

**VALOR DE ATR DA CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DE TEORES DE
BIOENERGIA E AÇÚCAR**

LARISSA CAROLINA GONÇALVES NEVES

**VALOR DE ATR DA CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DE TEORES DE
BIOENERGIA E AÇÚCAR**

LARISSA CAROLINA GONÇALVES NEVES

Dissertação apresentada à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade do Oeste Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre - Área de Concentração: Produção Vegetal

Orientador: Prof. Dr. Tadeu Alcides Marques

633.61
N515v

Neves, Larissa Carolina Gonçalves.

Valor de ATR da cana-de-açúcar em função de teores de bioenergia e açúcar / Neves., Larissa Carolina Gonçalves. – Presidente Prudente, 2013. 42f.: il.

Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade do Oeste Paulista – Unoeste, Presidente Prudente, SP, 2013.

Orientador: Prof Dr. Tadeu Alcides Marques

1. *Saccharum* SP.. 2. Qualidade. 3. Energia. I. Título.

LARISSA CAROLINA GONÇALVES NEVES

**VALOR DE ATR DA CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DE TEORES DE
BIOENERGIA E AÇÚCAR**

Dissertação apresentada à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade do Oeste Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre - Área de Concentração: Produção Vegetal

Presidente Prudente, 09 de outubro de 2013

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Tadeu Alcides Marques (Orientador)
Universidade do Oeste Paulista – Unoeste
Presidente Prudente-SP

Prof. Dr. Paulo Augusto Manfron
Universidade do Oeste Paulista – Unoeste
Presidente Prudente-SP

Prof. Dr. Hermas Amaral Germek
Faculdades de Tecnologia “Dep. Roque Trevisan” do
Centro Estadual de Educação Tecnológica “Paula Souza”
Piracicaba - SP

DEDICATÓRIA

Dedico esta pesquisa à Deus, que sempre me deu forças nas horas mais difíceis, iluminando e guiando o meu caminho em todos os momentos da minha vida.

À minha mãe Rosângela Mendes Gonçalves Neves e ao meu pai Aurelino de Souza Neves, que nunca mediram esforços para me ajudar, sempre me apoiando nas minhas decisões, e estando sempre presentes em toda a minha caminhada, me dando carinho, compreensão, e força nos momentos difíceis.

À minha irmã Lara Walessa Gonçalves Neves, pelo amor, carinho e confiança que sempre depositou em mim.

À minha “mãe” Carmem Maria de Jesus (avó), que durante toda a minha caminhada, acreditou no meu potencial, me dando sempre apoio e carinho.

Ao meu noivo Rafael Tomaz Moreira por sempre me apoiar, e me deixar confiante. Por sempre ser carinhoso e companheiro em todos os momentos. Obrigada por estarem sempre ao meu lado.

Amo todos vocês.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Dr. Tadeu Alcides Marques que, com muito carinho, paciência e rigidez de seus ensinamentos, me fez aprimorar meus conhecimentos podendo alcançar conquistas indescritíveis.

Aos colegas do CENTEC, Arleto Tenório dos Santos, Fábio Benincasa, pela força, no desenvolvimento da pesquisa. E em especial para Érick Malheiros Rampazo e Elvis Deltrejo Lima Junior, que não mediram esforços para que essa pesquisa fosse concluída, e contribuíram na execução das análises, tanto a campo, como laboratorial.

As amigas Jane Rodrigues Vasconcelos e Maryellen Costa Christovam pela amizade, companheirismo, compartilhamento dos momentos difíceis e alegres, e por toda a ajuda durante a execução do projeto.

À todos os Professores da Instituição, que compartilharam durante esse período os seus conhecimentos, ajudando na minha formação profissional.

Meu muito obrigada!!!

“O futuro pertence àqueles que acreditam na beleza de seus sonhos”

Eleanor Roosevelt.

RESUMO

Valor de ATR da cana-de-açúcar em função de teores de bioenergia e açúcar

No caso particular da cana-de-açúcar, os produtores são remunerados atualmente no Brasil, pelo teor de açúcares totais recuperáveis (ATR), que a matéria-prima apresenta ao chegar à indústria. Segundo CONSECANA: $ATR = 9,6316*PC+9,15*AR$, onde PC é a Pol da cana (sacarose aparente) e ARC são os açúcares redutores da cana (glicose +frutose). O objetivo da pesquisa foi propor alterações nos procedimentos utilizados para determinação matemática do ATR, estimando pelo poder calorífico do bolo úmido e peso do bolo úmido. O modelo final proposto fica então: $ATR = 25,9892 + 0,02172* PCbu* PBU +0,536* PBU - 4,14* PCbu + 4,8158*PC + 4,575* ARC$. Assim tem-se o ATR calculado em função do Poder calorífico do bolo úmido (PCbu), peso do bolo úmido (PBU), Pol da cana (PC) e Açúcares Redutores da Cana (ARC). Desta forma inclui-se na estimativa dos valores de ATR o Poder calorífico do bolo úmido, que reflete a bioenergia da fibra, peso do bolo úmido que estima a fibra da cana, além dos fatores já existentes, Pol da cana e Açúcares Redutores da cana. O modelo proposto estimou valores de ATR 11,08% superiores que o modelo Consecana.

Palavras-chave: *Saccharum*; Qualidade; Energia.

ABSTRACT

The TRS value of sugar cane in function of bioenergy and sugar tenors

In the specific case of sugarcane, producers in Brazil are currently paid by the content of total recoverable sugars (TRS) in the raw material when it reaches the industry. The according CONSECANA: $TRS = 9.6316 * PC + 9.15 * RSS$, where PC is the Pol in cane (apparent sucrose) and RSS are reducing sugars in sugarcane (glucose + fructose). The objective this research was to propose changes in the procedures used to mathematically determine the TRS, estimating the calorific value of moist cake and weight of moist cake. The final model is then proposed: $TRS = 25.9892 + 0.02172 * CVmc * WMC + 0.536 * WMC - 4.14 * CVmc + 4.8158 * PC + 4.575 * RSS$. Thus we obtain the TRS calculated according to the calorific value of moist cake (CVmc), weight of moist cake (WMC), Pol cane (PC) and the reducing sugars in sugarcane (RSS). This form is included in the estimation of TRS, the calorific value of moist cake, which reflects the bioenergy of fiber, weight of moist cake that estimates sugarcane fiber, in addition to existing factors Pol cane and reducing sugars in sugarcane. In the proposed model, the estimated values of TRS were 11.08% higher than the estimated values in the CONSECANA model.

Keywords: *Saccharum*; Quality; Energy.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1 Setor Sucreenergético Brasileiro.....	11
2.2 Biomassa de Cana-de-açúcar	12
2.3 Bagaço	15
2.4 Bioeletricidade.....	16
2.5 Análises Tecnológicas.....	17
2.5.1 ATR	18
2.6 Pagamento da cana-de-açúcar	19
2.7 Pagamento da cana-de-açúcar pelo teor de sacarose (PCTS).....	19
2.8 Pagamento da cana-de-açúcar pelo sistema Consecana	19
2.9 Poder calorífico	22
2.10 Fibra	23
3 HIPÓTESE E OBJETIVO	25
4 MATERIAL E MÉTODOS	26
4.1 Análises Tecnológicas.....	26
4.2 Análise de Fibra Real	27
4.3 Análise de Poder Calorífico	27
4.3.1 Poder calorífico na cana-de-açúcar desintegrada.....	27
4.3.2 Poder calorífico do bolo úmido	28
4.4 Modelagem Matemática	28
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
6 CONCLUSÃO.....	39
REFERÊNCIAS.....	40

1 INTRODUÇÃO

Na segunda década do século XXI o cultivo da cana-de-açúcar continua se expandindo, no Brasil, sendo que as taxas de expansão apresentam valores diferentes nas diferentes regiões produtoras. A previsão é que a área destinada ao cultivo no Brasil para a safra 2013/2014 tenha um acréscimo de aproximadamente 408 mil hectares, valor este 4,8% maior comparado à safra 2012/2013. Os Estados com maior acréscimo de áreas são Estado de São Paulo, com um aumento de 141,4 mil hectares, Minas Gerais, com 106,1 mil hectares, Goiás, com 101,1 mil hectares e Mato Grosso do Sul com 43,5 mil hectares. Este crescimento se deve à expansão de novas áreas de plantio das usinas já em funcionamento. A área cultivada com cana-de-açúcar, que será colhida na safra 2013/14, e destinada à atividade sucroalcooleira está estimada em 8,89 milhões de hectares, distribuídas em todos Estados produtores, sendo o Estado de São Paulo o maior produtor com 51,3% (4,56 milhões de hectares) (CONAB, 2013).

A biomassa vegetal é uma importante fonte de energia para a humanidade. Ela é a forma natural de armazenar uma fração da energia solar incidente no planeta, e até mesmo os combustíveis fósseis foram originados de biomassa. Um dos maiores desafios da humanidade é buscar soluções para utilizar de forma cada vez mais eficiente a biomassa vegetal oriunda de atividades agrícolas (GONÇALVES, 2010).

Caso a biomassa vegetal oriunda do cultivo da cana-de-açúcar for utilizada com fins energéticos o Brasil poderá ocupar posição estratégica privilegiada no cenário internacional. A biomassa residual resultante do processo industrial das usinas sucroalcooleira, em grande quantidade, integra-se favoravelmente ao processo de cogeração, que se constitui da produção simultânea e sequenciada de duas ou mais formas de energia a partir de um único combustível (TOLMASQUIM, 2007).

O bagaço está inserido em um grande contexto energético, e o seu volume encontrado nas indústrias permite que nos próximos anos a utilização para geração de energia seja feita em grande escala, os gastos para preparar este resíduo sucroalcooleiro são bem menores quando comparados a outras biomassas utilizadas em outros países na produção de bioenergia (FERREIRA, 2011).

O subproduto para cogeração possui grande poder energético, para cada tonelada de cana, cerca de 560.000kcal, contidas em 250 kg de bagaço, 392.000kcal em 70 litros de álcool produzido e 60.000kcal para 11.830 litros de biogás, produzidos na biodigestão da vinhaça, demonstrando que o bagaço possui maior energia do que o álcool e seu outro derivado da cana-de-açúcar (CORTEZ; LORA; OLEVARES GÓMEZ, 2008).

Romão Júnior (2009) relata que o bagaço nas décadas passadas era encarado como resíduo inconveniente devido à dificuldade de armazenamento, e agora juntamente com a palha são opções de lucratividade para as usinas, além de serem uma opção para solução de problemas de falta de energia, como ocorrido em 2001 (“apagão”) e, mais recentemente, com a crise do gás natural. Sendo assim, a energia contida na biomassa deve ser considerada na remuneração à matéria-prima, visto que no atual sistema (CONSECANA, 2006) a matéria prima é remunerada pelo teor de ATR contido, o qual irá proporcionar melhores índices de conversão em açúcar e bioetanol, sendo a geração de eletricidade “invisível” para este modelo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Setor Sucroenergético Brasileiro

Devido aos problemas de escassez dos recursos naturais, problemas ambientais e teorias alarmistas em relação às mudanças climáticas, os temas que relacionam energia e clima estão alcançando enormes impactos no meio científico internacional. A política energética brasileira promoveu enorme mudança na matriz energética, nas últimas décadas. O Brasil saiu de uma matriz energética baseada principalmente no petróleo e na lenha, para uma matriz totalmente diversificada, a qual contempla o petróleo e seus derivados, o gás natural, os biocombustíveis, a cana-de-açúcar, a energia eólica, o urânio, dentre diversas outras fontes. Utilizar com mais eficiência todos os recursos energéticos disponíveis, aproveitamento fontes alternativas de energia faz parte dos objetivos e programas das instituições de pesquisa e governamentais de diversos países, tendo a cogeração de energia como uma medida indispensável para suprir as demandas. Nos últimos anos, muitas empresas estão concentrando seus esforços na melhoria de uso dos potenciais energéticos, como meio de minimização de custos globais e maximização dos níveis de serviços obtendo maiores lucros devido à importância que a energia representa como fator determinante no desempenho das empresas. A bioenergia pode ser caracterizada como uma fonte potencial de vantagem competitiva e assim contribuir de forma significativa para a estrutura de custos (LIMA, 2009).

De acordo com Kitayama (2008), uma tonelada de cana-de-açúcar possui energia primária equivalente a 1,2 barris de petróleo. Desta energia, um terço está contida na sacarose e é plenamente utilizada na produção de etanol. Os outros dois terços estão contidos no bagaço e na palha, mas apenas uma reduzida parte, do total processado no Brasil, é utilizada para a produção de energia térmica e eletricidade para auto-suprimento e para a venda nos mercados cativo e livre.

A alternativa econômica atualmente mais viável de exploração do potencial energético do bagaço e da palha advém da queima desta biomassa com a finalidade de geração de energia elétrica para ser comercializada. Os novos projetos sucroenergéticos já incorporam em seus planos de negócio a comercialização de energia elétrica em conjunto com o foco principal que é a produção de etanol e/ou de açúcar. Os novos projetos têm como tecnologia padrão a extracondensação que

permite a geração de 80 KWh excedentes por tonelada de cana processada (CORRÊA NETO; RAMÓN, 2002). É importante assinalar que a estimativa de 80 KWh excedentes por tonelada de cana processada com base em turbinas de extra-condensação se refere à utilização apenas do bagaço de cana. Até recentemente esta era a única biomassa residual tecnologicamente viável para ser utilizada nas usinas sucroenergéticas como combustível. No entanto, o gradativo fim da prática das queimadas por imposição da legislação ambiental, irá disponibilizar grande quantidade de palha que será utilizada como insumo energético nas usinas. A utilização da palha para a produção de bioeletricidade permitirá uma produção estimada em torno de 200 KWh por tonelada de cana processada ou a produção de eletricidade no período da entressafra.

Segundo Sousa (2009), na safra 2008/09 foram processadas 562 milhões de toneladas de cana e se projeta que na safra 2020/21 se processe 1.038 milhões de toneladas de cana. Um exercício simples, partindo-se do pressuposto da adoção da tecnologia de extra-condensação em todas as usinas, mais a utilização de 75% do bagaço e 50% da palha disponíveis será possível obter energia elétrica média de 13.158 MW. Para se ter uma dimensão da relevância deste número, a energia firme da maior hidroelétrica do mundo, UHE de Itaipu, é de 9.699 MW médios.

2.2 Biomassa de Cana-de-açúcar

Na superfície do planeta terra existem aproximadamente 2 trilhões de toneladas de biomassa, oriundas de cultivo ou nativa. Caso este montante de biomassa fosse convertido em eletricidade, com as tecnologias existentes, produzir-se-ia 50% da demanda mundial por ano. Deve-se entender por biomassa toda matéria orgânica capaz de gerar energia renovável. Mundialmente apenas 1,5% da energia elétrica consumida no mundo tem origem nesse tipo de matéria-prima. O Brasil já está acima da média mundial, com 5,3% da energia elétrica consumida em 2009 gerada por biomassa. Setenta e cinco por cento dos 5,3% é oriundo cana-de-açúcar, mas usa-se também licor negro (resíduo da extração de celulose), lenha, casca de arroz e outras matérias recuperadas. No setor sucroenergético as fontes de biomassa geradas pela cana-de-açúcar são: o palhiço e o bagaço de cana (CANAVIEIROS, 2011).

A queima da biomassa vegetal foi durante o maior tempo da história da civilização humana, a única fonte de energia térmica utilizada e, na civilização moderna a utilização do petróleo e do carvão mineral tornaram-se predominantes. Com o esgotamento das reservas naturais de biomassa, tanto pelo consumo direto como pela conversão das áreas de florestas em terras agricultáveis, e devido ao aumento no uso do petróleo, carvão mineral e gás natural, como principais fontes energéticas, a participação da biomassa na matriz energética mundial do último século passou a ser minoritária nos países mais desenvolvidos. Contrariamente, nos países pouco desenvolvidos, onde ela seguiu tendo alto percentual de participação. Na matriz energética brasileira, por exemplo, em 2009, a biomassa total participou com 32% e somente os produtos da cana-de-açúcar representaram 18%, enquanto a participação da hidroeletricidade foi de apenas 15,2% (BRASIL, 2010). Portanto a biomassa da cana-de-açúcar teve importante participação e terá ainda mais no futuro.

Na segunda década do século XXI tem-se um momento em que a plataforma tecnológica petroquímica mostra instabilidade, tanto pela sua natureza de commodity esgotável, como por questões geopolíticas, o que cria grande insegurança energética no mundo. O resultado é uma expectativa de grandes transformações no suprimento energético mundial. O aproveitamento da energia contida na biomassa vegetal (bioenergia) volta a ser uma das mais importantes alternativas para o enfrentamento do problema discutido, especialmente para os países tropicais, coincidentemente aqueles mais pobres e que, por isso, não dispõem de recursos nem conhecimento suficientes para desenvolver alternativas de alta tecnologia. Porém, mesmo nos países desenvolvidos se está aplicando grande soma de recursos na pesquisa para o desenvolvimento de uma plataforma baseada em transformação da biomassa em combustíveis sólidos, líquidos, energia elétrica, biogás, bio-óleo e produtos químicos diversos, pois reduzir a dependência do petróleo é uma necessidade premente não apenas por razões econômicas, mas principalmente estratégicas e ambientais. A cana-de-açúcar, como explorada milenarmente, produz o colmo industrializável, que representa de 80 a 85% da biomassa total, o restante se constituindo de folhas e ponteiros (topo da planta), não aproveitados industrialmente. Uma parte destas folhas e ponteiros é queimada na colheita manual, onde se tem a necessidade de queima do canavial. Outra parte é deixada no campo. Na indústria após a extração do caldo resta o bagaço, que em

épocas passadas era um resíduo indesejável. Entretanto, com a escassez de madeira, o bagaço passou a ser uma importante fonte de energia (vapor) para o processo de produção de açúcar e etanol em substituição a tradicional lenha. Posteriormente, o bagaço passou também a ser utilizado para a geração de eletricidade necessária no processo e, seguindo com a evolução, passou-se a produzir excedente de eletricidade para ser adicionado na rede pública (cogeração). Também o bagaço passou a ser vendido para terceiros, especialmente para alimentar caldeiras de indústrias alimentícias, além de outros usos menores, como ração animal, produção de composto orgânico, fabricação de aglomerados, papel, etc. (CORTEZ; LORA; OLEVARES GÓMEZ, 2008).

No estudo de biomassas vegetais como matéria-prima para produção de energia elétrica é necessário caracterizar os seus poderes caloríficos. Estes podem ser determinados como Poder Calorífico Superior (PCS), Inferior (PCI) e Útil (PCU), dependendo da forma como é obtido (RIPOLI; RIPOLI, 2004). Existe como transformar PCS em PCI, quando sabe-se a composição do material em estudo. O Poder Calorífico Inferior é utilizado nos balanços para produção de energia, pois é o valor que realmente pode ser aproveitado, livre das perdas para evaporação da água contida.

Hugot (1972) afirma que o bagaço seco de cana-de-açúcar apresenta a seguinte composição elementar em porcentagem: Carbono = 44,0 a 49,0; Hidrogênio = 6,0 a 7,4; Oxigênio = 41,8 a 48,0 e Cinzas = 1,0 a 2,5. Já Fehr (1986) também apresenta a composição química do bagaço seco em porcentagem de cana-de-açúcar: Carbono = 45,95; Hidrogênio = 6,38; Oxigênio = 43,48 e Cinzas = 4,19. Oliveira (1982), por sua vez fornece os valores em porcentagem de: Carbono = 47; Hidrogênio = 6,5; Oxigênio = 44; Cinzas = 2,5; Sólidos solúveis = 3 a 8 e umidade entre 45 e 52. Contudo Patuarau (1969) cita que a composição química do bagaço de cana-de-açúcar varia em função da variedade, do grau de maturação da cultura, do sistema de colheita adotado e da eficiência industrial no processamento da matéria-prima, deste modo uma análise que possa determinar o Poder Calorífico do bagaço e análises de seus componentes tornam-se indispensáveis. Afirma também que, por definição, as fibras são componentes insolúveis em água, constituindo-se principalmente de celulose (41,7 a 62,9%), lignina (20,3 a 33,2%), pentosanas (20,2 a 31,9%) e cinzas (0,6 a 4,6%).

2.3 Bagaço

O bagaço da cana-de-açúcar é o resíduo sólido que remanesce da moagem da cana-de-açúcar nas usinas de açúcar e destilarias de álcool etílico no país. A proporção desse resíduo depende da quantidade de fibras que os particulares cultivares de cana apresenta. De um modo geral, o material genético em uso no país apresenta um teor aproximado de 270 a 290 kg de bagaço (com 50% de unidade) em cada tonelada de cana processada. Do total produzido nas unidades de produção, uma parcela diminuta (próxima a 10%) é destinada a usos diversos, como a alimentação animal, em especial através de um processo de hidrólise. Toda a parte restante (90%) é queimada em caldeiras no próprio ambiente onde é produzida, para a geração de vapor (BRESSAN FILHO, 2011).

É importante comentar que o setor sucroalcooleiro, em seus primórdios, ignorava a possibilidade de aproveitamento do bagaço e muito menos da palha; comprava energia elétrica das concessionárias locais e queimava óleo combustível. Com o passar do tempo, o uso do bagaço foi se tornando rotina em um processo cogenerador, pois permitia produzir energias térmicas, para o processo industrial, e eletricidade para a movimentação mecânica da indústria, iluminação e outros fins. A falta de visão do Setor Elétrico, entretanto, impedia a exportação de excedentes, em face, tanto das dificuldades impostas pela legislação, que defendia o monopólio existente na época, quanto pela cultura centralizante, predominante no Setor Elétrico Brasileiro, geradora de soluções hidrelétricas de grande porte (BALESTIERI, 2002).

Segundo Mello (2007), o uso racional dessas biomassas combustíveis (bagaço e palha) representa uma típica solução de geração distribuída da energia elétrica, com diversas pequenas unidades para totalizar uma grande produção. Como as usinas situam-se próximos dos centros urbanos de consumo elétrico, e possuem enorme potencial de exportação de excedentes, devido a evolução tecnológica verificada nas caldeiras de alta eficiência, o parque gerador hidrelétrico brasileiro coloca a cultura da cana-de-açúcar como a melhor alternativa de geração distribuída dentre todas aquelas passíveis de serem disponibilizadas rapidamente no país.

2.4 Bioeletricidade

A bioeletricidade vinculada à produção de etanol e açúcar tem condições excepcionais para representar papel estratégico na expansão do sistema elétrico nacional. Isso por ser fortemente complementar à hidroeletricidade, permitir a distribuição próxima aos centros de consumo e com importantes benefícios ambientais e socioeconômicos. A bioeletricidade produzida com bagaço apresenta complementaridade em relação ao parque hídrico, gerando energia exatamente nos meses mais secos do ano. Em 2008, a energia natural afluyente (ENA) foi de 80 a 90 GW média de janeiro a março, caindo para 30 a 40 GW média de junho a novembro, enquanto a moagem da cana no Centro-Sul fica acima de 80% do seu maior valor de maio a setembro. Ressalte-se que o potencial de produção da bioeletricidade até o final da década é de quase 15.000 MW médios ao ano, ou cerca de 15% da demanda do país. Essa complementaridade da bioeletricidade em relação ao parque hídrico pode desempenhar papel estratégico para a manutenção de uma matriz elétrica limpa e renovável, evitando necessidade de contratação de termoeletricas movidas a combustíveis fósseis que desempenham uma função de *back-up*. A bioeletricidade da cana apresenta benefícios ambientais (redução de emissões de gases de efeito estufa), econômicos (geração de empregos) e de garantia do suprimento (com descentralização) da energia elétrica. A garantia da segurança do suprimento com sustentabilidade ambiental exigirá investimentos em fontes alternativas e renováveis de energia e em processos eficientes de geração. A bioeletricidade se enquadra nessa premissa na medida em que é uma energia gerada a partir da biomassa residual do processo de geração de etanol e de açúcar. Por utilizar um resíduo como insumo energético, a bioeletricidade é por definição, uma fonte de energia renovável, eficiente e sustentável. Trata-se de uma energia que é produzida a partir da cogeração, um processo que garante índices significativos de eficiência na geração de energia. Além disso, ela é produzida em grande medida no principal centro de carga brasileiro que é o Estado de São Paulo ou em Estados limítrofes, o que também contribui com a eficiência econômica e elétrica ao reduzir os custos e as perdas com a transmissão. A bioeletricidade sucroenergética é uma fonte de energia que contribui para a segurança da oferta brasileira de energia elétrica, por diversificar a matriz e, sobretudo, por ser

complementar a geração hídrica. Além disso, ela é sustentável ambientalmente (SOUSA; MACEDO, 2010).

2.5 Análises Tecnológicas

Para a remuneração da tonelada da cana-de-açúcar realizam-se amostragem compostas nas cargas entregues às unidades industriais, posteriormente estas amostras são processadas e submetidas à análises predefinidas com o intuito de avaliar a qualidade e poder determinar o valor pela qualidade (Figura 1). As análises tecnológicas da cana-de-açúcar têm por objetivo avaliar a qualidade da matéria prima para diversos fins, como por exemplo, o cálculo de eficiência das moendas e os rendimentos industriais (MARQUES, 2007).

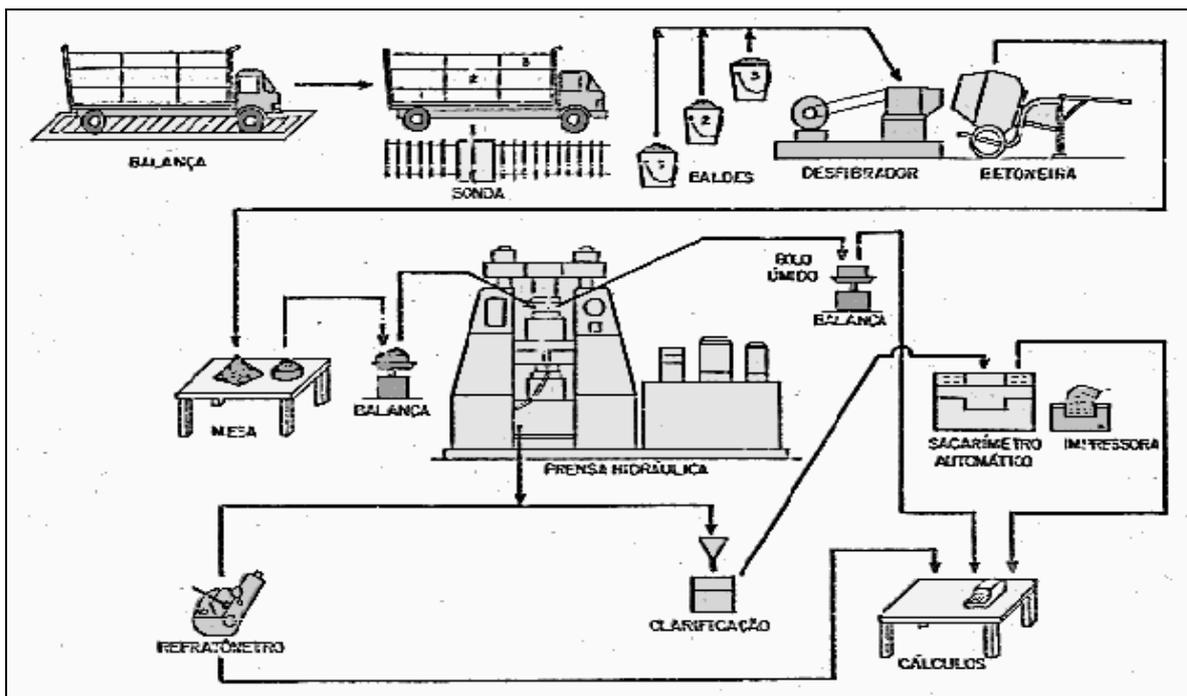


Figura 1. Esquema de amostragem, preparo e análises da cana-de-açúcar com finalidade de determinação da qualidade e valor.

2.5.1 ATR

Os ATR (Açúcares Totais Recuperáveis) constituem um dos parâmetros do sistema de pagamento de cana implantado em São Paulo a partir da safra de 1998/99, e representa a quantidade de ART (Açúcares Redutores Totais)

recuperados da cana até o xarope, ou seja, é o resultado da diferença entre o ART da cana e as perdas na lavagem de cana, bagaço final, torta de filtros ou prensas e “indeterminadas”, considerando eficiência média padrão, pode ser facilmente calculado após determinar-se o teor de PC (Pol da Cana) e ARC (Açúcares Redutores da Cana). A PC (pol da cana) é calculada pela Pcaldo (Pol do caldo) e F (Fibra da cana), visto que a massa de cana é igual a somatório da massa de caldo mais a massa da fibra. De modo análogo calcula-se o ARC através do ARcaldo e F (Fibra da cana). A Fibra da cana é estimada através da massa oriunda na prensa hidráulica, método da prensa, denominada de Bolo Úmido (FERNANDES, 2003).

2.6 Pagamento da cana-de-açúcar

Com poucas exceções como Índia e Fiji, a remuneração da cana em todo mundo é feita com base na sua qualidade (LMC INTERNATIONAL, 1997). Embora tenha sido implantado na Austrália há mais de um século, o pagamento de cana pela qualidade foi introduzido no Brasil somente em 1978 no Estado de Alagoas e até meados da década de 1980 nos principais estados produtores de cana (COSTA, 2001).

2.7 Pagamento da cana-de-açúcar pelo teor de sacarose (PCTS)

Este foi o primeiro sistema de pagamento de cana-de-açúcar a vigorar no Brasil, conhecido como PCTS, em cada unidade da federação o valor da tonelada de cana era obtido quando se comparava a cana analisada, com uma cana padrão. A cana padrão, as equações para a determinação do ágio ou deságio sobre o preço básico, bem como o próprio preço da tonelada de cana eram determinados pelo governo federal em ato específico publicado pelo Instituto do Açúcar e do álcool – IAA (OLIVEIRA et al., 1983).

No caso do Estado de São Paulo, uma tonelada de cana padrão continha 122,57 quilos de sacarose por tonelada, o que equivalia a uma Pol%Cana de 12,257% e a pureza do caldo igual a 83,87%. Quanto maior a pureza do caldo da cana, melhor a sua qualidade. Portanto, só se conseguia preço melhor para as canas mais ricas, isto é, para as que apresentassem Pol%Cana superior a 12,257% e pureza do caldo acima de 83,87% (NUNES; CONTINI, 2000). Com o aumento da

produção de etanol, nas destilarias autônomas e anexas, o parâmetro sacarose ficou um tanto defasado, visto que os açúcares glicose e frutose também são transformados em etanol, na fermentação biológica comercial.

2.8 Pagamento da cana-de-açúcar pelo sistema Consecana

Em 1997 foi constituído um grupo técnico e econômico formado por cinco representantes dos produtores de cana, indicados pela Organização dos Plantadores de Cana da Região Centro-Sul do Brasil (ORPLANA) e cinco representantes do setor industrial, indicados pela União da Agroindústria do Açúcar e do Alcool do Estado de São Paulo (UNICA), formando assim o Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Alcool do Estado de São Paulo (CONSECANA- SP). A principal atribuição desse grupo foi o desenvolvimento de um novo sistema de pagamento pela qualidade de cana entregue pelos produtores às unidades industriais denominado Sistema de Remuneração da Tonelada de Cana pela Qualidade/CONSECANA, que levassem em consideração não apenas o teor de sacarose, mas todos os açúcares metabolizáveis. Ainda tinham como um dos objetivos determinar do montante de açúcares contidos na cana-de-açúcar qual proporção realmente era recuperada nas unidades industriais e transformados em açúcar comercial ou etanol comercial. Esse sistema começou a ser adotado pelas unidades produtoras desde o ano-safra 1998/99, e consiste em um conjunto de regras de livre adoção, empregadas para o cálculo do preço da tonelada da cana-de-açúcar durante o ano-safra (CONSECANA, 2006). O sistema de pagamento da cana passou a utilizar como base para a qualidade da cana-de-açúcar a expressão da concentração total de açúcares (sacarose, glicose e frutose) recuperáveis em um processo industrial que apresenta em média 8,5% de perdas. A qualidade da cana passou a ser expressa em quilogramas de ATR por tonelada de cana. Esse conjunto de açúcares é denominado Açúcar Total Recuperável (ATR) contido em uma tonelada de cana. É importante ressaltar o sistema CONSECANA foi um avanço em relação ao sistema PCTS, pois considerava não apenas o teor de sacarose (açúcar que se cristaliza na indústria), mas também a glicose e frutose, que podem ser utilizadas pelas leveduras no processo de produção fermentativa do bioetanol, visto que a produção de etanol utiliza 50% da matéria prima (cana-de-açúcar colhida).

Este fato demonstra que o sistema de pagamento deve estar sempre em evolução e alinhado com as necessidades do mercado. (BURNQUIST, 1999).

A fórmula para determinar o valor da tonelada de cana (VTC) é segundo CONSECANA (2006):

$$\mathbf{VTC (R\$/t) = Qde de ATR (kg/t de cana) \times Valor do ATR (R\$/kg de ATR)} \quad (1)$$

Onde:

VTC = valor-base para a cana, em real por tonelada, posta na esteira da unidade industrial;

ATR = teor de Açúcar Total Recuperável da cana entregue, expresso em quilo por tonelada de cana;

Valor do ATR = preço médio de um quilo de Açúcar Total Recuperável (ATR), obtido em nível estadual.

A quantidade de ATR na cana é determinada pela seguinte fórmula técnica:

$$\mathbf{ATR (kg/t de cana) = 9,6316 \times PC + 9,15 \times ARC} \quad (2)$$

Onde:

PC = Pol%Cana;

ARC = Açúcares Redutores%Cana determinado pela seguinte fórmula:

$$\mathbf{ARC = (3,641 - 0,0343 \times Q) \times (1 - 0,01 \times F) \times (1,0313 - 0,0057 \times F)} \quad (3)$$

Q = pureza do caldo;

F = Fibra%cana;

$$\mathbf{F = 0,08 \times PBU + 0,876} \quad (4)$$

PBU = Peso do bolo umido.

O valor do ATR é obtido em função dos preços líquidos do açúcar branco destinado ao mercado interno e externo, do açúcar VHP destinado ao mercado externo, do álcool anidro e hidratado (combustível e industrial) comercializados no mercado doméstico e internacional. É determinado, também, pelo *mix* de produção de cada unidade industrial, ou seja, a quantidade produzida de açúcar e álcool, e pela participação da matéria-prima nos custos de produção do açúcar e do álcool (CONSECANA, 2006).

Nesses 30 anos de implantação do pagamento de cana pela qualidade no Brasil, a metodologia analítica para apuração do valor da tonelada de cana não sofreu mudança significativa, a despeito da extinção do IAA e conseqüentemente das comissões regionais de pagamento de cana. O sistema ATR manteve os mesmos parâmetros tecnológicos do sistema de pagamento de cana pelo teor de sacarose (PCTS) até então vigente: peso do bolo (bagaço) úmido, leitura sacarimétrica e brix (COSTA, 2001).

Nesta segunda década do século XXI a fonte lucrativa que se destaca é a biomassa da cana-de-açúcar. Além da utilização crescente da utilização da cana na produção de etanol e seus subprodutos, o bagaço e a palha da cana, assim como a maioria dos resíduos de biomassa obtidos nas atividades agrícolas e industriais, possuem elevados teores de materiais lignocelulósicos, fazendo com que se tornem matérias-primas capazes de produzir energia (DIAS et al., 2009). Assim as unidades industriais ampliarão o *mix* de lucratividade com a expansão da comercialização da bioeletricidade do setor sucroenergético brasileiro. Como aconteceu no passado, o sistema de pagamento deverá ser adaptado para que o setor produtivo esteja conectado com as novas necessidades de produção, não mais enviando para indústria matéria prima rica em sacarose, glicose e frutose, mas com elevados teores de bioenergia contida na biomassa.

2.9 Poder calorífico

A análise do poder calorífico é a determinação da variação da entalpia padrão de combustão quando uma substância reage completamente com o oxigênio. Normalmente utiliza-se a simbologia ΔH_c ou ΔH_{comb} para a quantidade de energia que está disponível no combustível a ser liberada na câmara de combustão pela explosão e rompimento das ligações químicas, como o produto final terá

sempre menor energia que os reagentes iniciais utiliza-se os valores com sinal negativo. Quanto maior for o poder calorífico maior é a energia total do combustível, sendo sua mensuração usualmente realizada em bomba calorimétrica, seguindo no Brasil as normas da ABNT (CORTEZ; LORA; OLEVARES GÓMEZ, 2008). O poder calorífico é dividido em poder calorífico inferior (PCI) e o poder calorífico superior (PCS) (PERES, 2007). A diferença entre os dois ocorre pela transformação da fase líquida em vapor, fato que absorve parte da energia do material. Quando se pensa em energia útil para um determinado processo é razoável utilizar o PCI, pois é a energia líquida que o material irá liberar, já descontando a energia que possui, mas será utilizada para mudança de fase da água. No caso de avaliação da bioenergia química constante no material torna-se mais interessante o PCS, apesar de não ser o valor útil para utilização do combustível é o valor total que o material contém realmente. As unidades mais utilizadas para ΔH_c são: KJ kg^{-1} , MJ kg^{-1} , TJ kg^{-1} entre outros.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (1984) – Norma NBR 8633 define Poder Calorífico Superior como sendo o numero de unidades de calor liberado, pela combustão de uma unidade de massa de uma substância, em bomba calorimétrica, em atmosfera de oxigênio, a volume constante e sob condições específicas de modo que, toda água proveniente da combustão, esteja no estado líquido. Oliveira (1982) definiu Poder Calorífico Inferior (PCI) como sendo o calor liberado pelo combustível menos o calor de vaporização da água. Sabendo-se que são necessários 600 kcal para evaporar 1 kg de água e que o peso dessa água formada durante a combustão é igual a nove vezes o peso de hidrogênio contido no combustível. Para Brito e Barrichello (1982) a diferença entre o PCS e o PCI ocorre em função de se considerar ou não o calor liberado pela condensação de água de constituição da biomassa. Recomendam que, na pratica, o PCI deve ser o preferido para valores de utilização da energia útil de um material, porem no processo de determinação, regra geral, utiliza-se de bomba calorimétrica, que fornece o PCS.

2.10 Fibra

O bagaço de cana-de-açúcar é um subproduto resultante da extração do caldo da cana-de-açúcar em moendas ou difusores de usinas ou destilarias produtoras de açúcar e etanol respectivamente. Pode ser considerado atualmente

como o principal resíduo agrícola brasileiro, em quantidade gerada, devido à expansão na produção de álcool. Mais que 50% do bagaço produzido é utilizado na própria unidade industrial, com a finalidade de geração de vapor para o suprimento de energia mecânica e elétrica de seu parque industrial (LORA; NASCIMENTO, 2004).

O bagaço de cana-de-açúcar “in natura” é composto por 45% de fibras lignocelulósicas, 50% de umidade, 2 a 3% de sólidos insolúveis e 2 a 3% de sólidos solúveis em água. Bioquimicamente, constitui-se de celulose, hemicelulose e lignina, com 41%, 25% e 20%, respectivamente, baseado no peso seco de bagaço (ICIDCA/GEPLACEA/PNUD, 1990).

O bagaço não é apenas utilizado como combustível na geração de energia, busca-se alternativas para a sua utilização como suporte de baixo custo em diferentes processos biotecnológicos, compostagem, utilização em alimentação animal (hidrolisado) e mais recentemente fala-se na utilização para produção do etanol de segunda geração. Uma possível alternativa seria a utilização como suporte em processos de micropropagação (MOHAN et al., 2001; 2004).

A RIDESA (Rede Interuniversitária de Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro), trabalha no desenvolvimento de uma variedade de cana-de-açúcar com maior percentual de fibras onde pretende potencializar o uso da cana em projetos energético (STAB, 2010). O IAC (Instituto Agrônomo de Campinas) sediado em Ribeirão Preto e a empresa Canaviallis também têm divulgado sucesso no desenvolvimento da chamada cana energia, com valores mais elevados de fibra e maior potencial de produção de biomassa.

Na lavoura canavieira, a fibra está associada à colheita da cana, evitando o seu acamamento, e na indústria, ao momento da moagem e ao balanço térmico da fábrica. A fibra também é utilizada nos cálculos de determinações expressas em porcentagem de cana, como a Pol, AR, ART e outros recursos que venham a definir a qualidade da cana-de-açúcar (STUPIELLO, 2002).

3 HIPÓTESE E OBJETIVO

A bioenergia contida na cana-de-açúcar, principalmente nos açúcares e na fibra, deve proporcionar um valor da matéria-prima mais ajustado a realidade comercial. Os açúcares são mensurados e utilizados nos métodos tradicionais de pagamento da cana no Brasil. O teor de fibra da cana é utilizado negativamente, pois sua presença dificulta o processo de extração e dependendo da composição promove complicações em todo o processamento industrial. No entanto a fibra industrial pode ser constituída de material inorgânico “trash” ou ser o principal constituinte do bagaço, o qual proporciona a produção da valorizada bioeletricidade.

A relação entre o valor energético e fibra do bolo úmido pode proporcionar a criação de um parâmetro adicional no cálculo do ATR para a remuneração pelo conteúdo energético do material entregue na usina.

O objetivo da pesquisa foi propor alterações nos procedimentos utilizados para determinação matemática do ATR, utilizando o poder calorífico do bolo úmido e peso do bolo úmido.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados no experimento foram obtidos do ensaio implantado no Campus II da UNOESTE. O solo do experimento foi caracterizado como Argissolo Vermelho-Amarelo Distroférrico, típico A moderado, textura médio-argilosa (EMBRAPA, 1999). O clima da região se classifica em Aw, sendo a estação chuvosa no verão e seca no inverno.

O cultivar RB 86 7515 foi plantado em dezembro de 2007 e para o presente estudo, utilizou-se as amostragens de terceiro corte, no ano de 2011. A unidade experimental (parcela) foi composta de cinco fileiras com cinco metros de comprimento, sendo o espaçamento de 1,5 m (área de 37,5 m²), totalizando trinta e duas parcelas. Foram realizadas as análises mensalmente durante os meses de abril, maio, junho e julho, as amostras foram coletadas nas três fileiras internas desprezando o primeiro e o último metro das extremidades da unidade experimental.

Durante cada mês as trinta e duas amostras de cana-de-açúcar, foram encaminhadas para o Centro de Estudos Avançados em Bioenergia e Tecnologia Sucroalcooleira – CENTEC, no qual foram desintegradas em equipamento tipo desintegrador mecânico IRBI DM – 540, e posteriormente homogeneizadas em homogeneizador do tipo mecânico IRBI HM – 250. Uma parte das amostras de cada parcela desintegrada e homogeneizadas ficou no Centro de Estudos, no qual foram realizadas análises de fibra real e análise do poder calorífico da cana desintegrada.

4.1 Análises Tecnológicas

Para análises tecnológicas as trinta e duas amostras de cana-de-açúcar previamente desintegradas e homogeneizadas foram encaminhadas para a Usina Alvorada do Oeste Ltda., no município de Santo Anastácio – SP. No laboratório pesou-se para cada amostra da parcela uma quantidade de 500 g da cana desintegrada e homogeneizada e transferiu-se para a prensa hidráulica para ser submetida a uma pressão constante de 250 kgf cm⁻² (24,5 MPa) durante o período de um minuto. A parte fibrosa resultante da prensagem foi pesada para fornecer o peso do bolo (bagaço) úmido (PBU), e levada para a universidade para a realização de análises calorimétricas. O caldo extraído pela prensa foi levado para o

laboratório de análises da UNOESTE para as análises tecnológicas (Brix, Pol, PU, AR), calculando-se a fibra industrial e o ATR (CONSCANA, 2006). Todas as amostras foram armazenadas em temperatura de 15°C.

4.2 Análise de Fibra Real

Para análise de fibra real utilizou-se da cana-de-açúcar separada após a desintegração e homogeneização seguindo o procedimento descrito por Valsechi (1968), método havaiano, no qual foram utilizados trinta e dois saquinhos de algodão um para cada amostra das parcelas. A análise fibra real foi realizada nos meses de abril, maio, junho e julho de 2011. Em cada saquinho foi colocado 100 g de cana-de-açúcar desfibrada e homogeneizada, lavadas em água corrente por 24 horas e levados para estufa ventilada à 65°C por 48 horas, até o peso constante.

4.3 Análise de Poder Calorífico

4.3.1 Poder calorífico na cana-de-açúcar desintegrada

Para a análise do poder calorífico superior foi utilizada bomba calorimétrica modelo Cal 2K – Digital Data System (DDS), segundo critérios estabelecidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, constantes da NBR 8693/84, segundo Nogueira (2009) e Vale et al. (2007). Na cana-de-açúcar desintegrada foi retirado 10 g do material e levado para estufa tipo Spencer de circulação forçada de ar do modelo TE – 060 da marca Tecnal, por 10 minutos à 120 °C. Anotou-se o valor inicial e final. 0,1 a 0,5 g da cana seca foi levada para a combustão total na bomba calorimétrica.

4.3.2 Poder calorífico do bolo úmido

Com o bolo úmido trazido da usina após a prensagem, foi realizada a análise de poder calorífico, pesou-se de 0,1 a 0,5 g de bolo úmido e levou-o para a combustão total na bomba calorimétrica, realizando-se assim trinta e duas análises.

Os dados foram planilhados e submetidos à análise de correlação e confecção de gráficos utilizando o programa matemático Microcal Origin 6.0.

4.4 Modelagem Matemática

Considerando o balanço de energia contido na planta cana-de-açúcar, pode-se escrever o seguinte modelo:

$$\text{Energia cana} = \text{Energia na fibra da cana} + \text{Energia dos açúcares da cana} + \text{Energia de outros orgânicos} \quad (5)$$

Como a bioenergia de um material pode ser determinada pelo poder calorífico superior, tem-se que:

$$PC_{\text{cana}} = \frac{F\%Cana}{100} * PC_{\text{fibra}} + \frac{ATR * PC_{\text{açúcar}}}{91,5} + \frac{\text{Teor de orgânicos não Açúcar} * PC_{\text{ona}}}{100} \quad (6)$$

Onde

F%Cana = Fibra da cana-de-açúcar

PC_{fibra} = Poder calorífico da fibra da cana

ATR = Açúcares Totais Recuperáveis (88% dos açúcares contidos na cana-de-açúcar)

PC_{ona} = Poder Calorífico dos orgânicos não açúcares

Como o teor de orgânicos não açúcares é de 1,16% da cana-de-açúcar, como o valor de ATR está próximo de 12% da cana-de-açúcar e o valor da fibra, em média 12%, tem-se que os orgânicos não açúcares representam no máximo 4,83% da soma de ATR com Fibra, podendo ser excluído da fórmula, pois sua determinação é complexa sendo oriunda de diferentes componentes, usando a fórmula simplificada fica:

$$PC_{\text{cana}} = \frac{F\%Cana}{100} * PC_{\text{fibra}} + \frac{ATR * PC_{\text{açúcar}}}{91,5} \quad (7)$$

Isolando ATR, tem-se:

$$ATR = \left[PC_{\text{cana}} - \frac{F\%Cana}{100} * PC_{\text{fibra}} \right] * \frac{88}{91,5} \quad (8)$$

O poder calorífico do açúcar é constante (17MJ Kg⁻¹), segundo Ferreira (2011), portanto o ATR pode ser estimado com o poder calorífico da cana (PC cana), teor de fibra da cana (F%cana) e poder calorífico da fibra (PC fibra).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para aferir a possibilidade de utilização da equação 8 e entender as relações entre os constituintes da cana-de-açúcar (fibra, açúcares, energia), realizou-se as análises de Fibra Real, Poder Calorífico da Cana, Análises convencionais pelo método Consecana para determinar Fibra e ATR. Também realizou-se as análises de poder calorífico da fibra real e poder calorífico do bolo úmido. Com os valores obtidos calculou-se também o poder calorífico da cana utilizando o poder calorífico do bolo úmido, sendo os valores apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Poder calorífico da cana analisada, Poder calorífico da cana calculado, Fibra real, Fibra método prensa, Poder calorífico da fibra real e Poder calorífico do bolo úmido.

Número das Amstras Abr, mai, jun, jul	(Figura 1)		(Figura 2)		(Figura 3)	
	Poder Calorífico da cana analisado Gj kg ⁻¹	Poder Calorífico da cana Calculado com o BU Gj kg ⁻¹	Fibra Real (%)	Fibra – Prensa Calculado	Poder Calorífico Fibra Real analisado (Mj kg ⁻¹)	Poder Calorífico do Bolo Úmido (Mj kg ⁻¹)
1	3,25	2,30	9,71	11,48	18,08	8,69
2	3,70	3,03	10,65	11,35	18,09	11,57
3	3,75	2,79	11,23	11,19	17,46	10,80
4	4,77	2,04	9,62	10,74	21,19	8,27
5	5,09	2,69	10,24	11,53	18,39	10,10
6	4,10	3,07	10,32	12,21	27,45	10,82
7	4,49	2,62	10,07	11,24	17,69	10,12
8	4,76	2,53	10,43	11,01	20,33	10,00
9	3,88	3,62	11,09	10,66	18,01	14,80
10	5,77	2,91	11,44	13,51	18,74	9,21
11	6,00	3,45	11,26	14,13	16,21	10,42
..
103	7,65	2,69	9,62	12,26	18,16	9,46
104	5,27	2,44	11,32	13,37	18,40	7,82
105	6,34	2,27	13,02	12,20	18,12	8,03
106	6,47	2,93	11,70	13,40	16,42	9,36
107	7,90	3,18	12,26	12,78	21,75	10,69
108	4,64	2,69	11,68	12,31	18,24	9,42
109	5,86	3,36	11,20	12,60	20,28	11,48
110	5,35	1,91	12,24	10,77	18,12	7,72
111	4,86	2,68	11,66	11,98	18,51	9,66
112	5,14	3,39	13,72	13,31	18,70	10,90
113	8,08	2,72	12,26	13,27	25,80	8,79
114	6,47	3,14	12,06	14,11	18,32	9,48
115	5,56	3,18	10,68	13,21	18,57	10,30
116	5,10	3,36	11,04	14,06	26,60	10,18
117	8,72	3,83	11,88	13,53	18,81	12,11
118	5,49	2,82	11,58	12,56	17,09	9,64
119	6,19	3,68	14,22	13,95	20,67	11,26
120	8,46	3,25	13,00	14,35	18,40	9,64
121	5,61	2,45	11,52	12,32	18,71	8,57
122	6,12	2,93	9,72	13,16	14,94	9,54
123	5,85	2,77	13,18	13,04	18,64	9,11
124	5,58	2,99	9,82	12,95	17,15	9,91
125	7,40	4,27	11,62	12,79	18,17	14,33
126	6,73	2,97	11,24	13,17	18,60	9,67
127	5,53	2,76	11,18	12,09	26,73	9,83
128	5,87	3,70	10,82	13,07	17,52	12,14

A Figura 2, apresenta a regressão entre o Poder calorífico analisado diretamente na cana-de-açúcar e o Poder calorífico calculado com a determinação do Poder calorífico do bolo úmido (Tabela 1). Apesar do baixo valor do coeficiente de determinação r^2 , pode-se observar que a regressão tem valor estatístico ao nível de 1%. Isto indica que existe uma forte correlação entre as variáveis.

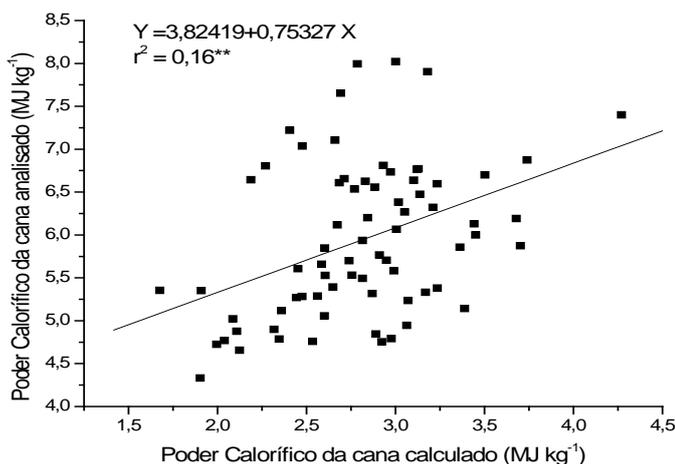


Figura 2. Modelo matemático de regressão entre Poder Calorífico da cana calculado com o Bolo Úmido e Poder Calorífico analisado diretamente na cana-de-açúcar.

A Figura 3, apresenta a regressão entre a fibra real analisada diretamente na cana-de-açúcar e a Fibra industrial calculada utilizando o valor do peso do bolo úmido (PBU). Apesar do baixo valor do coeficiente de determinação r^2 , pode-se observar que a regressão tem valor estatístico ao nível de 1%. Isto indica que existe uma forte correlação entre as variáveis.

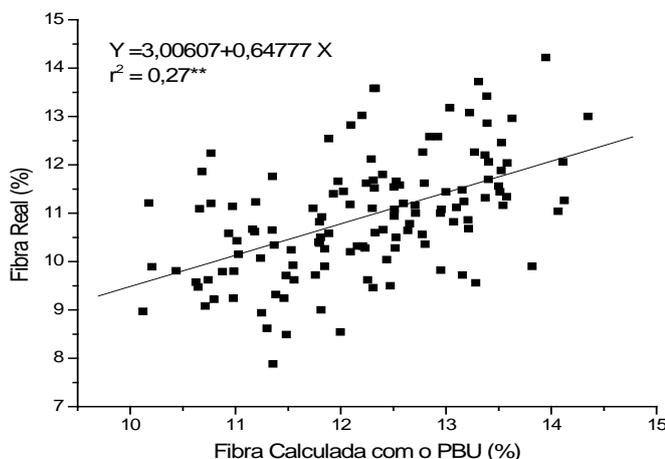


Figura 3. Modelo matemático de regressão entre Fibra calculada com o PBU e Fibra Real da cana-de-açúcar.

A Figura 4, apresenta a regressão entre o Poder calorífico da fibra real analisada diretamente na fibra da cana-de-açúcar e o Poder calorífico do bolo úmido (BU). Apesar do baixo valor do coeficiente de determinação r^2 , pode-se observar que a regressão tem valor estatístico ao nível de 1%. Isto indica que existe uma forte correlação entre as variáveis. Para Brito (1986), a biomassa como o bagaço de cana-de-açúcar, pode constituir a base de um modelo de desenvolvimento tecnológico e industrial auto-sustentável baseado em dados conceitos da realidade mundial e na interação do homem a um ambiente econômico em harmonia com seu ambiente, além de ser uma fonte simples de energia alternativa.

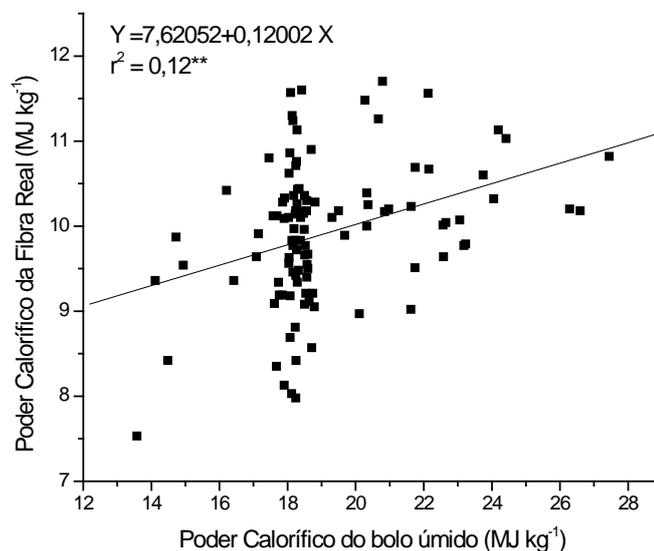


Figura 4. Modelo matemático de regressão entre Poder Calorífico do bolo úmido com o Poder calorífico da Fibra Real, determinada no material originado para determinação analítica da fibra real.

Na equação 8, o valor do PC_{cana} , primeira variável independente, pode ser calculado através do poder calorífico do bolo úmido, como mostra a Figura 2, cujos dados apresentaram coeficiente de correlação ao nível de 1%. A segunda variável independente apresentada neste modelo $F\%Cana$, a qual através da Figura 3 pode ser calculada utilizando o Peso do Bolo Úmido (PBU), com coeficiente de correlação ao nível de 1%. A terceira variável independente PC_{fibra} , através da Figura 4, pode ser calculada utilizando o poder calorífico do bolo úmido. O $PC_{açúcar}$ é constante, igual a 17 MJ kg^{-1} . Desta forma pode ser estimado o ATR com um

modelo matemático utilizando as variáveis Peso do Bolo Úmido (PBU) e Poder Calorífico do Bolo Úmido (PCbu). Desta forma realizou-se a regressão múltipla entre ATR, Poder calorífico da cana, calculado com o poder calorífico do bolo úmido, Fibra calculada com o peso do bolo úmido e poder calorífico do bolo úmido, contidos na Tabela 1. Os resultados desta regressão são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores de r, teste F e Coeficientes do modelo de regressão múltipla entre ATR (Y), Poder calorífico da cana calculado com o poder calorífico do bolo úmido (X1), Fibra calculada com o bolo úmido obtido na prensagem (X2) e poder calorífico do bolo úmido (X3).

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,773747483
R-Quadrado	0,598685168
R-quadrado ajustado	0,581236697
Erro padrão	8,650817496
Observações	73

ANOVA					
	gl	SQ	QM	F	significação
Regressão	3	7703,30	2567,77	34,31	1,09E-13
Resíduo	69	5163,73	74,84		
Total	72	12867,03			

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores
Interseção	20,12	71,62	0,28	0,78	-122,75
Variável X 1	10,86	23,92	0,45	0,65	-36,86
Variável X 2	6,70	6,16	1,09	0,28	-5,59
Variável X 3	-4,14	6,42	-0,65	0,52	-16,95

Em resumo tem-se o seguinte modelo ajustado aos valores:

$$Y = 20,12 + 10,86 \cdot X1 + 6,7 \cdot X2 - 4,14 \cdot X3 \quad (9)$$

Onde:

Y = Açúcares Totais Recuperáveis, estimado;

X1 = Poder calorífico da cana calculado com o poder calorífico do bolo úmido;

X2 = Fibra calculada com o bolo úmido obtido na prensagem;

X3 = Poder calorífico do bolo úmido

R2 = 0,60**

Pelo sistema Conselho... (2006), pode-se calcular o ATR pela equação 10, sendo o CV entre as duas equações de 9,17%.

$$Y = 9,6316 \cdot X_4 + 9,15 \cdot X_5$$

(10)

Onde:

X4 = Pol da Cana (PC);

X5 = Açúcares Redutores da cana (ARC).

Com o propósito de introduzir as variáveis independentes da equação 11 e 12 numa única equação, fez-se o procedimento de soma de equações.

Somando-se as equações 9 e 10, tem-se:

$$Y = 20,12 + 10,86 \cdot X_1 + 6,7 \cdot X_2 - 4,14 \cdot X_3 \quad (11)$$

$$Y = 9,6316 \cdot X_4 + 9,15 \cdot X_5 \quad (12)$$

$$2Y = 40,24 + 21,72 \cdot X_1 + 13,4 \cdot X_2 - 8,28 \cdot X_3 + 9,6316 \cdot X_4 + 9,15 \cdot X_5$$

(13)

$$Y = \frac{40,24 + 21,72 \cdot X_1 + 13,4 \cdot X_2 - 8,28 \cdot X_3 + 9,6316 \cdot X_4 + 9,15 \cdot X_5}{2} \quad (14)$$

$$Y = 20,12 + 10,86 \cdot X_1 + 6,70 \cdot X_2 - 4,14 \cdot X_3 + 4,8158 \cdot X_4 + 4,575 \cdot X_5 \quad (15)$$

Ou

$$ATR = 20,12 + 10,86 \cdot PCCCPCBU + 6,70 \cdot Fpbu - 4,14 \cdot PCbu + 4,8158 \cdot PC + 4,575 \cdot ARC \quad (16)$$

Na metodologia da prensa utiliza-se 500 g de cana-de-açúcar desfibrada e após a prensagem tem-se o PBU, variando de 110 a 160 g. Para transformar-se o poder calorífico do PBU para o poder calorífico da cana-de-açúcar deve-se utilizar o seguinte modelo:

$$PCCCPCBU = (PC_{bu}/500) \cdot PBU \quad (17)$$

Na metodologia Consecana a fibra industrial calculada com o PBU, segue o seguinte modelo:

$$F_{\text{industrial}} = 0,08 \cdot PBU + 0,876 \quad (18)$$

Por substituição das equações 17 e 18 na equação 16, obtem-se:

$$\text{ATR} = 20,12 + 10,86 * \left(\frac{\text{PCbu}}{500}\right) * \text{PBU} + 6,70 * (0,08 * \text{PBU} + 0,876) - 4,14 * \text{PCbu} + 4,8158 * \text{PC} + 4,575 * \text{ARC}$$

(19)

Assim tem-se o ATR calculado em função do Poder calorífico do bolo úmido (PCbu), peso do bolo úmido (PBU), Pol da cana (PC) e Açúcares Redutores da Cana (ARC), como descrito na equação 20.

$$\text{ATR} = 25,9892 + 0,02172 * \text{PCbu} * \text{PBU} + 0,536 * \text{PBU} - 4,14 * \text{PCbu} + 4,8158 * \text{PC} + 4,575 * \text{ARC} \quad (20)$$

Com a equação 10 (modelo Consecana) e 20 (modelo proposto) elaborou-se a Tabela 3, calculando-se os desvios entre os valores obtidos.

Tabela 3. Valores de ATR calculados com o modelo original Consecana confrontado com o modelo proposto.

Amostras	ATR	ATRproposto	desvio	desvio ²	PC	ARC	PCCCPCBU	Fpbu	PCpbu
1	123,53	147,85	24,32	591,42	12,08	0,79	2,30	11,48	08,69
2	130,23	146,28	16,05	257,51	12,73	0,83	3,03	11,35	11,57
3	119,18	140,23	21,06	443,32	11,57	0,84	2,79	11,19	10,80
4	138,17	149,07	10,90	118,89	13,68	0,70	2,04	10,74	08,27
5	136,48	153,00	16,52	272,95	13,47	0,74	2,69	11,53	10,10
6	140,21	160,52	20,31	412,48	13,92	0,67	3,07	12,21	10,82
7	143,35	153,68	10,32	106,56	14,20	0,72	2,62	11,24	10,12
8	143,39	151,73	08,35	069,71	14,24	0,68	2,53	11,01	10,00
9	124,76	131,96	07,20	051,90	12,19	0,81	3,62	10,66	14,80
10	126,24	135,15	08,90	079,29	12,45	0,69	2,35	10,18	10,09
11	120,60	139,04	18,44	339,97	11,72	0,84	2,05	10,63	08,42
..
103	119,53	142,84	23,31	543,58	11,57	0,89	3,09	11,55	11,60
104	113,63	131,62	17,99	323,56	11,06	0,78	2,36	10,44	09,87
105	140,58	157,00	16,42	269,71	16,32	0,00	2,90	11,80	10,62
106	147,73	161,78	14,04	197,23	15,34	0,00	2,67	11,82	09,77
107	150,38	167,97	17,59	309,31	14,92	0,73	2,68	12,30	09,40
108	136,13	152,46	16,33	266,82	13,12	1,07	1,68	10,98	06,64
109	140,81	149,31	08,50	072,33	14,47	0,16	2,27	10,77	09,18
110	146,01	159,74	13,73	188,57	14,63	0,55	3,23	11,93	11,70
111	136,75	155,96	19,21	368,91	13,38	0,86	2,60	11,76	09,56
112	149,50	166,79	17,29	298,81	14,75	0,81	2,93	12,32	10,25
113	145,75	175,19	29,45	867,05	14,35	0,82	3,24	13,41	10,33
114	159,85	162,66	02,81	007,92	16,20	0,42	2,71	11,35	10,36
115	152,04	163,20	11,16	124,57	15,08	0,74	2,77	11,79	10,15
116	152,67	164,34	11,67	136,18	16,34	0,00	2,82	11,89	10,23
117	154,72	171,15	16,43	270,02	15,65	0,44	3,00	12,51	10,32
118	138,41	160,52	22,11	488,87	13,77	0,63	2,89	12,23	10,18
119	151,49	174,51	23,02	529,92	15,10	0,66	3,02	13,00	09,96
120	162,85	185,24	22,39	501,32	16,43	0,50	3,18	13,54	10,04
121	159,70	175,45	15,75	248,14	16,10	0,51	2,46	12,51	08,46
122	171,75	176,18	04,44	019,67	17,36	0,50	2,77	12,09	09,89
123	178,67	184,21	05,53	030,63	18,11	0,47	2,69	12,51	09,25
124	149,37	172,35	22,98	528,20	15,01	0,52	3,13	12,92	10,39
125	179,49	182,83	03,34	011,13	18,16	0,50	2,67	12,33	9,34
126	179,64	186,08	06,44	041,52	18,14	0,54	3,18	12,80	10,67
127	172,16	178,92	06,76	045,74	17,39	0,51	3,06	12,44	10,60
128	150,66	206,94	56,28	3167,42	15,11	0,56	2,62	12,40	09,40
médias									
	140,30	156,47							
	CV =	11,08%							

Das 128 análises realizadas, a fórmula proposta estimou o ATR, em média, com 16,17 kg por tonelada de cana maior que a fórmula tradicional Consecana, qual estimou em média 140,30. Portanto estimaram-se, com a fórmula proposta, valores com 11,08% maiores de ATR (Tabela 3).

6 CONCLUSÃO

O modelo proposto leva em consideração valores de bioenergia contida na cana, principalmente na fibra. Esta bioenergia tem valor comercial e, portanto deve contribuir para a melhor avaliação da qualidade e valor de remuneração da matéria-prima. Sendo assim, é possível estimar valores de ATR utilizando Poder calorífico do bolo úmido, peso do bolo úmido, Pol da cana e Açúcares Redutores da cana.

A fórmula proposta estimou valores de ATR 11,08% maiores que a fórmula CONSECANA.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Carvão vegetal:** determinação do poder calorífico – método de determinação; NBR 8633. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.

BALESTIERI, J.A.P. **Cogeração:** geração combinada de eletricidade e calor. Florianópolis: EDUFSC, 2002.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Resenha Energética Brasileira. **Exercício de 2009 (versão preliminar)**. Brasília: MME, 2010.

BRESSA FILHO, A. **A geração termoelétrica com a queima do bagaço de cana-de-açúcar no Brasil, análise do desempenho da safra de 2009-2010.** [s.l.]: Diretoria de Política Agrícola e Informações Superintendência de Informações do Agronegócio, 2011. 160p.

BRITO, S.S. Energia de biomassa: uma alternativa para os trópicos. In: CONGRESSO PANAMERICANO DE ENERGIA, 3., Guatemala, 1986. **Anais...** São Paulo: CONFEA-CREA, 1986. p. 1-20.

BRITTO, J.O.; BARRICHELO, L.E.S. Aspectos técnicos da utilização da madeira e carvão vegetal como combustíveis. In: SEMINÁRIO DE ABASTECIMENTO ENERGÉTICO INDUSTRIAL COM RECURSOS FLORESTAIS, 2., São Paulo, 1982. **Anais...** Palestras apresentadas. São Paulo, Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia, 1982. p.101-37.

BURNQUIST, H.L. O sistema de remuneração da tonelada de cana pela qualidade – CONSECANA. **Preços Agrícolas**, Piracicaba, v.14, n.148, p.14-16, fev. 1999.

CANAVIEIROS (Município). **Alternativa sustentável. A cana-de-açúcar já é a segunda maior fonte de energia limpa do país.** 2011. Disponível em: http://municipios-canavieiros.com.br/download/07_CAP_05.pdf. Acesso em: 09 dez 2012.

CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.S.; OLEVARES GÓMEZ, E. **Biomassa para energia.** Campinas: Editora da Unicamp, 2008.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de safra brasileira:** cana-de-açúcar, primeiro levantamento, abril/2013 - Brasília: CONAB 2013.

CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Manual de instruções.** Piracicaba :Consecana, 2006.

CORRÊA NETO, V.; RAMON, D. **Análise de opções tecnológicas para projetos de cogeração no setor sucroalcooleiro.** Brasília: SETAP, 2002.

COSTA, J.A.B. **Avaliação dos sistemas de pagamento de cana-de-açúcar: PCTS x ATR**. 2001. 125p. Dissertação (Mestrado) - Campos dos Goytacazes: Universidade Estadual do Norte Fluminense.

DIAS, M.O.S. et al. Production of bioethanol and other bio-based materials from sugarcane bagasse: Integration to conventional bioethanol production process. **Chemical Engineering Research & Design**, v.87, p.1206-1216, 2009.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Produção de Informação, 1999. 412 p.

FEHR, M. Equivalências efetivas de combustíveis industriais. **Energia**, São Paulo, v.8, n.41/42, p.30-43, jan./abr. 1986.

FERNANDES, A.C. **Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar**. 2. ed. Piracicaba: EME, 2003.

FERREIRA, H.H. **O poder energético do bagaço da cana-de-açúcar em cogeração**. Araçatuba, SP: Fatec, 2011. 58f.

GONÇALVES, J.E. **Avaliação energética e ambiental de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis***. Botucatu: [s.n.], 2010.

HUGOT, E. **Handbook of cane sugar engineering**. Nova York: Elsevier, 1972.

ICIDCA/GEPLACEA/PNUD. **Manual de los derivados de la caña de azúcar**. 2 ed. México, 1990. 447p.

KITAYAMA, O. Bioeletricidade: perspectivas e desafios. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DO SETOR DE ENERGIA ELÉTRICA – GESEL/IE/UFRJ. **Anais...** Rio de Janeiro, 2008.

LMC INTERNATIONAL. An evaluation of cane payment systems in selected sugar industries worldwide. Main report. Oxford (preparado para o The World Bank, Washington) 1997. 125 p.

LIMA, A.D. **Otimização do aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar**. Botucatu-SP: Universidade Estadual “Júlio de Mesquita Filho”, 2009.

LORA, E.E.S.; NASCIMENTO, M.A.R. **Geração termelétrica: planejamento, projeto e operação**. Rio de Janeiro, Editora Interciência, 2004. vol.2. 1296 p.

MARQUES, T.A. **Apostila de análises tecnológicas usinas e destilarias**. Presidente Prudente : [s.n.], 2007.

MELLO, J.C.O. **Geração de eletricidade a partir de biomassa e biogás: minuta do Termo de Referência 8 (TR-8)**. São Paulo: Andrade & Canellas Consultoria e Engenharia, 2007.

MOHAN, R. et al. Estudo de um novo suporte para enraizamento de micro-estacas *in vitro*. In: ENCONTRO REGIONAL SUL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTO, 9, 2001, Curitiba. 9 EVINCI. **Anais...** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2001. p. 103.

MOHAN, R. et al. Use of sugarcane bagasse as an alternative low cost support material during the rooting stage of apple micropropagation. **In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant**, v.40, n.4, p.408-411, jul./aug. 2004.

NUNES, E.P.; CONTINI, E. **Caracterização e dimensionamento do complexo agroindustrial brasileiro**. São Paulo: Abag, 2000.

NOGUEIRA, M.F.M. **Biomassa energética**: caracterização de biomassas. Disponível: <http://www.bepinet.net/pdfs/Atividades/1st%20School%20of%20combustion,%20Florianópolis%202007/Caracterizacaode%20Biomassa%20Ufpa.pdf>. Acesso em: 19 mai 2009.

OLIVEIRA, E.R. Bagaço de cana: um combustível que ainda não recebeu a devida atenção. **Alcool & Açúcar**, São Paulo, v.2, n.4, p.10-19, mai/jun. 1982.

OLIVEIRA, E.R. et al. Pagamento de cana pelo teor de sacarose: o sistema implantado no estado de São Paulo. **Revista Brasil Açucareiro**, Rio de Janeiro, p.32-39, out./nov. 1983.

PATURAU, J.M. **Bagasse**: by products of the sugar cane industry. New York: Elsevier, 1969. 262p.

PERES, S. et al. Caracterização e determinação do poder calorífico e do número de cetano de vários tipos de biodiesel através da cromatografia. In: Congresso de Biodiesel 2007. **Anais...** Disponível em: <http://www.biodiesel.gov.br/docs/congresso2007/caracterizacao/11.pdf>

RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L. **Biomassa de cana-de-açúcar**: colheita, energia e ambiente. Piracicaba: TCC Ripoli, 2004. 302 p.

ROMÃO JÚNIOR, R.A. Análise da viabilidade do aproveitamento da palha da cana de açúcar para cogeração de energia numa usina sucroalcooleira. 2009. 164p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, SP.

SOUSA, E.L. Etanol: desafios e oportunidades nos mercados nacional e internacional. In: Workshop Infosucro/IE/UFRJ, 2. **Anais...** Rio de Janeiro, 27 de Novembro de 2009.

SOUSA, E.L.L.; MACEDO, I.C. **Etanol e bioeletricidade**: a cana-de-açúcar no futuro da matriz energética. São Paulo: Luc Projetos de Comunicação, 2010.

SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIRO DE BRASIL. Censo varietal de cana-de-açúcar de 2009 dos Estados de São Paulo Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. **Sertãozinho**, SP, v.28, n.4, p.34-37, 2010.

STUPIELLO, J.P. A fibra da matéria prima. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.21, n.2, p.12, 2002.

TOLMASQUIM, M.T. A energia renovável: em especial a cana no balanço energético brasileiro. **Revista Opiniões**, abr./jun. 2007.

VALE, A. T. et al. Caracterização energética e rendimento da carbonização de resíduos de grãos de café (*Coffea arábica* L.) e de madeira (*Cedrelinga catenaeformis*) Duke. **CERNE**, Lavras, v.13, n.4. p.416-20. 2007.

VALSECHI, O. **Curso de Aperfeiçoamento para Fiscalização de Análises em Cana-de-açúcar**. Piracicaba: USP, 1968.