



LETÍCIA FERNANDES DE OLIVEIRA

**SECAGEM DE BAGAÇO DE CANA EM UM
SECADOR CICLÔNICO**

LAVRAS – MG

2010

LETÍCIA FERNANDES DE OLIVEIRA

SECAGEM DE BAGAÇO DE CANA EM UM SECADOR CICLÔNICO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos, área de concentração em Ciência dos Alimentos, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa

Co-orientadora

Dra. Soraia Vilela Borges

LAVRAS - MG

2010

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca da UFLA**

Oliveira, Leticia Fernandes de.
Secagem de bagaço de cana em um secador ciclônico / Leticia
Fernandes de Oliveira. – Lavras : UFLA, 2010.
87 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2010.
Orientador: Jefferson Luiz Gomes Corrêa.
Bibliografia.

1. Biomassa. 2. Escoamento gás-partícula. 3. Energia. 4. Tempo
de residência. 5. Geometria do ciclone. I. Universidade Federal de
Lavras. II. Título.

CDD – 662.88

LETÍCIA FERNANDES DE OLIVEIRA

SECAGEM DE BAGAÇO DE CANA EM UM SECADOR CICLÔNICO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos, área de concentração em Ciência dos Alimentos, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 28 de setembro de 2010.

Dr. José Guilherme Lembi Ferreira Alves UFLA

Dra. Miriam Carla Bonicontró Ambrosio Ugri UEM

Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa
Orientador

Dra. Soraia Vilela Borges
Co-orientadora

LAVRAS – MG

2010

Aos meus verdadeiros mestres, mãe e pai, Ana Silva e Oliveira e Luiz Fernando de Oliveira, por todo esforço, exemplo, dedicação, carinho e por me permitirem sonhar.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me amparar em todos os momentos.

À Universidade Federal de Lavras, ao Programa de Pós Graduação em Ciência dos Alimentos e ao Departamento de Ciência dos Alimentos pela oportunidade e estrutura concedida para o desenvolvimento deste trabalho e obtenção do título de mestre.

Agradecimento especial faço-o ao meu orientador, Prof. Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa, pelos valiosos ensinamentos e dicas, pela paciência, dedicação e, acima de tudo, pelo exemplo de pessoa.

À Profa Fabiana Queiroz e à banca examinadora, José Guilherme Lembi Ferreira Alves e Miriam Carla Bonicontró Ambrosio Ugri, pelo intercâmbio de ideias e sugestões.

À Unidade Experimental de Produção de Painéis de Madeira, Departamento de Engenharia Florestal, pela recepção e ajuda, em especial ao Claret, Alan e Tati.

Às Usinas Junqueira (Iguarapava/SP) e Santa Lúcia (Araras/SP) pela gentileza e por possibilitarem o início da realização deste trabalho.

Ao Fernando Pereira, pela sua grande disposição e amizade.

À Professora Dr. Soraia Vilela Borges pela amizade e por ter-me guiado até aqui.

Aos colegas de laboratório, Bruno, Marcos, Ana Gabriela, Adriene, Jean e Bentinho pela cooperação, e a Poli, Fausto e Karina por estarem sempre prontos a ajudarem e pela grande amizade.

Aos meus irmãos, Dani e Fernando, e ao Dieguinho, minhas paixões. E à toda minha família pelo alicerce, ternura e momentos de distração.

Ao Leo, pelo amor, carinho e cuidado.

Aos colegas de mestrado e amigos da graduação, companheiros de todas as horas.

À CAPES, FAPEMIG, FINEP, e CNPq por proporcionarem as condições necessárias para o desenvolvimento deste trabalho.

Enfim, agradeço a todas as pessoas que se fizeram presentes e que torceram por mim.

RESUMO

O presente trabalho foi realizado com o objetivo de estudar a influência do teor de umidade inicial do bagaço de cana (bagaço do pátio e o recolhido logo após moagem) e da geometria do ciclone (testando-se o ângulo e a abertura inferior da parte cônica, B) na secagem do bagaço em um secador ciclônico. O material foi caracterizado, com relação ao teor de umidade, granulometria e poder calorífico. Para cada teor de umidade inicial e geometria, foram desenvolvidos experimentos de secagem com base em planejamento experimental. As variáveis independentes foram a temperatura do ar de secagem (35 a 275°C) e a vazão mássica de bagaço (10×10^{-3} a $29 \times 10^{-3} \text{ kgs}^{-1}$), mantendo-se a velocidade de ar constante ($7,5 \times 10^{-2} \text{ kgs}^{-1}$). As variáveis dependentes foram a redução do teor de umidade (RU) e o tempo de residência (t_{res}) das partículas no secador. Com os resultados mostraram-se que a redução da umidade é diretamente proporcional à temperatura e inversamente proporcional à vazão de sólidos. O t_{res} , também, foi inversamente proporcional à vazão de sólidos. A diminuição de B induz a uma tendência do aumento da RU e do t_{res} .

Palavras-chave: Tempo de residência. Energia. Geometria do ciclone. Biomassa. Escoamento gás-partícula

ABSTRACT

The influence of initial moisture content of sugarcane bagasse (bagasse patio and those obtained just after the mill) and the geometry of the conical part of the cyclone (two different angles and inferior outlet, B) were tested in bagasse drying in a cyclonic dryer. The product was characterized with respect to moisture content, particle size and calorific value. For each initial moisture content and geometry, experimental design was employed. The independent variables were drying agent temperature (35 to 275 °C) and bagasse mass flow rate (10×10^{-3} to 29×10^{-3} kgs^{-1}). The air flow rate was kept constant at 7.5×10^{-2} kgs^{-1} . The dependent variables were moisture reduction (RU) and average particle residence time (t_{res}) in the cyclonic dryer. It was observed that RU was directly proportional to temperature and inversely proportional to bagasse mass flow rate. Residence time was also inversely proportional to bagasse mass flow rate. Decreasing B carried out to a tendency of increasing RU and t_{res} .

Keywords: Particle residence time. Energy. Cyclone geometry. Biomass. Gas-Particle flow.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Estrutura da Oferta Interna de Energia, Brasil: 2009.....	21
Figura 2	Bagaço de cana	25
Figura 3	Bagaço de cana – fibra (a) e pó (b).....	25
Figura 4	Fluidodinâmica gás-partículas em um ciclone.....	31
Figura 5	Sistema experimental do secador.....	36
Figura 6	Esteira elétrica.....	37
Figura 7	Alimentador Venturi com dimensões em mm	37
Figura 8	Dimensionamento do secador ciclônico	39
Figura 9	Partes cônicas do ciclone, geometria 1 (a) e geometria 2 (b)	39
Figura 10	Fibra obtida nas peneiras de 4,75mm (A), 2,36mm (B), 1,18 mm (C), 0,60mm (D), 0,425mm (E) e 0,30mm (F) de diâmetro	52

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Distribuição granulométrica dos bagaços <i>in natura</i> provenientes das Usinas Junqueira (74,52% b.u) e Santa Lúcia (51,72% b.u)	48
Gráfico 2	Distribuição granulométrica dos bagaços com semelhantes teores de umidade 50,79 % em b.u (Usina Junqueira) e 50,94 % em b.u (Usina Santa Lúcia)	48
Gráfico 3	Poder calorífico de amostras de bagaço de cana em diferentes teores de água.....	50
Gráfico 4	Comportamento percentual de fibra e pó dentro de cada peneira.	51
Gráfico 5	Distribuição dos resíduos em torno da reta que indica normalidade à resposta RU, para o bagaço do pátio.....	54
Gráfico 6	Distribuição dos resíduos em torno da reta que indica normalidade à resposta t_{res} , para o bagaço do pátio	54
Gráfico 7	Superfície de respostas (a) e de contorno (b) para RU do bagaço do pátio submetido ao secador ciclônico	57
Gráfico 8	Distribuição dos resíduos em torno da reta que indica normalidade à resposta RU, para o bagaço recolhido logo após moagem (geometria 1 do ciclone)	61
Gráfico 9	Distribuição dos resíduos em torno da reta que indica normalidade à resposta t_{res} , para o bagaço recolhido logo após moagem (geometria 1 do ciclone)	61
Gráfico 10	Superfície de respostas (a) e de contorno (b) para RU do bagaço da moenda no secador ciclônico de geometria 1	64
Gráfico 11	Distribuição dos resíduos em torno da reta que indica normalidade à resposta RU, para o bagaço recolhido logo após moagem (geometria 2 do ciclone)	67

Gráfico 12 Distribuição dos resíduos em torno da reta que indica normalidade à resposta t_{res} , para o bagaço recolhido logo após moagem (geometria 2 do ciclone)	67
Gráfico 13 Superfície de respostas (a) e de contorno (b) para RU do bagaço no secador ciclônico de geometria 2	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Delineamento experimental para os ensaios de secagem de bagaço de cana	44
Tabela 2	Distribuição granulométrica do bagaço de cana proveniente da Usina Junqueira.....	46
Tabela 3	Distribuição granulométrica do bagaço de cana proveniente da Usina Santa Lúcia	47
Tabela 4	Resultados experimentais de secagem do bagaço do pátio obtidos no ciclone.....	53
Tabela 5	Análise dos coeficientes de regressão do bagaço de cana do pátio.	55
Tabela 6	Análise de variância do modelo simplificado, para resposta RU, do bagaço de cana do pátio	56
Tabela 7	Análise de variância do modelo simplificado, para resposta t_{res} , do bagaço de cana do pátio	56
Tabela 8	Resultados experimentais de secagem do bagaço, recolhido logo após moagem, no ciclone (geometria 1)	60
Tabela 9	Análise dos coeficientes de regressão do bagaço da moenda (geometria 1).....	62
Tabela 10	Análise de variância do modelo simplificado, para resposta RU, do bagaço da moenda (geometria 1)	63
Tabela 11	Análise de variância do modelo simplificado, para resposta t_{res} , do bagaço da moenda (geometria 1)	63
Tabela 12	Resultados experimentais de secagem do bagaço, recolhido logo após moagem, no ciclone (geometria 2)	66
Tabela 13	Análise dos coeficientes de regressão do bagaço da moenda (geometria 2).....	68

Tabela 14	Análise de variância do modelo simplificado, para resposta RU, do bagaço da moenda (geometria 2)	69
Tabela 15	Análise de variância do modelo simplificado, para resposta t_{res} , do bagaço da moenda (geometria 2)	69
Tabela 16	Dados condensados das secagens de bagaço de cana em secador ciclônico.....	72
Tabela 17	Condições que levam ao ponto ótimo da resposta para o bagaço recolhido logo após moagem	73
Tabela 18	Valores preditos da secagem de Corrêa (2003).	74

LISTA DE SÍMBOLOS

PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
X	Teor de umidade em base úmida
h	Porcentagem de hidrogênio presente no bagaço
α	Ângulo da parte cônica do cilindro com a vertical
H	Altura total do ciclone
B	Diâmetro do tubo de saída inferior do ciclone
De	Diâmetro do tubo de saída do gás
S	Altura do tubo de saída do gás
Li	Distância vertical do topo do ciclone ao duto de entrada
a	Altura do duto de entrada
b	Largura do duto de entrada
h	Altura da seção cilíndrica do ciclone
Q	Vazão da corrente de gás
CE	constante
β	D_2/D_1
D_1	Diâmetro da tubulação
D_2	Diâmetro da placa de orifício
A_1	Área
$\rho_{a,u}$	Massa específica
Re_{D_1}	Número de Reynolds
ΔP	Variação de pressão
RU	Redução de umidade
X_i	Teor de umidade do bagaço inicial
X_o	Teor de umidade do bagaço após secagem em ciclone
t_{res}	Tempo de residência

W	Vazão mássica de sólidos úmidos.
m_r	Massa remanescente
X_1	Variável codificada (temperatura do ar na entrada do ciclone)
X_2	Variável codificada (vazão mássica do bagaço)
W_{ar}	Vazão mássica do ar
T_{ai}	Temperatura do ar na entrada do ciclone
T_{pi}	Temperatura da partícula na entrada do ciclone
φ_i	Umidade absoluta do ar

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	Biomassa.....	20
2.2	Bagaço de cana-de-açúcar.....	23
2.2.1	Bagaço de cana como energia renovável.....	26
2.3	Ciclone como secador	28
3	MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1	Matéria-prima	33
3.2	Caracterização da matéria-prima.....	33
3.2.1	Granulometria.....	33
3.2.2	Teor de umidade	34
3.2.3	Poder Calorífico	34
3.2.4	Separação fibra e pó	35
3.3	Sistema experimental de secagem	35
3.3.1	Soprador	36
3.3.2	Tubulação	36
3.3.3	Esteira de alimentação.....	36
3.3.4	Alimentador Venturi	37
3.3.5	Aquecedor e isolamento.....	38
3.3.6	Ciclone	38
3.4	Cálculo de vazão do ar no ciclone	40
3.5	Procedimento de secagem	41
3.5.1	Controle das variáveis independentes.....	42
3.5.2	Redução do teor de umidade.....	42
3.5.3	Tempo de residência	42
3.6	Planejamento experimental	43

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1	Caracterização do bagaço de cana	45
4.1.1	Granulometria	45
4.1.2	Poder calorífico	49
4.1.3	Separação fibra e pó	50
4.2	Resultados da secagem em ciclone conforme planejamento experimental	52
4.2.1	Bagaço de cana do pátio	52
4.2.2	Bagaço de cana recolhido logo após sair da moenda	59
4.2.3	Bagaço de cana recolhido logo após sair da moenda – Geometria 2	65
4.3	Comparação das condições estudadas entre si e com a literatura.	72
5	CONCLUSÃO	75
	REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

As pressões exercidas pela cada vez mais presente legislação ambiental caracterizam um dos principais fatores de propulsão de tecnologias inovadoras ou o aperfeiçoamento daquelas já utilizadas ou, ainda, a transformação de uma rota tecnológica em outra. Com isso, a biomassa deixou de ser um sinônimo de subdesenvolvimento para significar energia limpa, pois, a substituição de combustíveis fósseis por combustíveis oriundos da biomassa, por meio do uso de tecnologias de conversão de energia eficientes e aceitáveis do ponto de vista ambiental, é uma alternativa importante que contribui para a redução da poluição da atmosfera, da pressão sobre os recursos não renováveis do país e pode gerar vantagens econômicas e sociais.

O Brasil apresenta-se, favoravelmente, com a já utilização de biomassa e o proeminente aumento de uso de biocombustíveis. Além disso, o país é o maior produtor do mundo de cana-de-açúcar e a alta produtividade alcançada pela lavoura canavieira, acrescida de ganhos sucessivos no processo de transformação da biomassa sucroalcooleira, tem disponibilizado enorme quantidade de matéria orgânica sob a forma de bagaço nas usinas e destilarias brasileiras (BRASIL, 2007). O bagaço de cana, quando gerenciado de forma apropriada, pode originar múltiplos produtos energéticos.

Com a otimização do processo de secagem do bagaço, para posterior queima em caldeiras e geração de energia, obtém-se uma maior eficiência da caldeira e, conseqüentemente, em uma maior eficiência energética de processos da indústria sucroalcooleira. Além disso, a otimização de processos envolvidos no uso de energia, advinda de fontes renováveis, contribui com a consolidação e valorização do uso deste tipo de energia. Vale observar que o insumo aqui tratado apresenta diversos outros usos que não a queima e, mesmo nestes casos,

a secagem sempre representa uma operação importante, pois, facilita a manipulação e transporte do mesmo.

Para este fim, o ciclone é um equipamento de pré-secagem ideal. Apresenta as vantagens de baixo custo, ausência de partes móveis e possibilidade de uso a pressões e temperaturas altas. Com relação aos equipamentos para pré-secagem, apresenta tempo de residência e fluidodinâmica superiores, respectivamente, ao secador pneumático e secador de leito fluidizado.

Este trabalho objetivou o estudo da secagem de bagaço de cana em secador ciclônico em diferentes condições operacionais e em diferentes geometrias do secador ciclônico.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Um fator muito importante, quando se otimiza a pré-secagem de subprodutos, é o conhecimento de suas características e disponibilidade e, também, dos fatores envolvidos no processo de secagem. E, para este fim, a revisão de literatura se torna necessária.

2.1 Biomassa

Probstein e Hicks (1982) e Klass (1998) definem biomassa como qualquer material derivado da vida vegetal e que seja renovável em um período de tempo inferior a 100 anos. Ushima (2004) afirma que a biomassa pode ser tida como uma fonte natural de energia, pois, armazena a energia solar por meio da reação de fotossíntese, tendo como principais componentes a hemicelulose, a lignina e a celulose (composição média: $C_6H_{10}O_5$), variando pouco, dependendo da natureza da biomassa. Sales, Andrade e Lora (2005) consideram biomassa como sendo todo material de origem orgânica (ex: madeira, detritos animais e resíduos orgânicos). Cui e Grace (2008) definem biomassa como uma matéria orgânica, proveniente das plantas, incluindo árvores, culturas agrícolas e outros resíduos.

Na década de 1970, a crise do petróleo despertou o desejo de encontrar uma nova fonte de energia e provocou o crescimento das ideias de aplicação da combustão de resíduos e biomassa (BOLYOS; LAWRENCE; NORDIN, 2003).

Atualmente, a biomassa como fonte de energia vem sendo cada vez mais explorada e representa uma alternativa ao alívio da pressão em recursos finitos de combustíveis fósseis e pode reduzir os custos de mitigação de emissões de carbono. A Figura 1 representa as fontes de suprimento de energia do Brasil, em

que os chamados combustíveis fósseis representam cerca de 51,5%; 1,4% provêm do uso de fontes nucleares e 47,2% do uso de energias renováveis.

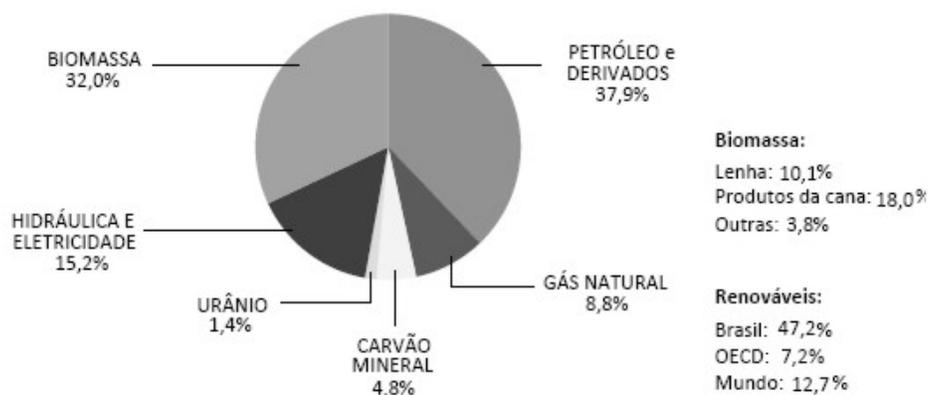


Figura 1 Estrutura da Oferta Interna de Energia, Brasil: 2009
 Fonte: Brasil (2010)

A biomassa é uma matéria-prima atrativa por 3 razões principais. Primeiro, é um recurso renovável, que pode ser de desenvolvimento sustentável no futuro. Por outro lado, tem propriedades ambientais positivas, resultando em nenhuma liberação líquida de dióxido de carbono e baixo teor de enxofre. Em terceiro lugar, possui um significativo potencial econômico, desde que sua cadeia produtiva apresente custos que possam concorrer com os dos combustíveis fósseis (DEMIRBAS, 2008).

Dentre as fontes de biomassa, têm-se as chamadas biomassas tradicionais e a biomassa moderna. A primeira se caracteriza por sua utilização ineficiente, por exemplo, em fornos de cozinha primitivos, que são poluentes e, em muitos casos, acarreta em desflorestamento. Já biomassa moderna está incluída nas “novas fontes renováveis de energia”, é aquela produzida de uma forma sustentável e utilizada para geração de eletricidade, produção de calor (ex: co-geração de calor) e combustíveis líquidos e veiculares, englobam-se neste

conceito os resíduos vegetais e florestais de reflorestamento e/ou manejo sustentável assim como os resíduos da pecuária e agricultura e resíduos urbanos (efluentes líquidos, por exemplo) (FONSECA, 2009a).

A biomassa possui uma alta estabilidade de ignição e pode ser facilmente transformada termo-quimicamente em outros combustíveis de alto valor, tais como o metanol e hidrogênio (ZHANG; XU; CHAMPAGNE, 2010).

Existe um grande número de tecnologias de conversão energética da biomassa, como a gaseificação, métodos de produção de calor e eletricidade (cogeração), recuperação de energia de resíduos sólidos urbanos e gás de aterros sanitários, além dos biocombustíveis para o setor de transporte (etanol e biodiesel) (GOLDEMBERG, 2009). A secagem de biomassa, para diversos fins, como transporte e aumento do poder calorífico, vem sendo muito estudada (XU; PANG, 2008; PANG; MUJUMDAR, 2010) para a otimização do uso deste produto.

Como forma de incentivo à implantação de novos projetos e ao uso de fontes alternativas de energia, o governo brasileiro lançou a lei PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica), cujo objetivo é a diversificação da matriz energética brasileira e a procura por soluções regionais por meio do uso de fontes de energia renováveis (LORA; ANDRADE, 2009), pequenas hidrelétricas, bagaço de cana, e usinas eólicas estão entre as fontes favorecidas por tais incentivos.

Outro indicativo do comprometimento do país na luta contra o aquecimento global é o Plano Nacional sobre Mudança do Clima, que tem como um de seus objetivos a manutenção da elevada participação de energia renovável na matriz elétrica (OLIVEIRA; HENRIQUES; PEREIRA JUNIOR, 2010). Projeções para o futuro indicam que a importância da biomassa aumentará muito, chegando a representar no fim do século 21 de 10% a 20% de toda a energia usada pela humanidade (GOLDEMBERG, 2009).

No cenário mais intensivo da biomassa, sua energia irá contribuir modernizando até 2050, cerca de metade da demanda total da energia em países em desenvolvimento (DEMIRBAS, 2008).

Oliveira, Henriques e Pereira Junior (2010) demonstraram que a energia produzida por resíduos, no Brasil, pode ter um custo de 20-60% menor que o da geração de energia eólica.

2.2 Bagaço de cana-de-açúcar

O sistema agro-industrial da cana-de-açúcar é um dos mais antigos, está ligado aos principais eventos históricos e é de enorme importância para o Brasil. A partir dos anos 70, este sistema passou por importante transformação, deixando de ser exclusivamente voltado para o setor de alimentos, para destinar-se ao setor energético, por meio do Proálcool (WAACK; NEVES, 1998).

Anteriormente a este programa, a cana-de-açúcar era usada somente como suprimento alimentar para a produção de açúcar e álcool, mas significativos avanços na tecnologia e no processo convencional tornaram possível a modernização do engenho para produzir diferentes tipos de açúcar e álcool, leveduras para alimentação do gado, grande excedente de energia na forma de bagaço, eletricidade ou suprimento calorífico, como fertilizantes e reservas de alimentação para a produção do biogás/bioetanol e plásticos biodegradáveis, entre outros (OLIVÉRIO, 2006).

A cana de açúcar é um dos principais produtos agrícolas do Brasil, apresentando anualmente crescimentos ascendentes em sua produção, avançando em áreas de outras culturas importantes (laranja, soja, milho) e, principalmente, sobre as áreas de pecuária extensiva (BRASIL, 2007). Em 2007/2008, a produção de cana-de-açúcar atingiu 495 milhões de toneladas, em 2008/2009

este número subiu para 569 milhões de toneladas (ASSOCIAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DE CANA DE AÇÚCAR - UNICA, 2010).

Em paralelo ocorre, também, um aumento na geração de resíduos, uma tonelada de cana gera cerca de 320 Kg de bagaço (NEVES; CONEJERO, 2007) e 95% da eletricidade consumida pela indústria de açúcar (1,48GW) são gerados pelo bagaço de cana (LORA; ANDRADE, 2009).

O bagaço é um material muito importante, um co-produto de alto valor que pode ser usado em diferentes formas: para produzir gás, papel, plástico, ração animal, materiais compostos e, na usina sucro-alcooleira, é usado como fonte de geração de energia na produção de vapor (SILVA; GARCIA; SILVA, 2010).

O bagaço de cana de açúcar (Figura 2), após a extração do caldo de cana, é constituído de 46% de fibra, 50% de água e 4% de sólidos dissolvidos. Além do emaranhado de fibra possui outros elementos estruturais como vasos, parênquimas e células epiteliais e, também, é composto, em média, de 47% de carbono, 6,5% de hidrogênio, 44% de oxigênio e 2,5% de cinzas em sua massa seca (SOSA-ARNAO; NEBRA, 2009).

Quimicamente, cerca de 40 a 50% do resíduo seco corresponde a um polímero de glicose (celulose). A sua maioria se encontra na forma cristalina, os outros 25-35% são hemiceluloses, um polímero amorfo, usualmente composto por xylose, arabinose, galactose, glicose e manose, o montante restante é composto em sua maior parte por lignina e em menor parte por minerais, ceras e outros compostos (SUN et al., 2004).

Fisicamente, o bagaço de cana é caracterizado por apresentar partículas classificadas como fibra e pó (Figura 3) e as fibras correspondem às partículas com formato próximo de um cilindro e de um prisma elíptico e o pó às partículas extremamente irregulares com formato semelhante a um disco ou a uma esfera

(CORRÊA, 2003; HUGOT, 1964; NEBRA; MACEDO, 1988; RASUL; RUDOLPH; CARSKY, 1999; SOSA - ARNAO, 2008).



Figura 2 Bagaço de cana



Figura 3 Bagaço de cana – fibra (a) e pó (b)

Atualmente, o recurso de maior potencial para geração de energia elétrica no país, com relação ao aproveitamento das biomassas, é o bagaço de cana-de-açúcar. A alta produtividade alcançada pela lavoura canavieira, acrescida de ganhos sucessivos nos processos de transformação da biomassa sucroalcooleira, têm disponibilizado enorme quantidade de matéria orgânica sob a forma de bagaço nas usinas e destilarias de cana-de-açúcar, interligadas aos principais sistemas elétricos, que atendem a grandes centros de consumo dos

estados das regiões sul e sudeste (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2005).

2.2.1 Bagaço de cana como energia renovável

Há um grande enfoque na procura de novas fontes energéticas em substituição aos recursos fósseis e hidráulicos, sendo vários fatores conducentes desse processo, como os fatores ambientais, econômicos e políticos. No âmbito ambiental, a queima de produtos fósseis em caldeiras, por exemplo, gera grande quantidade de gases (CO₂, metano e dióxido de enxofre) que são responsáveis pelo efeito estufa. Quanto à economia e à política, há uma grande insegurança com relação à oferta de energia proveniente do petróleo e derivados, uma vez que 65,4% desse combustível encontram-se em regiões de grandes conflitos no Oriente Médio, além da grande oscilação de preços (MARCONATO; SANTINI, 2008).

A produção de eletricidade, considerando a biomassa no Brasil, em 2006, correspondeu a, aproximadamente, 4,4% do montante total gerado, que foi 419,3 TWh; 8,35 TWh gerados de bagaço de cana, 0,72 TWh de lenha, 5,19 TWh de licor negro e 4,25 TWh de outros resíduos agrícolas (BRASIL, 2009). No ano de 2007, os derivados da cana-de-açúcar foram considerados a segunda principal fonte primária de energia do país, perdendo apenas para o petróleo e seus derivados, com um aumento de 14,7% em relação ao ano anterior (ANEEL, 2008).

Muitos esforços, portanto, estão em curso para se obter o melhor potencial possível dos resíduos agrícolas renováveis, com especial atenção ao bagaço de cana, que é visto como um foco alternativo de renda e energia, não só pelas usinas, mas também pelo governo.

O bagaço de cana é gerado em grandes quantidades em todo o mundo, cerca de 54 milhões de toneladas de bagaço são produzidos anualmente (SUN et al., 2004). Além de serem abundantes possuem baixo custo, que os torna atrativos para a produção do etanol e de energia (WHEALS et al., 1999).

A geração de bagaço tende a crescer cada vez mais. Um indicativo disto é o aumento progressivo da produção do etanol e para sua produção cerca de 28% da cana são transformados em bagaço. Em termos energéticos, o bagaço equivale a 49,5%, o etanol a 43,2% e o vinhoto a 7,3% (BRASIL, 2007).

Na produção das agroindústrias sucroalcooleiras, o bagaço é um dos resíduos que podem ser utilizados na produção de eletricidade por meio da co-geração, que é um processo de transformação de uma forma de energia em energia útil, podendo ser mecânica para movimentar máquinas e gerar energia ou térmica para gerar vapor (SILVA; GARCIA; SILVA, 2010). Em média, cada tonelada de cana requer 12KWh de energia elétrica, que pode ser gerado pelos próprios resíduos da cana. Os custos de geração já são competitivos com os do sistema convencional de suprimento, possibilitando a auto-suficiência do setor em termos de suprimento energético, por meio da co-geração (BRASIL, 2007).

Além do consumo interno de energia, estimativas predizem que apenas as usinas do interior do estado de São Paulo, por exemplo, poderiam gerar eletricidade suficiente, provinda da queima do bagaço de cana, para suprir a demanda dos estados do Rio de Janeiro, Paraná e Santa Catarina (SALOMÃO, 2008). Atualmente, no Brasil, a capacidade total de geração de eletricidade, considerando o bagaço de cana, instalada nas usinas, corresponde a cerca de 2300MW (ANEEL, 2009).

Além da grande disponibilidade do bagaço, o Brasil tem a vantagem de ser o único país que domina todos os estágios da tecnologia de produção da cana-de-açúcar, apresentando uma cadeia bem organizada (VIDAL; SANTOS; SANTOS, 2006) e a safra da cana-de-açúcar coincide com o período de

estiagem na região Sudeste/Centro-Oeste, em que está concentrada a maior potência instalada em hidrelétricas do país. Assim, a eletricidade fornecida neste período auxilia a preservação dos níveis dos reservatórios das Usinas Hidroelétricas de Energia (ANNEL, 2008).

2.3 Ciclone como secador

Normalmente, durante o processamento da cana-de-açúcar, a fibra esmagada (bagaço) é embebida em água e enviada diretamente para as caldeiras, fornecendo, por meio das estações de co-geração, eletricidade, trabalho mecânico e energia térmica, necessários para todo o processo de produção do açúcar e do álcool. Cada tonelada de bagaço de cana esmagado produz cerca de 255 Kg de bagaço com umidade de 50% (KILICASLAN et al., 1999). O teor energético do bagaço é, aproximadamente, 30% a 40% da energia total da planta (ROSILLO-CALLE; BAJAY; ROTHMAN, 2005).

A combustão direta do bagaço torna o processo muito ineficiente e gera problemas, em decorrência da alta umidade e da baixa densidade do resíduo a ser queimado. O alto teor de umidade do resíduo pode provocar uma ignição pobre e a redução da temperatura de combustão, que impede a combustão dos produtos de reação e, conseqüentemente, afeta a qualidade desta (HELLWIG, 1985 apud WERTHER et al., 2000, p. 4). São necessárias pesquisas de novas tecnologias que favoreçam o processo de queima para gerar excedentes.

A secagem do bagaço facilita o seu armazenamento e transporte (ANEEL, 2005). Em consequência baixa densidade do bagaço *in natura* (ocupando grande volume) e do elevado custo de transporte, na maioria das vezes, é economicamente inviável a utilização de resíduos agrícolas como o principal combustível em grandes centrais de energia. A sua utilização em pequenas centrais de energia elétrica local tem a desvantagem de elevados

custos em investimentos específicos e uma menor eficiência térmica em comparação com uma usina grande (HELLWIG, 1985).

Uma alternativa para o aumento do potencial energético do bagaço é por meio de uma pré-secagem, pois, o bagaço seco apresenta um alto poder calorífico (19268 KJ/Kg), ao mesmo tempo, a redução da umidade, também, provoca a redução do volume dos gases de saída da caldeira e a redução do vapor da água nos gases de combustão resulta em altas temperaturas de combustão, melhorando a eficiência da caldeira (SOZA-ARNAO, 2008). Paiva, Nebra e Gallo (1998) comprovaram que há um aumento de 27,7% de eficiência energética ao se alimentar a caldeira com bagaço a 20% de umidade, em relação à mesma situação com alimentação de bagaço a 50% (b.u.). Sosa-Arnao e Nebra (2009) concluíram que os sistemas de geração de vapor acoplados a um secador de bagaço, quando comparado a dois geradores de vapor usados nas caldeiras de bagaço brasileiras, possuem uma maior eficiência, ou seja, um maior desempenho termodinâmico.

No processo de secagem, a remoção de umidade ocorre, geralmente, com a evaporação da mesma por transferência simultânea de massa e calor entre as fases sólida e gasosa. Esta operação pode estar no meio de um processo industrial ou ser a última ou única etapa a ser desenvolvida. O calor pode ser cedido à fase sólida por uma fonte externa, por meio dos mecanismos de convecção, condução, radiação ou, ainda, dielectricamente dentro do sólido. Pode, também, ocorrer como combinação de mais de um dos mecanismos acima (CORRÊA, 2003).

Dentre os tipos de secadores utilizados em secagem de resíduos, destacam-se os secadores pneumáticos, bastante usados na indústria e, também, em vários trabalhos acadêmicos (BARBOSA, 1992; KORN, 2001; NEBRA, 1985; VIOTTO, 1991) e secadores ciclônicos (BENTA, 1997; CORRÊA, 2003; GONÇALVES, 1996; SANTOS, 2009; SILVA, 1991). Diversos são os

trabalhos de secagem de produtos, que não só resíduos, em secador ciclônico, como o de Akpınar (2005), Akpınar, Midilli e Bicer (2003), Akpınar, Midilli e Bicer, (2005), Bunyawichakul et al. (2006) e Oztop e Akpınar (2008). No entanto, os equipamentos utilizados por esses autores possuem configuração bastante diferenciada daquela de um ciclone separador (LINDEN, 1949; KORN, 2001) utilizado como secador nos trabalhos de Nebra, Silva e Mujumdar (2000) e Silva e Nebra (1997).

O ciclone nada mais é do que um simples coletor mecânico que usa forças centrífugas para separação de partículas por meio de um fluxo de gás, podendo remover partículas maiores que 5 μm de uma fase gasosa com maior eficiência (CORRÊA et al., 2004a; LINDEN, 1949) e são, também, atrativos para operarem a elevadas temperaturas e/ou pressão. É um equipamento que oferece algumas vantagens, por ser relativamente barato em sua fabricação, econômico durante seu uso, simples e adaptável a diversas condições de operação (CHEN; WANG, 2001).

Seu princípio de funcionamento (Figura 4) consiste, inicialmente, na injeção de uma corrente gasosa contendo material particulado por uma entrada tangencial próxima ao topo do mesmo. Esta corrente adquire um escoamento em espiral descendente. A força de arrasto da fase gasosa conduz a partícula a uma trajetória em espiral na periferia, colidindo com a parede interna do equipamento. Os sólidos são, assim, levados a um movimento, também, em espiral descendente, junto à parede, sendo assim recolhidos na parte inferior do ciclone. Na região central do equipamento, o gás passa de uma espiral descendente a uma espiral ascendente, conhecida como *core*, saindo “limpo” pelo duto superior, também, chamado tubo de saída do gás ou *draft tube* (CORRÊA, 2003).

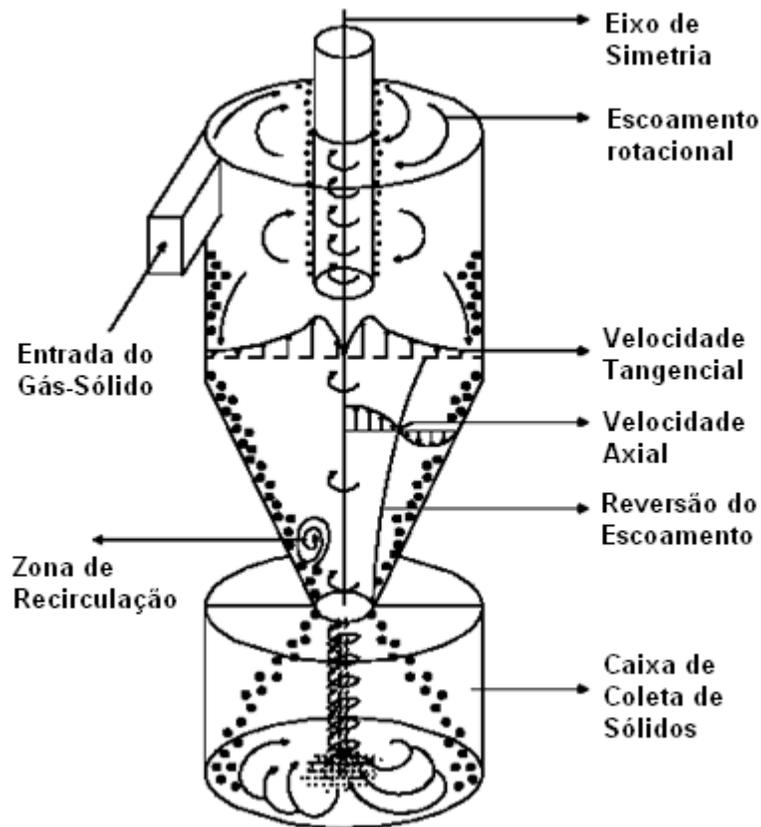


Figura 4 Fluidodinâmica gás-partículas em um ciclone
 Fonte: Ogawa (1997)

Em específico à secagem do bagaço de cana, o estudo pioneiro foi de E. W. Kerr, que conseguiu uma redução de 18,4% de umidade com o uso de um secador em torre, cujo bagaço possuía um movimento descendente e o gás de exaustão de caldeiras ascendente. Nebra (1985) e Nebra e Macedo (1989) obtiveram redução no teor de umidade do bagaço de, aproximadamente, 29% (b.u), com o uso de um secador pneumático industrial seguido de um ciclone. Ainda, neste mesmo trabalho, chegou-se à conclusão de que a maior parte da secagem ocorria no ciclone.

Korn (2001) concluiu que o uso de um ciclone, imediatamente, após um secador pneumático é vantajoso por ser um equipamento mais simples e extremamente eficiente.

Mediante o trabalho de Nebra (1985), vários estudos foram realizados com a intenção de obter maior eficiência de tempo de residência e secagem em ciclone (CORRÊA, 2003; CORRÊA et al., 2004a; CORRÊA et al., 2004b; CREMASCO, 1994; DIBB, 1997; FARIAS, 2006; GODOY, 1989; NEBRA; SILVA; MUJUMDAR, 2000; SILVA, 1991; SILVA; NEBRA, 1997). No entanto, estudos com a secagem de bagaço de cana em secador ciclônico são poucos (CORRÊA et al., 2004a; CORRÊA et al., 2004b; FARIAS, 2006).

Em estudos anteriores (BENTA, 1997; CREMASCO, 1994; GODOY, 1989; GODOY, SILVA; NEBRA, 1992; GONÇALVES, 1996; SILVA, 1991; SILVA; NEBRA, 1997) foram realizados testes de secagem de resíduos agroindustriais e de tempo de residência em um ciclone tipo Bernauer, projetado para atuar na limpeza de gases. Surgiram, então, estudos objetivando a alteração da geometria do ciclone com vistas à secagem (DIBB, 1997; DIBB; SILVA, 1997). Corrêa (2003) testou a secagem de bagaço de cana em um ciclone com geometria, voltada ao aumento do tempo de residência das partículas e, desta forma, voltada a uma maior redução de umidade das partículas. Aquele estudo deu origem a um equipamento em escala piloto bastante apropriado para a secagem de umidade não-ligada com a redução de umidade de bagaço de cana de 48% (b.u.) para 26% (b.u.) em 8,7s de tempo de residência (CORRÊA et al., 2004a; CORRÊA et al., 2004b). Pretende-se, neste trabalho, um estudo experimental da secagem de bagaço em um secador ciclônico com parte cônica diferente daquele utilizado por Corrêa et al. (2004a), para ampliar a avaliação da geometria do ciclone na secagem e no tempo de residência das partículas neste equipamento.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Inicialmente caracterizou-se o material (bagaço) a ser seco, em seguida desenvolveu-se um planejamento experimental, para condução do experimento, conforme descrito a seguir.

3.1 Matéria-prima

O bagaço de cana foi cedido pelas Usinas Junqueira (Grupo COSAN) e Santa Lúcia S/A, situadas em Iguarapava (SP) e Araras (SP), respectivamente, sendo o primeiro provindo do pátio, pego no mês de janeiro, e o segundo recolhido, logo após extração na moenda, pego entre abril a agosto.

O bagaço foi acondicionado em sacos herméticos e mantido sob refrigeração (10°C), para garantir a preservação das suas características iniciais até o seu uso.

3.2 Caracterização da matéria-prima

Procedeu-se à caracterização física do bagaço de cana antes e após a sua secagem em secador ciclônico, realizando-se as análises de granulometria, poder calorífico, teor de umidade e separação fibra e pó, conforme descrito a seguir.

3.2.1 Granulometria

Para a determinação da distribuição de tamanho, foi adotado o método das peneiras padronizadas, como citado por Foust et al. (1980), utilizando o conjunto de peneiras padronizadas da série Tyler (8, 14, 28, 35 e 48 mesh).

3.2.2 Teor de umidade

O teor de umidade foi determinado, por meio de secagem em estufa a 105°C, conforme norma NBR 7993 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1983), por não ter sido obtido norma específica para secagem de bagaço de cana e por este método já ter sido utilizado com êxito por diversos autores como Rasul, Rudolph e Carsky (1999), Corrêa (2003) e Costa (2008), para determinação da umidade do bagaço de cana. As medidas de massa foram efetuadas em balança analítica com precisão de 0,0001g de, aproximadamente, 5g de amostra do bagaço.

3.2.3 Poder Calorífico

Os testes de calorimetria foram realizados na Unidade Experimental de Produção de Painéis de Madeira, do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Lavras, utilizando-se um calorímetro adiabático digital IKA C-200. Para a determinação do poder calorífico superior (PCS), a amostra de, aproximadamente, 1g do bagaço de cana a ser analisado, foi pesada em uma cápsula metálica e colocada no reator do calorímetro (bomba calorimétrica). Após o fechamento da bomba, o sistema foi pressurizado com, aproximadamente, 30 bar de oxigênio. A bomba foi colocada no calorímetro adiabático contendo água e a ignição da amostra se deu eletricamente. As medições do PCS foram reportadas em cal/g.

O poder calorífico superior, que corresponde à entalpia de combustão completa de um combustível, incluindo a entalpia de condensação da água (FRIEDL et al., 2005), foi convertido em poder calorífico inferior (PCI), que é obtido, quando a entalpia de condensação da água não está incluída, conforme Hugot (1964):

$$PCI = FCS - 600 [(9h - X) - X] \quad (1)$$

em que X corresponde ao teor de umidade em base úmida e h à porcentagem de hidrogênio presente no bagaço de cana (Kg). Para os cálculos, estipulou-se o valor de h igual a 6,5%, conforme Hugot (1964). Islam, Parveen e Haniu (2010) citam valores na faixa de 5,97 a 6,7% de hidrogênio no bagaço de cana.

3.2.4 Separação fibra e pó

O bagaço de cana foi totalmente seco em estufa a 105°C até obtenção de peso constante. Em seguida, foi separado, granulometricamente, em peneiras de 4, 8, 14, 28, 35 e 48 Tyler.

A separação da fibra e do pó, em cada peneira, procedeu-se manualmente, partícula por partícula, com o auxílio de uma pinça, conforme descrito por Corrêa (2003). Foi considerada fibra as partículas com formato mais próximo a um cilindro e o pó formato próximo a um disco ou a uma esfera.

3.3 Sistema experimental de secagem

A Figura 5 representa um esboço do sistema experimental utilizado para secagem de bagaço de cana e este composto por ciclone, coletor de sólidos, alimentador Venturi, esteira elétrica, aquecedor, placa de orifício, soprador. Todo o sistema foi revestido por lã de rocha, com espessura de 10 cm e alumínio corrugado para manutenção da temperatura. Deve-se observar que um esquema semelhante a este foi usado, também, para secagem de bagaço de cana por Corrêa (2003), sendo mais relevante às diferenças dimensionais do ciclone, conforme Figura 8.

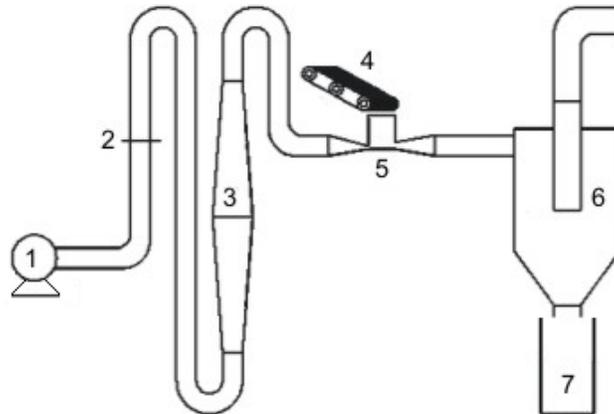


Figura 5 Sistema experimental do secador (1-Soprador; 2-Placa de orifício; 3- Aquecedor; 4- Esteira elétrica; 5- Alimentador Venturi; 6- Ciclone; 7- Coletor de sólidos)

3.3.1 Soprador

O soprador utilizado possui uma rotação em torno de 5000 RPM, com pressão de 1000 mm de ca e vazão de $30 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$, sendo do tipo VEC 5ta 500 especial, com motor 5 SCV.

3.3.2 Tubulação

A tubulação que conduz o ar do soprador ao aquecedor é de PVC com diâmetro de 0,1016 m. O restante da tubulação é constituído por aço carbono.

3.3.3 Esteira de alimentação

Para obtenção de vazão constante dos sólidos de alimentação, optou-se pelo uso de uma esteira elétrica (Figura 6), fabricada pela empresa Ermapi Equipamentos Industriais Ltda, com velocidade ajustável de até 20 ms^{-1} , com

dimensões de 1,5m de comprimento por 0,1 m de largura útil, sendo esta alimentada manualmente.



Figura 6 Esteira elétrica

3.3.4 Alimentador Venturi

A dimensão do alimentador Venturi, aqui utilizado, foi feito conforme o trabalho de Corrêa (2003) e pode ser observado na Figura 7.

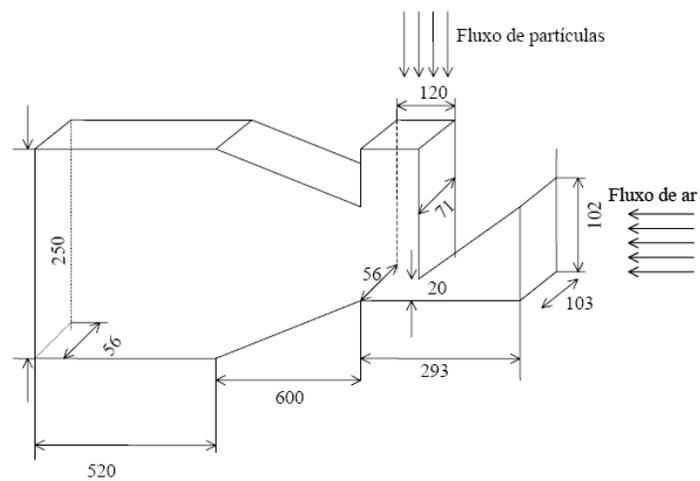


Figura 7 Alimentador Venturi com dimensões em mm
Fonte: Corrêa (2003)

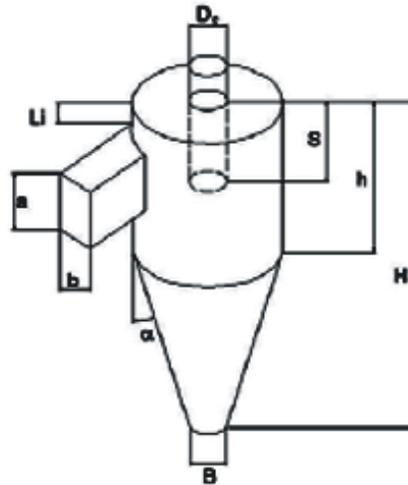
3.3.5 Aquecedor e isolamento

O aquecedor e o isolamento, também seguiram os padrões de Corrêa (2003), sendo o aquecedor fabricado em chapas de aço carbono com 17 resistências da marca Anluz, totalizando uma potência de 34 KW.

A partir do aquecedor, isolou-se todo o sistema com lã de rocha de 5 cm de espessura, sendo revestido com alumínio corrugado.

3.3.6 Ciclone

O ciclone estudado foi dimensionado com base no trabalho de Corrêa (2003), procurando obter dimensões que conduzissem a um maior tempo de residência, conforme Figura 8. Neste trabalho, usaram-se duas dimensões de parte cônica (Figura 9), diferindo entre si o valor de α , H e B, geometria 1 ($\alpha = 41^\circ$, H = 1,20 m e B = 0,10 m) e geometria 2 ($\alpha = 47^\circ$, H = 1,10 m e B = 0,16 m).



$$D_e = 0,16 \text{ m}, S = 0,50 \text{ m}, L_i = 0,15 \text{ m}, a = 0,056 \text{ m}, \\ b = 0,25 \text{ m}, h = 0,73 \text{ m}.$$

Figura 8 Dimensionamento do secador ciclônico

Este ciclone difere do utilizado por Corrêa (2003) em relação à inclinação, à abertura inferior da parte cônica e à altura H . O equipamento utilizado por Corrêa possuía $\alpha = 49^\circ$, $H = 1 \text{ m}$ e $B = 0,10 \text{ m}$.

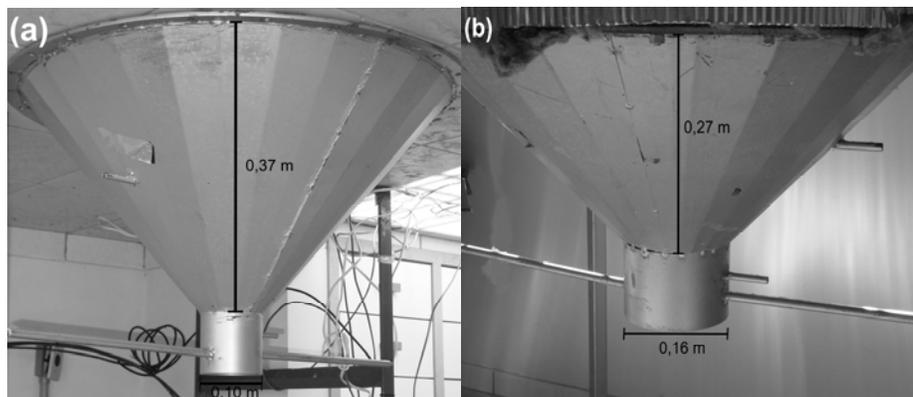


Figura 9 Partes cônicas do ciclone, geometria 1 (a) e geometria 2 (b)

3.4 Cálculo de vazão do ar no ciclone

A vazão da corrente de gás foi mantida constante em todo experimento, sendo esta de $7,5 \times 10^{-2} \text{ Kgs}^{-1}$. Esta vazão foi calculada baseando-se na medida de um diferencial de pressão, obtido em um manômetro, com álcool, de tubo inclinado, medidas de temperatura e pressão ambiente e temperatura da corrente gasosa, conforme equação proposta pela norma da ASME, reportada por Delmée (1983):

$$Q = CE\beta^2 A_1 \left(\frac{\Delta P}{\rho_{a,u}} \right)^{0,5} \quad (2)$$

em que β é igual a fração entre D_2 (diâmetro da placa de orifício) por D_1 (diâmetro da tubulação em questão), A_1 é área da tubulação, $\rho_{a,u}$ é a massa específica do fluido e CE é uma constante calculada conforme equação 3.

$$CE = C'E + Br(10^6 Re D_1)^{0,8} \quad (3)$$

em que

$$C'E = 0,6014 - 0,030352 D_1^{-0,28} + (0,3760 + 0,1629 D_1^{-0,28}) \left(\frac{0,16129}{D_1^2 \beta^2 + 0,0635 D_1} + \beta^4 + 1,5 \beta^{16} \right) C'E + Br(10^6 Re D_1)^{0,8} \quad (4)$$

e

$$Br = 0,0002 + \frac{0,02784}{D_1} \left(0,0038 + \frac{0,01016}{D_1} \right) [\beta^2 + (16,5 + 0,19695 D_1)] \beta^{16} \quad (5)$$

em que D_1 é expresso em mm e Re_{D_1} corresponde ao número de Reynolds com relação à D_1 .

3.5 Procedimento de secagem

Realizaram-se três conjuntos de experimentos de secagem. Numa primeira etapa secou-se bagaço, proveniente do pátio, da Usina Junqueira, Iguarapava/SP, no ciclone com parte cônica correspondente à geometria 1 ($\alpha = 41^\circ$, $B = 0,10$ m e $H = 1,20$ m). Na segunda etapa, no ciclone com esta mesma geometria, secou-se o bagaço, recolhido logo após maceração em moenda, da Usina Santa Lúcia, Araras/SP e, numa última etapa, foi seco o bagaço, ainda, da Usina Santa Lúcia, no ciclone com a parte cônica diferenciada da anterior, geometria 2 ($\alpha = 47^\circ$, $B = 0,16$ m e $H=1,10$ m).

Para secagem do material, primeiramente, determinou-se a umidade absoluta do ar e a temperatura absoluta. Foram ligados o soprador e o aquecedor do secador ciclônico, mediu-se a temperatura da parede do ciclone, com o auxílio de um termopar acoplado à parede do equipamento. Ao alcançar temperatura constante da parede do ciclone, para estabelecimento de regime permanente de troca de calor, iniciou-se à alimentação de sólidos (bagaço de cana), controlando a vazão de sólidos e de ar. Verificou-se, novamente, a temperatura do termopar acoplado à parede do ciclone, para confirmação de não variação desta, garantindo, assim, que o sistema se encontra em regime permanente de troca de calor e massa. Mediu-se a temperatura da corrente gasosa no ponto próximo a placa de orifício, antes da alimentação de sólidos, antes da entrada do ciclone e na saída superior e inferior do ciclone.

3.5.1 Controle das variáveis independentes

O ajuste da temperatura desejada foi feito controlando as resistências que compunham o aquecedor.

Para conseguir uma vazão mássica constante, ajustou-se a alimentação de sólidos por meio da velocidade da esteira e da altura da parede colocada exatamente no final da esteira, garantindo uma espessura constante do material.

A sua determinação foi feita, por uma medida de sólidos coletada em balança com precisão de 0,01g, em um determinado intervalo de tempo, conforme Corrêa (2003).

3.5.2 Redução do teor de umidade

A medida do teor de água procedeu-se conforme descrito no item 3.2.2. A redução do teor de umidade foi calculada conforme equação 6.

$$RU = \frac{X_i - X_o}{X_i} \quad (6)$$

em que X_i representa o teor de umidade do bagaço de cana, antes de entrar no sistema pelo alimentador Venturi e X_o o teor de umidade do bagaço, logo após secagem em ciclone, ambos em base úmida.

3.5.3 Tempo de residência

A medida da massa remanescente do sólido é feita ao cortar simultaneamente as alimentações de sólido e de gás. O tempo de residência é dependente desta medida e da vazão mássica de sólidos, conforme especificado

no item anterior e calculado pela Equação 7, conforme método holdup (CORRÊA et al., 2004b; LEDE et al., 1987; LI et al., 2008).

$$t_{res} = \frac{m_r}{W} \quad (7)$$

em que m_r corresponde à massa remanescente e W à vazão mássica de sólidos úmidos.

3.6 Planejamento experimental

Para secagem do bagaço de cana, primeiramente, definiu-se o planejamento experimental, baseado no método de superfície de resposta. A escolha deste método se deve a sua simplicidade de análise dos resultados e por ter a vantagem de explorar todo o espaço experimental com um menor número de ensaios a serem realizados (RODRIGUES; IEMMA, 2005).

Foi feito um delineamento composto central rotacional (DCCR), totalizando 11 ensaios, sendo 4 ensaios nas condições axiais e 3 repetições no ponto central (para avaliar a reprodutibilidade do processo, com o cálculo do erro experimental). Os níveis utilizados e os ensaios experimentais se encontram na Tabela 1.

O mesmo planejamento experimental foi adotado para as três secagens em ciclone: secagem do bagaço proveniente do pátio; secagem do bagaço proveniente diretamente da moenda; e mudança do dimensionamento da parte cônica do ciclone para secagem do bagaço da moenda.

Tabela 1 Delineamento experimental para os ensaios de secagem de bagaço de cana

Ensaio	Variáveis codificadas		Variáveis reais	
	X_1	X_2	T [°C]	$W \times 10^3$ [Kgs ⁻¹]
1	-1	-1	70	5
2	+1	-1	240	5
3	-1	+1	70	25
4	+1	+1	240	25
5	-1,41	0	35	15
6	+1,41	0	275	15
7	0	-1,41	155	1
8	0	+1,41	155	29
9	0	0	155	15
10	0	0	155	15
11	0	0	155	15

Onde X_1 corresponde à temperatura do ar [°C] e X_2 a vazão mássica do bagaço de cana [10^{-3} kg s⁻¹].

As variáveis dependentes analisadas foram a redução da umidade (RU) e o tempo de residência (t_{res}).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados encontrados para caracterização do bagaço e os obtidos em planejamento experimental se encontram abaixo.

4.1 Caracterização do bagaço de cana

Para a caracterização do material, tanto *in natura* quanto o seco em sistema experimental, foram realizadas as análises de granulometria, teor de umidade e poder calorífico.

Para a análise da forma das partículas do bagaço foi feita a separação das fibras e pós.

4.1.1 Granulometria

Nas Tabelas 2 e 3 são apresentados os resultados obtidos na análise granulométrica do bagaço de cana do pátio e o extraído diretamente da moenda, das usinas Junqueira e Santa Lúcia, conforme o seu teor de umidade. As dimensões da abertura das peneiras correspondem respectivamente à série Tyler 8, 14, 28, 35, 48 e fundo (abertura 2,36; 1,18; 0,6; 0,425; 0,30; e 0 mm, respectivamente). Os teores de umidade apresentados na tabelas 2 e 3 correspondem ao bagaço *in natura* e aos bagaços secos, conforme planejamento experimental, em secador ciclônico.

Tabela 2 Distribuição granulométrica do bagaço de cana proveniente da Usina Junqueira

Ensaio	X (%) (bu)	Abertura da peneira (mm)					
		2,36	1,18	0,60	0,425	0,30	0,00
		Fração mássica retida (%)					
In natura	74,52	39,96	47,28	11,55	0,61	0,60	0
5	72,81	48,45	36,28	14,85	0,42	0	0
8	71,43	22,38	15,38	57,97	4,27	0	0
3	71,05	46,67	23,55	28,96	0,81	0	0
11	67,78	49,95	6,74	40,77	2,53	0	0
1	67,31	36,84	8,45	48,57	6,13	0	0
10	65,01	33,29	26,46	37,50	2,75	0	0
9	64,86	36,86	11,10	48,19	3,71	0,14	0
7	64,38	32,55	18,15	44,87	4,38	0,50	0
4	62,68	38,16	16,57	41,13	4,07	0,06	0
6	59,28	31,98	14,02	46,40	7,5	0,11	0
2	50,79	23,38	17,52	45,77	11,55	1,78	0

Tabela 3 Distribuição granulométrica do bagaço de cana proveniente da Usina Santa Lúcia

Ensaio	X (%) (bu)	Abertura da peneira (mm)					
		2,36	1,18	0,60	0,425	0,30	0,00
		Fração mássica retida (%)					
In natura	51,72	34,09	18,72	33,50	10,49	1,86	0,19
3	50,94	31,51	20,57	30,25	12,53	3,10	0,57
5	47,69	30,53	20,66	32,40	12,94	2,08	0,40
8	45,22	38,10	19,14	27,00	10,68	2,69	0,91
11	44,72	39,81	21,73	24,53	8,52	2,93	0,92
1	44,45	31,18	19,21	27,44	8,10	6,28	3,70
4	42,15	29,62	23,49	30,38	11,33	3,53	0,97
10	41,57	36,40	23,21	25,80	8,97	3,11	1,11
6	41,46	37,76	21,47	26,13	8,72	3,11	1,64
9	41,41	30,07	24,32	28,46	9,74	4,12	1,86
2	25,21	25,33	17,54	28,73	8,36	10,36	8,21
7	18,38	46,98	18,09	16,58	5,29	5,71	4,57

De acordo com as Tabelas 2 e 3, observa-se que houve uma maior concentração mássica de bagaço entre as peneiras de diâmetro 2,36 a 0,60 mm. Porém, as distribuições granulométricas, obtidas após os experimentos, mostraram-se inversamente proporcionais ao teor de umidade final do bagaço. O aumento do teor de umidade leva à formação de grumos pelas partículas de bagaço de cana, com a aderência das partículas menores às maiores, provocando uma maior retenção mássica nas peneiras de maior abertura (CORRÊA, 2003).

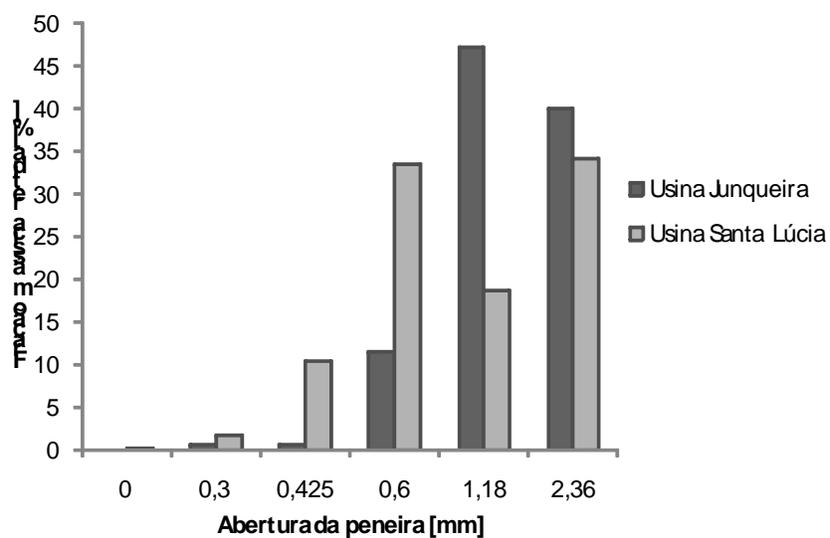


Gráfico 1 Distribuição granulométrica dos bagaços *in natura* provenientes das Usinas Junqueira (74,52% b.u) e Santa Lúcia (51,72% b.u)

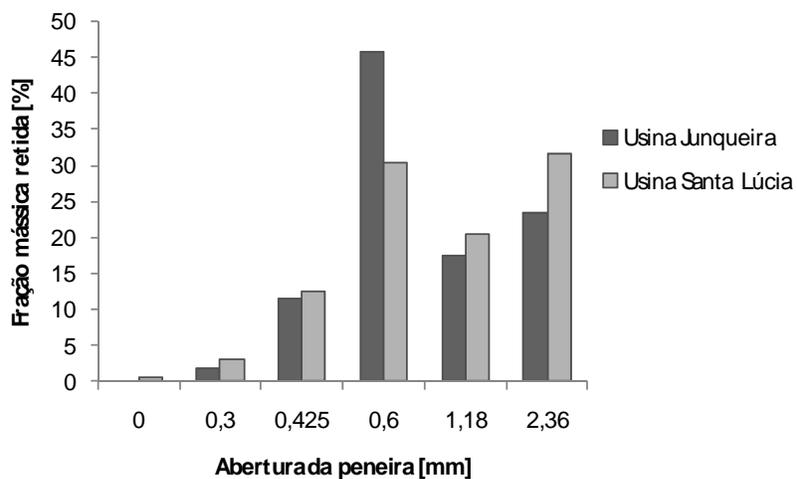


Gráfico 2 Distribuição granulométrica dos bagaços com semelhantes teores de umidade 50,79 % em b.u (Usina Junqueira) e 50,94 % em b.u (Usina Santa Lúcia)

Os histogramas (Gráficos 1 e 2) demonstram o percentual de retenção mássica nas peneiras do bagaço antes de ser seco e do mesmo com teores de umidade semelhantes, de ambas as Usinas.

O bagaço de ambas as indústrias mostraram a mesma tendência com relação à concentração de bagaço em função da umidade, da maior retenção nas peneiras de 8 mesh (2,36mm) e 28 mesh (0,60 mm) e da distribuição mássica semelhante entre as peneiras, principalmente, quando se comparam os bagaços com teores de umidades próximos (Gráfico 2). Em consequência desta mesma tendência, será tratado de agora em diante como bagaço do pátio (Usina Junqueira) e bagaço recolhido logo após moagem (Usina Santa Lúcia).

Com relação ao bagaço, em condições de umidade em equilíbrio com o ar ambiente, Bernhardt (1998), Nebra e Macedo (1988) e Sosa-Arno (2008), também, obtiveram uma maior retenção do bagaço na peneira de 28 mesh.

4.1.2 Poder calorífico

Observa-se, pelo Gráfico 3, que o processo sofrido pelo bagaço na usina não interfere no seu poder calorífico, no entanto, o seu teor de umidade influencia, significativamente e o aumento do teor de umidade provoca uma diminuição do seu poder calorífico. A mesma tendência foi observada por Silva e Morais (2008) que trabalharam com bagaço de cana em uma faixa de umidade de 0 a 50%.

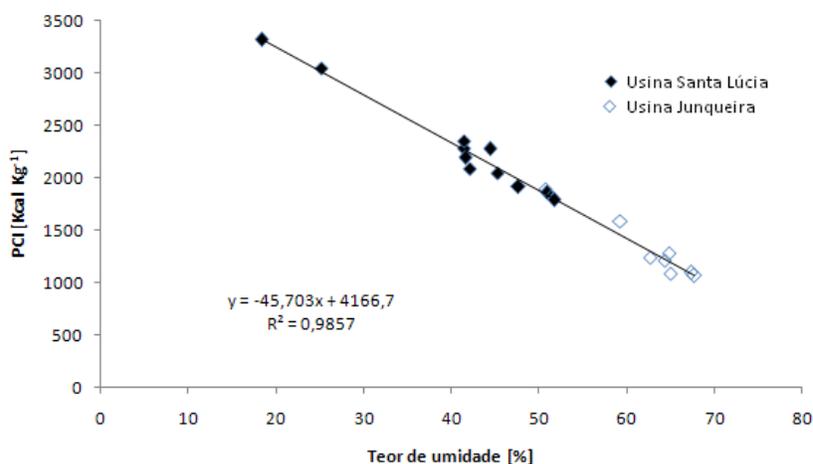


Gráfico 3 Poder calorífico de amostras de bagaço de cana em diferentes teores de água

Com a redução da umidade de 67 para 18% em b.u consegue-se um incremento energético da ordem de, aproximadamente, 68%.

O valor experimental do PCI, obtido neste trabalho, apresenta boa concordância com diversos trabalhos, nos quais o PCI foi determinado em um bagaço com, aproximadamente, 50% de umidade, como o de Ramos et al. (2003) (1849,9 Kcal/Kg), Couto et al. (2004) (1770 Kcal/Kg), Uchôa (2005) (1849,9 Kcal/Kg) e Ramjeawon (2008) e comparando o bagaço *in natura* ao bagaço pré-seco, este último possui vantagens, tanto pelo menor teor de umidade como pelo maior poder calorífico. Em caso de estocagem, ter-se-á mais energia por unidade de volume, reduzindo-se pátios de estocagem e a dimensão de equipamentos de queima (QUIRINO, 1991).

4.1.3 Separação fibra e pó

As partículas do bagaço de cana podem ser classificadas como fibra e pó. Conforme Corrêa (2003), as fibras correspondem às partículas com formato

próximo de um cilindro, e o pó às partículas extremamente irregulares com formato semelhante a um disco ou a uma esfera. Na separação granulométrica deste bagaço há uma tendência de uma maior predominância da fibra sobre o pó em peneiras com diâmetros médio maiores.

A diferenciação entre as partículas do bagaço encontram-se representadas no Gráfico 4.

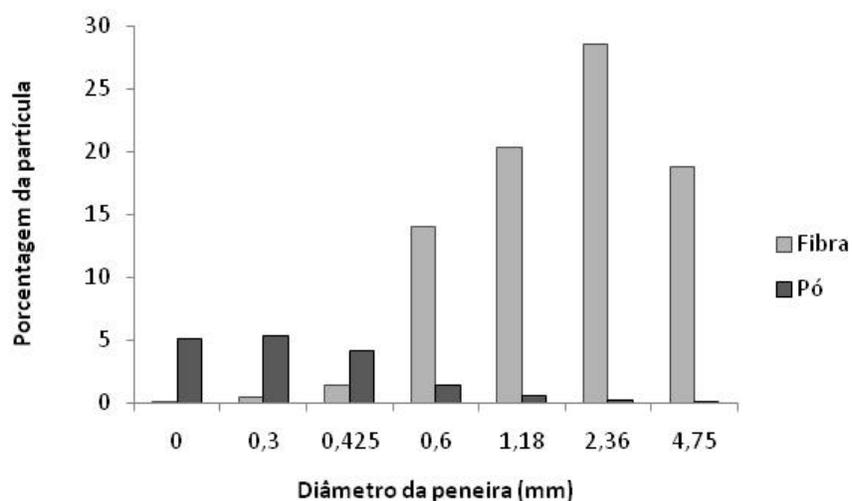


Gráfico 4 Comportamento percentual de fibra e pó dentro de cada peneira

Pelo Gráfico 4 observa-se que as fibras representam 83,35% das partículas e um maior percentual foi encontrado nas peneiras com maiores diâmetros (0,6 a 4,75mm). Os 16,65% das partículas restantes correspondem ao pó, com maior concentração nas demais peneiras (0 a 0,425mm de diâmetro). Tendência semelhante foi encontrada por Corrêa (2003), Nebra e Macedo (1988) e Sosa-Arno (2008).

Visualmente, dentro de cada peneira, as fibras diferiram entre si com relação à sua dimensão, Figura 10.

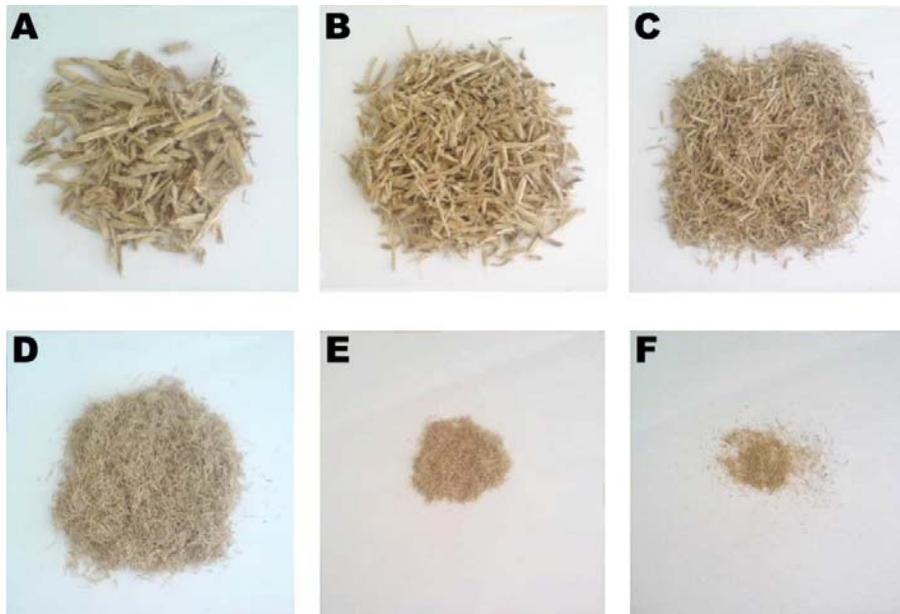


Figura 10 Fibra obtida nas peneiras de 4,75mm (A), 2,36mm (B), 1,18 mm (C), 0,60mm (D), 0,425mm (E) e 0,30mm (F) de diâmetro

4.2 Resultados da secagem em ciclone conforme planejamento experimental

Para a análise das variáveis respostas, em todos os planejamentos, usou-se o erro residual.

4.2.1 Bagaço de cana do pátio

Os dados experimentais, vazão mássica do ar (W_{ar}) e de sólidos (W), temperatura do ar (T_{ai}) e da partícula (T_{pi}) na entrada do ciclone, umidade absoluta do ar (φ_i) e teor de umidade inicial do bagaço (X_i) e suas respectivas respostas, teor de umidade final (X_o), redução de umidade (RU) e tempo de residência (t_{res}), da secagem do bagaço de cana em secador ciclônico encontram-se sumarizadas na Tabela 4.

Tabela 4 Resultados experimentais de secagem do bagaço do pátio obtidos no ciclone

Ensaio	$W_{ar} \times 10^2$ [kgs ⁻¹]	$W \times 10^3$ [kgs ⁻¹]	T_{ai} [°C]	T_{pi} [°C]	$\phi_i \times 10^2$ [Kg/Kg]	X_i [b.u]	X_o [b.u]	RU [-]	t_{res} [s]
1	7,50	5	70	25	1,40	71,66	67,30	0,06	1,28
2	7,50	5	240	26	1,44	71,66	50,79	0,29	1,86
3	7,50	25	70	26	1,30	71,66	71,05	0,01	0,18
4	7,50	25	240	28	1,30	71,66	62,68	0,13	0,46
5	7,50	15	35	25	1,34	74,14	72,81	0,02	0,35
6	7,50	15	275	26	1,49	71,66	59,28	0,17	0,84
7	7,50	1	155	28	1,28	73,36	64,38	0,12	9,50
8	7,50	29	155	25	1,36	74,14	71,43	0,04	0,14
9	7,50	15	155	25	1,34	71,66	64,86	0,09	0,45
10	7,50	15	155	25	1,40	71,66	65,01	0,09	0,63
11	7,50	15	155	25	1,40	71,66	67,77	0,06	0,43

Como pode ser observado, nos resultados obtidos para os diferentes ensaios realizados (Tabela 4), o bagaço de cana apresentou uma redução de umidade entre 1 a 29% e tempo de residência no secador ciclônico entre 0,14 e 9,5s, com valores mínimos e máximos, respectivamente. O ensaio com menor RU e t_{res} foram os Ensaios 3 e 8, com elevadas vazões mássicas de sólidos ($25 \times 10^{-3} \text{ kgs}^{-1}$ e $29 \times 10^{-3} \text{ kgs}^{-1}$, respectivamente). Por outro lado, os ensaios com maiores RU e t_{res} foram os Ensaios 2 e 7, com baixas vazões mássicas de sólidos ($5 \times 10^{-3} \text{ kgs}^{-1}$ e $1 \times 10^{-3} \text{ kgs}^{-1}$, respectivamente).

Após obtidos os resultados, para utilizar o DCCR, uma das condições exigidas pelo modelo estatístico é que os resíduos fossem, normalmente, distribuídos. Isso pode ser verificado pelos Gráficos 5 e 6.

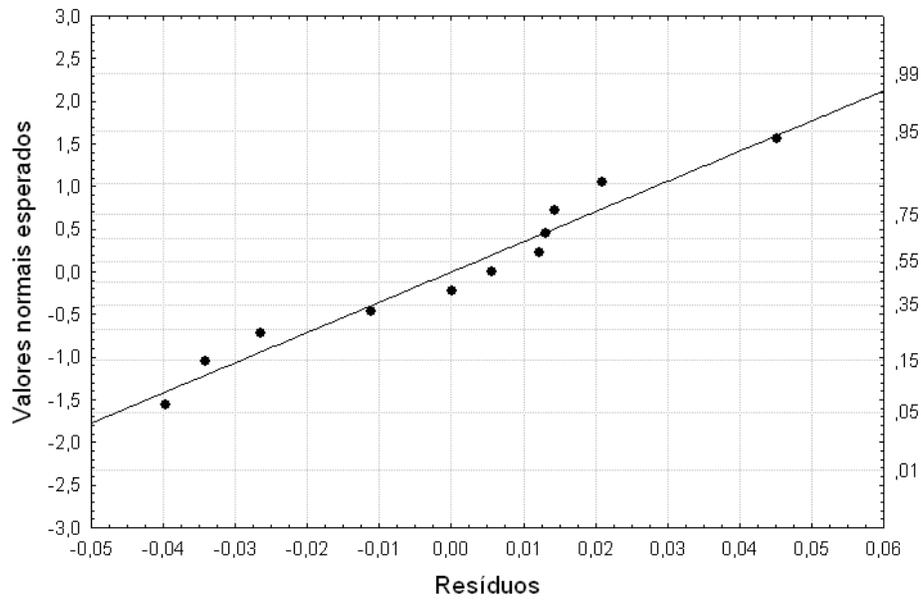


Gráfico 5 Distribuição dos resíduos em torno da reta que indica normalidade à resposta RU, para o bagaço do pátio

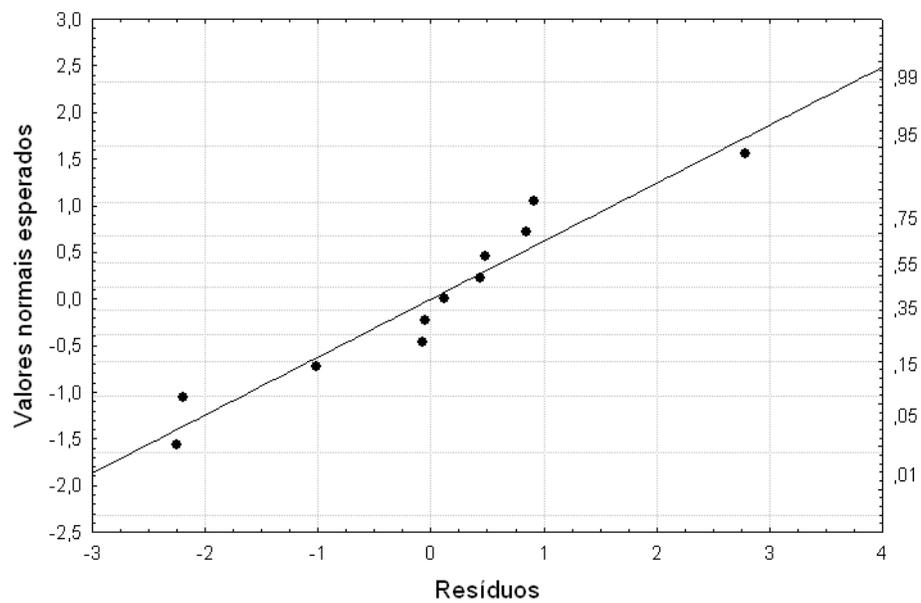


Gráfico 6 Distribuição dos resíduos em torno da reta que indica normalidade à resposta t_{res} , para o bagaço do pátio

Pelos resultados obtidos foi possível determinar os coeficientes de regressão, representados na Tabela 5. O coeficiente de determinação (R^2) foi igual a 90% para a RU e 72% para o t_{res} , ao nível de 5% de significância.

Tabela 5 Análise dos coeficientes de regressão do bagaço de cana do pátio

Fator	RU		t_{res}	
	Coef. de regressão	p-valor	Coef. de regressão	p-valor
Média	0,081	0,026*	0,503	0,686
Temperatura (L)	0,071	0,002*	0,194	0,798
Temperatura (Q)	0,015	0,346	-0,395	0,664
Vazão (L)	-0,042	0,021*	-1,969	0,040*
Vazão (Q)	0,008	0,627	1,718	0,101
T x W	-0,028	0,178	-0,074	0,945

*significativo ao nível de 5% de significância.

Em vista dos resultados experimentais das variáveis estudadas na análise de variância, obtiveram-se modelos codificados, representados nas Equações 8 e 9. Analisou-se a regressão por meio da análise de variância (Tabelas 6 e 7).

$$RU = 0,081 + 0,071X_1 + 0,015 X_1^2 - 0,042 X_2 + 0,008 X_2^2 - 0,028 X_1X_2 \quad (8)$$

$$t_{res} = 0,503 + 0,194 X_1 - 0,395 X_1^2 - 1,969 X_2 + 1,718X_2^2 - 0,074X_1X_2 \quad (9)$$

em que X_1 = temperatura ($^{\circ}\text{C}$); X_2 = vazão mássica de sólidos (Kg s^{-1})

Tabela 6 Análise de variância do modelo simplificado, para resposta RU, do bagaço de cana do pátio

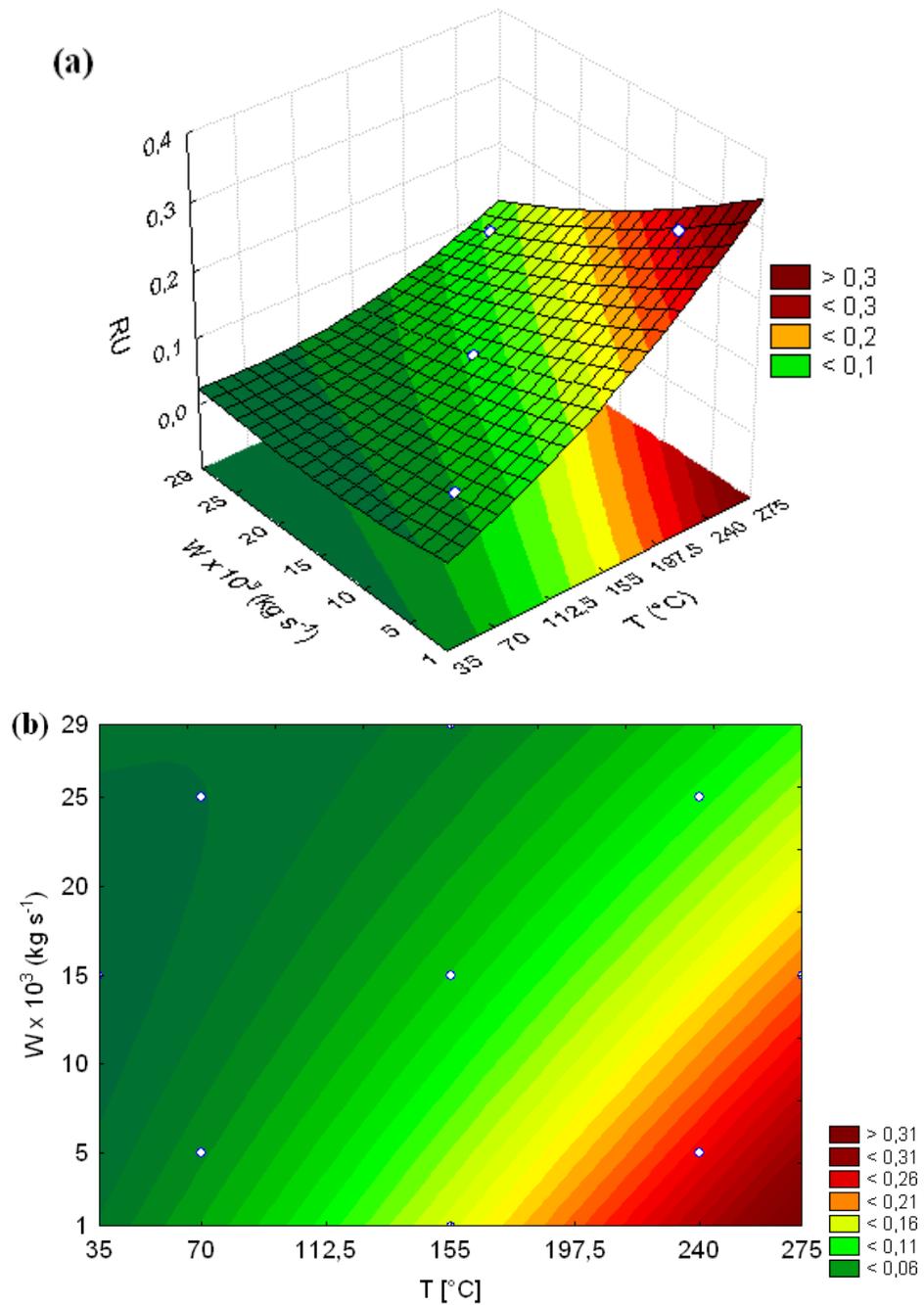
Fator	SQ	G.L	QM	Fcal	p-valor
Regressão	0,059	5	0,012	8,971	0,015
Erro	0,006	5	0,001		
Total SS	0,065	10			

Tabela 7 Análise de variância do modelo simplificado, para resposta t_{res} , do bagaço de cana do pátio

Fator	SQ	G.L	QM	Fcal	p-valor
Regressão	53,008	5	10,602	2,566	0,162
Erro	20,657	5	4,131		
Total SS	73,665	10			

Na análise de variância para a RU, o valor do F calculado se encontrou maior que o de F tabelado, indicando um bom ajuste ao modelo, podendo, assim, gerar a superfície de resposta e de contorno do modelo completo (Gráfico 7).

Já o t_{res} obteve um valor de F calculado abaixo do de F tabelado, não sendo possível o ajuste do modelo.



De acordo com a Tabela 5 e Gráfico 7, a temperatura é a que mais interfere na redução de umidade, seguida da vazão mássica do bagaço, ambos na forma linear. A vazão e a temperatura interferem de formas opostas, ou seja, quanto maior a temperatura e menor a vazão de sólidos, maior a redução de umidade.

A influência diretamente proporcional da temperatura, em processos de secagem, tem relação com o aumento da força motriz de calor neste processo. E pelo teor de umidade do bagaço ser alta, em condições de temperaturas mais altas, quando comparado às temperaturas mais baixas, a variação da umidade relativa do ar é menor e, desta forma, é mais fácil a remoção da umidade do sólido. Na condição de menor teor de umidade, esta questão da umidade relativa não foi tão relevante, sendo a vazão mais influente.

Como nos experimentos desenvolvidos neste trabalho, a vazão de ar foi mantida constante. Ao aumentar a vazão de partículas, aumenta-se a taxa entre vazão de partículas por vazão de ar. Numa situação de baixa vazão de sólidos, maior a quantidade de ar aquecido envolvido na secagem frente à quantidade de material úmido. Como a maior parte do teor de umidade do bagaço de cana é correspondente à umidade não ligada (CORRÊA et al., 2004a), a influência da velocidade e quantidade de ar envolvido é bastante grande.

Com relação ao tempo de residência, apesar de não ser possível a construção do gráfico da superfície de resposta, observa-se pela Tabela 5 que a vazão mássica de bagaço influenciou nos experimentos, portanto, quanto maior a vazão menor o tempo de residência.

O aumento da vazão de bagaço leva a uma maior relação entre a vazão de bagaço pela vazão de ar. Quanto maior esta relação, maior a atuação da força peso do bagaço com relação à força de arraste do ar, fazendo com que o bagaço chegue mais rápido à abertura inferior do ciclone. Este comportamento foi observado em outros trabalhos (CORRÊA et al., 2004b; FONSECA et al.,

2009b). O aumento da concentração volumétrica de bagaço leva à diminuição da componente tangencial da velocidade que mantém o movimento de giro das partículas no ciclone e prende as partículas às paredes do equipamento (CORRÊA et al., 2000; CORRÊA et al., 2004b; DERKSEN; SUNDARESAN; AKKER, 2006; GODOY; SILVA; NEBRA, 1989; YUU et al., 1978). No fluxo de rotação do ar, o atrito com as partículas do produto diminui o movimento de rotação e a queda de pressão (KORN, 2001), assim, o bagaço tende a ficar menos tempo no secador ciclônico, obtendo menor redução de umidade.

A análise da condição do ponto ótimo da superfície de resposta leva uma resposta de RU igual 0,29 em uma vazão de sólidos de $1,5 \times 10^{-3} \text{Kgs}^{-1}$ a uma temperatura de 247°C . Em decorrência do elevado teor de umidade inicial do bagaço do pátio, encontra-se uma maior dificuldade para chegar a maiores valores de reduções de umidade. Além disso, o elevado teor de umidade dificulta possíveis comparações ou deduções de um modelo de secagem para bagaços com menores teores de umidade, aqueles secos logo após saírem da moenda (com aproximadamente 50% de umidade). Por isso novos experimentos, com este tipo de bagaço, foram realizados.

4.2.2 Bagaço de cana recolhido logo após sair da moenda

Os dados experimentais e suas respectivas respostas da secagem do bagaço de cana, recolhido logo após maceração em moenda e secos na geometria 1 do ciclone, encontram-se sumarizados na Tabela 8.

Tabela 8 Resultados experimentais de secagem do bagaço, recolhido logo após moagem, no ciclone (geometria 1)

Ensaio	$W_{ar} \times 10^2$ [kgs ⁻¹]	$W \times 10^3$ [kgs ⁻¹]	T_{ai} [°C]	T_{pi} [°C]	$\phi_i \times 10^2$ [Kg/Kg]	X_i (b.u)	X_o (b.u)	RU	t_{res} [s]
1	7,50	5	70	24	1,06	51,72	44,45	0,14	2,41
2	7,50	5	240	24	1,06	49,43	25,21	0,49	2,99
3	7,50	25	70	24	0,96	51,72	50,94	0,01	0,33
4	7,50	25	240	25	0,86	49,53	42,15	0,15	0,52
5	7,50	15	35	23	0,88	49,53	47,69	0,04	0,53
6	7,50	15	275	26	1,22	49,53	41,46	0,16	0,56
7	7,50	1	155	23	0,96	49,53	18,38	0,63	18,77
8	7,50	29	155	28	1,21	51,72	45,22	0,13	0,33
9	7,50	15	155	26	1,20	51,72	41,41	0,20	0,61
10	7,50	15	155	27	1,24	51,72	41,57	0,20	0,71
11	7,50	15	155	27	1,08	51,72	44,71	0,13	0,73

Conforme Tabela 8, a redução de umidade, para os diferentes ensaios, encontrou-se em torno de 1 a 63% e tempo de residência no secador ciclônico entre 0,33 e 18,77s. Valores estes superiores aos encontrados na secagem do bagaço do pátio. No entanto, conforme o obtido no bagaço do pátio, os ensaios com menor RU e t_{res} foram os Ensaios 3 e 8, com elevadas vazões mássicas de sólidos (25×10^{-3} kgs⁻¹ e 29×10^{-3} kgs⁻¹, respectivamente) e o com maior RU e t_{res} foi o Ensaio 7, com baixas vazões mássicas de sólidos (1×10^{-3} kgs⁻¹).

Analisou-se a distribuição dos resíduos (Gráficos 8 e 9).

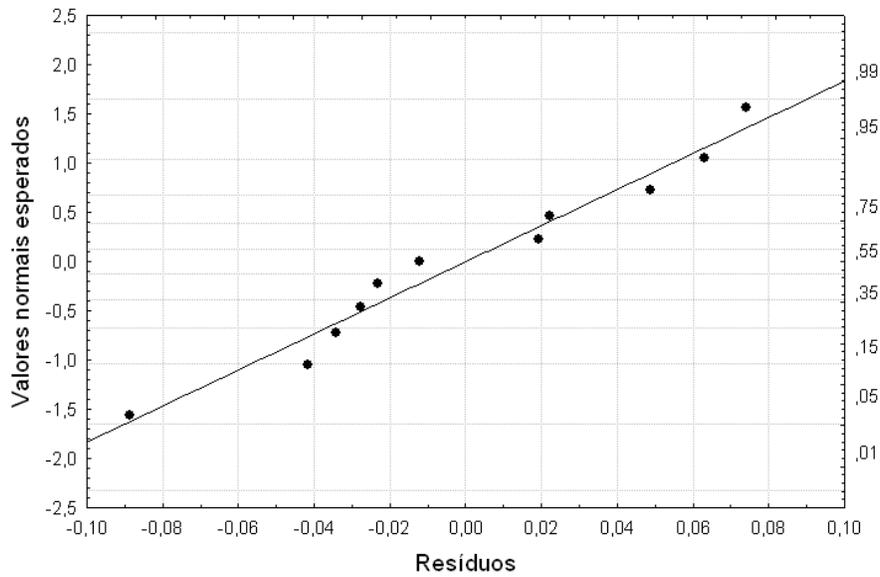


Gráfico 8 Distribuição dos resíduos em torno da reta que indica normalidade à resposta RU, para o bagaço recolhido logo após moagem (geometria 1 do ciclone)

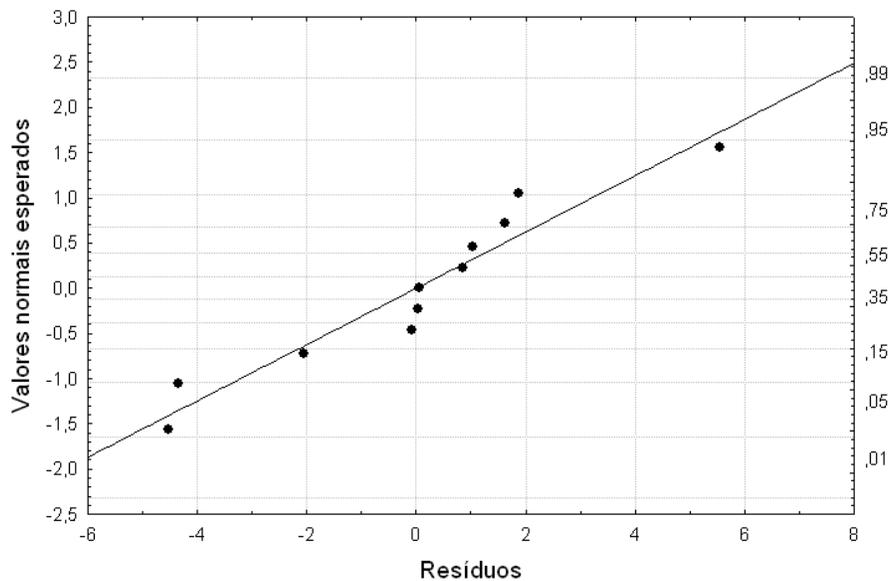


Gráfico 9 Distribuição dos resíduos em torno da reta que indica normalidade à resposta t_{res} , para o bagaço recolhido logo após moagem (geometria 1 do ciclone)

A análise dos resíduos indicou que estes se encontram, normalmente, distribuídos em torno da reta.

Com os dados gerados, determinaram-se os coeficientes de regressão (Tabela 9). O coeficiente de determinação (R^2) foi igual a 93% para a RU e 72% para o t_{res} , ao nível de 5% de significância.

Tabela 9 Análise dos coeficientes de regressão do bagaço da moenda (geometria 1)

Fator	RU		t_{res}	
	Coef. de regressão	p-valor	Coef. de regressão	p-valor
Média	0,177	0,007*	0,689	0,781
Temperatura (L)	0,083	0,021*	0,102	0,946
Temperatura (Q)	-0,048	0,136	-0,943	0,604
Vazão (L)	-0,147	0,002*	-3,830	0,044*
Vazão (Q)	0,090	0,029*	3,561	0,091
T x W	-0,054	0,185	-0,098	0,963

*significativo ao nível de 5% de confiança

Em vista dos resultados experimentais das variáveis, estudadas na análise de variância, obtiveram-se modelos codificados, representados nas Equações 10 e 11. Analisou-se a regressão, por meio da análise de variância (Tabelas 10 e 11).

$$RU = 0,177 + 0,083 X_1 - 0,048 X_1^2 - 0,147 X_2 + 0,090 X_2^2 - 0,054 X_1 X_2 \quad (10)$$

$$t_{res} = 0,0689 + 0,102 X_1 - 0,943 X_1^2 - 3,830 X_2 + 3,561 X_2^2 - 0,098 X_1 X_2 \quad (11)$$

em que X_1 = temperatura ($^{\circ}\text{C}$); X_2 = vazão mássica de sólidos (Kg s^{-1})

Tabela 10 Análise de variância do modelo simplificado, para resposta RU, do bagaço da moenda (geometria 1)

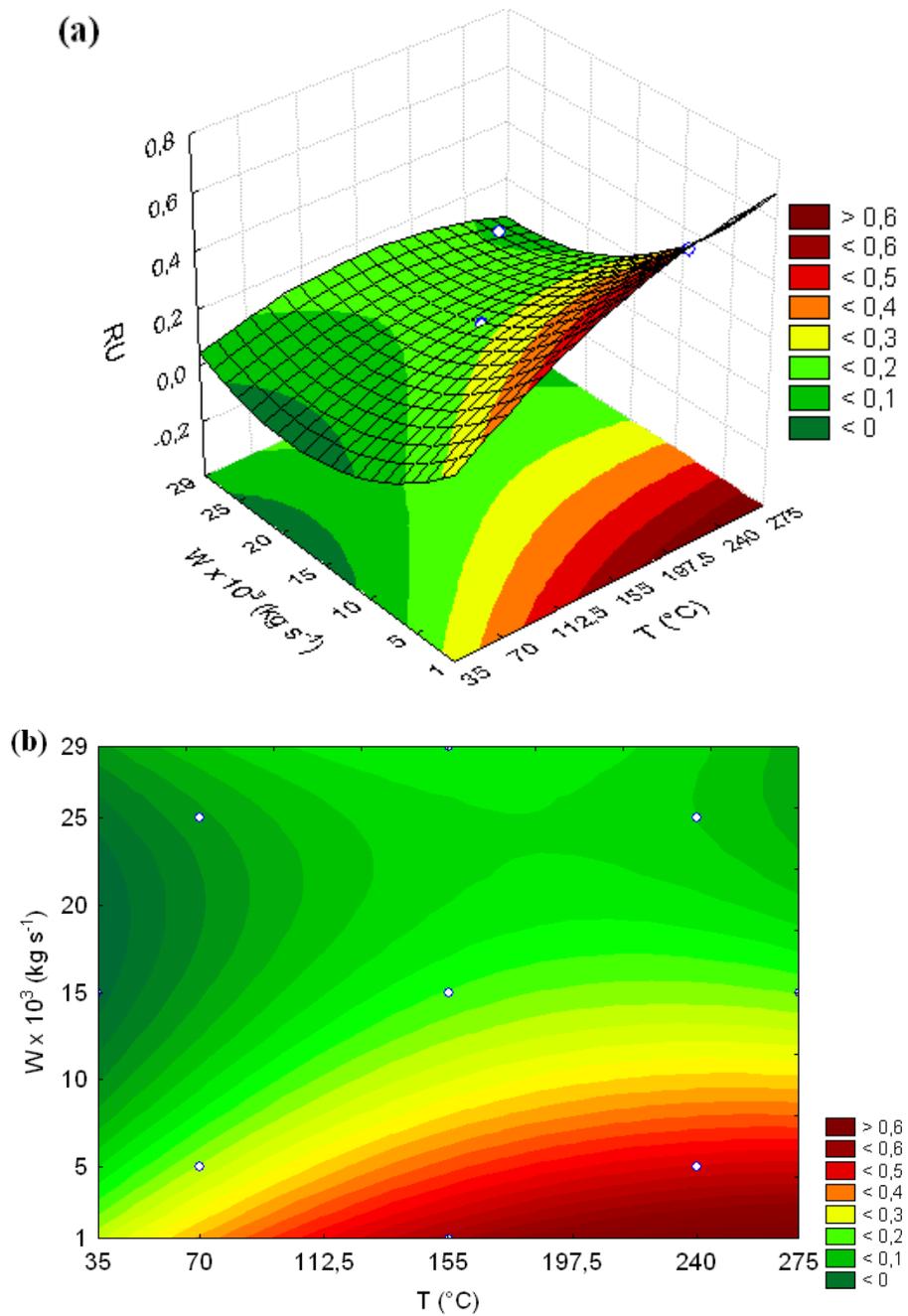
Fator	SQ	G.L	QM	Fcal	p-valor
Regressão	0,321	5	0,064	12,894	0,007
Erro	0,025	5	0,005		
Total SS	0,346	10			

Tabela 11 Análise de variância do modelo simplificado, para resposta t_{res} , do bagaço da moenda (geometria 1)

Fator	SQ	G.L	QM	Fcal	p-valor
Regressão	213,592	5	42,718	2,593	0,160
Erro	82,373	5	16,475		
Total SS	295,964	10			

Na análise de variância para a RU, o valor do F calculado se encontrou maior que o de F tabelado, indicando um bom ajuste ao modelo, podendo, assim, gerar a superfície de resposta e curva de contorno do modelo completo (Gráfico 10).

Já o t_{res} , novamente, obteve um baixo valor do F calculado, abaixo do de F tabelado, não sendo possível o ajuste do modelo.



Da mesma forma que o bagaço do pátio, a redução de umidade foi influenciada diretamente pela temperatura e inversamente pela vazão. No entanto, aqui houve uma maior influência da vazão do que da temperatura (Tabela 9).

Embora seja verificada a influência diretamente proporcional da temperatura, como força motriz de calor em processos de secagem, a vazão de ar é, ainda, mais influente. Vijayaraj e Saravanan (2008), simulando condições do processo de secagem do bagaço em leito fixo, observaram, para vazão de ar constante, maior influência da espessura do material sobre a redução de umidade de bagaço do que a temperatura do ar de secagem. Apesar da diferente fluidodinâmica daquele secador com relação ao utilizado neste trabalho, aponta-se, novamente, a relação entre quantidade de material frente à quantidade de ar utilizado na secagem.

Para o tempo de residência, observa-se novamente a influência da vazão de sólidos (Tabela 9), do mesmo modo que foi encontrado para o bagaço do pátio.

Conforme trabalho de Sosa-Arno e Nebra (2009), as condições mais eficientes da caldeira e dispositivos periféricos (economizadores, aquecedores de ar e secador) envolvem a temperatura da entrada de ar no secador a 215°C e redução de umidade de 50 para 34,5% (b.u). Considerando estas condições com os dispositivos estudados neste trabalho (Gráfico 15), a vazão de sólidos deve estar entre $10 \times 10^{-3} \text{ Kgs}^{-1}$ e $15 \times 10^{-3} \text{ Kgs}^{-1}$.

4.2.3 Bagaço de cana recolhido logo após sair da moenda – Geometria 2

A geometria da parte cônica de um ciclone pode influenciar, significativamente, a eficiência deste equipamento (JACKSON, 1963), por isto,

é de extrema importância a análise dos efeitos, em mesmas condições de trabalho, da geometria deste na secagem do bagaço.

A secagem do bagaço, recolhido logo após sua moagem na segunda geometria do ciclone ($\alpha = 47^\circ$, $H = 1,10\text{m}$ e $B = 0,16\text{m}$), gerou os dados representados pela Tabela 12.

O bagaço de cana seco, no ciclone com geometria diferenciada, obteve uma redução de umidade entre 0 a 56% e tempo de residência no secador ciclônico entre 0,23 a 6,34 s. O ensaio com menor RU foi o ensaio 5, com baixa temperatura (35°C), e com menor t_{res} foram os Ensaios 3 e 8, com elevadas vazões mássicas de sólidos ($25 \times 10^{-2} \text{ kgs}^{-1}$ e $29 \times 10^{-2} \text{ kgs}^{-1}$, respectivamente). Por outro lado, o ensaio com maior RU e t_{res} foi o Ensaio 7, com baixa vazões mássica de sólido ($1 \times 10^{-2} \text{ kgs}^{-1}$).

Tabela 12 Resultados experimentais de secagem do bagaço, recolhido logo após moagem, no ciclone (geometria 2)

Ensaio	$W_{\text{ar}} \times 10^2$ [kgs ⁻¹]	$W_{\text{s}} \times 10^3$ [kgs ⁻¹]	T_{ai} [°C]	T_{pi} [°C]	$\phi_i \times 10^2$ [Kg/Kg]	X_i (b.s)	X_o (b.s)	RU	t_{res} [s]
1	7,50	5	70	25	1,05	43,25	39	0,10	1,40
2	7,50	5	240	22	0,94	43,16	26,45	0,38	1,44
3	7,50	25	70	28	0,96	43,25	42,09	0,03	0,23
4	7,50	25	240	23	0,82	43,16	41,50	0,04	0,65
5	7,50	15	35	22	0,72	43,16	43,16	0,00	0,57
6	7,50	15	275	24	1,01	43,16	34,34	0,20	0,48
7	7,50	1	155	27	0,94	43,25	18,85	0,56	6,34
8	7,50	29	155	25	0,84	43,25	38,14	0,12	0,23
9	7,50	15	155	22	0,84	43,25	34,17	0,21	0,44
10	7,50	15	155	24	0,84	43,25	33,72	0,22	0,93
11	7,50	15	155	23	1,10	43,25	33,62	0,22	1,42

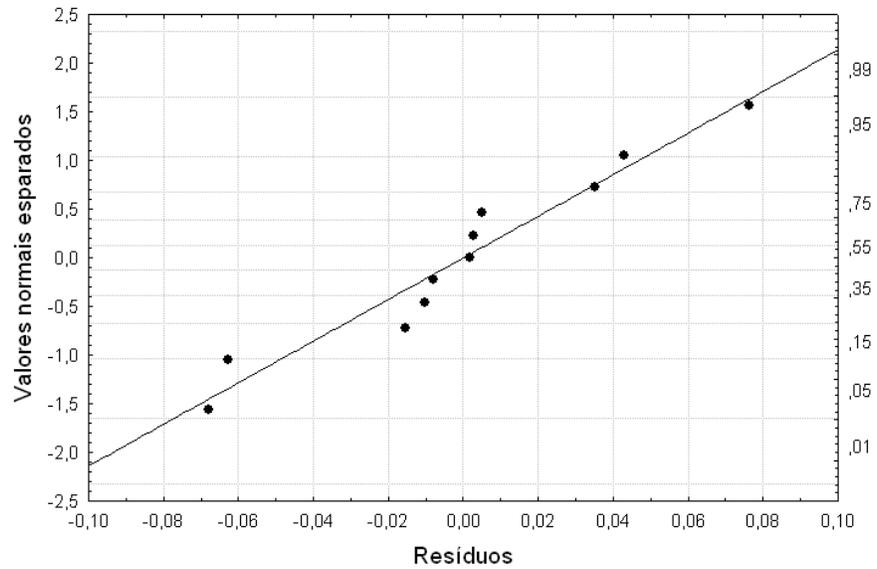


Gráfico 11 Distribuição dos resíduos em torno da reta que indica normalidade à resposta RU, para o bagaço recolhido logo após moagem (geometria 2 do ciclone)

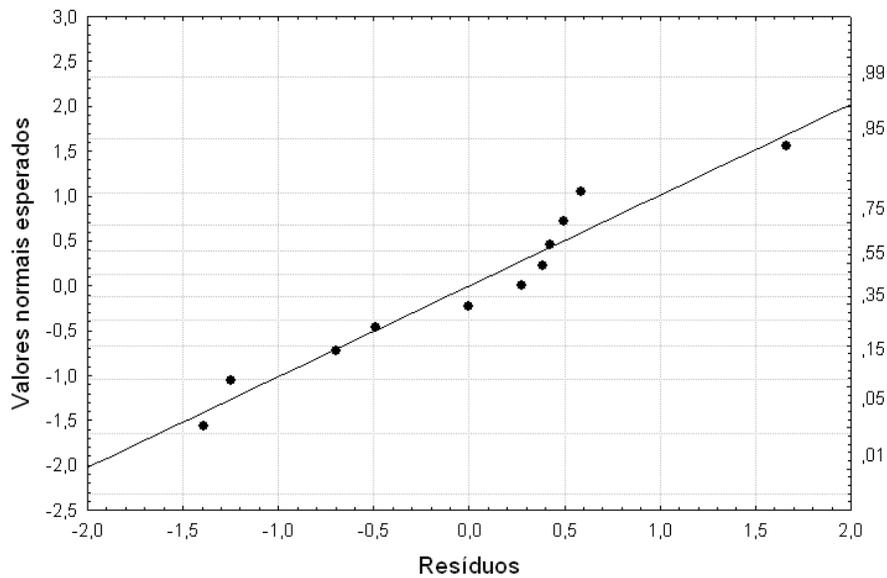


Gráfico 12 Distribuição dos resíduos em torno da reta que indica normalidade à resposta t_{res} , para o bagaço recolhido logo após moagem (geometria 2 do ciclone)

Conforme Gráficos 11 e 12 analisou-se a distribuição dos resíduos e estes se encontraram normalmente distribuídos, pois, os pontos encontram-se próximos à reta.

Com os resultados obtidos, foi possível determinar os coeficientes de regressão que estão apresentados na Tabela 13. O coeficiente de variação (R^2) foi igual a 94% para a RU e 74% para o t_{res} , ao nível de 5% de significância.

Tabela 13 Análise dos coeficientes de regressão do bagaço da moenda (geometria 2)

Fator	RU		t_{res}	
	Coef. de regressão	p-valor	Coef. de regressão	p-valor
Média	0,216	0,002*	0,930	0,258
Temperatura (L)	0,078	0,014*	0,040	0,932
Temperatura (Q)	-0,082	0,022*	-0,447	0,439
Vazão (L)	-0,131	0,002*	-1,327	0,031*
Vazão (Q)	0,043	0,143	0,934	0,139
T x W	-0,069	0,068	-0,094	0,887

*significativo ao nível de 5% de confiança

Em vista dos resultados experimentais das variáveis estudadas, na análise de variância, obtiveram-se modelos codificados, Equações 12 e 11.

$$RU = 0,216 + 0,078 X_1 - 0,082 X_1^2 - 0,131 X_2 + 0,043 X_2^2 - 0,069 X_1 X_2 \quad (12)$$

$$t_{res} = 0,930 + 0,040 X_1 - 0,447 X_1^2 - 1,327 X_2 - 0,934 X_2^2 - 0,094 X_1 X_2 \quad (13)$$

em que X_1 = temperatura ($^{\circ}C$); X_2 = vazão mássica de sólidos ($Kg s^{-1}$)

Do mesmo modo da secagem anterior, observa-se pelo p-valor (Tabela 9) que a vazão mássica de bagaço é a que mais interfere na redução de umidade, seguida da temperatura, ambos, na forma linear e de formas opostas, menor vazão de sólidos e maior temperatura geram uma maior redução de umidade.

A vazão mássica de bagaço, também, é a que oferece maior interferência sobre o tempo de residência. Quanto maior a vazão menor o tempo de residência.

Para plotagem do modelo simplificado na superfície de resposta, analisou-se a adequabilidade do modelo, por meio da análise de variância (Tabelas 14 e 15).

Tabela 14 Análise de variância do modelo simplificado, para resposta RU, do bagaço da moenda (geometria 2)

Fator	SQ	G.L	QM	Fcal	p-valor
Regressão	0,271	5	0,054	15,195	0,004
Erro	0,018	5	0,004		
Total SS	0,290	10			

Tabela 15 Análise de variância do modelo simplificado, para resposta t_{res} , do bagaço da moenda (geometria 2)

Fator	SQ	G.L	QM	Fcal	p-valor
Regressão	22,282	5	4,457	2,796	0,142
Erro	7,970	5	1,594		
Total SS	30,252	10			

Na análise de variância para a RU, o valor do F calculado se encontrou maior que o de F tabelado, indicando um bom ajuste ao modelo, podendo, assim, gerar a superfície de resposta do modelo simplificado (Gráfico 13).

Já o t_{res} obteve um baixo valor F calculado, não sendo possível o ajuste do modelo.

Conforme trabalho de Sosa-Arno e Nebra (2009), as condições para a temperatura da entrada de ar no secador a 215°C e redução de umidade de 50 para 34,5% (b.u), deve-se a uma vazão de sólidos entre $8 \times 10^{-3} \text{ Kgs}^{-1}$ e $15 \times 10^{-3} \text{ Kgs}^{-1}$ para a geometria 2.

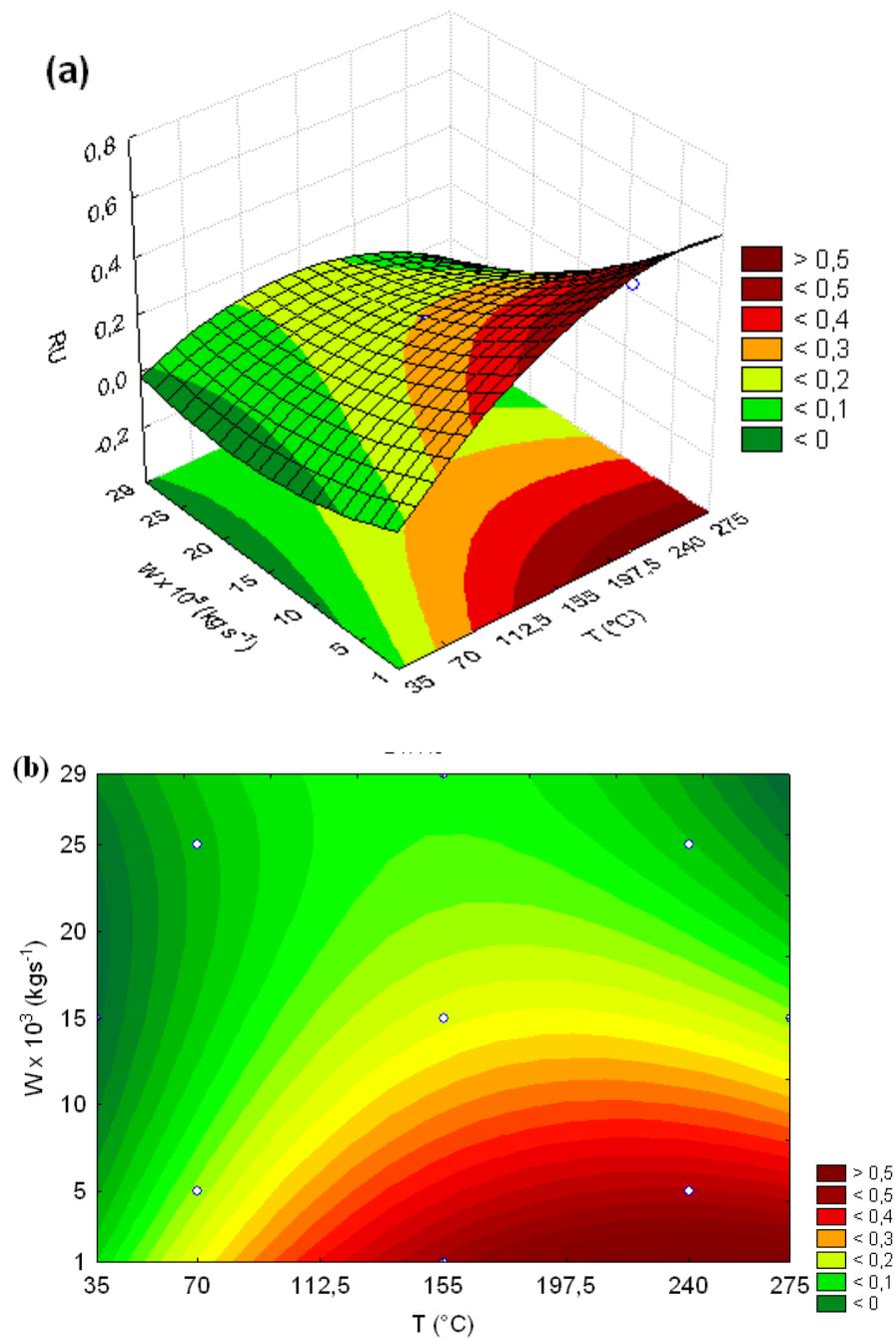


Gráfico 13 Superfície de respostas (a) e de contorno (b) para RU do bagaço no secador ciclônico de geometria 2

4.3 Comparação das condições estudadas entre si e com a literatura

Os resultados experimentais encontrados nas três secagens se encontram sumarizados na Tabela 16.

Tabela 16 Dados condensados das secagens de bagaço de cana em secador ciclônico

Ensaio	Bagaço pátio		Bagaço moenda (geometria 1)		Bagaço moenda (geometria 2)	
	RU [-]	t _{res} [s]	RU [-]	t _{res} [s]	RU [-]	t _{res} [s]
1	0,06	1,28	0,14	2,41	0,10	1,40
2	0,29	1,86	0,49	2,99	0,38	1,44
3	0,01	0,18	0,01	0,33	0,07	0,23
4	0,13	0,46	0,15	0,52	0,04	0,65
5	0,02	0,35	0,04	0,53	0,00	0,57
6	0,17	0,84	0,16	0,56	0,20	0,48
7	0,12	9,50	0,63	18,77	0,56	6,34
8	0,04	0,14	0,13	0,33	0,12	0,23
9	0,09	0,45	0,20	0,61	0,21	0,44
10	0,09	0,63	0,20	0,71	0,22	0,93
11	0,06	0,43	0,13	0,73	0,22	1,42

Por todos os resultados apresentados, observou-se que, independente do bagaço utilizado, do pátio ou o recolhido logo após passar pela moenda, e da geometria do ciclone, geometria 1 ou 2, a redução do teor de umidade e o aumento do tempo de residência são maiores com a diminuição da vazão de

alimentação dos sólidos. O aumento da temperatura, também, leva a uma maior redução do teor de umidade.

Comparando a secagem do bagaço do pátio com a do bagaço extraído diretamente da moenda, nota-se que uma maior redução de umidade e tempo de residência, dentro das mesmas condições, é conseguida pelo bagaço com menor teor de umidade inicial. No entanto, ambos os bagaços seguem uma mesma tendência para este fim.

Ao analisar a secagem do bagaço com menor teor de umidade inicial no ciclone com geometria 1 e com geometria 2, observa-se que a diferenciação do dimensionamento da parte cônica causou uma tendência à redução do teor de umidade e, quanto ao tempo de residência, verifica-se que baixas vazões levam a maiores tempos de residência, que pode ser observado pela análise das condições de ponto ótimo (Tabela 17).

Tabela 17 Condições que levam ao ponto ótimo da resposta para o bagaço recolhido logo após moagem

Parte cônica	W x 10³[kgs⁻¹]	T [C]	RU [-]
Geometria 1	1	275	0.63
Geometria 2	1	255	0.56

Apesar da geometria 1 possuir uma menor inclinação ($\alpha = 41^\circ$), tem uma altura de 0,10 cm a mais que a geometria 2 e uma menor abertura na parte inferior do cone (B), que favorece um maior tempo de residência das partículas nesta parte cônica. A diminuição da abertura da parte cônica faz com que o gás e as partículas sejam, definitivamente, acelerados na seção do cone, em virtude da redução gradual do espaço transversal, causando uma maior velocidade

tangencial e uma maior força centrífuga que atua sobre as partículas no fluxo de gás (GIMBUN et al., 2005; XIANG; LEE, 2005; XIANG; PARK; LEE, 2001; ZHANG; JIN, 2007). Isto faz com que ocorra uma maior taxa de fluxo, aumentando o movimento de rotação e, conseqüentemente, aumentando o tempo de residência das partículas no secador ciclônico. Corrêa et al. (2004b) demonstraram que o tempo de residência das partículas no secador ciclônico aumenta, consideravelmente, com a diminuição do valor B. Já, em relação ao teor de umidade, Corrêa et al. (2004a) obtiveram uma grande diferença na redução de umidade entre os ciclones, sendo maior a redução no secador com menor valor de B. No entanto, naquele trabalho, a variação de B, também, foi grande. No presente trabalho observou-se, apenas, uma leve tendência para maior redução de umidade no ciclone com menor B.

Utilizando a mesma vazão de sólidos utilizados por Corrêa e predizendo os valores de RU, para as duas geometrias do ciclone, são obtidos os resultados da Tabela 18. Observa-se que valores próximos de redução de umidade são alcançados.

Tabela 18 Valores preditos da secagem de Corrêa (2003)

Variáveis independentes		Ciclone Corrêa		Valores Preditos Geometria 1	Valores Preditos Geometria 2
T [°C]	$W_s \times 10^3$ [kgs ⁻¹]	RU	t _{res} [s]	RU	RU
239	10	0,38	9,11	0,33	0,32
Intervalo de confiança					
-95% conf.				0,22	0,23
95% conf.				0,44	0,41

5 CONCLUSÃO

O teor de umidade inicial do bagaço oferece grande influência em sua caracterização, portanto, quanto maior o teor de umidade, maiores porcentagens mássicas de bagaço são retidas nas peneiras de maiores diâmetros e menor o seu poder calorífico.

Verificou-se que, independente do teor de umidade inicial do bagaço de cana e da geometria da parte cônica, a secagem deste em secador ciclônico, sofre grande influência da vazão mássica de sólidos alimentados e da temperatura de secagem. Quanto maior a temperatura e menor a vazão de sólidos maior será a redução do teor de umidade.

O tempo de residência, também, foi influenciado, inversamente, pela vazão mássica de sólidos.

A geometria da parte cônica do ciclone apresentou influência na redução de umidade e no tempo de residência das partículas no secador ciclônico. Quanto menor o diâmetro inferior da parte cônica ocorre uma tendência ao aumento na redução de umidade e eleva o tempo de residência.

O dimensionamento da abertura inferior do ciclone é o maior responsável pela predição da redução de umidade e, principalmente, do tempo de residência, quando comparado à literatura.

O ciclone, aqui usado, mostrou-se eficiente na redução do teor de umidade, podendo ser explorado de forma industrial, para melhoria da eficiência energética de caldeiras que possuem como combustível o bagaço de cana.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2. ed. Brasília, 2005. Disponível em: <http://www3.aneel.gov.br/atlas/atlas_2edicao/index.html>. Acesso em: 28 out. 2009.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília, 2008. 236 p. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/visualizar_texto.cfm?idtxt=1687>. Acesso em: 28 out. 2009.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **BIG – Banco de informação de geração**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 15 nov. 2009.

AKPINAR, E. K. Evaluation of convective heat transfer coefficient of various crops in cyclone type dryer. **Energy Conversion and Management**, England, v. 46, p. 2439-2454, 2005.

AKPINAR, E. K.; MIDILLI, A.; BICER, Y. Energy and exergy of potato drying process via cyclone type dryer. **Energy Conversion and Management**, England, v. 46, p. 2530-2552, 2005.

AKPINAR, E.; MIDILLI, A.; BICER, Y. Single layer drying behavior of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling. **Energy Conversion and Management**, England, v. 44, p. 1689-1705, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-7993. **Madeira**: determinação da umidade por secagem em estufa reduzida a serragem. Rio de Janeiro, 1983. 2 p.

ASSOCIAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DE CANA DE AÇÚCAR. Brasil. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/dadosCotacao/estatistica/>>. Acesso em: 17 ago. 2010.

BARBOSA, R. D. **Secagem de bagaço de cana em sistema pneumático**. 1992. 223 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas, 1992.

BENTA, E. S. **Estudo da secagem de sabugo de milho em ciclone**. 1997. 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, 1997.

BERNHARDT, W. Handling properties of sugarcane bagasse I: characterization of bagasse particles. **Zuckerindustrie**, Germany, v. 123, n. 6, p. 428-432, June 1998.

BOLYOS, E.; LAWRENCE, D.; NORDIN, A. Biomass as an energy source: the challenges and the path forward. In: INTERNATIONAL DISPOSAL CONFERENCE, 3., 2003, Karlskoga. **Anais...** Karlskoga, 2003. p. 27-33.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Cadeia produtiva da Agroenergia**. Brasília, 2007. 112 p. (Agronegócios, 3).

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco energético nacional 2008**. Brasília, 2009. Disponível em: <www.mme.gov.br>. Acesso em: 14 nov. 2009.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Resenha energética brasileira 2009**. Brasília, 2010. Disponível em: <www.mme.gov.br>. Acesso em: 17 ago. 2010.

BUNYAWANICHAKUL, P. et al. Numerical and experimental studies of the flow field in a cyclone dryer. **Journal of Fluid Engineering**, Los Alamos, v. 128, n. 6, p.1240-1250, Mar. 2006.

CHEN, C.; WANG, L. F. S. Cost-benefit analysis of electrocyclone and cyclone. **Resources, Conservation and Recycling**, England, v. 31, n. 4, p. 285-292, Apr. 2001.

- CORRÊA, J. L. G. **Discussão de parâmetros de projeto de secadores ciclônicos**. 2003. 169 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2003.
- CORRÊA, J. L. G. et al. Cyclone as a sugar cane bagasse dryer. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, Pequim, v. 12, p. 826-830, Dec. 2004a.
- CORRÊA, J. L. G. et al. Estudo do tempo de residência médio de particulados em ciclone. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 28., 2000, Campinas. **Anais...** Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2000. p. 165-172.
- CORRÊA, J. L. G. et al. The cyclonic dryer: a numerical and experimental analysis of the influence of geometry on average particle residence time. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, São Paulo, v. 21, n. 1, p. 103-112, Jan./Mar. 2004b.
- COSTA, J. M. G. **Caracterização física, secagem (fritura de imersão e leito fixo) e isoterma de desorção do bagaço de cana**. 2008. 100 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.
- COUTO, L. C. et al. Vias de valorização energética da biomassa. **Biomassa e Energia**, Viçosa, MG, v. 1, n. 1, p. 7 1-92, jan. 2004.
- CREMASCO, M. A. **Estudo sobre o escoamento gás-partículas em um reator ciclônico**. 1994. 199 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 1994.
- CUI, H.; GRACE, J. R. Spouting of biomass particles: a review. **Bioresourcse Technology**, England, v. 99, n. 10, p. 4008-4020, July 2008.

DELMÉE, J. P. **Manual de medição de vazão**. São Paulo: E. Blucher, 1983. 473 p.

DEMIRBAS, A. Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections. **Energy Conversion and Management**, England, v. 49, n. 8, p. 2106-2116, Aug. 2008.

DERKSEN, J. J.; SUNDARESAN, S.; AKKER, H. E. A. van den. Simulation of mass-loading effects in gas-solid cyclone separators. **Powder Technology**, Switzerland, v. 163, n. 1/2, p. 59-68, Apr. 2006.

DIBB, A. **Comportamento fluidodinâmico do ciclone em diferentes geometrias**. 1997. 67 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, 1997.

DIBB, A.; SILVA, M. A. Cyclone as a dryer: the optimum geometry. In: INTER-AMERICAN DRYING CONFERENCE, 1., 1997, Itu. **Anais ...** Itu: [s.n], 1997. p. 396-403.

FARIAS, F. P. M. **Estudo teórico da termofluidodinâmica em secadores ciclônicos**. 2006. 150 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de ciências e Tecnologia, Campina Grande, 2006.

FONSECA, A. D. **Biomass-to-liquids**: uma contribuição ao estudo da obtenção de biocombustíveis sintético através da síntese Fischer-Tropsch. 2009. 143 p. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009a.

FONSECA, J. C. P. et al. Ciclone como secador de resíduos agroindustrial. Estudo de caso: Borra de café. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 34., 2009, Campinas. **Anais...** Campinas: Universidade Estadual de Caminas, 2009. p. 6.

FOUST, A. S. et al. **Principles of unit operation**. New York: J. Wiley, 1980.

FRIEDL, A. et al. Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition. **Analytica Chimica Acta**, Netherlands, v. 544, n. 1-2, p. 191-198, July 2005.

GIMBUN, J. et al. Prediction of the effects of cone tip diameter on the cyclone performance. **Journal of Aerosol Science**, England, v. 36, n. 8, p. 1056-1065, Aug. 2005.

GOLDEMBERG, J. Biomassa e energia. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 3, p. 582-587, fev. 2009.

GODOY, A. L. **Estudo teórico e experimental do tempo de permanência de partículas em ciclones de gás**. 1989. 101 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia, Campinas, 1989.

GODOY, A. L.; SILVA, M. A.; NEBRA, S. A. Análise experimental do tempo de residência de partículas em ciclones de gás. In: ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS, 20., 1992, São Carlos. **Anais...** São Carlos: UFSCar, 1992. p. 251 - 261.

GONÇALVES, E. C. **Secagem ciclônica de resíduos da indústria processadora de laranja**. 1996. 84 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, 1996.

HELLWIG, G. Basic of the combustion of wood and straw. In: WERTHER, J. et al. Combustion of agricultural residues. **Progress in Energy and Combustion Science**, England, v. 26, n. 1, p. 1-27, 2000.

HUGOT, E. **Manual para ingenieros azucareros**. México: Continental, 1964.

ISLAM, M. R.; PARVEEN, M.; HANIU, H. Properties of sugar cane waste-derived bio-oils obtained by fixed-bed fire-tube heating pyrolysis. **Bioresource Technology**, England, v. 101, n. 11, p. 4162-4168, June 2010.

JACKSON, R. **Mechanical equipment for removing grit and dust from gases**: the british coal utilization research association. Leatherhead: [s. n], 1963. 281 p.

KILICASLAN, I. et al. Sugar cane as an alternative energy source for Turkey. **Energy Conversion and Management**, England, v. 40, n. 1, p. 1-11, Jan. 1999.

KLASS, D. L. **Biomass for renewable energy, fuels and chemicals**. San Diego: Academic, 1998. 651 p.

KORN, O. Cyclone dryer: a pneumatic dryer with increased solid residence time. **Drying Technology**, New York, v. 19, n. 8, p. 1925-1937, 2001.

LEDE, J. et al. Measurement of solid particle residence time in cyclone reactor; a comparison of four methods. **Chemical Engineering and processing**, Switexerland, v. 22, n. 4, p. 215-222, Dec.1987.

LI, S. et al. Particle holdup and average residence time in the cyclone of a circulating fluidized bed boiler. **Chemical Engineering and Technology**, Weinheim, v. 31, n. 2, p. 224-230, Jan. 2008.

LINDEN, A. J. Investigations into cyclone dust collector. **Proceedings of the Institute Mechanical Engineering Journal**, London, v. 160, p. 233-251, 1949.

LORA, E. S.; ANDRADE, R. V. Biomass as energy source in Brazil. **Renewable and Energy Reviews**, England, v. 13, n. 4, p. 777-788, May 2009.

MARCONATO, M. S.; SANTINI, G. A. Alternativas para a geração de energia renovável no Brasil: a opção pela biomassa. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, 46., 2008, Rio Branco. **Anais...** Rio Branco: Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural, 2008. p. 17.

NEBRA, S. A.; MACEDO, I. C. Bagasse particle shape and size and their free-setting velocity. **Internacional Sugar Journal**, Wales, v. 90, n. 1077, p. 168-170, Sept. 1988.

NEBRA, S. A.; MACEDO, I. C. Pneumatic drying of bagasse. **Internacional Sugar Journal**, Wales, v. 91, n. 1081, p. 3-7, Jan. 1989.

NEBRA, S. A. **Secagem pneumática de bagaço de cana**. 1985. 129 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Campinas, Campinas, 1985.

NEBRA, S. A.; SILVA, M. A.; MUJUMDAR, A. S. Drying in cyclones: a review. **Drying Technology**, New York, v. 18, n. 3, p. 791-832, 2000.

NEVES, M. F.; CONEJERO, M. A. Sistema agroindustrial da cana: cenários e agenda estratégica. **Revista de Economia Aplicada**, Ribeirão Preto, v. 11, n. 4, p. 587-604, out./dez. 2007.

OLIVEIRA, L. B.; HENRIQUES, R. M.; PEREIRA JUNIOR, A. O. Use of wastes as option for the mitigation of CO₂ emissions in the Brazilian power sector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, England, v. 14, n. 9, p. 3247-3251, Dec. 2010.

OLIVÉRIO, L. O. Technological evolution of the Brazilian sugar and alcohol sector: dedini's contribution. **International Sugar Journal**, London, v. 108, n. 1287, p. 120-129, Mar. 2006.

OGAWA, A. Mechanical separation process and flow patterns of cyclone dust collectors. **American Society of Mechanical Engineers**, Vancouver, v. 50, p. 97, 1997.

OZTOP, H. F.; AKPINAR, E. K. Numerical and experimental analysis of moisture transfer for convective drying of some products. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, England, v. 35, n. 2, p. 169-177, Feb. 2008.

PAIVA, S. M. E.; NEBRA, S. A.; GALLO, W. L. R. Análise exergética comparativa de sistemas de recuperação de energia dos gases efluentes de caldeiras de bagaço de cana. In: BRAZILIAN CONGRESS OF ENGINEERING AND THERMAL SCIENCES, 7., 1998, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABCM, 1998. p. 347 -352.

PANG, S.; MUJUMDAR, A. Drying of wood biomass for bioenergy: drying technologies and optimization for an integrated bioenergy plant. **Drying Technology**, New York, v. 28, n. 5, p. 690-701, May 2010.

PROBSTEIN, R. F.; HICKS, R. E. **Synthetic fuels**. New York: McGraw Hill, 1982. 490 p.

QUIRINO, W. F. **Briquetagem de resíduos ligno-celulósicos**. Brasília: LPF, 1991. (Circular Técnica, 20).

RAMJEAWON, T. Life cycle assessment of electricity generation from bagasse in Mauritius. **Journal of Cleaner Production**, England, v. 16, n. 16, p. 1727-1734, 2008.

RAMOS, R. A. V. et al. Análise energética e exergética de uma usina sucroalcooleira com sistema de cogeração de energia em expansão. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE GERAÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA, 5., 2003, São Pedro. **Anais...** São Pedro: UNESP, 2003. p. 1-9.

RASUL, M. G.; RUDOLPH, V.; CARSKY, M. Physical properties of bagasse. **Fuel**, England, v. 78, n. 8, p. 905-910, June 1999.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos**: uma estratégia sequencial de planejamentos. Campinas: Casa do Pão, 2005. 326 p.

ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S.; ROTHMAN, H. **Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira**. Campinas: UNICAMP, 2005. 447 p.

SALOMÃO, A. Apagão de idéias. **Revista Época Negócios Online**, São Paulo, v. 2, n. 13, p. 1-6, mar. 2008.

SALES, C. A. V. B.; ANDRADE, R. V.; LORA, E. E. S. Geração de eletricidade a partir da biomassa. **Biomassa e Energia**, Viçosa, MG, v. 2, n. 3, p. 195-204, 2005.

SANTOS, J. C. P. **Secagem de borra de café em secador ciclônico**. 2009. 64 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

SILVA, M. A. **Estudo da secagem em ciclone**. 1991. 146 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 1991.

SILVA, M. A.; GODOY, A. L.; NEBRA, S. A. Estudo experimental da variação do perfil de velocidade no ciclone com a concentração de sólidos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 10., 1989, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABCM, 1989. p. 351-354.

SILVA, M. A.; NEBRA, S. A. Numerical simulation of drying in a cyclone. **Drying Technology**, New York, v. 15, n. 6/8, p. 1731-1741, 1997.

SILVA, M. B.; MORAIS, A. S. Avaliação energética do bagaço de cana em diferentes níveis de umidade e graus de compactação. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 28., 2008, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABEPRO, 2008. p. 9.

SILVA, V. S.; GARCIA, C.; SILVA, C. M. O destino do bagaço da cana-de-açúcar: um estudo a partir das agroindústrias sucroalcooleiras do Paraná. **Revista em Agronegócios e Meio Ambiente**, Maringá, v. 3, n. 1, p. 59-76, 2010.

SOSA-ARNAO, J. H. **Caldeiras aquatubulares de bagaço**: estudo do sistema de recuperação de energia. 2008. 232 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2008.

SOSA-ARNAO, J. H.; NEBRA, S. A. Bagasse dryer role in the energy recovery of water tube boilers. **Drying Technology**, Philadelphia, v. 27, n. 4, p. 587-594, 2009.

SUN, J. X. et al. Fractional extraction and structural characterization of sugarcane bagasse hemicelluloses. **Carbohydrate Polymer**, England, v. 2, p. 195-204, June 2004.

UCHÔA, T. B. **Análise da viabilidade técnica e econômica da utilização de gás natural como combustível complementar em usinas sucroalcooleiras**. 2005. 150 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, São Paulo, 2005.

USHIMA, A. H. **Thermeletric generation system test for remote communities based in the biomass gasification**: IPT final report. Hsinchu: Technological Research Institute, 2004.

VIDAL, M. F.; SANTOS, J. A. N.; SANTOS, M. A. **Setor sucroalcooleiro no nordeste brasileiro**: estruturação da cadeia produtiva, produção e mercado. Fortaleza: Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural, 2006. Disponível em: <<http://www.cesumar.br/pesquisa/periodicos/index.php/rama/article/view/1360/1018>>. Acesso em: 2 ago. 2010.

VIJAYARAJ, B.; SARAVANAN, R. Numerical modeling of moisture and temperature distribution within a rectangular bagasse layer undergoing drying. **Drying Technology**, Philadelphia, v. 26, n. 6, p. 749-758, 2008.

VIOTTO, L. A. **Projeto e avaliação econômica de sistemas de secagem de borra de café**. 1991. 295 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1991.

WAACK, R.S; NEVES, M. F. Competitividade do Sistema Agroindustrial da Cana-de-Açúcar. In: FARINA, E. M. M. Q; ZYLBERSTAJN, D. (Coord.). **Competitividade no agribusiness brasileiro**: sistema agroindustrial da cana-de-açúcar. São Paulo: USP, 1998. 72 p.

WHEALS, L. C. et al. Fuel ethanol after 25 years. **Trends Biotechnol**, England, v. 12, p. 482-487, Dec. 1999.

XIANG, R. B.; LEE, K. W. Numerical simulation of flow patterns in cyclones of different cone dimensions. **Particle and Particle Systems Characterization**, England, v. 22, n.3, p.212-218, Aug. 2005.

XIANG, R.; PARK, S. H.; LEE, K. W. Effects of cone dimension on cyclone performace. **Journal of Aerosol Science**, England, v. 32, p. 549-561, Apr. 2001.

XU, Q.; PANG, S. Mathematical modeling of rotary drying of wood biomass. **Drying Tecnology**, Philadelphia, v. 26, n. 11, p. 1344-1350, 2008.

ZHANG, J.; JIN, Y. H. Separation characteristics of cyclone separators with different cone geometries. **Petrochemical Equipament**, Pequim, v. 36, p. 33-36, 2007.

ZHANG, L.; XU, C.; CHAMPAGNE, P. Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass. **Energy Conversion and Management**, England, v. 51, n. 5, p. 969-982, 2010.

YUU, S. et al. The reduction of pressure drop due to dust loading in conventional cyclone. **Chemical Engineering Science**, England, v. 33, n. 12, p. 1573-15080, 1978.