de fazer esta transformação de forma eficiente.

Enfatizou-se neste trabalho a investigação do processo alcalino de extração de celulose a partir dos resíduos do beneficiamento do palmito em conserva, originário da Palmeira Real da Austrália (*Archontophoenix alexandrae*). Os resíduos deste processo constituem três camadas de bainhas que revestem o palmito. As bainhas da Palmeira Real da Austrália são um resíduo agrícola, de natureza lignocelulósica, como a maior parte destes tipos de resíduos vegetais (KEREM et al., 1992). Os principais componentes dos resíduos lignocelulósicos são a celulose, a hemicelulose, a lignina e o nitrogênio em quantidade menor. A proporção destes componentes no resíduo depende do tipo de material, idade e estágio vegetativo (RAJARATHNAM et al., 1992).

Diversas pesquisas têm sido realizadas a fim de se investigar as diferentes aplicações para os resíduos da Palmeira Real da Austrália, pois podem agregar valor a um resíduo

deixado no campo e diminuir dano ambiental resultante do seu acúmulo (TONINI, 2004). Entre as pesquisas destacam-se a aplicação das bainhas medianas para produção de enzimas hidrolíticas por Fungos do Gênero *Polyporus* (ISRAEL, 2005), o uso dos resíduos para a obtenção de produtos alimentícios (VIEIRA, 2006), os resíduos utilizados como substratos no cultivo de fungos tanto das espécies *Pycnoporus sanguineus* (BORDERES, 2006) quanto *Lentinula edodes* (TONINI, 2004). Em estudo feito na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRJ), foi pesquisado o uso do estipe de *Euterpe edulis Martis*, desprezado na colheita do palmito como matéria-prima fibrosa alternativa à produção de polpa celulósica pelo método Kraft (ANDRADE et al., 2000).

A procura de matérias-primas facilmente renováveis para a fabricação de bens de consumo é uma tendência que cresce ao redor do mundo. O aspecto mais atrativo em relação às fibras naturais são os seus impactos ambientais positivos, pois representam um recurso renovável e são produzidas com baixo consumo energético (JOHN e THOMAS, 2008). Na linha de tal tendência, sugere-se a obtenção de celulose a partir das bainhas da Palmeira Real da Austrália, desta forma pode-se aproveitar e valorizar um subproduto abundante, resultante do processamento industrial da produção de palmito em conserva.

Para a viabilização de tal projeto, as bainhas resultantes do beneficiamento do palmito, que são freqüentemente deixadas no campo ou utilizadas para a alimentação animal, deverão ser submetidas à extração da celulose em equipamentos específicos. Normalmente o polpamento químico de matérias-primas lignocelulósicas mais utilizado industrialmente emprega reagentes alcalinos para transformação da fibra *in natura* em polpa de celulose (SIXTA, 2006; SOUZA et al., 2008). O polpamento com soda e antraquinona como aditivo é adequado e usual para processos de polpamento em plantas que não sofrem com sazonalidade (HOLTON, 1977; ANTUNES et al., 2000).

Referências diversas podem ser encontradas sobre o tratamento de resíduos vegetais com extração alcalina utilizando hidróxido de sódio e aditivo para deslignificação. Na literatura pesquisada é citado o polpamento com soda a partir da palha de arroz (RODRÍGUES et al., 2010), polpamento alcalino com soda para obtenção de fibras da palha do milho (REDDY e YANG, 2005), obtenção de fibras da palha de soja através de polpamento alcalino (REDDY e YANG, 2009) e obtenção de fibras da banana com extração alcalina com soda (ELANTHIKKAL et al., 2010). Entre os trabalhos foi evidenciado o tratamento de raques da Palmeira de Tâmara (Tamareira), usando polpamento alcalino para obtenção e caracterização de fibras como substituição à fibra da madeira (KHRISTOVA et al.,

2004; KHIARI et al., 2009). No método de polpeamento químico alcalino das bainhas da Palmeira Real da Austrália, que é alvo de estudo nesta pesquisa, utilizou-se o hidróxido de sódio (NaOH) como reagente deslignificante e antraquinona (AQ) como aditivo do processo. Foi proposto um delineamento experimental com três fatores controláveis – concentração de AQ (entre 0,5% e 1%), tempo de permanência na autoclave (entre 120 e 150 minutos) na temperatura de polpeamento (127 °C) e concentração de NaOH (entre 15% a 29%). As variáveis de resposta analisadas foram o número kappa, que representa o teor de lignina residual na matéria polpeada (ABNT, 2005), a capacidade de absorção de água, a velocidade de absorção e densidade aparente da polpa.

O objetivo deste estudo é verificar a viabilidade de extração de celulose das bainhas da Palmeira Real da Austrália para a obtenção de fibra com capacidade absorvente e baixo teor de lignina residual, bem como revelar a influência dos fatores controláveis de processo sobre as variáveis de resposta analisadas. Este trabalho faz parte do projeto n° 570628/2008-3 do edital jovem pesquisador CNPq 06/2008, realizado por pesquisadores do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PPGEP/UFRGS). Este projeto prevê o reaproveitamento dos resíduos vegetais da agroindústria da região, visando produção de polpa de celulose para fins sanitários e absorventes.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este referencial trata das bainhas da Palmeira Real da Austrália e métodos de extração de celulose. Na literatura pesquisada sobre materiais lignocelulósicos há pouca disponibilidade de trabalhos científicos sobre as propriedades e comportamento das fibras da mesma.

2.1. Palmeira Real da Austrália

No cultivo da Palmeira Real da Austrália, a extração do palmito inicia-se a partir de dois anos após o plantio, desde que plantadas em regiões aptas e com adubação adequada (BOVI et al., 2001), enquanto as espécies tradicionais levam de oito a doze anos para formar o palmito (UZZO et al., 2004). Entretanto, a alta produtividade da Palmeira Real da Austrália conduz à geração de grande quantidade de resíduo vegetal do processamento. O processo de extração do palmito exige o corte da palmeira, pois somente uma pequena parte interna do caule é utilizada para comercialização e consumo alimentício (BORDERES, 2006). Assim, a valorização do resíduo gerado apresenta-se como uma alternativa atraente para gerar

desenvolvimento nos negócios do setor alinhado com conceitos de sustentabilidade, como princípios de não geração de resíduos (PAULI, 1996; McDONOUGH e BRAUNGART, 2002).

Os principais constituintes das plantas são a celulose, hemicelulose e lignina (OKEKE e OBI, 1994). De acordo com Lima e Marcondes (2005), o palmito é encontrado nas extremidades dos caules das palmeiras onde se formam as folhas, sendo constituído por um cartucho de três camadas (bainhas): externa, mediana e o miolo do palmito. A camada externa que envolve o palmito é fibrosa, de cor esverdeada ou marrom e não é utilizada na industrialização do palmito, representa de 25 a 35 % do seu peso seco, conforme a espécie de palmito. A próxima camada é a bainha mediana ou semi-fibrosa, a qual tem cor mais clara e representa de 25 a 30 % do peso seco, e também não é utilizada na industrialização do palmito. A camada mais interna é o miolo, a qual contém baixo teor de fibras. Esta camada é utilizada na industrialização do palmito em conserva. Dos diversos resíduos agroindustriais com potencialidade para serem utilizados em bioprocessos, a bainha mediana de palmito, que possui alta concentração em material lignocelulósico (TONINI, 2004), ainda é pouco estudada.

2.2. Hidrólise Ácida

A hidrólise química é um mecanismo de conversão da celulose e das hemiceluloses em seus açúcares constituintes. A hidrólise ácida de material vegetal lignocelulósico é conhecida desde 1819 (HARRIS e BEGLINGER, 1946). Os processos de hidrólise ácida de materiais lignocelulósicos se dividem em dois grupos principais: emprego de ácidos fortes ou o emprego de ácidos diluídos. Ao se empregar ácidos diluídos é possível o uso de ácidos diversos, inclusive do ácido sulfuroso, sulfúrico, clorídrico, fluorídrico, fosfórico, nítrico e fórmico.

A hidrólise com ácido diluído envolve o menor consumo de ácido, mas requer o uso de altas temperaturas para taxas aceitáveis de conversão do material em açúcares. Por sua vez, os processos com uso de ácidos concentrados são operados em temperaturas menores e rendimentos altos na conversão, com taxas de até 90% do rendimento teórico de glicose (SEMRAU e JONES, 1984).

2.3. Processos de extração de celulose

Os dois principais processos de polpação alcalina são o processo soda e o processo

Kraft. Em ambos o hidróxido de sódio (NaOH) é o reagente deslignificante em maior quantidade no licor de cozimento, enquanto no Kraft o sulfeto de sódio (Na₂S) também está presente. O uso de aditivo de processo tem sido uma alternativa bastante considerada nos processos alcalinos, pois aumenta a eficiência das reações de polpação e permite a diminuição da carga de álcali ativo e de compostos de enxofre, seguida de menor poluição odorífera (GOMIDE et al., 1987). Os mesmos autores ao analisarem o processo soda já destacam que a ação da antraquinona como aditivo trouxe maiores benefícios nos polpeamentos realizados com concentração de NaOH mais baixa, pois a ação deste aditivo pode ser mascarada pela presença do íon OH⁻ em concentrações mais elevadas.

O uso de antraquinona nos processos alcalinos promove uma maior taxa de deslignificação e a menor degradação da fibra de celulose, levando a maiores rendimentos e menor teor de lignina residual, representado pelo número kappa (SILVA JÚNIOR et al., 1998; VASCONCELOS, 2005). Estudos já realizados por Holton (1977) indicam que o efeito da antraquinona é mais pronunciado na polpação soda quando comparado com a polpação Kraft. Pesquisadores ao avaliarem a polpação de *Eucalyptus grandis* usando o processo Kraft e a soda, com e sem antraquinona, revelam o excelente comportamento do processo soda-AQ, quanto ao rendimento e ao número kappa, comparáveis ao processo Kraft para uma mesma carga de alcalina (SANTOS e SANSÍGOLO, 2002).

As vantagens que os processos alcalinos apresentam frente aos demais, referem-se a adaptação a todos os tipos de madeira na produção de polpas de alta qualidade com excelentes propriedades de resistências, além de um eficiente sistema de recuperação de reagentes químicos e de energia. O processo soda com uso de aditivos mostra-se potencialmente favorável para a aplicação quando há a restrição no uso de enxofre (GOMIDE et al, 1987). Quanto aos cuidados na aplicação deste processo, ressalta-se que o tempo de cozimento excessivamente longo, as altas temperaturas e altas concentrações de soda utilizadas podem promover a degradação dos carboidratos da madeira, diminuindo o rendimento do processo (CASEY, 1960; D'ALMEIDA, 1988; SIXTA, 2006). Na prática industrial são recomendadas temperaturas na faixa de 170°C, no entanto, segundo D'Almeida (1988) os fatores tempo e temperatura são interdependentes, se for usado uma temperatura maior para o polpeamento, pode se optar por um tempo menor, ou vice-versa. Assim, são buscadas condições de processo que promovam a deslignificação sem degradação excessiva das fibras de celulose.

2.4. Projeto de experimentos

A busca pela melhoria contínua nos processos e produtos oferecidos ao mercado desencadeia a busca por metodologias e ferramentas que propiciem a otimização dos mesmos. Neste cenário, as abordagens de projetos de experimentos e otimização proporcionam o aumento de produtividade, avanços na qualidade dos produtos e redução de tempo custos produtivos.

O Projeto de Experimentos (*Design of Experiments*, DOE) é um método que auxilia no levantamento de informações relativas ao produto, a fim de gerar respostas estatisticamente precisas e a redução de tempo e custo na coleta dos dados. Este método tem como objetivo otimizar o planejamento, a execução e a análise de um experimento (JIJU, 2003). Segundo Montgomery (2005) o projeto de experimentos é uma ferramenta eficaz para o desenvolvimento de produtos e processos, bem como contribui para a melhoria do rendimento e estabilidade dos processos existentes. O projeto de experimentos auxilia a identificar as variáveis que têm maior influência no resultado geral, além de garantir que os fatores físicos controlados sejam estatisticamente independentes entre si e assim, os efeitos gerados por estes podem ser medidos separadamente (MOSKOWITZ, 1995).

Um Projeto de experimentos mostrará eficiência se uma abordagem científica for aplicada no seu planejamento. O processo de planejamento do experimento é concebido pela integração de métodos estatísticos, do modo que os dados coletados possam ser analisados estatisticamente, levando a conclusões objetivas e validas (MONTGOMERY, 2001; JIJU, 2003). Uma vez que o projeto de experimentos exige a realização de ensaios, cujos dados serão analisados estatisticamente, é importante que o entendimento do problema seja dominado por parte da equipe envolvida no experimento. Ainda, é feita a recomendação de que durante a execução, o processo seja monitorado com atenção para garantir que o que foi planejado seja executado corretamente (MONTGOMERY, 2001).

Na literatura são encontrados diversos trabalhos que utilizam projetos de experimentos na área de engenharia. Antony et al. (1999) citam as potenciais aplicações e benefícios adquiridos através do uso de projetos de experimentos, que permitem a otimização de produtos e processos, ressaltando os aspectos de redução de tempo, aumento da qualidade, rendimento e capacidade dos processos de desenvolvimento de produtos. O projeto de experimentos ainda contribui para a redução da sensibilidade de produtos e processos em relação ao ambiente e variações de produção, e ainda redução de custo operacional (ANTONY et al., 1999; CALADO E MONTGOMERY, 2003).

Outro aspecto relevante quanto à aplicação da metodologia diz respeito sobre a ordem da realização dos ensaios. Para Hicks e Turner (1999) é importante aleatorizar a ordem das experimentações, para equilibrar o efeito dos fatores não controláveis que geram um fator de ruído aos ensaios. A realização de repetições dos ensaios é outro conceito significativo, tanto para a determinação de erro experimental quanto para a estimativa dos efeitos dos fatores controláveis, no entanto, aspectos como tempo, custo, disponibilidade de equipamentos, entre outros, inviabilizam a repetição dos ensaios.

Geralmente os experimentos envolvem diversos fatores, sobre os quais se visa determinar a influência nas variáveis de saída analisadas. Para Montgomery (2001), é importante que se realize a análise dos fatores nas variáveis de saída, e também das interações entre fatores. Para tal fim, são sugeridos diversos tipos de projetos de experimentos. Observa-se que entre os projetos mais difundidos estão os Fatoriais de dois níveis, os Fatoriais Fracionados e a Metodologia de Superfície Resposta (MSR).

2.4.1. Metodologia de superfície de resposta

A Metodologia de Superfície Resposta (MSR) é uma combinação das técnicas de planejamento de experimentos, análise de regressão e métodos de otimização, com vasta aplicação nas pesquisas industriais onde um elevado número de variáveis de um sistema influencia alguma característica fundamental deste sistema (BARBETTA e LEHRER, 2001). A Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) encaixa-se bem para a aplicação em experimentos nos quais se busca a otimização de produtos e processos, pois ela gera o mapeamento de regiões modeladas através de superfícies n-dimensionais (RIBEIRO, 2007).

A aplicação desta metodologia baseia-se em três etapas principais, que envolvem o planejamento do experimento e definição dos pontos experimentais; estimativa dos coeficientes da equação da superfície de resposta e exploração da superfície de resposta a fim de se encontrar os melhores valores dos fatores controláveis. Para a aplicação desta metodologia, o Projeto Composto de Segunda Ordem (PCSO) oferece vantagens, pois é recomendado para o ajuste de modelos quadráticos, permitindo o estudo de termos lineares e quadráticos. O PCSO é a soma de um experimento 2^k , pontos estrela e mais pontos centrais. Os pontos da parte fatorial (2^k) permitem estudar os efeitos principais e as interações entre os fatores, enquanto os pontos da estrela permitem a estimativa de efeitos não lineares (RIBEIRO e CATEN, 2003). As repetições do ponto central permitem uma avaliação mais precisa da variância experimental, já que se aumentam os graus de liberdade do termo de erro.

Da mesma maneira, o valor de alfa pode ser definido de modo que o projeto adquira as propriedades de rotacionalidade ou ortogonalidade (RIBEIRO e CATEN, 2003).

Nas equações de regressão múltipla, para que se torne possível comparar os efeitos dos diferentes fatores controláveis (termos) do modelo, é necessário padronizar o intervalo de variação destes. A padronização é feita através da conversão dos níveis reais do intervalo de investigação em níveis codificados do intervalo. Para tanto, o nível baixo será o nível -1 e o nível alto será o nível $+1$.

3. MÉTODO

Este estudo tem característica de uma pesquisa de natureza aplicada, com abordagem quantitativa, ao passo que utiliza análises numéricas e o uso de técnicas estatísticas. O objetivo deste estudo, segundo Gil (1991), é de caráter explicativo já que visa identificar os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos através do uso do método experimental. Para atingir os objetivos, o procedimento usado foi de pesquisa experimental, caracterizada pela determinação de um objeto de estudo, seleção das variáveis que seriam capazes de influenciá-lo e definição das formas de controle dos efeitos que estas produzem no objeto (GIL, 1991).

Para a pesquisa experimental foi utilizado o resíduo da produção do beneficiamento de palmito, que consiste nas bainhas que envolvem o mesmo. Até o momento apenas as bainhas são recolhidas pela empresa, permanecendo os outros elementos no campo (estipe, tronco e folhas), ou seja, nas propriedades dos fornecedores do palmito. Com base neste fato, o estudo prevê o aproveitamento das bainhas da Palmeira Real da Austrália, a um custo de transporte embutido no custo do processamento do palmito, ou seja, sem gastos extras para a formulação.

A partir dos resultados de ensaios preliminares de polpeamento químico alcalino das bainhas da Palmeira Real da Austrália, realizados na empresa beneficiadora em outro estudo, avaliou-se a possibilidade de realizar delineamentos experimentais em equipamentos utilizados para extração de celulose de matérias vegetais para a produção de polpas em escala de bancada. É importante relatar que, estudos realizados previamente pela FEPAGRO (Fundação Estadual de Pesquisas Agropecuária) com os resíduos do processo de palmito em conserva apontaram o tratamento via hidrólise ácida como um meio de gerar produto de alto valor comercial, a inulina. Este estudo é mostrado na Patente 0606063-3 de 2008. A substância inulina, um adoçante natural, está presente no licor filtrado após a hidrólise ácida

das bainhas da palmeira.

Desta forma, o polpamento químico das bainhas, proposto neste trabalho, foi desenvolvido de duas formas: a partir do resíduo bainha *in natura* e após sofrer hidrólise ácida. A matéria-prima triturada *in natura* foi seca em estufa na temperatura de 68°C e ficou reservada em recipiente para ser usada no decorrer dos ensaios. Foi considerando que a matéria-prima antes da secagem deveria apresentar fibras firmes e não estar em estágio de decomposição. Similarmente, para a etapa de hidrólise ácida, a matéria-prima *in natura* já seca passou pela reação de hidrólise em diversas rodadas, a seguir foi secada em estufa, misturada e homogeneizada para então ser usada nos ensaios de extração alcalina. Desta maneira, foram analisadas as melhores condições de processo de polpamento com NaOH e AQ como aditivo através de um projeto de experimentos. Tal projeto consiste de um planejamento estatístico de um número mínimo de experimentos realizados de forma eficiente com geração de resultados eficazes (MONTGOMERY, 2001).

O processo de hidrólise ácida das bainhas (terço superior do estipe da palmeira de onde se retira o palmito) constituiu no ataque da fibra com solução ácida diluída em água. Na Tabela 1 constam as condições de hidrólise ácida conforme Patente 0606063-3, ano 2008.

Tabela 1: Condições de processo da hidrólise ácida dos resíduos da Palemira Real da Austrália

Relação solução-material	10:1
Concentração de ácido % (v/v)	3
Pressão (atm)	1,5
Temperatura (°C)	127
Tempo na temperatura estipulada na autoclave (min)	30

O experimento planejado para extração alcalina foi um Projeto Composto de Segunda Ordem (PSCO), 2^k com pontos estrela e pontos centrais. A temperatura teve que ser mantida em 127°C, correspondente ao limite máximo de funcionamento tolerado pelo equipamento utilizado. Concentração AQ, tempo de reação e concentração de hidróxido de sódio NaOH foram os fatores controláveis do processo, enquanto o número kappa, a capacidade de absorção, a velocidade de absorção e a densidade aparente da polpa foram as variáveis de resposta analisadas. Os níveis investigados, de acordo com os parâmetros industriais e disponíveis na literatura, foram, 0,33 a 1,17 % para a concentração de AQ, 110 até 160 minutos para o tempo e 10 a 34% para a concentração de NaOH. Estes intervalos foram definidos conforme o PCSO com valor de alfa de 1,68 e dois pontos centrais. Os pontos de

estudo e seus respectivos níveis codificados estão listados na Tabela 2. Os intervalos utilizados foram resultados de testes preliminares, bem como de intervalos de valores investigados na literatura sobre polpeamento químico (SMOOK, 1982; D'ALMEIDA, 1988; KHRISTOVA et al., 2004; VASCONCELOS, 2005; SIXTA, 2006; KHIARI et al., 2009; RODRÍGUES et al., 2010).

Tabela 2 - Pontos e fatores controláveis, em seus níveis altos e baixos, e ponto central para o Projeto Composto Central de Segunda Ordem (PCSO)

Fatores	FATORES CONTROLÁVEIS	Níveis Reais		Nível central	Nível Estrela	
		Nível Baixo	Nível Alto		(-1,68)	(1,68)
		(-1)	(+1)	(0)		
X1	Concentração de AQ (%)	0,5	1,0	0,75	0,33	1,17
X2	Tempo (min)	120	150	135	110	160
X3	Concentração de NaOH (%)	15	29	22	10	34

A Tabela 2 mostra os fatores controláveis, intervalos utilizados e seus respectivos níveis analisados nos experimentos, enquanto isso a Tabela 3 são mostrados os pontos investigados em ensaios laboratoriais.

Tabela 3 - Ensaios investigados para extração de celulose das bainhas da Palmeira Real da Austrália segundo o Projeto de Experimentos (PE)

PONTO	FATORES CONTROLÁVEIS DE PROCESSO		
	Concentração AQ (%)	Tempo (min)	Concentração de NaOH (%)
1	0,5	120	15
2	1	120	15
3	0,5	150	15
4	1	150	15
5	0,5	120	29
6	1	120	29
7	0,5	150	29
8	1	150	29
9	0,33	135	22
10	1,17	135	22
11	0,75	110	22
12	0,75	160	22
13	0,75	135	10
14	0,75	135	34
15	0,75	135	22
16	0,75	135	22

A ordem dos ensaios foi aleatorizada e sem repetição. Para a construção de modelos,

os dados experimentais foram ajustados por um polinômio de segunda ordem através de uma regressão linear múltipla:

$$Y = A_0 + \sum_{i=1}^n A_i X_i + \sum_{i=1}^n A_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n A_{ij} X_i X_j$$

3.1. Descrição laboratorial

Os tratamentos foram realizados no laboratório de Fitopatologia localizado na Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária (FEPAGRO). Na reação de hidrólise ácida a temperatura e a pressão foram mantidas constantes em 127°C e 1,5 atm, respectivamente numa autoclave vertical da marca BIOENG modelo A50 NÚMERO 274. Para aumentar a eficiência do ataque da fibra, este material foi triturado de modo a aumentar a superfície de contato com a solução ácida. Após a matéria sofrer hidrólise, esta foi neutralizada em meio aquoso com NaOH até atingir pH próximo de 7,0. A seguir, foi colocada em estufa marca BIOMATIC para secagem no intuito de servir de matéria-prima para a segunda rodada de experimentos com tratamento alcalino. O resíduo gerado no processo de produção da inulina consiste, essencialmente, da estrutura polimérica que possivelmente advém da celulose restante das fibras da planta da palmeira. Este material apresenta como vantagens alta capacidade de absorção de líquidos, baixo teor salino e nenhum resquício de contaminantes biológicos que possam provocar sua decomposição (PATENTE PI 0606063-3, 2008).

Seguida a preparação do material hidrolisado, ocorreram os ensaios para extração de celulose em meio alcalino conforme projeto PCSO mostrado na Tabela 3. Os tratamentos alcalinos ocorreram em dias distintos uma vez que o processo requer um longo período de tempo (em torno de quatro horas), mas procurou-se manter as mesmas condições ambientais minimizando assim o erro experimental. O processo de extração alcalina dos resíduos da Palmeira Real da Austrália consistiu no ataque da lignina presente nas bainhas da planta, com soluções alcalinas em meio aquoso. Primeiramente foram determinadas as quantidades de palha e de água utilizadas em cada experimento. Para aumentar a eficiência do ataque, as bainhas foram picadas, de modo a aumentar a superfície de contato com a solução alcalina. A granulação da matéria-prima foi determinada pela passagem desta numa peneira de *Mesh Tyler 2*. Durante a montagem do experimento procurou-se observar o recobrimento total do material vegetal com a solução alcalina. Usou-se 50 g de material seco e a relação licor-material foi de 10:1, correspondente a 500 mL de solução. As soluções alcalinas foram

preparadas a partir da solubilização de NaOH e AQ em água destilada conforme concentrações pré-definidas. A pesagem de 50 g do material vegetal, hidrolisado ou *in natura* após a secagem, foi feita em uma balança analítica digital BELMARK 500 de capacidade máxima de 500 g. A secagem do material vegetal foi realizada na mesma estufa utilizada na etapa anterior, a uma temperatura constante de 68°C até peso constante. O material vegetal seco nestas condições foi denominado “palha”. A autoclave disponível para a realização dos ensaios foi regulada para operar em temperatura e pressão constantes em 127°C e 1,5 atm, respectivamente, sendo estes os parâmetros máximos permitidos para o funcionamento do equipamento. A autoclave tem capacidade de vinte litros e contém um cesto que tem capacidade de suportar dois copos béqueres de dois litros cada. Os experimentos foram feitos, acomodando a palha em copos béqueres termo-resistente e a seguir adicionada a solução alcalina na concentração determinada. O equipamento é utilizado para experimentos em nível de bancada, pois apesar do pequeno porte permite reproduzir parâmetros de processos aplicáveis industrialmente.

O preparo das soluções de estudo e recobrimento da palha com a solução determinada foi feito durante o pré-aquecimento do equipamento a fim de reduzir o tempo de aquecimento do mesmo até a temperatura desejada. Após o fechamento dos copos béqueres com papel alumínio e folha de papelão, estes foram inseridos no cesto da autoclave. Logo, esta foi fechada, mas a válvula superior de liberação de vapor foi mantida aberta até que vapor fosse liberado. Ao se chegar no ponto de liberação de vapor a temperatura alcançada estava em torno de 100 °C e então a válvula foi fechada para que se atingisse a temperatura estipulada de 127 °C através de aquecimento no nível máximo, já que haviam três níveis de aquecimento. O tempo necessário para este procedimento ficou em torno de 15 min.

Iniciado o experimento, manteve-se o controle do fator tempo. O tempo definido para cada ponto foi medido a partir do momento que o sistema atingisse a temperatura de 127 °C com desvio de no máximo ± 5 °C da temperatura estipulada. Caso a temperatura ultrapassasse a temperatura de controle, ou alcançasse valores superiores a esta, a temperatura seria diminuída até que voltasse ao valor de 127°C através de mudança do nível máximo para o nível intermediário de aquecimento. Ao fim do tempo de preparo, dentro da faixa de controle de temperatura, o aparelho foi desligado e teve sua pressão aliviada. O passo seguinte foi a abertura do equipamento para a retirada dos copos béqueres. Estes foram resfriados antes de serem abertos, já que o conteúdo no seu interior seria removido para análise das variáveis analisadas.

O material presente no interior dos béqueres foi separado, pois era constituído de matéria polpeada e de licor negro. A polpa foi filtrada e lavada três vezes com água destilada antes de passar por um processo de secagem. A secagem ocorreu na estufa, cuja temperatura foi mantida em 68°C durante 24 horas. O licor negro foi neutralizado para posterior descarte. A parte sólida foi analisada para a determinação das variáveis de resposta.

3.2. Métodos analíticos

Em todos os experimentos realizados, foram retiradas amostras para análise das variáveis de resposta: Número kappa, capacidade de absorção (g de água), velocidade de absorção (g de água/s) e densidade aparente da polpa (g/cm³). Todas as amostras foram secas após a coleta e seguiram para a análise laboratorial, a qual foi feita uma única vez para cada amostra. As análises das variáveis de resposta foram realizadas em um laboratório terceirizado da rede SENAI. O laboratório está localizado em Telêmaco Borba, no Paraná e conta com serviço especializado para ensaios de polpa de papel e celulose. Cabe ressaltar que encontrar serviços terceirizados para as análises propostas foi uma tarefa trabalhosa, pois as grandes empresas produtoras de celulose, que costumam analisar estas características da polpa, não abrem seus laboratórios para serviços terceirizados.

A seguir são listados os métodos utilizados para a medição de cada variável de resposta e os seus respectivos equipamentos e utensílios.

3.2.1. Metodologia para determinação do número Kappa

Esta análise fornece uma indicação do grau de deslignificação da celulose. As análises de determinação do número kappa em polpa de bainhas da Palmeira Real da Austrália procederam segundo a Norma ABNT NBR ISO 302 (2005). O número kappa é determinado pela oxidação da lignina presente, com permanganato de potássio. O excedente de permanganato é neutralizado com iodeto de potássio. Para determinação do número kappa, foi utilizado um grama de celulose seca para cada ensaio, sendo que de cada amostra, foram realizados ensaios em triplicata. A correção da temperatura e volume do número kappa foi feita segundo determinação da Norma ABNT NBR ISO 302 (2005), item 9, subitem 9, cálculos de “número kappa de 5 a 100”. Os resultados apresentados correspondem à média dos três ensaios.

3.2.2. Metodologia para determinação da capacidade e tempo de absorção de água

Para ambos os ensaios de capacidade de absorção e velocidade de absorção são usadas

5 gramas de celulose, sendo que os ensaios são realizados em tal seqüência. Para os ensaios de velocidade de absorção e capacidade de absorção, as polpas foram desagregadas em desagregador DSG 3000 Regmed, equipado com lâminas sem fio, para evitar cortes nas fibras. Em seguida foram formadas folhas, com as quais foram realizados os ensaios. As análises procederam segundo a Norma ABNT NBR 15004 (2003), onde a folha foi imersa progressivamente, permitindo o contato com a água, por um período definido de tempo. O tempo requerido para o completo umedecimento do corpo de prova é determinado e a massa de água absorvida é também determinada após o tempo de imersão estabelecido, seguido de um tempo de drenagem, sob condições especificadas na Norma. Assim, a capacidade de absorção é determinada pela quantidade de água que uma certa massa fibrosa (folha) pode reter, sem que haja gotejamento.

A velocidade de absorção é determinada pelo método da “cestinha”, onde 5 gramas de material fibroso são acondicionados em uma cesta de metal de massa igual a 3,2g, que será submersa em água. O tempo de submersão é determinado em segundos. A divisão entre a capacidade de absorção pelo tempo de requerido para absorção. Ambos ensaios foram realizados uma única vez para cada amostra.

3.2.3. Metodologia para determinação da densidade aparente

A determinação da densidade aparente foi feita segundo ABNT NBR NM - ISO 534 (2006), com massa de fibra de celulose de 1,6 gramas. Para esta análise fez-se uso de balança especial, da marca Gehaka, modelo BG 400, equipada com kit para medição de densidade. As fibras de celulose foram saturadas em água, determinando o volume deslocado de água. A seguir o material foi secado em estufa a 150°C +- 2°C, até peso constante, para fins de determinação da massa seca. A densidade aparente foi calculada dividindo-se a massa de fibras secas pelo volume deslocado. Os ensaios foram feitos uma única vez para cada amostra.

3.3. Codificação dos fatores

Nas equações de regressão múltipla, para que se torne possível comparar os efeitos das diferentes fatores controláveis (termos) do modelo, é necessário padronizar o intervalo de variação destas. A padronização é feita através da conversão dos níveis reais do intervalo de investigação em níveis codificados do intervalo. Para tanto, o nível baixo será o nível -1 e o nível alto será o nível +1 (RIBEIRO e CATEN, 2003). Para converter os níveis reais (NR) em níveis codificados (NC) se utiliza a fórmula:

$$NC = \frac{NR - ((LSI - LII) / 2 + LII)}{((LSI - LII) / 2)} \quad (\text{eq. 1})$$

Onde:

VC= Valor Central do intervalo investigado

$VC = ((LSI - LII) / 2 + LII)$

LSI= Limite Superior do intervalo investigado

LII= Limite Inferior do intervalo investigado

Um projeto rotacional assegura a mesma precisão nas estimativas de Y para todos os pontos do espaço amostral. Para atribuir rotacionalidade ao projeto, o valor de alfa deve ser

definido como: $\alpha = F^{\frac{1}{4}}$ (eq. 2)

Onde: F= número de pontos da parte fatorial

3.4. Obtenção do modelo de regressão

Todos os resultados foram tratados no software estatístico Minitab versão 15 a fim de avaliar estatisticamente, ao nível de significância de 15%, quais fatores e interações entre os fatores controláveis (concentração de AQ, tempo de reação e concentração de NaOH) possuem influência significativa nos valores obtidos para as variáveis de resposta. Para esta análise, utilizando o Projeto Composto Central de Segunda Ordem (PCSO) foi necessário codificar cada um dos fatores controláveis investigados nos níveis altos (+1) e baixos (-1), o ponto central (0) e os pontos estrela ($\pm 1,68$). Os valores dos pontos estrela (alfa) foram calculados de modo a conferir a condição de ortogonalidade ao projeto.

3.5. Obtenção dos gráficos de Superfície Resposta

A partir dos experimentos realizados e valores das variáveis de resposta para cada ponto experimental, com o auxílio do software Minitab versão 15 foi gerado gráficos de Superfície Resposta a partir da influência de pares de fatores controláveis codificados sobre cada uma das variáveis de resposta. A geração de gráficos de Superfície Resposta possibilita a análise do comportamento dos valores das variáveis de resposta frente aos fatores controláveis a fim de se definir condições ótimas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os materiais absorventes tais como papéis para fins sanitários precisam apresentar algumas características relevantes para que garantam a eficiência de sua função, ou seja, a absorção e retenção de líquidos. Para Jordão e Neves (1989), as propriedades de absorção mais relevantes da polpa absorvente são: elevada velocidade de absorção e capacidade de reter ou absorver líquidos. Entretanto, a capacidade da polpa reter líquidos está ligada a sua estrutura fibrosa e arranjo das mesmas. O autor cita que as fibras do material devem ser longas, porosas e rígidas. Foelkel (2010) reforça que a morfologia das fibras também interfere na capacidade de absorção da polpa, assim como a quantidade de resinas.

O volume específico, que corresponde ao inverso da densidade também é uma característica importante. Polpas que apresentam alto volume específico, ou baixa densidade, geralmente mostram elevada absorção de água.

Para Foelkel (2010), que estudou o comportamento das polpas para fins absorventes, as especificações para parâmetros de capacidade de absorção de água, tempo de absorção e densidade são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros para polpas absorventes

Parâmetro	Valores utilizados no mercado	Especificações
Capacidade de absorção de água [g de água/g polpa seca]	8 a 14	Nominal-é-melhor
Tempo de absorção [s]	0,7 a 2,5	Nominal-é-melhor
Velocidade de absorção [g/s]*	3,2 a 20	Nominal-é-melhor
Densidade da folha de polpa [g/cm ³]	0,4 a 0,6	Nominal-é-melhor

* Considerando os valores máximos e mínimos de capacidade e tempo de absorção

A fim de se determinar tais parâmetros para a polpa obtida dos resíduos do processo (bainhas), foram realizados experimentos no período de novembro a fevereiro de 2010. Foram realizados 16 ensaios com material *in natura* e outros 16 ensaios com material hidrolisado, os quais geraram 32 amostras distintas que foram submetidas à análise em laboratório especializado.

Para cada condição experimental fez-se apenas um ensaio, uma vez que estes são trabalhosos e necessitam um tempo elevado para realização. Assim, os resultados expostos são dados preliminares de estudo, indicativos dos fatores que influenciam as variáveis de resposta analisadas. Para aumentar o grau de confiança dos resultados, seria necessária a

realização repetições nos ensaios.

Os resultados obtidos para as variáveis de resposta em cada tratamento, sem e com hidrólise ácida da matéria-prima, estão listados na Tabela 5 e 6, respectivamente.

Tabela 5 - Fatores do processo e variáveis de resposta do Projeto de Experimento para extração da celulose das bainhas da Palmeira-Real com hidróxido de sódio e aditivo

PONT O	FATORES CONTROLÁVEIS E CODIFICAÇÃO DOS FATORES						VARIÁVEIS DE RESPOSTA			
	Concentração AQ (%)		Tempo (min)		Concentraçã o NaOH (%)		Nº kappa	Capacidade de Absorção [g]	Velocidade de Absorção [g/s]	Densidade aparente [g/cm ³]
1	0,5	-1	120	-1	15	-1	51,38	3,52	0,71	1,17
2	1	1	120	-1	15	-1	41,27	2,17	0,17	1,34
3	0,5	-1	150	1	15	-1	46,18	2,58	0,16	1,36
4	1	1	150	1	15	-1	66,50	2	0,51	1,27
5	0,5	-1	120	-1	29	1	42,49	2,49	0,14	1,3
6	1	1	120	-1	29	1	41,16	2,44	0,28	1,23
7	0,5	-1	150	1	29	1	61,68	3,82	0,6	1,07
8	1	1	150	1	29	1	60,04	4,83	0,91	1,21
9	0,33	-1,68	135	0	22	0	51,87	2,92	0,53	1,36
10	1,17	1,68	135	0	22	0	51,10	2,36	0,16	1,29
11	0,75	0	110	-1,68	22	0	48,40	3,43	0,45	1,28
12	0,75	0	160	1,68	22	0	50,48	1,8	0,02	1,24
13	0,75	0	135	0	10	-1,68	51,43	2,75	0,65	1,24
14	0,75	0	135	0	34	1,68	62,39	2,04	0,47	1,15
15	0,75	0	135	0	22	0	60,45	2,34	0,55	1,2
16	0,75	0	135	0	22	0	62,00	2,98	0,6	1,22

Tabela 6 - Fatores do processo e variáveis de resposta do Projeto de Experimento para extração da celulose das bainhas da Palmeira-Real com hidróxido de sódio e aditivo após hidrólise ácida

PONTO	FATORES CONTROLÁVEIS E CODIFICAÇÃO DOS FATORES						VARIÁVEIS DE RESPOSTA			
	Concentração AQ (%)		Tempo (min)		Concentração NaOH (%)		Nº kappa	Capacidade de Absorção [g]	Velocidade de Absorção [g/s]	Densidad e aparente [g/cm ³]
1	0,5	-1	120	-1	15	-1	66,12	3,23	0,38	1,19
2	1	1	120	-1	15	-1	47,61	2,93	1,04	1,17
3	0,5	-1	150	1	15	-1	50,23	3,3	0,58	1,39
4	1	1	150	1	15	-1	61,5	4,05	0,8	1,34

5	0,5	-1	120	-1	29	1	43,73	3,48	1,47	1,12
6	1	1	120	-1	29	1	35,28	4,12	0,71	1,14
7	0,5	-1	150	1	29	1	43,27	3,73	1	1,21
8	1	1	150	1	29	1	49,23	3,32	1,36	1,06
9	0,33	-1,68	135	0	22	0	38,76	4,53	1,45	1,12
10	1,17	1,68	135	0	22	0	54,86	4,53	0,74	1,14
11	0,75	0	110	-1,68	22	0	25,17	3,86	0,17	1,27
12	0,75	0	160	1,68	22	0	22,41	4,13	0,37	1,45
13	0,75	0	135	0	10	-1,68	60,89	3,14	0,64	1,2
14	0,75	0	135	0	34	1,68	43,38	3,41	0,52	1,3
15	0,75	0	135	0	22	0	39,51	2,83	1,24	1,49
16	0,75	0	135	0	22	0	39,39	3,31	1,36	1,3

Utilizando o software Minitab versão 15 verificou-se os efeitos lineares e quadráticos estatisticamente significativos, ao nível de 15%, para as variáveis de resposta. O valor foi definido conforme dados dispostos na literatura quando se trabalha com experimentos com fontes vegetais que envolvem reações químicas. Na base de dados pesquisados, estudo mostra a otimização de condições de cultura de polímeros de unidades de glicose (celulose bacteriana) produzidos por xarope de bordo ou xarope de ácer como fonte de carbono, através de um projeto de experimentos e avaliação dos parâmetros significativos a um nível de 10% para criação de modelos e otimização com metodologia de superfície de resposta (ZENG et al., 2011). Outros estudos verificaram o efeito das condições de polpeamento com dimetilformamida nas fibras de bagaço com o uso de projeto composto central de segunda ordem e proposição de modelos de regressão a um nível de significância estatística de 15% para as variáveis de interesse e uso de metodologia de superfície de resposta para otimização (REZAYATI-CHARANI e MOHAMMADI-ROVSHANDEH, 2005; REZAYATI-CHARANI et al., 2006). Cho e Zoh (2007) também propuseram a otimização das variáveis de interesse com o uso de metodologia de superfície de resposta tendo por base um projeto composto central de segunda ordem para verificar os efeitos da degradação fotocatalítica de um corante em meio definido a um nível de significância estatística de 10% para a proposta de modelos de regressão. Pesquisadores realizaram polpeamento com soda e antraquinona dos cachos de frutos da palma após extraído o óleo, através de um projeto de experimentos e com geração de modelos de regressão para prever o valor das variáveis de interesse da polpa, aceitando nível de significância estatística de até 20% (JIMÉNEZ et al., 2009).

De posse dos resultados laboratoriais foi feita uma modelagem através da regressão múltipla, utilizando apenas os efeitos significativos apontados pela análise estatística. Com a

regressão múltipla é possível estimar uma equação matemática, na qual pelos valores das variáveis independentes é possível prever o valor da variável dependente. Na tabela 9 são mostradas as equações geradas pelo *software* para as variáveis de resposta dos experimentos que tiveram apenas a etapa de extração alcalina. Os modelos previstos pela regressão foram feitos a partir da análise do p-valor dos fatores controláveis que fossem menor ou igual a 0,15.

Tabela 9 – Modelos propostos para as variáveis de resposta dos experimentos com extração alcalina

<i>Variável (Y)</i>	<i>Equação</i>	<i>R² - coeficiente de determinação</i>	<i>p - valor</i>
Número Kappa	$Y = 61,298 + 4,51X_2 - 4,342 X_2^2$	69,40%	X_2 : 0,059; X_2^2 : 0,114
Capacidade de absorção [g]	$Y = 2,6177 + 0,6038 X_2X_3$	54,30%	X_2X_3 : 0,090
Velocidade de absorção [g/s]	$Y = 0,5686 + 0,1625 X_2X_3$	60,60%	X_2X_3 : 0,113
Densidade aparente [g/cm³]	$Y = 1,2119 - 0,0352 X_3 - 0,0462 X_2X_3$	61,90%	X_3 : 0,139; X_2X_3 : 0,137

Para a variável de resposta Número kappa, verifica-se no modelo a influência linear positiva do fator tempo, bem como o efeito quadrático negativo deste fator. Os fatores de concentração de AQ e concentração de NaOH não foram estatisticamente significativos ao modelo, nem suas interações.

Tanto para a capacidade de absorção da polpa quanto para a velocidade de absorção da polpa, a interação positiva entre os fatores tempo e concentração de NaOH demonstrou ser significativa aos modelos. O fator tempo, entretanto, não mostrou ser significativo ao nível de 15%. Para a densidade aparente da polpa, o modelo também mostrou que a interação entre os fatores tempo e concentração de NaOH é significativa, porém negativa. Além disso, o modelo para esta variável de resposta mostra a influência linear e negativa para o fator concentração de NaOH.

Entretanto, os valores de R^2 que indicam o quão bem a equação de regressão se ajusta aos dados amostrais, está entre 54,3 a 69,4%, sendo o valor mais elevado encontrado para a variável número kappa. Isso indica que neste modelo 69,4% da variável resposta é explicada pela variável controlável e 30,6 % pode ser explicado por fatores externos que não aparecem no modelo. Os outros modelos revelam ainda mais influencia de fatores externos. Uma vez

que os experimentos foram realizados sem repetição, pode se prever que os dados amostrais gerados não sejam suficientes para descrever modelos que expressem a influência dos fatores controláveis sobre as variáveis de resposta analisadas. Além disso, condições experimentais e variabilidades do processo podem induzir a resultados distorcidos, que poderiam ser analisados se os experimentos fossem repetidos.

Na tabela 10 são mostradas as equações geradas pelo *software* para as variáveis de resposta dos experimentos que tiveram também a etapa de hidrólise ácida seguida da etapa de extração alcalina.

Tabela 10 – Modelos propostos para as variáveis de resposta dos experimentos com extração alcalina após hidrólise ácida

<i>Variável (Y)</i>	<i>Equação</i>	<i>R² - coeficiente de determinação</i>	<i>p - valor</i>
Número Kappa	$Y = 38,618 - 6,107X_3 + 4,61 X_1^2 + 6,493 X_3^2 + 5,524 X_1X_2$	81,60%	X_3 : 0,034; X_1^2 : 0,141; X_3^2 : 0,054; X_1X_2 : 0,108
Capacidade de absorção [g]	$Y = 3,1149 + 0,4077X_1^2$	67,30%	X_1^2 : 0,042
Velocidade de absorção [g/s]	$Y = 1,2702 - 0,2923X_2^2$	59,30%	X_2^2 : 0,080
Densidade aparente [g/cm³]	$Y = 1,3984 + 0,05 X_2 - 0,1019X_1^2 - 0,0595 X_3^2$	74,50%	X_2 : 0,116; X_1^2 : 0,022; X_3^2 : 0,122

A análise de regressão para o Número kappa mostrou que a concentração de NaOH é um fator significativo no modelo. Ela influencia de modo linear, provocando a redução do número kappa caso houver aumento na concentração de NaOH. Isso pode ser visto, uma vez que o índice do fator na equação é negativo. No modelo de regressão também são verificados os efeitos quadráticos positivos das concentrações de AQ e de NaOH, bem como a interação positiva entre os fatores concentração de AQ e tempo.

O valor de R^2 do modelo gerado é próximo de 1, indicando que o ajuste está coerente com os dados amostrais. Dados da literatura fortalecem o modelo proposto, já que um aumento na concentração de NaOH acarreta na diminuição do número kappa, indicando o maior grau de deslignificação. Por outro lado, estudos verificaram também que a presença de quantidade pequena de licor afeta o número kappa (ABNT, 2005), por tal razão, se a lavagem da amostra polpeada for deficiente, esta variável pode aumentar.

A análise de regressão para capacidade de absorção mostrou que o efeito quadrático

positivo da concentração de AQ é significativo no modelo, no entanto, o modelo não demonstrou significância estatística para os fatores tempo e concentração de NaOH.

Na análise de regressão para a variável velocidade de absorção, verificou-se a significância estatística para o efeito quadrático negativo do fator tempo. Por fim, para construção do modelo para a variável densidade aparente, a análise de regressão mostrou a influência linear e positiva do fator tempo e efeitos quadráticos negativos tanto para o fator concentração de AQ quanto para concentração de NaOH.

Com base nas equações de regressão geradas, que destacam os coeficientes significativos ao modelo, fez-se o uso do software para a geração de Gráficos de Superfície de Resposta que destacam para cada uma das variáveis de resposta a interação de pares dos fatores controláveis ou até mesmo os efeitos quadráticos. Nos Apêndices 1 e 2 são mostrados estes gráficos, com os efeitos dos fatores, através de gráficos: tempo *versus* concentração de NaOH; concentração de AQ *versus* concentração de NaOH e concentração de AQ *versus* tempo.

Para os ensaios que contemplaram apenas extração alcalina, a análise do gráfico concentração de AQ *versus* tempo para o número Kappa tem inclinação, indicando o efeito quadrático da variável tempo. Para as variáveis capacidade de absorção, velocidade de absorção e densidade aparente, os gráficos mostram o comportamento da interação tempo *versus* concentração de NaOH.

Enquanto isso, os gráficos dos experimentos que tiveram a reação de hidrólise ácida seguida de extração alcalina, para o número Kappa, mostram os efeitos quadráticos da concentração de AQ e de NaOH através do gráfico concentração de AQ *versus* concentração de NaOH. A interação positiva entre as variáveis concentração de AQ e tempo, através do gráfico com ambos os fatores.

Para a variável capacidade de absorção, verifica-se que o efeito quadrático da variável concentração de AQ através da interação concentração de AQ *versus* tempo. O mesmo gráfico foi construído para a variável velocidade de absorção a fim de revelar o efeito quadrático do fator tempo. Tais resultados indicam que seria conveniente encontrar um valor ótimo entre os fatores tempo e concentração de AQ, já que ambas influenciam tanto na capacidade de absorção quanto na velocidade de absorção, que são variáveis de resposta importantes para polpas que se destinem a fins sanitários. São variáveis relevantes, pois do ponto de vista prático, a polpa deve atender a estes parâmetros.

Por fim, para a variável densidade aparente foi construído o gráfico concentração de AQ

versus concentração de NaOH, para se observar a inclinação indicativa dos efeitos quadráticos destes fatores. Pela análise pode se propor regiões que conduzam a menores valores de densidade aparente, pois assim geralmente tem-se a polpas mais absorventes.

A geração tanto de modelos de regressão, quanto de gráficos de superfície de resposta pode conduzir à análise e proposição de condições favoráveis à qualidade das polpas obtidas. Logo, com o auxílio do *software* foi possível prever a otimização das variáveis de resposta em conjunto, através da otimização multivariada, a partir dos valores de referência usados comercialmente. A otimização multivariada foi feita através dos modelos gerados para cada uma das variáveis de resposta, estimando a importância relativa de cada uma destas variáveis através de números numa escala de 1 a 10.

A variável capacidade de absorção ganhou maior importância, sendo atribuído o valor 10. Logo, para a variável velocidade de absorção foi atribuído o valor 7. A variável densidade aparente teve valor 4 proposto, enquanto a variável número kappa teve a menor importância relativa com valor 1. Os Apêndices 3 e 4 mostram os gráficos gerados para o comportamento de cada um dos três fatores controláveis frente às variáveis de resposta segundo os modelos propostos apresentados nas Tabelas 9 e 10. A otimização foi feita a partir da codificação dos três fatores controláveis, respeitando o intervalo superior para o ponto estrela de 1,68 e inferior para o ponto estrela -1,68. Na tabela 11 são listados os limites inferiores e superiores especificados para as variáveis de resposta, bem como, o valor alvo.

Tabela 11 – Especificações para as variáveis de resposta dos experimentos com extração alcalina após hidrólise ácida após otimização

Variável de resposta	Limite inferior	Valor alvo	Limite superior
Número kappa	5	8	10
Capacidade de absorção de água [g de água/g polpa seca]	8	10	12
Velocidade de absorção [g/s]	3,2	12	20
Densidade da folha de polpa [g/cm ³]	0,4	0,55	0,6

Na tabela 12 são listados os valores e os pontos experimentais para os valores otimizados de cada variável de resposta através de otimização multivariada.

Tabela 12 – Valores propostos para as variáveis de resposta dos experimentos com extração alcalina após hidrólise ácida após otimização

Variável de Resposta	Valores otimizados		Nível para fator concentração de AQ		Nível para fator tempo		Nível para fator concentração de NaOH	
	Sem hidrólise	Com hidrólise	Sem hidrólise	Com hidrólise	Sem hidrólise	Com hidrólise	Sem hidrólise	Com hidrólise
Número Kappa	41,4784	95,7789	-1,68	-1,68	-1,68	-1,68	-1,68	-1,68
Capacidade e de absorção	4,3219	4,2648	-1,68	-1,68	-1,68	-1,68	-1,68	-1,68
Velocidade e de absorção	1,0272	0,4458	-1,68	-1,68	-1,68	-1,68	-1,68	-1,68
Densidade aparente	1,1406	0,8592	-1,68	-1,68	-1,68	-1,68	-1,68	-1,68

No entanto, mesmo com otimização das variáveis, a partir dos resultados apresentados, verifica-se que as polpas produzidas pelos processos propostos não atendem as características da qualidade requeridas para polpas absorventes. Os números kappa bastante elevados, não estão adequados aos de referência para polpas com fins sanitários, geralmente entre 5 a 10. Os tempos de absorção muito longos apresentados pelas polpas conduziram a baixas velocidades de absorção, que estão entre valores inferiores ou próximos de 1g/s. Por sua vez, a capacidade de absorção, também é baixa para as amostras, apresentando valores máximos próximo de 5g de água/g de polpa seca. Para a variável densidade aparente, as amostras estudadas indicaram valores próximos à 1g/cm³ ou ligeiramente superiores, não atendendo também os valores comerciais de referência.

Em vista do exposto, seria indicado que os experimentos fossem reproduzidos, para comprovar estes valores. Outro fator refere-se à caracterização morfológica da fibra, para propostas de melhorias nos experimentos, bem como proposição de pré-tratamento da mesma. Devido às limitações impostas pelo processo, quanto ao uso de temperaturas não superiores a 127°C, as condições de processo ficaram desfavoráveis. A literatura recomenda que sejam usadas temperaturas na faixa de 170°C, sendo que o tempo de processamento pode auxiliar o processo de deslignificação caso estas temperaturas não sejam possíveis. Entretanto, no estudo, o tempo prolongado na polpação não supriu totalmente deficiências na deslignificação. De acordo com dados levantados na literatura, sugere-se para trabalhos futuros, investigar faixas de temperatura entre 150 a 180°C, com tempo de polpeamento entre 90 a 180 minutos, concentração de NaOH nos intervalo investigado de 10 a 34% e concentração de AQ de 0 a 1% em relação à matéria seca.

5. CONCLUSÃO

Face à problemática de geração de resíduos pela agroindústria e o impacto ambiental causado pelo acúmulo destes no meio ambiente, a proposição de valorização dos mesmos é uma alternativa de relevância econômica e ambiental. O objetivo deste estudo foi verificar a viabilidade de extração de celulose das bainhas da Palmeira Real da Austrália para a obtenção de fibra com capacidade absorvente e baixo teor de lignina residual, bem como revelar a influência dos fatores controláveis de processo sobre as variáveis de resposta analisadas.

Tendo em vista possibilidade de obtenção de polpa de celulose com as características de interesse, foi proposta a extração de celulose em meio alcalino das bainhas da Palmeira Real da Austrália. A espécie referida gera matéria-prima para indústria beneficiadora de palmito em conserva, que por sua vez gera resíduos com potencial de reaproveitamento para produtos de valor agregado, assim foram testadas condições de extração do resíduo via projeto de experimentos.

Para o projeto de experimentos fez-se uso da Metodologia de Superfície Resposta (MSR) com um projeto de experimentos do tipo PCSO, no qual os fatores controláveis foram codificados para que se tornasse possível comparar os efeitos dos diferentes fatores controláveis. Para tanto, foram gerados modelos para as variáveis de resposta (número kappa, capacidade de absorção, velocidade de absorção e densidade aparente) através de regressão múltipla, adotando nível de significância estatística de 15%. Tais modelos contemplaram a influência dos três fatores controláveis: Concentração de AQ (0,33 a 1,17%), Tempo de Reação (110 – 160 minutos) e Concentração de NaOH (10 – 34 %) sobre as variáveis de resposta.

A partir dos resultados apresentados pelos ensaios do projeto experimental, verifica-se que as polpas produzidas pelos processos propostos não atendem as características da qualidade requeridas para polpas absorventes. Os números kappa bastante elevados, não estão adequados aos de referência para polpas com fins sanitários, geralmente entre 5 a 10. Os tempos de absorção muito longos apresentados pelas polpas conduziram a baixas velocidades de absorção, que estão entre valores inferiores ou próximos de 1g/s. Por sua vez, a capacidade de absorção, também é baixa para as amostras, apresentando valores máximos próximo de 5g de água/g de polpa seca. Para a variável densidade aparente, as amostras estudadas indicaram valores próximos à 1g/cm³ ou ligeiramente superiores, não atendendo também os valores comerciais de referência.

No estudo prático e exploratório, o tempo prolongado na polpação não supriu totalmente deficiências na deslignificação, uma vez que se teve a limitação imposta pelo processo com uso de temperatura máxima de 127°C, inferior às temperaturas recomendadas pela literatura que ficam entre 160 a 170°C. Em vista do exposto, seria indicado que os experimentos fossem reproduzidos, para comprovar os valores expostos, bem como, sugere-se para trabalhos futuros, investigar faixas de temperatura entre 150 a 180°C, com tempo de polpamento entre 90 a 180 minutos, concentração de NaOH nos intervalo investigado de 10 a 34% e concentração de AQ de 0 a 1% em relação à matéria seca.

No caso de ainda haver a restrição quanto ao uso de temperaturas mais elevadas, os ensaios poderiam seguir os mesmos intervalos de concentração de AQ e de NaOH, porém com intervalos de investigação maiores para o fator tempo, a fim de servirem de indicativo para análise do efeito deste fator nas variáveis de resposta.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) pelo fornecimento de bolsa de pesquisa. Também agradecemos ao laboratório que permitiu a realização deste estudo disponibilizando materiais e equipamentos (FEPAGRO) e à empresa beneficiadora de material vegetal pelo fornecimento de matéria-prima para a realização dos experimentos.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR ISO 302. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Pasta celulósica - Determinação do número kappa**, 2005.
- ABNT NBR 15004. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Papel e Produto para fins sanitários – Determinação da capacidade e tempo de absorção de água, 2003.
- ABNT NBR NM-ISSO 534. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Papel e Cartão – Determinação da espessura e da densidade aparente de uma única folha ou de um maço, 2006.
- ANDRADE, A. M. et al. Polpação Kraft do estipe de *Euterpe edulis* Martius (Palmiteiro). **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 07, n. 01, p.227 – 237, jan/dez. 2000.
- ANTONY, J.; HUGHES, M.; KAYE, M. Reducing manufacturing process variability using experimental design technique; a case study. **Integrated Manufacturing Systems**, v.10, Iss: 3, p.162 – 170, 1999.
- ANTUNES, A.; AMARAL, E.; BELGACEM, M. N. Cynara cardunculus L.: chemical composition and soda-anthraquinone cooking. **Industrial Crops and Products**, Tucson, v.12, p.85–91, 2000.
- BARBETTA, P. A.; LEHRER, C. O uso da metodologia de superfície de resposta para adequar os parâmetros de entrada de um algoritmo genético. In: XXI ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 21., 2001, Salvador. **Anais...** Salvador:

[s.n], 2001.

BORDERES, J. **Produção de *Pycnoporus sanguineus* em resíduos do processamento da palmeira-real-da-australia**. 2006. 9p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Ciências Biológicas) – Fundação Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2006.

CALADO, V.; MONTGOMERY, C. D. **Planejamento de experimento usando o *Statistica***. Rio de Janeiro: E-paper, 2003.

CASEY, J. P. **Pulp and paper: chemistry and chemical technology**. 2.ed. New York: Interscience, 1960. v.2.

CENTRO NACIONAL DE TECNOLOGIAS LIMPAS (CNTL). **Cinco fases da implantação de técnicas de produção mais limpa, série manuais de produção mais limpa**. Porto Alegre: SENAI-RS, 2003. Disponível em: <<http://www.senairs.org.br/cntl/>>. Acesso em: 24 dez. 2009.

CHO, I. H.; ZOH, K. D. Photocatalytic degradation of azo dye (Reactive Red 120) in TiO₂/UV system: Optimization and modeling using a response surface methodology (RSM) based on the central composite design. **Dyes and Pigments**, v. 75, p. 533-543, 2007.

D'ALMEIDA, M. L. O. **Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica**. 2.ed. São Paulo: SENAI; IPT, 1988. v.1.

ELANTHIKKAL, S. et al. Cellulose microfibrils produced from banana plant wastes: isolation and characterization. **Carbohydrate Polymers**, [s.l.], v.80, p.852–859, 2010.

FOELKEL, E. Mini artigo técnico: Polpas ou Celuloses Tipo "Fluff". Disponível em: <http://www.celso-foelkel.com.br/pinus_26.html>. Acesso em: 12 set. 2010.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Porto Alegre, RS). Reinaldo Simões Gonçalves. **Processo de produção por hidrólise ácida a partir da planta de palmeira de inulina e substrato para plantas**. BR n. PI 0606063-3A, 27 dez. 2006, 19 ago. 2008.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 1991.

GOMIDE, J. L.; VIVONE, R. R.; MARQUES, A. R. Utilização do processo soda/antraquinona para produção de celulose branqueável de *Eucalyptus* spp. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ABCP, 20., 1987. **Trabalhos publicados**. São Paulo: [s.n.], 1987, p.35-42.

HARRIS, E. E.; BEGLINGER, E. Madison wood sugar process. **Industrial and Engineering Chemistry**, Washington, v.38, n.9, p.890-895, 1946.

HICKS, C. R.; TURNER, K. V. **Fundamental concepts in the Design of Experiments**. 5.ed. New York: Oxford University Press, 1999.

HOLTON, H. H. Soda additive softwood pulping a major new process. **Pulp Paper Can**, 78, T218–T223, 1997.

ISRAEL, C.M. **Utilização do resíduo do processamento do palmitero para a produção de enzimas hidrolíticas por fungos do gênero *Polyporus***. 2005. 136p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Ambiental) - Fundação Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2005.

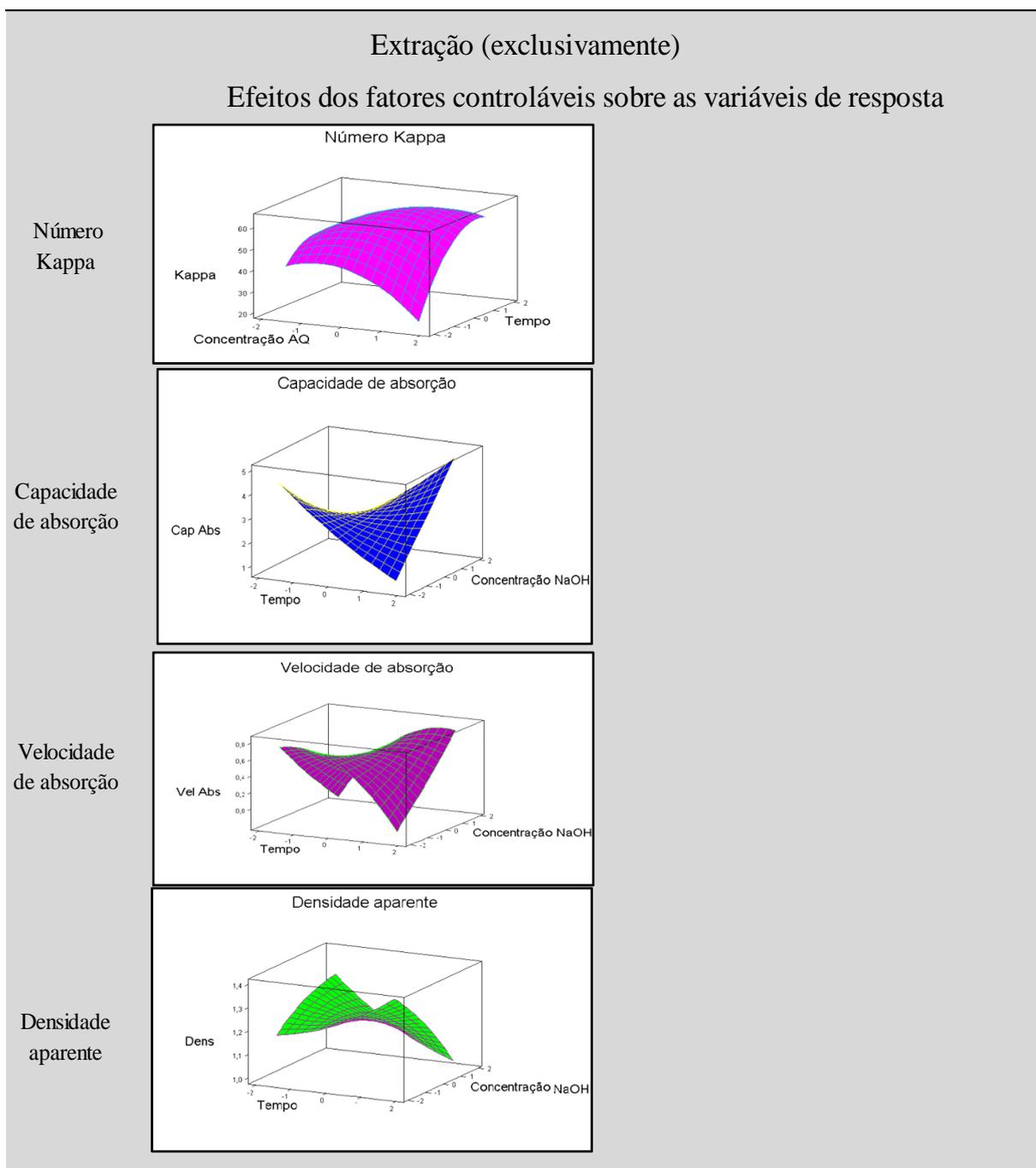
JIJU, A. DE. **Design of experiments for engineers and scientist**. New York: Elsevier, 2003.

- JIMÉNEZ, L. et al. Soda-anthraquinone pulping of palm oil empty fruit bunches and beating of the resulting pulp. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 100, p.1262-1267, 2009.
- JOHN, M. J.; THOMAS, S. Biofibres and biocomposites. **Carbohydrate Polymers**, [s.l.], v.71, p.343–364, 2008.
- JORDÃO, M.C.S.; NEVES, J.M. Avaliação de pastas lignocelulósicas para fins absorventes com ênfase em pasta fofa (*fluff pulp*). **O Papel**, São Paulo, p.53-62, 1989.
- KEREM, Z.; FRIESEM, D.; HADAR, Y. Lignocelulose degradation during solid- state fermentation: pleorotus ostreatus versus phanerochaete chrisporium. **Applied and Environmental Microbiology**, [s.l.], v.58, n.4, p.1121-1127, 1992.
- KHIARI, R. et al. Chemical composition and pulping of date palm rachis and Posidonia oceanica – a comparison with other wood and non-wood fibre sources. **Bioresource Technology**, [s.l.], v.101, p.775–780, 2009.
- KHRISTOVA, P. et al. Alkaline pulping with additives of date palm rachis and leaves from Sudan. **Bioresource Technology**, [s.l.], v.96, p.79–85, 2004.
- KHRISTOVA, P. et al. Environmentally friendly pulping and bleaching of bagasse. **Industrial Crops and Products**, [s.l.], v.23, p.131-139, 2006.
- LIMA, L.R.; MARCONDES, A.A. Farinha de palmito. In: ENCONTRO NACIONAL DE PRODUTORES DE PALMITO DA PALMEIRA-REAL, 3, 2005, Balneário Camboriu. **Anais...** Florianópolis: Abrapalmer; EPAGRI, 2005.
- McDONOUGH, W.; BRAUNGART, M. **Remaking the way we make things: cradle to cradle**. New York: North Point Press, 2002.
- MONTGOMERY, C. D. **Design and analysis of experiments**. 5.ed. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- MONTGOMERY, D. C. **Introduction to Statistical Quality Control**. 5.ed. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2005. 759p.
- MOSKOWITZ, H. R. One practitioner's overview to applied product optimization. **Food Quality and Preference**, [s.l.], v.6, p.75 – 81, 1995.
- OKEKE, B. C.; OBI, S. K. C. Lignocelulose and sugar compositions of some agro-waste materials. **Bioresource Technology**, [s.l.], v.47, p.283, 1994.
- PAULI, G. **Emissão zero: a busca de novos paradigmas: o que os negócios podem oferecer à sociedade**. Tradução José W. M. Kaehler, Maria T. R. Rodriguez. Porto Alegre: EDIPUCRS, 1996.
- PAULI, G. **Upsizing: como gerar mais renda, criar mais postos de trabalho e eliminar a poluição**. Porto Alegre: L&PM, 1998.
- RAJARATHNAM, S.; SHASHIREKA, M. N.; BANO, Z. Biopotentialites of the basidiomycetes. **Advances in Applied Microbiology**, [s.l.], v.37, p.223-361, 1992.
- REDDY, N.; YANG, Y. Properties and potential applications of natural cellulose fibers from cornhusks. **Green Chemistry**, [s.l.], v.7, p.190–195, 2005.
- REDDY, N.; YANG, Y. Natural cellulose fibers from soybean straw. **Bioresource Technology**, [s.l.], v.100, p.3593–3598, 2009.

- REZAYATI-CHARANI, P.; MOHAMMADI-ROVSHANDEH, J. Effect of pulping variables with dimethyl formamide on the characteristics of bagasse-fiber. **Bioresource Technology**, v. 96, p. 1658–1669, 2005.
- REZAYATI-CHARANI, P. et al. Influence of dimethyl formamide pulping of bagasse on pulp properties. **Science Direct**, v. 97, p. 2435-2442, 2006.
- RIBEIRO, J. L. D. **Projeto de experimentos**. Porto Alegre: UFRGS, 2007. Apostila didática do Curso de Engenharia de Produção.
- RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. S. ten. **Projeto de experimentos**. Porto Alegre: PPGEP/UFRGS, 2003.
- RODRÍGUEZ, A. et al. Feasibility of rice straw as a raw material for the production of soda cellulose pulp. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v.18, p.1084-1091, 2010.
- SANTOS, S. R.; SANSÍGOLO, C. A. **Deslignificação e resistências de polpas obtidas pelos processos Kraft, Kraft-AQ, Soda-AQ e soda de madeira de Eucalyptus grandis**, In: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE INVESTIGAÇÃO EM CELULOSE E PAPEL, 3., 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo: [s.n], 2002.
- SEMRAU, K. T.; JONES J. L. Wood hydrolysis for ethanol production previous experience and the economics of selected process. **Biomass**, [s.l.], v.5, n.2, p.109-135, 1984.
- SILVA JÚNIOR, F. G.; DURAN, N.; MEI, L. I. Avaliação do efeito da antraquinona e surfactante sobre a polpação kraft de Eucalyptus sp. **O Papel**, São Paulo, v.59, n.5, p.60-65, 1998.
- SIXTA, H. **Handbook of pulp**, v.1. Lenzing: Wiley-VCH, 2006.
- SMOOK, G.A. **Handbook for pulp and paper technologists**. Atlanta, TAPPI. 1982, 395p.
- SOUZA, A. H. C. B. et al. **Guia técnico ambiental da indústria de papel e celulose**. São Paulo: CETESB, 2008.
- TONINI, R. C. G. **Utilização da bainha mediana de palmito (*Euterpe edulis* Mart. *Arecaceae*) como substrato para cultivo de *Lentinula edodes* (Beck.) Pegler**. 2004. 125p. Dissertação (Mestrado de Engenharia Ambiental) – Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2004.
- VASCONCELOS, F. S. R. **Avaliação do processo SuperBatch™ de polpação de Pinus taeda**. 2005. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais com opção em Tecnologia de Produtos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- VIEIRA, M.A. **Caracterização de farinhas obtidas dos resíduos da produção de palmito da palmeira-real (*Arcontophoenix alexandrae*) e desenvolvimento de biscoito fibroso**. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2006.
- ZENG, X. et al. Statistical optimization of culture conditions for bacterial cellulose production by *Acetobacter xylinum* BPR 2001 from maple syrup. **Carbohydrate Polymers**, v. 85, p. 506–513, 2011.

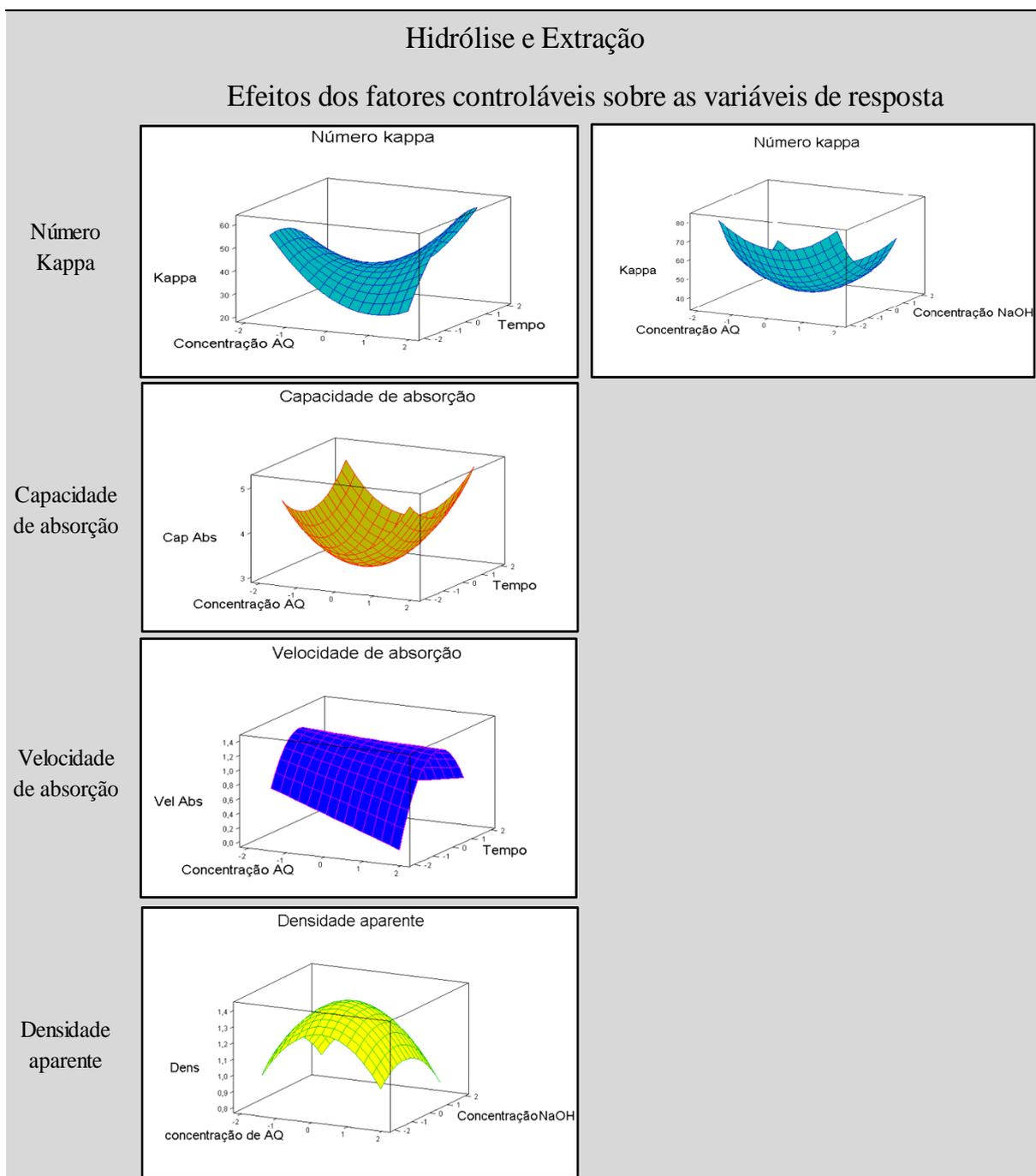
APÊNDICE 1

Gráficos de Superfície Resposta para extração

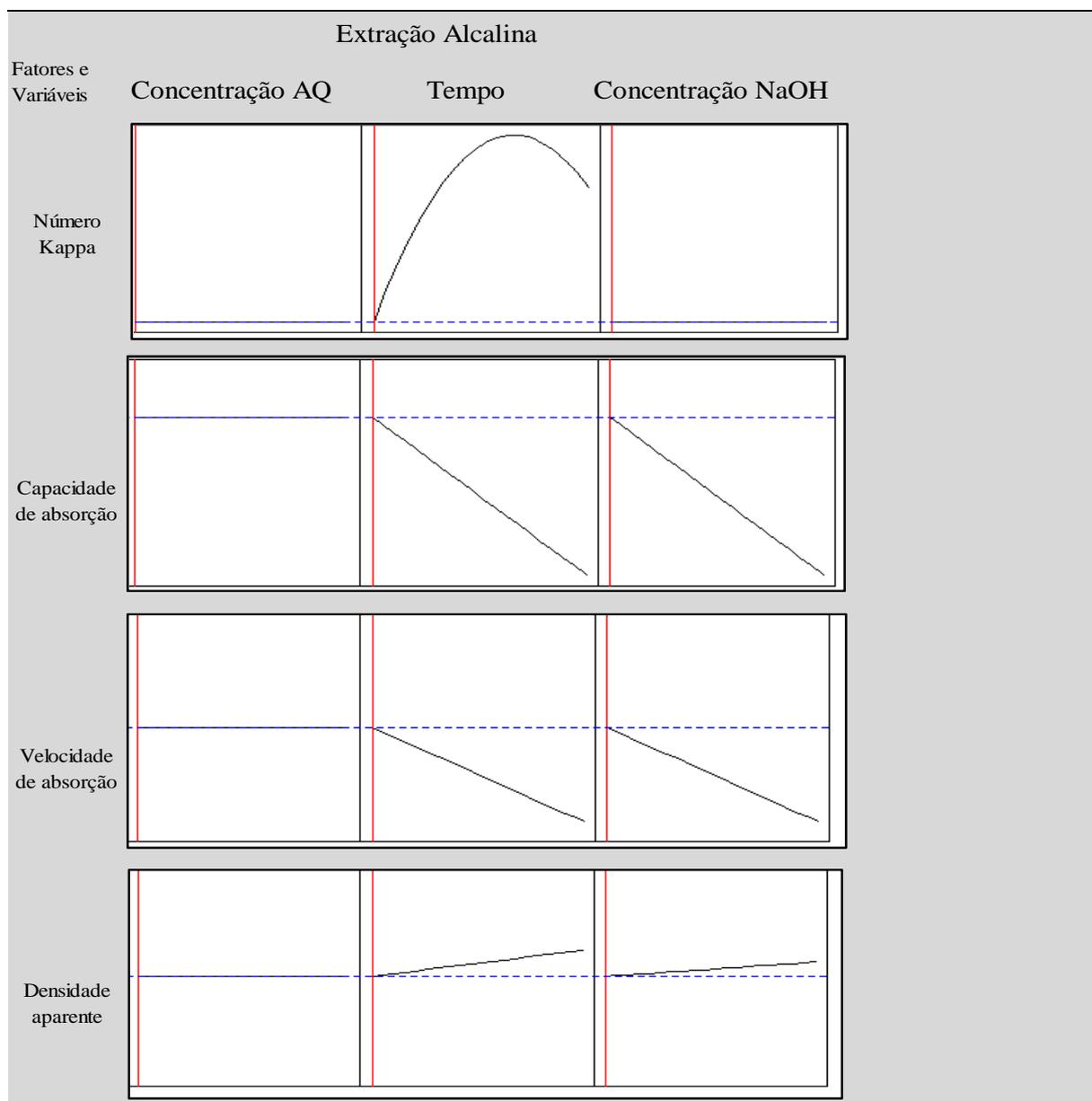


APÊNDICE 2

Gráficos de Superfície Resposta para extração seguida de hidrólise

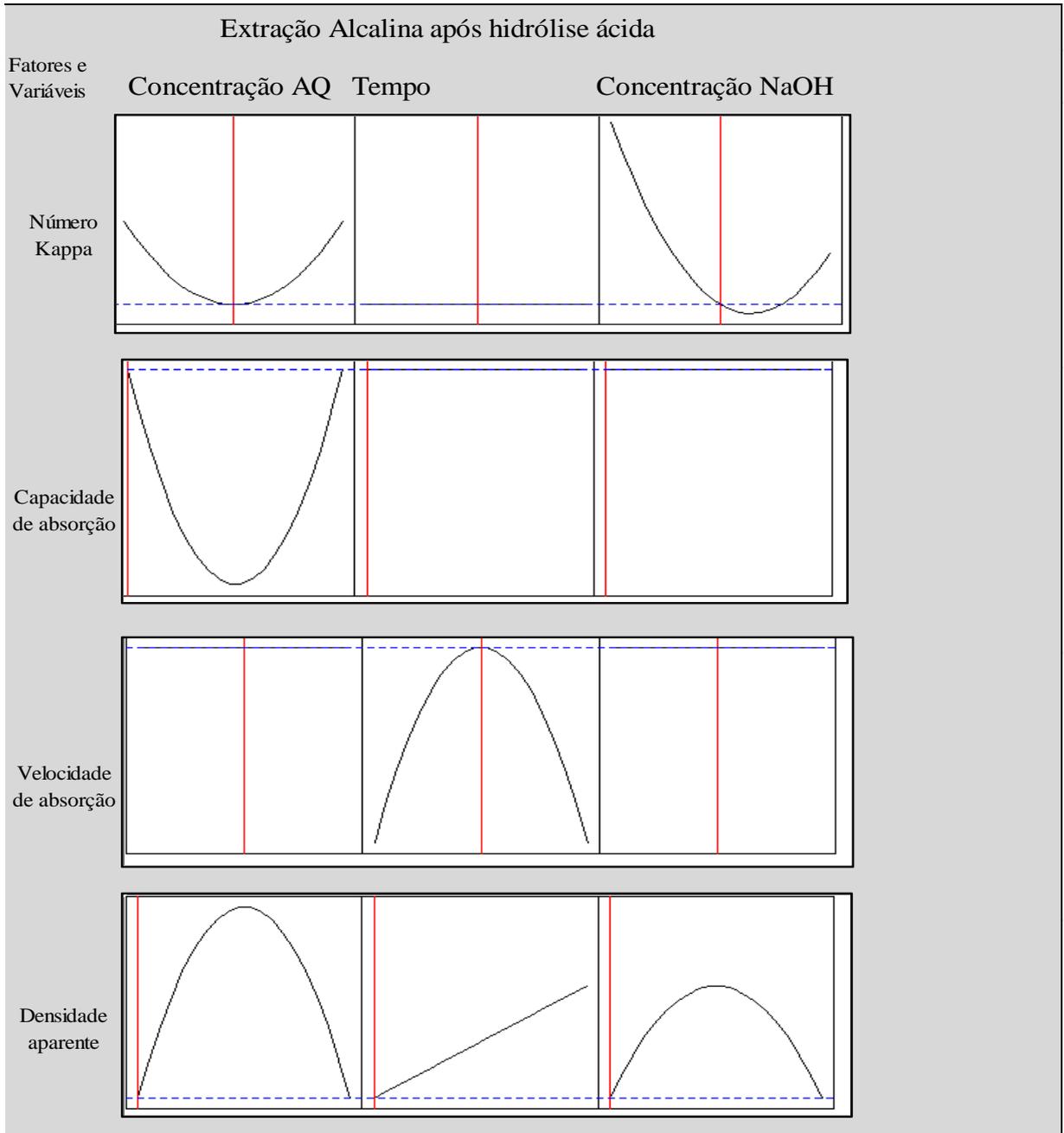


APÊNDICE 3
Gráficos Otimização para variáveis após extração



APÊNDICE 4

Gráficos Otimização para variáveis após extração seguida de hidrólise



5. COMENTÁRIOS FINAIS

Este capítulo apresenta inicialmente as conclusões da dissertação, e na sequência, estão as sugestões para trabalhos futuros.

5.1 Conclusões

Nesta dissertação foi discutida a relevância das abordagens que tratam sobre sustentabilidade para a condução de processos e desenvolvimento de produtos e a possibilidade de extração de celulose de resíduos vegetais lignocelulósicos gerados nos processos da agroindústria. O objetivo geral deste trabalho foi realizar um estudo exploratório de extração de celulose a partir de resíduo do processo produtivo de empresa beneficiadora de material vegetal, sob perspectiva das dimensões ambiental e econômica da sustentabilidade. Para que o objetivo geral proposto e seus desdobramentos fossem atingidos, foram realizados três artigos.

O primeiro artigo apresenta as abordagens que tratam de sustentabilidade e suas diretrizes com enfoque ambiental e econômico, a fim de gerar informações para a avaliação de processos. Neste artigo foram mostrados os processos industriais de extração de celulose descritos na literatura, identificando suas variáveis, características de operação e flexibilidade quanto à adequação de uso de diferentes matérias-primas. A partir das informações estudadas foi elaborada uma tabela que mostrava as diretrizes com enfoque econômico e ambiental descritas em abordagens sobre sustentabilidade, que serviram de base para proposição de critérios de avaliação dos processos industriais de extração de celulose quanto ao atendimento ou não dos mesmos. Para a análise fez-se pesquisa em material bibliográfico e questionamentos com profissionais do meio.

Os processos de extração de celulose têm evoluído na adequação de práticas sustentáveis, contemplando operações que visam o controle de emissões, eficiência no uso de recursos materiais e energéticos e minimização ou reaproveitamento de resíduos e maior eficiência na deslignificação. Entretanto, o uso de grandes áreas para plantação de florestas de reflorestamento é uma realidade possível de ser mudada. Nesta perspectiva, sugere-se o uso de resíduos vegetais provenientes de atividades da agroindústria para a obtenção de celulose. Como os processos foram desenvolvidos para madeira, cabe determinar condições que permitam a extração de celulose de materiais vegetais lignocelulósicos que seriam destinados

a resíduos. A análise dos processos e suas características acerca de sustentabilidade e adequação ao uso de fontes vegetais não madeira, como resíduos vegetais, permitiu a escolha do processo que melhor atendesse aos critérios de sustentabilidade.

A análise conduziu à escolha do processo Soda por atender a maior parte dos critérios de sustentabilidade definidos e ainda ser aplicável a diferentes fontes vegetais lignocelulósicas. Uma vez que o processo não usa compostos de enxofre no licor de polpeamento, mas apenas NaOH, o uso de aditivos pode aprimorar a seletividade do processo, sem haver o inconveniente de geração de compostos odoríferos emitidos na atmosfera. Na seleção de processos e verificação do atendimento a critérios sustentáveis, vale lembrar que muitas vezes as melhorias dependem da empresa ter recursos financeiros para aplicar em seus projetos e processos com aquisição de tecnologias e materiais. Do mesmo modo, clientes aos quais se destinam os produtos devem estar cientes de práticas sustentáveis para que os resultados sejam otimizados. O artigo serviu de base para o planejamento do estudo de extração de celulose.

As variáveis de processo, empresa beneficiadora de material vegetal que gerasse grande volume de resíduos em seus processos e disposta a estudar meios de valorização de seu resíduo foram determinadas a fim de tornar possível a realização desta pesquisa.

Por sua vez, alinhado ao objetivo geral desta dissertação, o segundo artigo apresentou a empresa alvo do estudo, o mapeamento do seu processo produtivo, que era o beneficiamento do palmito para produção de conservas. Este processo, por apresentar alto volume de resíduos gerados foi estudado para gerar a proposta de aproveitamento dos resíduos gerados no mesmo. As condições experimentais de processos de extração para materiais vegetais lignocelulósicos, foram estudadas a fim de definir as variáveis associadas ao mesmo. Para a proposição de um cenário de valorização de resíduos, o processo de extração de celulose foi adaptado segundo as limitações impostas pelas instalações da unidade fabril, ainda que permeando os aspectos das abordagens sustentáveis com enfoque ambiental e econômico. Foram realizados ensaios experimentais contemplando os cenários de valorização de resíduos, a fim de analisar a qualidade da polpa obtida em condições distintas e propor estudo exploratório para extração de celulose do resíduo.

O estudo em campo indicou que resíduos podem ser valorizados por diferentes caminhos processuais, gerando produtos com propriedades distintas. Ainda, foram levantadas

limitações nas instalações industriais que afetam no processo, que deverão ser submetidas a estudos visando realizar melhorias e aumentar a eficiência nas operações. Outro resultado obtido remete sobre a possibilidade de testar diferentes condições de extração de celulose do material vegetal, uma vez identificados as variáveis controláveis (tempo de polpeamento, concentração de reagentes no licor de polpeamento e uso de aditivos de processo) que podem ter efeito sobre a polpa produzida pelos processos testados.

Por fim, o artigo três apresenta a aplicação experimental do estudo desenvolvido para extração de celulose de resíduo vegetal proveniente do beneficiamento do palmito. Foi aplicado um Projeto de Experimentos para a definição dos pontos experimentais. Para o projeto de experimentos fez-se uso da Metodologia de Superfície Resposta (MSR) com um projeto de experimentos do tipo PCSO, no qual os fatores controláveis foram codificados para que se tornasse possível comparar os efeitos dos diferentes fatores controláveis. Para tanto, foram gerados modelos para as variáveis de resposta (número kappa, capacidade de absorção, velocidade de absorção e densidade aparente) através de regressão múltipla, adotando nível de significância estatística de 15%. Tais modelos contemplaram a influência dos três fatores controláveis: Concentração de AQ (0,33 a 1,17%), Tempo de Reação (110 – 160 minutos) e Concentração de NaOH (10 – 34 %) sobre as variáveis de resposta. A análise estatística foi feita para mostrar a influência dos fatores controláveis sobre as variáveis de resposta.

A partir dos resultados apresentados pelos ensaios do projeto experimental, verifica-se que as polpas produzidas pelos processos propostos não atendem as características da qualidade requeridas para polpas absorventes no que tange os valores comerciais de referência. No estudo prático e exploratório, o tempo prolongado na polpação não supriu totalmente deficiências na deslignificação, uma vez que se teve a limitação imposta pelo processo com uso de temperatura máxima de 127°C, inferior às temperaturas recomendadas pela literatura que ficam entre 160 a 170°C. Em vista do exposto, seria indicado que os experimentos fossem reproduzidos, para comprovar os valores expostos, bem como, sugere-se para trabalhos futuros, investigar faixas de temperatura entre 150 a 180°C, com tempo de polpeamento entre 90 a 180 minutos, concentração de NaOH nos intervalos investigados de 10 a 34% e concentração de AQ de 0 a 1% em relação a matéria seca.

No caso de ainda haver a restrição quanto ao uso de temperaturas mais elevadas, os ensaios poderiam seguir os mesmos intervalos de concentração de AQ e de NaOH, porém

com intervalos de investigação maiores para o fator tempo, a fim de servirem de indicativo para análise do efeito deste fator nas variáveis de resposta.

A partir da união dos três artigos foi possível alcançar os objetivos propostos nesta pesquisa: *i)* no primeiro artigo foram identificadas na literatura as abordagens sustentáveis a fim de gerar critérios de avaliação dos processos de extração de celulose frente às dimensões econômica e ambiental, assim como, foi selecionado o processo tradicional de extração de celulose que está alinhado com tais dimensões e é mais flexível aos diferentes tipos de material vegetal; *ii)* no segundo artigo foi proposta a valorização de resíduos vegetais, logo, foi proposto e adaptado o processo industrial de extração de celulose para aplicação em resíduo vegetal, com enfoque nas diretrizes econômica e ambiental da sustentabilidade, ainda que atendendo as limitações do processo vigente na unidade industrial escolhida para este estudo; *iii)* no terceiro artigo foi realizado o estudo prático e exploratório do processo adaptado para fins de análise das polpas obtidas em relação ao número kappa, capacidade de absorção, velocidade de absorção e densidade aparente a partir de testes com diferentes condições de processo.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

No decorrer do estudo foi possível visualizar algumas propostas para trabalhos futuros: *i)* entrevistar mais empresas do setor de papel e celulose a fim de detalhar os pontos no processo que carecem de melhorias quanto aos aspectos de sustentabilidade; *ii)* propor pré-tratamento da matéria-prima; *iii)* realizar repetições nos ensaios com material vegetal (resíduos da Palmeira Real da Austrália), a fim de se analisar a variabilidade dos resultados que poderia impactar nos modelos propostos; *vi)* propor projeto de experimentos fatorial de dois níveis com quatro fatores controláveis (24) para analisar a influencia do pré-tratamento da matéria-prima nas variáveis de resposta; *vii)* adequar as limitações apresentadas quanto aos equipamentos da empresa e reproduzir em laboratório experimentos com mais altas temperaturas de operação para a extração de celulose, conforme dados disponíveis na literatura e *viii)* realizar ensaios de extração com outros materiais vegetais lignocelulósicos que seriam destinados a resíduos.

REFERÊNCIAS

ADENESKY FILHO, E. **Resíduos agroindustriais da palmeira real da Austrália *Archontophoenix alexandrae* H. Wendl. & Drude como componente para substratos de**

espécies ornamentais. 2007. 134f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2007.

ANSELMO FILHO, P.; BADR, O. Biomass resources for energy in North-Eastern Brazil. **Applied Energy**, v.77, p.51–67, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL (BRACELPA). **Dados do Setor**. Disponível em: <<http://www.bracelpa.org.br/bra/estatisticas/pdf/booklet/booklet.pdf>>. Acesso em: 12 dez. 2011. a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL (BRACELPA). **Relatório Anual, 2009/2010**. Disponível em: <<http://www.bracelpa.org.br/bra2/sites/default/files/estatisticas/rel2009.pdf>>. Acesso em: 11 dez. 2011. b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL (BRACELPA). **Tipos e aplicações**. Disponível em: <<http://www.bracelpa.org.br/bra2/?q=node/181>>. Acesso em: 11 dez. 2010. c.

CATAPAN, D. C.; CATAPAN, A.; CATAPAN, E. A. Produção mais limpa – a terceira geração da gestão ambiental. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 30., 2010, São Carlos, SP. **Anais...** São Carlos: ABEPRO, 2010.

DEMIRBAS, A. Waste management, waste resource facilities and waste conversion processes. **Energy Conversion and Management**, [s.l.], v.52, p.1280-1287, 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Cultivo do eucalipto**. Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Eucalipto/CultivodoEucalipto/01_Importancia_economica.htm>. Acesso em: 11 fev. 2011.

FIGUIREDO, C. J. J. et al. O desenvolvimento sustentável na agricultura: o caso de um sistemas agroindustrial. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 30., 2010, São Carlos, SP. **Anais...** São Carlos: ABEPRO, 2010.

GEETHAMMA, V. G. et al. Composite of short coir fibres and natural rubber: effect of chemical modification, loading and orientation of fibre. **Polymer**, [s.l.], v.39, n.6-7, p.1483-1491, 1998.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6 ed. São Paulo: Atlas, 2008

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/.2008>>. Acesso em: 20 jan. 2011.

ISRAEL, C.M. **Utilização do resíduo do processamento do palmito para a produção de enzimas hidrolíticas por fungos do gênero *Polyporus***. 2005. 136p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Ambiental) - Fundação Universidade Regional de Blumenau, Blumenau. 2005.

KHRISTOVA, P. et al. Environmentally friendly pulping and bleaching of bagasse. **Industrial Crops and Products**, [s.l.], v.23, p.131-139, 2006.

KURTZ, L. R. P. Desenvolvimento sustentável, uma análise crítica sobre a sustentabilidade econômica, social e ambiental. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 30., 2010, São Carlos, SP. **Anais...** São Carlos: ABEPRO, 2010.

LEITÃO, V. F. et al. Biomass residues in Brazil: availability and potential uses. **Waste Biomass Valor**, [s.l.], v.1, p.65-76, 2010.

- LIM, S. K. et al. Novel regenerated cellulose fibers from rice straw. **Journal of Applied Polymer Science**, [s.l.], v.82, p.1705–1708, 2001.
- LINS, C.; OUCHI, H. C. **Sustentabilidade corporativa – papel e celulose**. Rio de Janeiro: Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável, 2007.
- LINS, C.; ZYLBERSTAJN, D. **Sustentabilidade e geração de valor: a transição para o século XXI**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.
- MESQUITA, R. A. S.; COSTA, R. P. Sustentabilidade de uma rede de pequenos produtores agroecológicos: o papel da Engenharia de Produção. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 30., 2010, São Carlos, SP. **Anais...** São Carlos: ABEPRO, 2010.
- MTUI, Y. S. G. Recent advances in pretreatment of lignocellulosic wastes and production of value added products. **African Journal of Biotechnology**, [s.l.], v.8, n.8, p.1398-1415, apr. 2009.
- NUINTIN, A. A.; LIMA, E. A.; CURI, M. A. Avaliação do sistemas de gestão integrada sob os aspectos de sustentabilidade – econômico, social e ambiental – utilizando indicadores: o caso de uma organização distribuidora de derivados de petróleo e etanol. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 30., 2010, São Carlos, SP. **Anais...** São Carlos: ABEPRO, 2010.
- RAJARATHNAM, S.; SHASHIREKA, M. N. ; BANO, Z. Biopotentialites of the basidiomacromycetes. **Advances in Applied Microbiology**, [s.l.], v.37, p.223-361, 1992.
- REDDY, N.; YANG, Y. Properties and potential applications of natural cellulose fibers from cornhusks. **Green Chemistry**, [s.l.], v.7, p.190–195, 2005.
- ROCHA, F. B. de A. et al. Gestão de resíduos como ferramenta aplicada ao beneficiamento do coco verde. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 30., 2010, São Carlos, SP. **Anais...** São Carlos: ABEPRO, 2010.
- SANTIAGO, B. H.; SELVAM, P.V.P. **Tratamento superficial da fibra do coco: estudo de caso baseado numa alternativa econômica para fabricação de materiais compósitos**. Natal: Grupo de Pesquisa em Engenharia de Custos e Processos, Universidade Federal do Rio Norte, 2008.
- SATYANARAYANA, K. G. et al. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications. **Metals Materials and Processes**, [s.l.], v.17, p.299-318, 2005.
- SATYANARAYANA, K. G. et al. Studies on natural fibers of Brazil and green composites. **Composites: Part A**, [s.l.], v.38, p.1694-1709, 2007.
- SATYANARAYANA, K. G.; ARIZAGA, G. G. C.; WYPYCH, F. Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers — an overview. **Progress in Polymer Science**, [s.l.], v.34, p.982–1021, 2009.
- SILVA, M. C. et al. Characterization of three non-product materials from a bleached eucalyptus kraft pulp mill, in view of valorizing them as a source of cellulose fibres. **Industrial crops and products**, [s.l.], v.27, p. 288–295, 2009.
- SOUZA, A. H. C. B. et al. **Guia técnico ambiental da indústria de papel e celulose**. São Paulo: CETESB, 2008.

TONINI, R.C.G. **Utilização da bainha mediana de palmito (*Euterpe edulis* Mart.Arecaceae) como substrato para cultivo de *Lentinula edodes* (Beck.) Pegler.** 2004. 125p. Dissertação (Mestrado de Engenharia Ambiental) – Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2004.

VIDALES, L. T. et al. Identificação de resíduos vegetais com potencial para obtenção de celulose: estudo no Rio Grande do Sul e em Minas Gerais. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO – SIMPEP, 17., 2010, Bauru. **Anais...** Bauru: [s.n], 2010.

WORLD BANK GROUP. Pollution, prevention and abatement handbook. [s.l.]: Toward Cleaner Production, 1998. Disponível em: <http://smap.ew.eea.europa.eu/test1/fo1083237/poll_abatement_hanbook.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2010.

YOUNGQUIST, J. A. et al. In: SYMPOSIUM SPONSORED BY THE U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE FOREST SERVICE AND PARTNERS, 1996, Madison. **Proceedings...** Madison, WI: Forest Products Society, 1996. p.123-134.