



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



Estudo de caso de melhoria na etapa de secagem de uma maltaria no RS

Autor: Joana Tomaz Tancredo

Orientadora: Profa. Dra. Liliana Amaral Féris

Porto Alegre, julho de 2015

Sumário

Sumário	ii
Agradecimentos	iii
Resumo	iv
Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	vi
Lista de Símbolos	vii
Lista de Abreviaturas e Siglas	viii
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	3
2.1 Malteação de Cevada	3
2.1.1 Maceração	4
2.1.2 Germinação	5
2.1.3 Secagem	7
2.2 Parâmetros de Qualidade do Malte	9
2.2.1 Extrato	10
2.2.2 Diferença de Extrato	11
2.2.3 Cor de Cocção	11
2.2.4 FAN – Free Amino Nitrogen (Nitrogênio Livre)	11
2.2.5 Nitrogênio Solúvel	11
2.2.6 Poder Diastásico	11
2.2.7 Beta-Glucanos	12
2.2.8 Índice de Kolbach	12
2.3 Secagem de Grãos	12
2.3.1 Etapas de Secagem em Camada Espessa	14
2.3.2 Consumo Energético	16
3 Estudo de Caso	19
3.1 Descrição do Processo	19
3.2 Metodologia Aplicada	21
4 Resultados e Discussão	22
4.1 Perfil de Consumo/Hora ao Longo da Secagem	22
4.2 Consumo de Combustível por Batelada	24
4.3 Impacto em Qualidade e Tempo de Secagem	26
5 Conclusões e Trabalhos Futuros	28
6 Referências	30
Anexo A	A.1
Anexo B	B.1

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço ao meu pai, que durante muitos anos foi meu porto seguro e meu norte. Que me ensinou comprometimento e responsabilidade e que hoje, mesmo não estando mais presente entre nós, é a pessoa a quem eu dedico essa conquista.

Agradeço à minha mãe e irmãos, Ramona, Giuseppe e Felipe, pelo carinho, pelo apoio e pela compreensão. Por terem me dado o suporte e a força nos momentos mais difíceis, contribuindo para que eu chegasse até aqui. E ao Fábio e aos meninos, agradeço por cuidarem das pessoas que eu mais amo nesse mundo, e pelo amor e afeto genuínos.

Agradeço aos meus familiares, por terem sempre me incentivado a buscar o melhor. Por terem acreditado em mim e por entenderem o sacrifício do convívio frequente, muitas vezes necessário durante esse caminho.

Agradeço ao Maurício, por trazer alegria e leveza pra minha vida e pela paciência e apoio nessa reta final. Obrigada por me fazer feliz.

Agradeço também às professoras Liliana e Manuela. À primeira pela orientação e apoio, não apenas no trabalho final, mas durante muitos outros momentos no decorrer do curso. À segunda, não apenas pela ligação acadêmica, mas pela amizade e conselhos trocados.

Agradeço aos colegas de trabalho, por permitirem o desenvolvimento desse projeto, por fornecerem ajuda em todos os momentos e pelo reconhecimento da importância dos resultados obtidos. Especialmente, Rafael e Beleti, obrigada.

Finalmente, agradeço aos amigos e colegas, da faculdade e da vida. Em especial, Júlia, Gabriel, Luísa e Filipe. Agradeço a vocês por todos os momentos, sérios ou de descontração. Agradeço porque saio da universidade com muito mais do que um diploma, com amizades para a vida toda.

Resumo

O setor cervejeiro atualmente movimenta uma cadeia produtiva responsável por 15 % da indústria de transformação no Brasil. O malte é a principal matéria-prima da cerveja, produzido a partir de três principais etapas de processo: maceração, germinação e secagem. Sendo a secagem a etapa de maior consumo energético, a busca por melhorias de processo que levem a economia de recursos é um campo de grande interesse econômico. Nesse contexto, foi realizada uma melhoria de processo em uma maltaria do estado do RS, com capacidade de produção de aproximadamente 90.000 toneladas de malte por ano. Através do acompanhamento do consumo de combustível utilizado na secagem, identificou-se pontos de pico de consumo e propôs-se uma nova curva de secagem, com elevação contínua de temperatura na etapa inicial. A curva contínua, em relação à curva anterior, que utilizava patamares de temperatura, apresentou uma redução de 4,5 % no volume de gás consumido por batelada de malte. Ainda, a nova curva não resultou em impactos significativos nos parâmetros de qualidade do malte ou na produtividade do processo e é atualmente o modelo utilizado na maltaria em questão.

Palavras-chave: malte, secagem de grãos, consumo de gás natural, caldeira, curva de secagem

Lista de Figuras

Figura 2.1: Diagrama do processo de malteio. Fonte: (EBC, 2000).	4
Figura 2.2: Estrutura do grão de cevada. Fonte: (Pollock, 1979).....	5
Figura 2.3: Grão de malte germinado. Fonte: (Carlsberg, 1999)	6
Figura 2.4: Estufa circular de secagem de malte. Fonte: (Dodd & Sprake, 2014)	8
Figura 2.5: Estufa retangular de secagem de malte. Fonte: (BSG, 2014)	9
Figura 2.6: Comportamento da taxa de secagem. Fonte: (Chen & Mujumdar, 2008)	16
Figura 2.7: Diagrama psicrométrico. Fonte: (Park, 2007).	18
Figura 3.1: Curva de secagem padrão da maltaria. Fonte: (O autor, 2015).	20
Figura 3.2: Esquematização do funcionamento de uma válvula três vias, AB corresponde à vazão de água fornecida pela caldeira, B à água direcionada aos radiadores da estufa e A à água que retorna pra para a caldeira sem realizar troca térmica. Fonte: (Comeval, 2006).	20
Figura 4.1: Acompanhamento do consumo de gás por hora com curva em patamares - Fabricações 167, 185, 214 e 232. Fonte: (O autor, 2015).	23
Figura 4.2: Acompanhamento do consumo de gás por hora com curva contínua - Fabricações 205, 234, 257 e 262. Fonte: (O autor, 2015).	24
Figura 4.3: Sobreposição entre curva de secagem contínua e em patamares. Fonte: (O autor, 2015).	26
Figura 4.4: Resultados de qualidade para o grupo amostral e limites superiores e inferiores para os parâmetros beta-glucanos, poder diastásico, cor de cocção e FAN. Fonte: (O autor, 2015).	27

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Valores característicos de qualidade para os diversos tipos de malte. Fonte: (Ministério da Agricultura, 1977).	10
Tabela 4.1: Consumo médio de combustível por Curva de Secagem. Fonte: (O autor, 2015).	25
Tabela 4.2: Custo do gás natural para a indústria nos estados brasileiros. Fonte: (FIRJAN, 2015).	25

Lista de Símbolos

∂ – Derivada parcial

ΔT – Diferença de temperatura

A – Área

A_{ev} – Quantidade de água evaporada

C_p – Calor específico a pressão constante

h_1 – Entalpia na condição 1

h_2 – Entalpia na condição 2

H_a – Teor de umidade do ar de entrada

H_s – Teor de umidade do ar saturado

h_v – Calor latente de vaporização

kg – Quilograma

k_y – Coeficiente de transferência de massa

\dot{m} – Vazão mássica

M – Teor de umidade (em base seca)

M_s – Massa de sólidos secos

$^{\circ}C$ – Graus Celsius

ppm – Partes por milhão

q – Calor trocado

rpm – Rotações por minuto

T – Temperatura

WK – Unidades Windisch-Kolbach

Lista de Abreviaturas e Siglas

ASBC – American Society Brewery Chemists

DMS – Dimetil Sulfetos

EBC – European Brewery Convection

FAN – Free Amino Nitrogen

IOB – Institute of Brewing

MEBAK – Middle European Brewery Analysis Commission

PIB – Produto Interno Bruto

UMV – Umidade do malte verde

1 Introdução

O setor cervejeiro em 2013, segundo dados da CervBrasil (2014), produziu 13,5 bilhões de litros do líquido no Brasil, gerando um faturamento na casa dos R\$ 70 bilhões e movimentando uma cadeia produtiva responsável por 2 % do PIB e 15 % da indústria de transformação nacional.

Dentre as matérias primas do setor cervejeiro, o malte é a principal, sendo responsável pela cor e densidade da cerveja, e atuando também na composição do sabor e aroma. Seu consumo ocorre na proporção média de 200 gramas por litro de cerveja, dependendo do rendimento do processo.

No Brasil, o consumo anual de malte pela indústria cervejeira está estimado em 1,3 milhões de toneladas, de acordo com a EMBRAPA (2011). Embora toda a cevada seja cultivada no país em escala comercial apenas para o uso na fabricação de malte, aproximadamente 85 % da demanda da indústria cervejeira no país ainda depende da importações de grãos de cevada e malte da Argentina e do Uruguai.

O malte é produzido a partir do processo de germinação parcial de grãos, usualmente de cevada, e a malteação envolve três principais etapas: maceração, germinação e secagem. O objetivo do processo é a ativação e formação de enzimas, que atuarão tanto no processo de malteação como posteriormente no processo de produção de cerveja, agindo sobre as reservas energéticas do grão, principalmente amido e proteínas e transformando-os em substâncias de menor peso molecular.

Na etapa de secagem, foco do presente trabalho, cessam os processos germinativos e as modificações no grão e o malte tem sua umidade reduzida a valores seguros para estocagem. Essa etapa é responsável pela maior demanda energética do processo, devido à necessidade de fornecimento de calor para essa remoção da umidade.

O desenvolvimento do processo de secagem sofre influência de diversos parâmetros de processo, dentre eles temperatura, vazão e umidade relativa do ar de secagem. A manipulação desses parâmetros precisa ser realizada de modo a equilibrar redução em consumo energético e tempo de secagem com resultados de qualidade do malte.

Nesse contexto, esse trabalho tem como objetivo reduzir o consumo energético do processo de secagem de malte realizado na maltaria estudada, através de alterações na curva de temperaturas utilizada nessa etapa.

2 Revisão Bibliográfica

No desenvolvimento de um processo de melhoria na etapa de secagem de uma maltaria, é essencial o entendimento do processo completo de malteio, suas características e objetivos de cada etapa. Ainda, necessita-se de um aprofundamento nos parâmetros de qualidade avaliados no malte produzido, a fim de identificar quais sofrem influência das modificações aplicadas no processo e devem ser incluídos na avaliação de resultados. Por fim, a carga teórica correspondente à secagem como operação unitária, mais especificamente de grãos, se mostra de grande ajuda no entendimento do processo.

2.1 Malteação de Cevada

A cevada é uma das quatro matérias-primas fundamentais na produção de cerveja, juntamente com lúpulo, água e leveduras (Kunze, 2014). No entanto, os grãos de cevada precisam ser malteados para só então desenvolverem as características necessárias ao processo cervejeiro. É durante o processo de malteação que ocorre a produção e ativação de enzimas capazes de quebrar as cadeias de amido e proteínas no grão, disponibilizando substrato solúvel e aminoácidos, respectivamente, essenciais para etapas posteriores do processo cervejeiro (Lewis & Young, 1995) (EBC, 2000).

A quantidade e a qualidade do malte utilizado possuem efeito direto em propriedades características da cerveja produzida, dentre elas, cor, espuma e aroma (Bamforth & Barclay, 1993).

Segundo Boulton (2006), o processo de malteação é constituído por três etapas principais: maceração, germinação e secagem, conforme fluxograma simplificado da Figura 2.1. Na etapa de maceração, ocorre a umidificação do grão de cevada, de modo a ativar as modificações bioquímicas dentro do grão. Após, o grão segue para a etapa de germinação controlada, na qual ocorrem as atividades enzimáticas inerentes ao seu desenvolvimento, sob temperatura e umidade controladas. Ao chegar aos teores de componentes desejados, o processo é cessado através da secagem, aonde também são desenvolvidos a cor e o sabor característicos do malte.

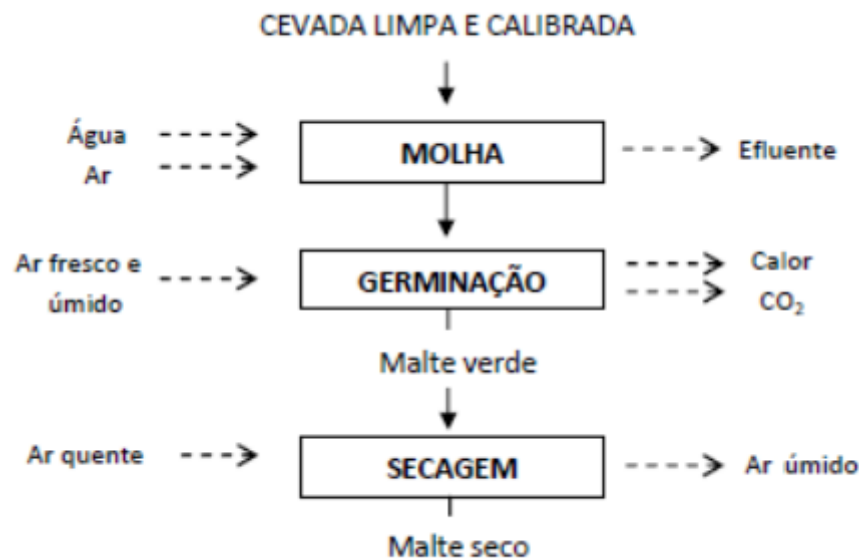


Figura 2.1: Diagrama do processo de malteio. Fonte: (EBC, 2000).

2.1.1 Maceração

A maceração é a primeira etapa do processo de malteação de cevada. Nesse primeiro momento, os grãos, previamente limpos e classificados, são imersos em água com o objetivo de elevar sua umidade de 11 – 12 % até 35 – 45 %, além de lixiviar substâncias aderidas à casca e promover a remoção de sujidades superficiais (Tschope & Nohel, 1999).

Segundo Zschoerper (2009), a elevação de umidade do grão fornece as condições necessárias ao processo de malteio, uma vez que não há germinação abaixo de um determinado teor de umidade. Dentre os fatores que influenciam na taxa de absorção de água pelo grão está a temperatura da água, com temperaturas mais elevadas facilitando a absorção (Bamforth & Barclay, 1993). Outro fator relacionado é o tempo de maceração, sendo a taxa de absorção maior no início da maceração e diminuindo com a aproximação do ponto de saturação (Tschope & Nohel, 1999).

A etapa de maceração é realizada intercalando períodos úmidos, onde os grãos ficam totalmente imersos em água e outros onde a água é drenada, denominados períodos secos. A execução de períodos a seco possibilita um controle da umidade absorvida pelo grão, além de garantir a obtenção de oxigênio para sua respiração, evitando a metabolização de suas reservas anaerobiamente (Tschope & Nohel, 1999).

Ainda assim, durante o período úmido, há uma alta demanda de oxigênio dissolvido na água (Zschoerper, 2009). Para aumentar essa disponibilidade de oxigênio bombeia-se

ar comprimido nos funis de maceração (Kunze, 2014). Evitando a falta de oxigênio, evita-se a condição anaeróbica, que levaria os grãos a entrar em processo de fermentação, produzindo gás carbônico e etanol. Nessas condições a germinação é prejudicada, podendo levar à morte de grãos (Briggs, 2012).

Além disso, durante os períodos secos, gás carbônico é formado na respiração dos grãos e tende a ficar entre eles, depositando-se na parte inferior dos equipamentos de maceração, e precisa ser succionado para não causar a morte dos grãos (Kunze, 2014).

Na maceração iniciam-se os processos metabólicos do grão, com a ativação de sistemas e a solubilização e desagregação do endosperma, indicado na Figura 2.2, diminuindo sua rigidez. O início da germinação se torna perceptível com o aparecimento da radícula (Silva F. e., 2008).

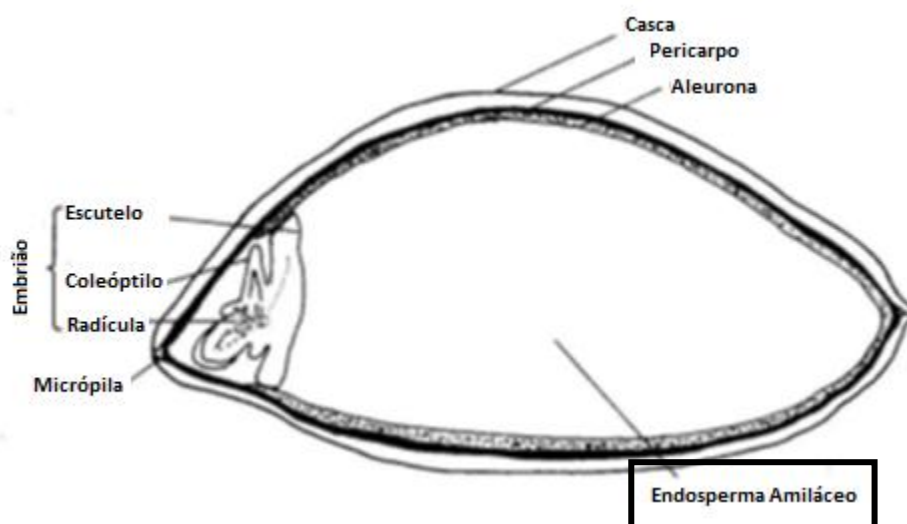


Figura 2.2: Estrutura do grão de cevada. Fonte: (Pollock, 1979)

2.1.2 Germinação

O processo de germinação inicia-se tão logo o grão atinge as condições de umidade necessárias e prolonga-se por cerca de 100 horas (Cruber, 2001). A germinação se desenvolve através do fornecimento de oxigênio e calor suficientes para o desenvolvimento do grão. A atuação enzimática é necessária nesse momento, para que ocorra o desdobramento das substâncias da reserva energética e estas possam ser utilizadas como fonte de alimento (Tschope & Nohel, 1999).

Ao longo da germinação, ocorre a difusão da giberelina, hormônio produzido no embrião e liberado pelo escutelo, até a camada da aleurona (Lewis & Young, 1995). A

giberelina atua estimulando a formação e liberação da enzima α -amilase pela aleurona (Briggs, 2012). A adição de giberelina solubilizada na água de irrigação muitas vezes é realizada para estimular a formação de enzimas durante o processo (Kunze, 2014).

Na Figura 2.3 é representado esquematicamente o processo enzimático que ocorre no grão durante a germinação.

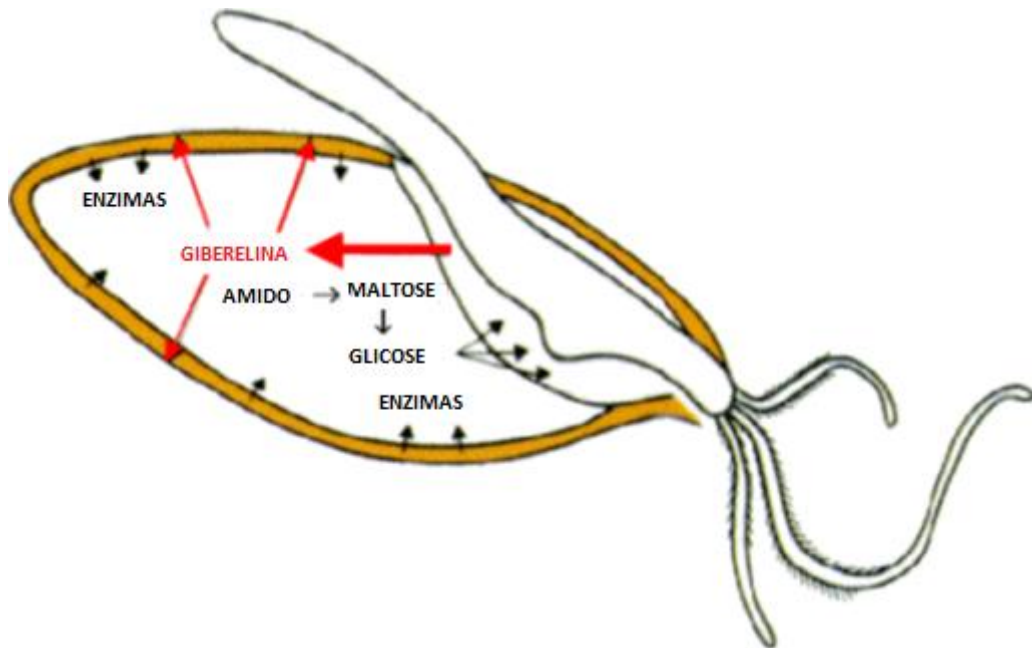


Figura 2.3: Grão de malte germinado. Fonte: (Carlsberg, 1999)

Essa síntese e ativação de enzimas resulta na quebra das cadeias longas de amido em açúcares e cadeias mais curtas, que podem ser consumidos pelo embrião (Cabral & Cordeiro, 2004). Parte desses açúcares são então utilizados como fonte de energia e para a síntese de novos tecidos, como radícula e folículo (Tschope & Nohel, 1999).

A dissolução mais importante durante a germinação é a dos componentes da parede celular do amido. Todos os seus componentes precisam ser quebrados para que a solubilização do corpo farinhoso se dê por completo posteriormente, no processo de mosturação, etapa da produção de cerveja. Essa dissolução se dá pelo complexo enzimático citase (Tschope & Nohel, 1999).

Durante o processo de germinação, umidade e temperatura são rigorosamente controladas, de modo a garantir as condições ótimas para a formação e ação das enzimas presentes no processo. Usualmente a perda de água do grão para o ambiente é repostada via aspersão de água sobre os grãos. Paralelamente, o controle de temperatura é feito

através da passagem de ar frio através da massa de grãos, removendo o calor gerado pelo processo de respiração, além de garantir a oxigenação do processo (Bamforth & Barclay, 1993).

Ao final da germinação é obtido o malte verde, com um teor de umidade entre 40 e 44 % e nível de composição enzimática e de desagregação do endosperma desejados. Nesse momento os grãos são direcionados para a secagem, onde os processos bioquímicos são interrompidos (Cruber, 2001).

2.1.3 Secagem

A etapa final do processo de malteação é a secagem do malte. Nessa etapa se estabelecem as características e qualidade finais desejadas ao produto, com a redução da umidade do malte verde sendo reduzida de 45 % até 5 %, provendo ao malte características estáveis e armazenáveis. Os principais objetivos da etapa são interromper as reações bioquímicas dentro do grão e fixar as características do mesmo (Warpala & Pandiella, 2000).

Na etapa de secagem podem ser identificados diversos outros efeitos: cessam o crescimento da plântula e as modificações do malte; ocorre inativação do sistema enzimático e preservação das enzimas; desenvolvimento e estabilização de características do aroma; remoção de aromas indesejáveis; e secagem das radículas de modo a facilitar a sua remoção (EBC, 2000).

A passagem de ar quente entre a massa de grãos promove a remoção de água. Essa taxa de remoção é influenciada principalmente por dois parâmetros: a velocidade e a temperatura do ar que atravessa a camada de grãos (Briggs, 2012).

O processo de secagem deve ser conduzido cautelosamente, uma vez que deseja-se realizar a redução de umidade sem danificar o sistema enzimático formado nas etapas anteriores (Hoseney, 1986). Com esse intuito, o malte deve ser primeiramente aquecido de maneira gradual, utilizando-se altas vazões de ar, protegendo as enzimas termo sensíveis em altas umidades. Apenas após uma considerável redução da umidade, até em torno de 10 %, torna-se viável aumentar a temperatura de secagem, a fim de formar o aroma e sabor característicos (Lewis & Young, 1995).

Durante o último período da secagem, após a elevação da temperatura, ocorrem também as últimas transformações bioquímicas no grão, com a redução de pH devido à presença de enxofre, solubilização de polifenóis e antocianinas, redução na solubilização das proteínas e degradação do percussor de DMS, composto indesejável na cerveja. Além disso, nesse momento, chamado período de cura, desenvolvem-se a cor e o aroma do malte e ocorrem as reações de Maillard, fenômenos diretamente relacionados à temperatura da etapa final (Cabral & Cordeiro, 2004).

O processo de secagem pode ocorrer em estufas circulares, como a ilustrada na Figura 2.4 ou retangulares, conforme ilustrado na Figura 2.5. Usualmente, a camada de malte tem aproximadamente 1 metro de altura e deve apresentar resistência homogênea ao fluxo de ar, sem criação de caminhos preferenciais. Ao término do período de cura, o malte é resfriado e em seguida conduzido a silos de armazenamento (Prior, 1996). Devido aos requisitos térmicos, a etapa de secagem é a etapa que mais consome energia em todo o processo de malteação, cerca de 90 % da energia total requerida (Gibson, 1989).



Figura 2.4: Estufa circular de secagem de malte. Fonte: (Dodd & Sprake, 2014)



Figura 2.5: Estufa retangular de secagem de malte. Fonte: (BSG, 2014)

2.2 Parâmetros de Qualidade do Malte

A determinação das características do malte através de parâmetros de qualidade é importante na obtenção de informações quanto ao desenvolvimento do processo de malteação e na identificação do impacto desse malte no processo de fabricação de cerveja (Tschope & Nohel, 1999).

Esses parâmetros de qualidade são compostos por análises físico-químicas, sensoriais e fisiológicas. Essas análises são realizadas através de métodos oficiais e padronizados por entidades reconhecidas, tais como EBC (European Brewery Convection), ASBC (American Society Brewery Chemists), MEBAK (Middle European Brewery Analysis Commission) e IOB (Institute of Brewing) (Kunze, 2014) (Zschoerper, 2009).

Diferentes tipos de malte são caracterizados por diferentes valores para os parâmetros de qualidade. Essa diversidade de características é obtida variando-se as características da cevada escolhida para maltear e os parâmetros das etapas do processo de malteação, ou ainda com o uso de aditivos no processo (Zschoerper, 2009). Os tipos de malte existentes no Brasil, de acordo com a Portaria nº 166 de abril de 1977 do Ministério da Agricultura, são Malte Pilsen, Malte Caramelo, Malte Munique e Malte Preto ou Torrado.

O Malte Pilsen é o tipo mais comum, podendo ser utilizado na produção de todos os estilos de cerveja. O Malte Caramelo, apresenta uma extensa gama de cores e é utilizado na produção de cervejas com aromas caramelados. O Malte Munique é um malte escuro,

utilizado na produção de cervejas onde se deseja obter aroma maltado acentuado (Zschoerper, 2009). O Malte Preto, por sua vez, é utilizado na produção de cervejas escuras, sendo produzido através da torrefação do malte pilsen em temperaturas na casa de 200 °C por período de duas horas (Kunze, 2014).

Na Tabela 2.1 encontram-se as especificações de qualidade para os diversos tipos de malte, definidas pela Portaria nº 166. A garantia de que estes valores de referência serão atingidos, evitando problemas no posterior processamento do produto são responsabilidade do produtor de malte (Seward, 1992).

Tabela 2.1: Valores característicos de qualidade para os diversos tipos de malte. Fonte: (Ministério da Agricultura, 1977).

Característicos Específicos (Determinados através dos Métodos de Ensaio da EBC)	Malte Pilsen				Malte Munique		Malte Caramelo		Malte Torrado	
	2 Fileiras		6 Fileiras		mín	máx	mín	máx	mín	máx
	mín	máx	mín	máx						
1. Umidade (%)	-	5,0	-	5,0	-	5,0	-	5,0	-	5,0
2. Extrato (% Substância Seca)	79,0	-	78,0	-	78,0	-	76,0	-	65,0	-
3. Diferença de Extrato (% S. S.)	-	2,5	-	2,5	-	2,5	-	-	-	-
4. Poder Diastásico (WK)	250	-	300	-	-	-	-	-	-	-
5. Sacarificação (min)	-	15	-	15	-	20	-	-	-	-
6. Proteínas Totais (% S. S.)	-	11,5	-	11,5	-	12,5	-	-	-	-
7. Índice Kolback (KZ)	-	45	-	45	-	-	-	-	-	-
8. Cor do Mosto Congresso (Unid. EBC)	-	3,5	-	3,5	15	25,0	100	140,0	1200	1500,0
9. Cor de Cocção (Unid. EBC)	-	6,0	-	6,0	-	-	-	-	-	-
10. Índice Hartong (VZ 45 °C)	38	-	38	-	-	-	-	-	-	-
11. Viscosidade do Mosto (cp)	-	1,6	-	1,6	-	-	-	-	-	-
12. Grãos Vitrosos (%)	-	5,0	-	5,0	-	10,0	-	-	-	-
13. Impurezas e Matérias Estranhas (%)	-	0,5	-	0,5	-	0,5	-	0,5	-	0,5

Segundo Tschope (1999), na avaliação da qualidade do malte, é importante que sejam feitas análises do mosto *congress* obtido a partir dele. O mosto *congress* é uma réplica obtida em escala laboratorial do mosto produzido na cervejaria a partir do malte a ser avaliado. A seguir, serão apresentadas as principais análises realizadas no mosto *congress* (Zschoerper, 2009).

2.2.1 Extrato

A análise de extrato determina o potencial do malte em fornecer açúcares fermentáveis e compostos de nitrogênio quando moído finamente. O valor padrão para o extrato é no mínimo 80,5 %, sendo que quanto maior seu valor, melhor será o rendimento da sala de brassagem, na fabricação de cerveja (Zschoerper, 2009).

2.2.2 *Diferença de Extrato*

É o valor da diferença entre o extrato obtido a partir da moagem fina e da moagem grossa do malte, sendo essa diferença menor quando o malte sofre mais modificações durante o processo de fabricação (Zschoerper, 2009).

2.2.3 *Cor de Cocção*

A análise da cor de cocção fornece características em relação a cor que a cerveja tende a ter após o processo cervejeiro e sua determinação é feita através da fervura do mosto por duas horas e posterior verificação de cor (Tschope & Nohel, 1999).

A cor é influenciada pelas etapas de germinação e secagem do malte, tendo um valor padrão de 6,0 EBC para a cerveja pilsen (Zschoerper, 2009).

2.2.4 *FAN – Free Amino Nitrogen (Nitrogênio Livre)*

A análise de FAN permite determinar a concentração de aminoácidos (parcela nitrogenada de baixo peso molecular) no mosto que podem ser assimilados pelas leveduras no processo de fermentação, viabilizando a multiplicação das mesmas. Concentrações em torno de 160 mg.L⁻¹ são consideradas aceitáveis (Zschoerper, 2009)

2.2.5 *Nitrogênio Solúvel*

Segundo Tschope (1999), representa a quantidade de nitrogênio solubilizado no processo de mosturação. Valores ideais se encontram entre 550 e 750 mg a cada 100 g de malte isento de água, sendo que valores acima destes geram baixo rendimento na fabricação de cerveja e valores abaixo podem acarretar em problemas na fermentação (Zschoerper, 2009).

2.2.6 *Poder Diastásico*

O poder diastásico mede a atividade das enzimas α e β -amilase. Valores abaixo de 220 WK geram problemas na etapa de brassagem da cervejaria e valores muito elevados podem influenciar no grau de fermentação (Zschoerper, 2009).

2.2.7 *Beta-Glucanos*

A quantidade de beta-glucanos está diretamente relacionada com a viscosidade do mosto e seu excesso gera problemas na filtração da cerveja, sendo desejáveis valores abaixo de 220 ppm (Zschoerper, 2009).

2.2.8 *Índice de Kolbach*

Segundo Kunze (2014), esse índice fornece o percentual de nitrogênio total presente no malte que foi dissolvido na mosturação, e conseqüentemente o quanto as proteínas do malte foram hidrolisadas pelas enzimas proteolíticas.

2.3 **Secagem de Grãos**

A secagem é uma das mais antigas operações unitárias conhecidas, estando presente nos mais diversos ramos da indústria, e com fundamental importância no setor alimentício. É uma operação complexa, devido a características próprias da descrição matemática dos fenômenos envolvidos simultaneamente no processo (Menon & Mujumdar, 1987).

Segundo Keey (1978), a secagem é a remoção de uma substância volátil (comumente água) de um produto sólido, sendo a quantidade de água presente no sólido denominada umidade. Assim, ficam excluídas da definição de secagem a concentração de uma solução, a remoção mecânica de água e métodos térmicos relacionados à destilação.

A secagem consiste em um processo simultâneo de transferência de calor e massa entre o produto e o ar de secagem (Silva J. S., 2008). Essa é uma operação de alto consumo energético, uma vez que é necessário fornecimento de calor para evaporar a umidade do material, que em seguida é arrastada em forma de vapor para o ar de secagem (Keey, 1978).

O fornecimento de calor ao processo pode se dar por diferentes vias: convecção, radiação, condução, micro-ondas, radiofrequência, aquecimento ôhmico, dentre outros. Para que a geração de vapor ocorra, é necessário que seja fornecido calor suficiente ao material para compensar o calor latente de vaporização da substância a ser evaporada. A vaporização consome o calor fornecido, assim o material a ser seco mantém-se a

temperaturas relativamente baixas, preservando sua qualidade (Chen & Mujumdar, 2008).

Ao utilizar-se calor fornecido via ar quente, a transferência de calor ocorre inicialmente por convecção e então é conduzido ao interior do material via difusão. Simultaneamente, para o vapor formado, ocorre a transferência de massa via difusão, convecção ou uma combinação dos fenômenos através dos canais porosos no interior do material (Chen & Mujumdar, 2008).

A microestrutura do alimento é particularmente relevante no processo de secagem, uma vez que água nos estados líquido e gasoso se move através dessa estrutura. Porosidade e tortuosidades são características importantes da microestrutura que é basicamente composta por proteínas, gorduras, carboidratos, minerais e ar (Chen & Mujumdar, 2008).

No processamento de alimentos, a secagem tem por finalidade a remoção da água presente nesses produtos. Essa remoção tem objetivos diversos, dentre eles proporcionar condições seguras de armazenamento, cessar processos biológicos, condicionar para etapas subsequentes de processo, reduzir custos de transporte e realçar sabor e aroma (Keey, 1978) (Pan, 1997).

Existem diversos métodos para secagem de alimentos, e suas vantagens podem ser medidas em termos de eficiência energética, tempo de secagem, qualidade do produto final e etc., dependendo das exigências do processo. Um balanço entre esses fatores é fundamental para alcançar o equilíbrio econômico na operação (Chen & Mujumdar, 2008).

O método usual para secagem de grãos é a passagem de ar seco através de uma camada de grãos. A camada de ar adjacente ao produto encontra-se em equilíbrio com o material, assim a água presente na camada limite é transferida para a corrente de ar, sendo carregada para fora do secador. Uma vez que a umidade evapora para alcançar novamente o equilíbrio com a camada limite, o calor de evaporação precisa ser compensado via calor transferido para a superfície do produto. Consequentemente, ar quente proporciona uma secagem mais rápida do que ar frio a um mesmo teor de umidade (Smith & Hui, 2008)

2.3.1 Etapas de Secagem em Camada Espessa

Matematicamente, a secagem em camada espessa é modelada como uma composição de múltiplas camadas delgadas. Com o intuito de estudar a taxa de secagem de um produto, é conveniente definir camada delgada como uma camada com espessura tal que o ar na saída da camada não é perceptivelmente diferente do ar de entrada. Além disso, todo o produto encontra-se efetivamente em contato com o mesmo ar (Smith & Hui, 2008).

Em termos de processo, inicialmente ocorre uma etapa de pré-secagem, onde o sistema começa a entrar no regime operacional. Nesse momento, o produto encontra-se geralmente a uma temperatura abaixo da do ar de secagem e a pressão parcial de vapor d'água na superfície do produto é baixa, resultando numa taxa de transferência de massa e velocidade de secagem também baixas. O calor chegando através do ar de secagem eleva a temperatura do produto, resultando num aumento de pressão e consequentemente da velocidade de secagem. Este fenômeno continua a ocorrer até que as transferências de calor e massa entrem em equilíbrio, de modo que as entalpias do ar e do produto na superfície de contato se igualem. Esse período inicial tem uma duração desprezível em relação ao tempo total de secagem (Park, 2007).

Segundo Lewis & Young (1995), a secagem de uma massa de grãos pode ser dividida em duas grandes etapas, no que diz respeito aos processos de transferência que ocorrem com a água envolvida no processo.

Na primeira etapa a secagem ocorre a taxa constante, com a remoção da umidade superficial do grão (água livre) ocorrendo através do fluxo de ar aquecido que passa através do leito. O fluxo de ar é o parâmetro limitante nessa fase do processo, com o ar saturado deixando a camada de grãos a uma temperatura constante (Lewis & Young, 1995).

Esse período é definido pela equação,

$$m_s = \frac{dM}{dt} = k_y A (H_s - H_a)$$

onde t é o tempo de secagem, M é o teor de umidade da amostra (fração em base seca), m_s é a massa de sólido seco da amostra (kg), k_y é o coeficiente de transferência de massa, A é a área (m^2) para evaporação e H_s e H_a são os teores de umidade do ar saturado e no estado de entrada, respectivamente (Smith & Hui, 2008).

Nesse período, a umidade do produto é alta e a pressão de vapor de água na sua superfície é constante e igual à pressão de vapor de água pura na temperatura do produto. A temperatura do produto é também constante e igual à temperatura de bulbo úmido. (Park, 2007).

A remoção da umidade na primeira etapa ocorre enquanto a migração de água do interior até a superfície do produto ocorre a uma velocidade suficiente para repor a perda por evaporação de água na superfície (Park, 2007). A secagem ocorre com a evolução de uma frente de secagem através de subcamadas de grãos, do fundo ao topo do leito. Quando a última camada (limite superior) é seca, o ar passa a deixar a camada de grãos sem estar saturado, e assim inicia-se a segunda etapa de secagem, após o chamado ponto de ruptura (Lewis & Young, 1995).

Na segunda etapa, a remoção de calor torna-se mais lenta, com uma taxa decrescente de secagem, e a água retida no interior do grão é removida. Nesse momento a taxa de secagem é limitada pela difusão da água através da estrutura do grão e não mais pela transferência que ocorre na superfície de contato (Lewis & Young, 1995).

Essa etapa é definida pela equação a seguir.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D(T) \frac{\partial^2 M}{\partial x^2}$$

[2]

A equação acima é chamada Lei de Fick e M é uma função de posição e tempo. A variação do teor de umidade no interior do produto causa gradientes de umidade, resultando em movimentação da água no interior do sólido (Smith & Hui, 2008).

No segundo período, a vazão de ar deixa de ser um parâmetro crucial ao processo, dando lugar à temperatura do ar. Isso possibilita que a vazão de ar seja reduzida e a temperatura elevada, além de surgir a possibilidade da utilização da recirculação de ar, sendo esse o período chamado período de cura (Lewis & Young, 1995).

Durante este período, a troca de calor não é mais compensada, conseqüentemente, a temperatura do produto aumenta e tende assintoticamente à temperatura do ar. No final deste período o produto estará em equilíbrio com o ar e a velocidade de secagem é nula.

Na Figura 2.6 é possível ver o comportamento da taxa de secagem no decorrer do processo de redução de umidade do material.

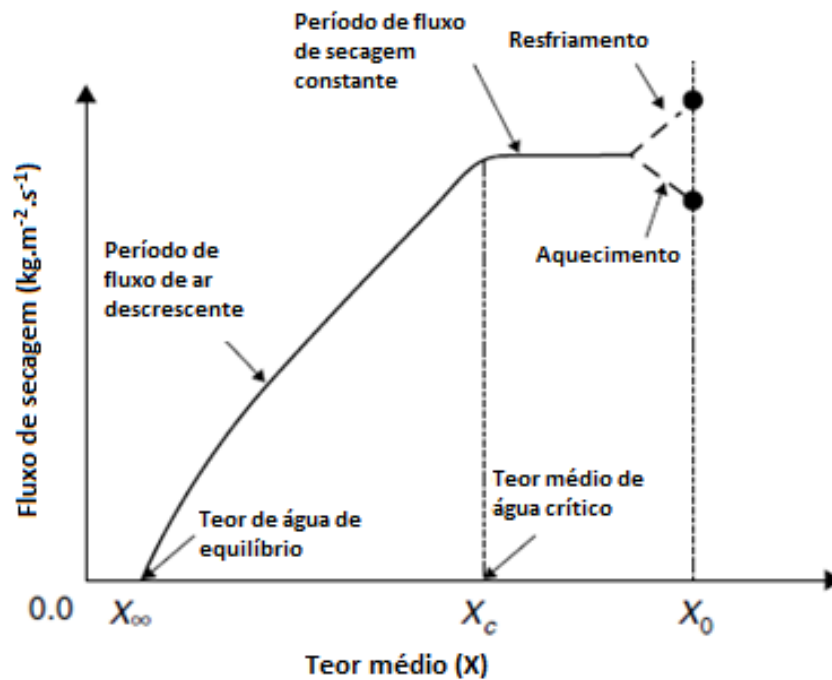


Figura 2.6: Comportamento da taxa de secagem. Fonte: (Chen & Mujumdar, 2008)

2.3.2 Consumo Energético

A secagem é um processo que envolve fenômenos de transferência de calor e massa entre o produto e o ar de secagem. Tais fenômenos podem ser equacionados e agrupados em modelos matemáticos, os quais têm se mostrado eficientes na análise da secagem, no desenvolvimento e otimização de secadores (Silva J. S., 2008).

O consumo energético do processo de secagem depende fundamentalmente de dois fatores, a energia consumida nos ventiladores e a energia consumida no aquecimento do ar (Park, 2007).

a) Ventiladores

Os ventiladores utilizados no processo devem fornecer uma vazão tal que o fluxo de ar seja suficiente para vencer a perda de carga na tubulação e no leito de secagem, além de arrastar toda a umidade do material. A determinação do consumo energético nos

ventiladores depende dessa vazão de ar, sendo dada pela velocidade de ar desejada e pela área de exposição do material. De posse desses valores, é possível determinar a potência dos ventiladores necessários e conseqüentemente seu consumo (Park, 2007).

b) Aquecimento do ar

No processo de secagem, o ar ambiente é aquecido e em seguida insuflado através do leito de secagem. O calor adicionado ao ar é então transferido ao material a ser seco e a umidade presente no material é aquecida e transformada em vapor para então se difundir no ar e deixar a câmara de secagem transportado pelo ar agora resfriado e mais úmido (Park, 2007).

Segundo Park (2007), o aquecimento do ar antes de entrar no processo se dá sem alteração do conteúdo de umidade absoluta da massa de ar, através de trocadores de calor indireto. O fluxo de ar necessário ao processo é expresso em termos de quantidade de ar seco por tempo ($\text{kg ar seco}\cdot\text{h}^{-1}$), e a quantidade de calor necessária ao aquecimento é dada por

$$q = \dot{m} \times (h_2 - h_1) = \dot{m} \times C_p \times (T_2 - T_1)$$

[3]

A obtenção dos balanços energéticos do processo depende da determinação dos estados da mistura ar-vapor d'água entrando e saindo do leito de secagem, além do estado do próprio material a ser secado. As propriedades da mistura ar/vapor são obtidas através de diagramas psicrométricos, como o da Figura 2.7.

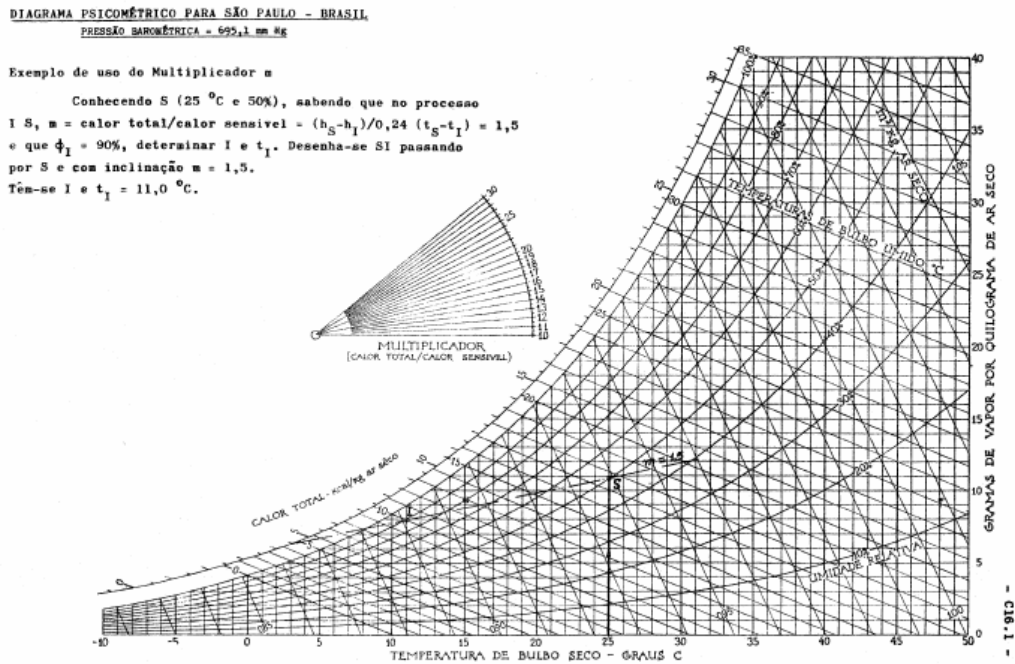


Figura 2.7: Diagrama psicrométrico. Fonte: (Park, 2007).

Considerando a secagem de grãos em camadas espessas como um processo adiabático, pode-se dizer que o calor que entra na massa de grãos é igual o calor que sai no ar de exaustão. A secagem inicia-se na subcamada inferior e vai progredindo até atingir a última subcamada na parte superior (Silva J. S., 2008).

Segundo Silva (2008), durante o processo de secagem em camada espessa, a diferença entre os calores sensíveis do ar de entrada e saída da massa de grãos é igual ao produto do calor de vaporização e a quantidade de água evaporada, conforme a equação,

$$(m \times Cp \times \Delta T) = (h_v \times A_{ev})$$

[4]

Na qual m é a massa e C_p o calor específico do ar, ΔT a diferença de temperatura do ar que entra e sai da camada, h_v o calor latente de vaporização e A_{ev} a quantidade de água evaporada. Assim, o calor sensível fornecido é igual ao calor latente de vaporização necessário para evaporar a água contida no produto até a umidade final desejada.

Segundo Silva (2008), a solução do balanço de energia para o processo de secagem depende da determinação da vazão do ar de secagem, das propriedades psicrométricas do ar, do teor de umidade de equilíbrio, do calor latente de vaporização e do tempo de secagem.

3 Estudo de Caso

A descrição e mapeamento do processo produtivo característico da unidade em questão é uma etapa crucial no desenvolvimento da proposta de melhoria e diretamente relacionada à metodologia aplicada para desenvolvimento da proposta de trabalho.

3.1 Descrição do Processo

O presente estudo de caso foi realizado em uma planta de malteação de cevada localizada no estado do Rio Grande do Sul. O processo de malteio em análise ocorre em bateladas, e o volume de produção da planta em questão é de aproximadamente 90.000 toneladas de malte por ano. Essa produção é dividida em bateladas com alimentação de 225 toneladas de cevada, com uma perda de processo em torno de 15 %, resultando em 190 toneladas de malte.

Observa-se que, ao chegar na unidade de malteação, a cevada apresenta 10 % de umidade. Ao longo das duas etapas iniciais do processo de malteio, maceração e germinação, essa umidade do grão é elevada, chegando a um valor em torno de 45 % no final do período germinativo, antes do grão ingressar na etapa de secagem. Essa umidade é chamada umidade do malte verde (UMV).

Na etapa de secagem ocorre a remoção de grande parte da água presente no grão, com a redução do teor de umidade a um valor de 5 %. Essa remoção de água ocorre simultaneamente em duas estufas retangulares, de dimensões 15 x 15 m. A batelada de malte é carregada nas estufas de modo a formar uma camada com inicialmente 1,20 m de altura em cada estufa, distribuindo a carga de malte uniformemente.

No interior das estufas, ar quente é impulsionado através do leito de grãos a uma vazão de aproximadamente $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. São utilizados dois ventiladores axiais por estufa, cada um trabalhando a 705 rpm. O ar utilizado para a secagem é captado do ambiente e passa através de um conjunto de radiadores, onde ocorre o incremento de sua temperatura. A temperatura do ar de secagem é definida por uma curva alimentada no sistema de controle do processo pelo malteador, e inicialmente seguia o modelo apresentado na Figura 3.1, com pequenas variações entre fabricações.

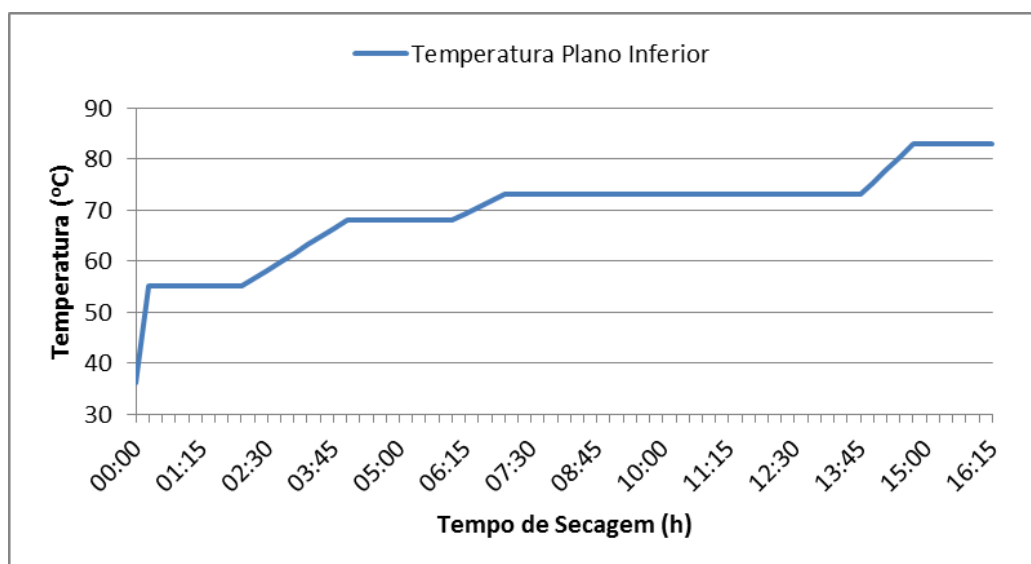


Figura 3.1: Curva de secagem padrão da maltaria. Fonte: (O autor, 2015).

O fluido quente, que troca calor com o ar de secagem nos radiadores, é água. Essa água é fornecida por uma caldeira fogo tubular, a uma pressão de $4,5 \text{ kgf.cm}^{-2}$, com a caldeira trabalhando através da queima de gás natural. O controle da temperatura do ar de secagem tem como mecanismo de atuação uma válvula três vias, que estabelece a fração da vazão de água proveniente da caldeira que é direcionada ao processo, conforme esquema apresentado na Figura 3.2.

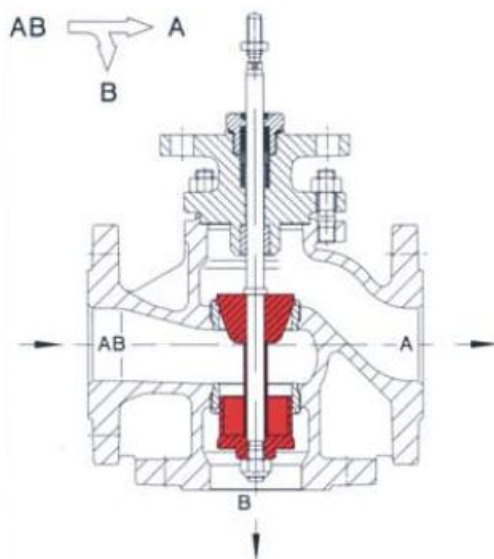


Figura 3.2: Esquemática do funcionamento de uma válvula três vias, AB corresponde à vazão de água fornecida pela caldeira, B à água direcionada aos radiadores da estufa e A à água que retorna pra para a caldeira sem realizar troca térmica. Fonte: (Comeval, 2006).

O consumo de energia calorífica do processo de secagem é dado, portanto, pela energia necessária para levar o ar ambiente até a temperatura exigida pela curva de

secagem. Essa energia é a quantidade de calor trocado entre a água quente e o ar ambiente durante todo o período de secagem, e se reflete no volume de gás natural consumido pela caldeira, índice acompanhado diariamente pela unidade.

Após finalizado o processo de secagem, amostras do malte pronto são enviadas ao laboratório de qualidade da unidade, a fim de que sejam analisados os itens de qualidade da fabricação, sendo eles: Extrato, Diferença de Extrato, Cor de Cocção, FAN, Nitrogênio Solúvel, Poder Diastásico, Beta-Glucanos e Índice de Kolbach. Para o estudo em questão, os valores de FAN, Beta-Glucanos, Poder Diastásico e Cor de Cocção foram levados em consideração para comparação entre rampas de secagem, por serem estes os parâmetros com maior influência da etapa de secagem.

3.2 Metodologia Aplicada

O ponto inicial do trabalho consistiu no acompanhamento do consumo de combustível através da medição da vazão de gás natural alimentada na caldeira de hora em hora durante 75 dias. Esta etapa teve como objetivo possibilitar a mensuração do consumo de gás consumido por batelada de malte e identificar os pontos de maior consumo no decorrer da secagem.

A partir desse acompanhamento foi realizada uma alteração no modelo da curva de secagem, buscando reduzir a exigência de energia calorífica no processo e assim trazer economia do consumo de combustível da planta. A implementação da curva foi realizada através da definição de novo programa de temperaturas de secagem.

A validação da alteração de curva foi feita através da análise dos resultados de um grupo de estudo de 60 fabricações, entre maio e julho do ano de 2014. Os parâmetros levados em conta foram: consumo de combustível, tempo de secagem, FAN, Beta-Glucanos, Poder Diastásico, e Cor de Cocção. Assim, buscou-se identificar se houve redução no consumo de combustível e quais os impactos em capacidade de produção e qualidade do malte, comparando-se dois modelos de curva de secagem. A tabela completa com dados por batelada encontra-se no Anexo A.

4 Resultados e Discussão

Para avaliação dos resultados obtidos via melhoria proposta, mostra-se necessária a avaliação de três diferentes frentes. Primeiramente, o comportamento do consumo de gás ao longo do período de secagem precisa ser avaliado, de modo a visualizar qualitativamente a presença de picos de consumo. Ainda, uma comparação entre as médias de consumo de gás por fabricação para a curva em patamares e contínua é o ponto chave do trabalho e uma avaliação dos impactos da mudança de curva nos parâmetros de qualidade e eficiência de processo também figuram como análises importantes.

4.1 Perfil de Consumo/Hora ao Longo da Secagem

O programa de temperaturas de secagem utilizado anteriormente pela maltaria tinha seu início com uma elevação brusca da temperatura, de aproximadamente 42 °C (entre carregamentos) até 55 °C. Após permanecer duas horas em 55 °C, a temperatura passava por uma nova elevação, chegando em 68 °C após duas horas de rampa. Em seguida, a temperatura era mantida por mais duas horas em 68 °C, antes de ser elevada a 73 °C em uma hora de rampa. A temperatura era então mantida em 73 °C até que ocorresse o ponto de ruptura, identificado através da elevação da temperatura no plano superior de secagem, quando era novamente elevada, levando uma hora pra chegar a 83 °C. Nessa temperatura era mantida por mais uma hora e meia, encerrando assim o ciclo de secagem. Esse tipo de curva de secagem foi denominado curva em patamares.

Na Figura 4.1 são apresentados alguns gráficos resultantes do acompanhamento do consumo de gás hora a hora, para fabricações programadas com a curva em patamares.

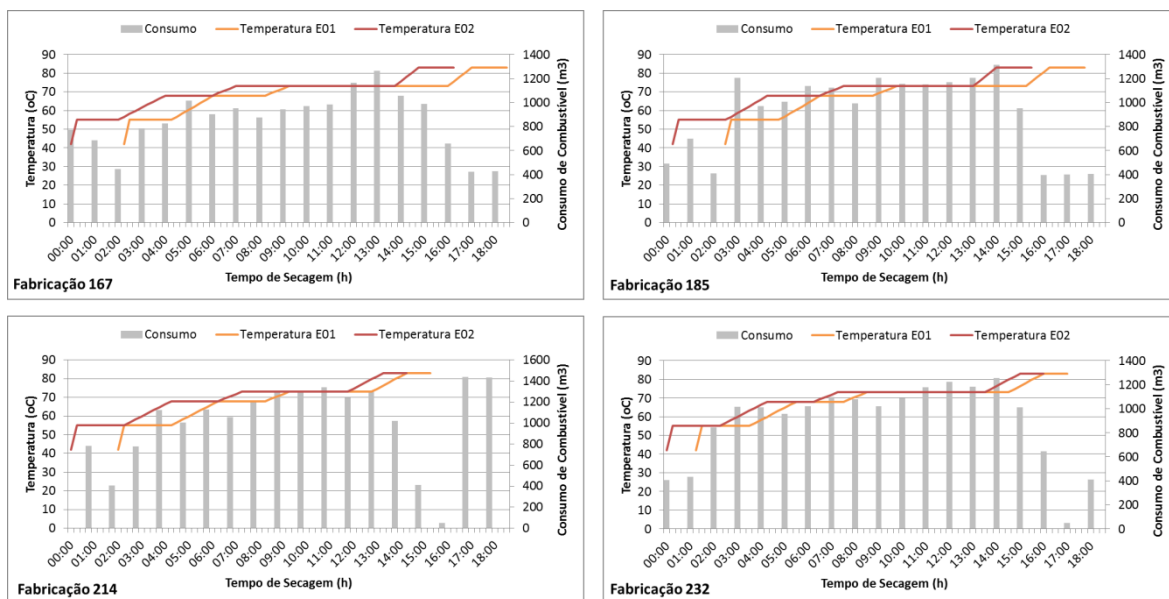


Figura 4.1: Acompanhamento do consumo de gás por hora com curva em patamares - Fabricações 167, 185, 214 e 232. Fonte: (O autor, 2015).

As curvas de Temperatura E01 e E02 representam as temperaturas programadas na Estufa 1 e na Estufa 2, respectivamente, e a defasagem entre elas se dá pelo tempo de carregamento de cada estufa. As barras representam o consumo de gás natural na caldeira por hora.

O comportamento do consumo observado para a curva em patamares apresenta diversos picos ao longo do ciclo de secagem. Estes picos ocorrem geralmente em momentos nos quais as duas estufas estão em rampa de elevação de temperatura simultaneamente.

Diante disso, foi proposta um novo modelo de curva de secagem. Uma vez que o parâmetro limitante na primeira fase de secagem é a vazão de ar, e não a temperatura do ar de secagem, decidiu-se realizar uma elevação lenta e constante dessa temperatura, de modo a permitir uma operação mais uniforme da caldeira.

A nova curva proposta realiza uma elevação de temperatura gradual, elevando inicialmente a temperatura em torno de 42 °C até 73 °C em uma rampa de aquecimento de sete horas. Após essa elevação, a curva é semelhante à anterior, com a temperatura ficando estável em 73 °C até que ocorra o ponto de ruptura, momento no qual inicia-se uma rampa de uma hora até 83 °C (ou 85 °C), temperatura na qual se encerra a secagem após uma hora e meia de cura. Essa curva foi denominada curva contínua, e a variação no consumo de gás hora a hora está exemplificada na Figura 4.2.

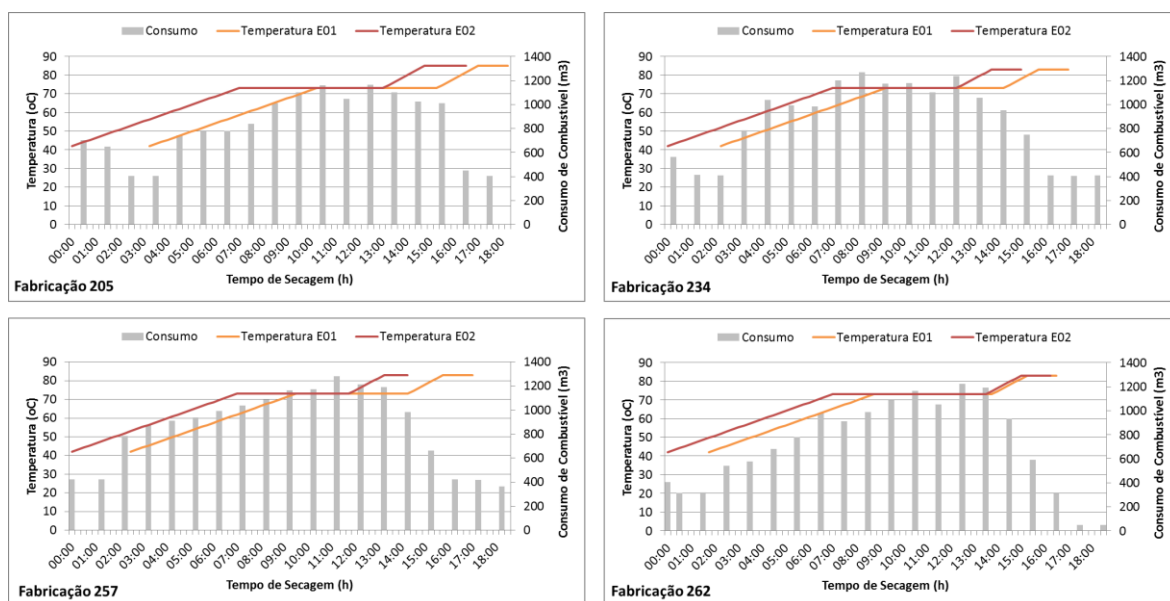


Figura 4.2: Acompanhamento do consumo de gás por hora com curva contínua - Fabricações 205, 234, 257 e 262. Fonte: (O autor, 2015).

Pode-se observar que, com a utilização da curva contínua, houve uma redução na quantidade de picos de consumo de combustível no decorrer da secagem. Ao iniciar o aquecimento de modo gradual, permite-se que a caldeira atue de maneira mais uniforme, com o consumo/hora também sendo elevado gradualmente, atingindo valores mais altos apenas no momento em que se inicia a segunda elevação de temperatura da curva, após o ponto de ruptura.

A comparação entre o comportamento dos dois tipos de curva mostra que a utilização de uma rampa de elevação com taxa de $4,4 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ por um longo período é preferível frente a utilização de três rampas breves com taxas mais bruscas (52 , $6,5$ e $5 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$). O comportamento do consumo/hora de combustível ao longo das curvas de secagem das bateladas que compõem a amostra encontram-se no Anexo B.

4.2 Consumo de Combustível por Batelada

O consumo médio de combustível para cada tipo de curva de secagem foi mensurado através da análise dos dados do grupo amostral em questão (listado no Anexo A), composto 60 bateladas de fabricação (30 com curva em patamares e 30 com curva contínua), com dados colhidos entre maio e julho de 2014, desprezando-se as fabricações com possível influência de paradas de linha e outras anomalias. O valor médio encontrado para cada tipo de curva de secagem encontra-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Consumo médio de combustível por Curva de Secagem. Fonte: (O autor, 2015).

Curva de Secagem	Consumo de Combustível (m ³)
Patamares	15.602
Contínua	14.917

Esses valores mostram uma economia média de 686 m³ de gás natural por fabricação para a curva contínua frente à curva em patamares. Esse volume de gás corresponde a uma redução de 4,4 % no consumo do combustível. Conforme a Tabela 4.2, isso corresponde a uma economia aproximada de R\$ 1.124,84 por batelada, ou R\$ 5,92 por tonelada de malte produzida.

Tabela 4.2: Custo do gás natural para a indústria nos estados brasileiros. Fonte: (FIRJAN, 2015).

Extraído em: 04/06/2015			
Posição	Estado	Tarifa (US\$/MMBtu)	Tarifa (R\$/m ³)
1	Paraná	25.42	1.68
2	Rio Grande do Sul	24.81	1.64
3	São Paulo	23.39	1.54
4	Alagoas	21.54	1.42
4	Mato Grosso do Sul	21.54	1.42
6	Paraíba	21.35	1.41
7	Ceará	21.2	1.4
8	Santa Catarina	20.8	1.37
9	Pernambuco	20.64	1.36
10	Minas Gerais	20.26	1.34
11	Sergipe	19.85	1.31
12	Bahia	19.44	1.28
13	Rio de Janeiro	18.56	1.23
14	Amazonas	17.8	1.18
15	Espírito Santo	17.55	1.16
16	Rio Grande do Norte	15.36	1.01

Fonte: Cálculos do Sistema FIRJAN - www.firjan.org.br

A amostra analisada apresentou um desvio padrão considerável para os valores de consumo de gás natural (939 m³), entretanto, a economia no consumo de combustível para a curva contínua em relação à curva em patamares condiz com o esperado ao analisar os requisitos energéticos do processo. Na Figura 4.3 encontram-se os dois modelos de curva de secagem.

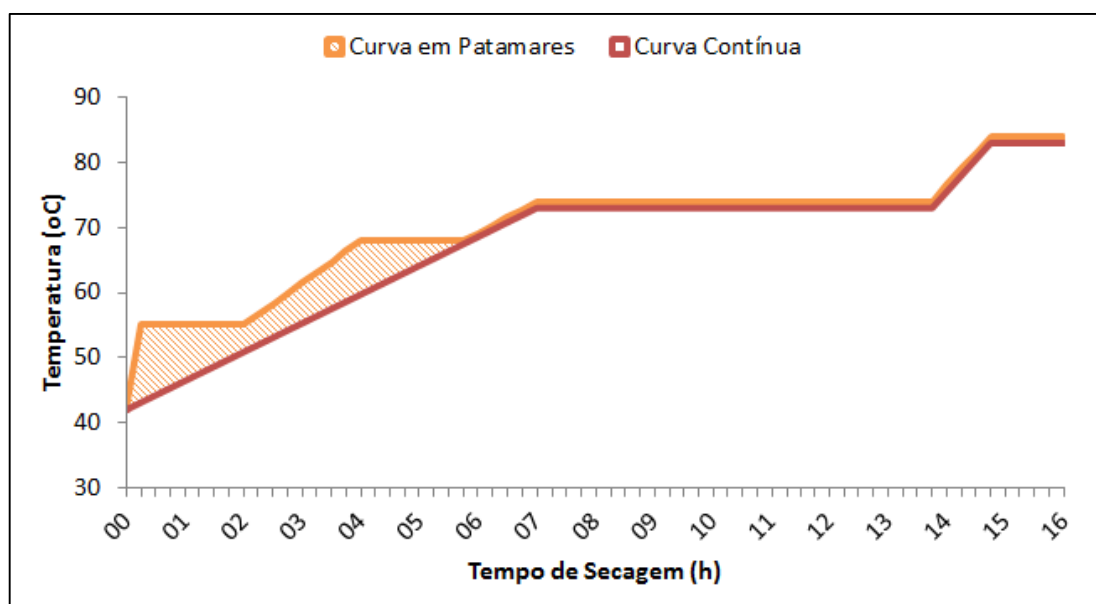


Figura 4.3: Sobreposição entre curva de secagem contínua e em patamares. Fonte: (O autor, 2015).

A área hachurada na Figura 4.3 corresponde à diferença de consumo, ou de carga térmica, entre as duas curvas de secagem. Na curva em patamares é necessário um aquecimento maior nas primeiras horas de secagem e esse calor é responsável pelo maior consumo de combustível.

Realizou-se uma análise das áreas abaixo das curvas, considerando-se aquecer o ar de uma temperatura ambiente de 25 °C até a temperatura exigida pela curva, em um período de 16 horas de secagem. Para a curva em patamares determinou-se uma área de 644,6 °C.h, enquanto que para a curva contínua a área determinada foi de 612,5 °C.h. A diferença entre essas áreas é a área hachurada na Figura 4.3 corresponde a uma redução de 5 % no consumo energético, valor esse muito próximo do encontrado experimentalmente.

4.3 Impacto em Qualidade e Tempo de Secagem

Foram quatro os parâmetros analisados para identificar possíveis prejuízos na qualidade do malte devido à alteração no modelo da curva de secagem: Beta-Glucanos, Poder Diastásico, Cor de Cocção e FAN. A tabela com os valores de cada item por batelada de malte encontra-se no Anexo A.

Na Figura 4.4, são apresentados os gráficos com as médias obtidas no grupo amostral para cada um desses parâmetros para cada tipo de curva, em patamares e contínua. Além

disso, estão ilustrados os limites superior e inferior da maltaria em questão para esses parâmetros, quando aplicáveis.

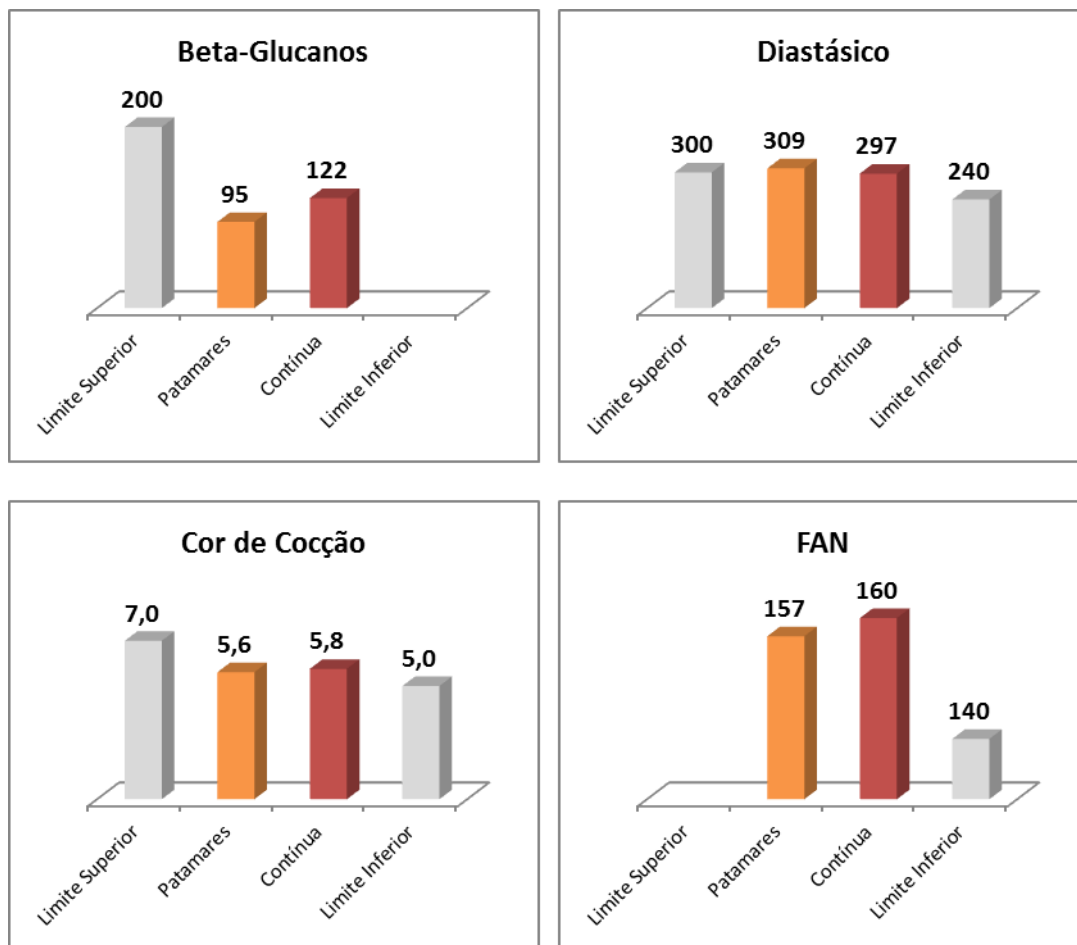


Figura 4.4: Resultados de qualidade para o grupo amostral e limites superiores e inferiores para os parâmetros beta-glucanos, poder diastásico, cor de cocção e FAN. Fonte: (O autor, 2015).

Através desses resultados, é possível observar que a utilização da curva contínua não trouxe prejuízos em nenhum dos parâmetros avaliados. A curva apresentou resultados de qualidade semelhantes ao da curva em patamares. No caso de Cor de Cocção e FAN, a mudança de curva trouxe alterações inferiores a 3 % de impacto. Para Poder Diastásico observou-se uma melhora em torno de 4 %, enquanto que para Beta-Glucanos houve um aumento de 28 %, explicado pela alta variabilidade e, mantendo-se dentro do limite superior do parâmetro.

No que diz respeito a tempo de secagem, foi observado um aumento de 12 minutos no tempo médio da curva contínua, em relação à curva em patamares. Esse aumento, equivalente a 1,2 % não representou uma redução significativa de produtividade e foi considerada insignificante frente aos ganhos em redução de consumo energético.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

O processo de malteação é de extrema importância para a indústria cervejeira, uma vez que o malte é a principal matéria-prima do setor. Sua produção a partir de cevada envolve as etapas de maceração, germinação e secagem, e a redução do consumo energético dessas etapas é fundamental na redução do custo dessa matéria-prima.

O maior consumo energético do processo de malteação ocorre na etapa de secagem e esta é responsável pela definição de características de cor e sabor do malte. Assim, melhorias de processo nessa etapa trazem impactos significativos no custo de produção do malte, e conseqüentemente da cerveja, e têm influência direta na qualidade da cerveja produzida.

Utilizando-se da característica inerente ao processo de que para altas umidades, a vazão de ar é o parâmetro de maior influência na remoção de água, foi proposta uma alteração na curva de secagem. Essa alteração consiste na utilização de temperaturas mais brandas no início da secagem, com um aquecimento lento e contínuo, de modo a permitir uma operação mais uniforme do sistema de fornecimento de calor.

O acompanhamento do consumo de combustível hora a hora durante todo o período de secagem, mostrou que a mudança de curva reduziu a quantidade de picos de consumo ao longo da secagem, permitindo uma operação mais suave, uniforme e eficiente da caldeira. A utilização de apenas uma rampa de temperatura, com elevação suave e contínua, reduziu a presença de picos que ocorriam nos períodos de duas rampas bruscas coincidentes.

Essa operação mais eficiente foi confirmada através da comparação do consumo por batelada entre as curvas em patamares e contínua. A curva contínua apresentou uma redução de aproximadamente 700 m³ de gás natural consumido por batelada de malte. Esse valor representa uma redução de 4,5 % no consumo, valor próximo ao realizar uma análise gráfica das curvas de secagem, de 5 %.

A validação da utilização da curva de secagem contínua foi realizada, ainda, através de análises de qualidade e tempo de secagem. Não houveram impactos significativos nos parâmetros de qualidade. Cor de Cocção e FAN apresentaram variações menores do que 3 %, enquanto Poder Diastásico apresentou uma melhora de 4 %. Para Beta-Glucanos

houve um aumento de 28 %, entretanto o valor se manteve dentro do limite superior da planta, sendo esse um parâmetro de alta variabilidade. Os impactos no tempo de secagem foram pequenos, com um aumento de 10 minutos no tempo total de secagem por fabricação.

Através da proposição de uma nova curva de secagem e análise de dados experimentais, optou-se por realizar uma mudança no padrão de processo da maltaria. Como trabalhos futuros, sugere-se a modelagem matemática rigorosa do processo, e o estudo da influência dos diversos parâmetros associados à secagem de malte, dentre eles UMV e temperatura e umidade ambientes. Também sugere-se o estudo energético do processo do ponto de vista da operação da caldeira.

6 Referências

1. BAMFORTH, C. W., & Barclay, A. H. (1993). Malting technology and the uses of malt. In: A. MacGregor, & R. S. Bhatta, Barley: chemistry and technology (pp. 297-354). St Paul: American Association of Cereal Chemists.
2. BOULTON, C., & QUAIN, D. (2006). Brewing Yeast and Fermentation. Oxford: Blackwell Publishing.
3. BRIGGS, D. E. (2012). Malting and Brewing Science. London: Springer.
4. BSG (2014). BSG CraftBrewing. Acesso em Julho de 2015, disponível em <https://bsgcraftbrewing.com/rahr-malting-co-malt-of-reputation>
5. CABRAL, T., & CORDEIRO, J. (2004). Da cevada ao malte. Acesso em Março de 2015, disponível em Associação Portuguesa dos Técnicos de Cerveja e Malte: http://apctcm.pt/asp/docs_informacoes/doc_22.pdf
6. CARLSBERG. (1999). Hydrolase Action and Modification. Acesso em Março de 2015, disponível em <http://mail.crc.dk/flab/hydrolas.htm>
7. CERVBRAZIL, A. B. (2014). Anuário 2014. Acesso em Junho de 2015, disponível em <http://cervbrasil.org.br/wp-content/themes/cerv/pdf/anuariofinal2014.pdf>
8. CHEN, X. D., & MUJUMDAR, A. S. (2008). Drying Technologies in Food Processing. John Wiley & Sons.
9. COMEVAL, S. L. (2006). Valvulas de Control. Depto. Técnico.
10. CRUBER, M. A. (2001). The flavor contributions of kilned and roasted products to finished beer styles. Technical Quarterly-Master Brewers Association of the Americas, 38, n 4, pp. 227-233.
11. DODD, L., & SPRAKE, P. (2014). It Comes In Pints? Acesso em Julho de 2015, disponível em <http://icipints.com/2014/09/24/malt-getting-the-grist/>
12. EBC, European Brewery Convention. (2000). Malting Technology, Manual of Good Practice. Nürnberg: Fachverlag Hans Carl.
13. EMBRAPA. (Dezembro de 2011). Cevada. Acesso em Junho de 2015, disponível em Agência Embrapa de Informação Tecnológica: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cevada/Abertura.html>
14. FIRJAN, S. (2015). Quanto Custa o Gás Natural para a Indústria no Brasil? Acesso em Junho de 2015, disponível em <http://www.quantocustaogasnatural.com.br/>
15. GIBSON, G. (1989). Malting plant technology. In: G. H. Palmer, Cereal Science and Technology. Aberdeen: Aberdeen University Press.
16. HOSENEY, R. C. (1986). Principles of Cereal Science and Technology. Minnesota: American Association of Cereal Chemistry Inc.

17. KEEY, R. B. (1978). Introduction to industrial drying operations. Oxford: Pergamon Press.
18. KUNZE, W. (2014). Technology Brewing and Malting (5th ed.). Berlin: VLB Berlin.
19. LEWIS, M. J., & YOUNG, T. W. (1995). Brewing (1st ed.). London: Chapman & Hall.
20. MENON, A. S., & MUJUMDAR, A. S. (1987). Drying of solids: principles, classification, and selection of dryers. In: A. S. Mujumdar, Handbook of Industrial Drying (pp. 295-326). New York: Marcel Dekker Inc.
21. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (1977). PORTARIA Nº 166.
22. PAN, Y. K. (1997). Drying of a root crop in vibro-fluidized beds. In: A. S. Mujumdar, Drying Technology (pp. 225-223). New York: Marcel Dekker Inc.
23. PARK, K. J. (2007). Conceitos de Processo e Equipamentos de Secagem. Campinas: CTEA - UNICAMP.
24. POLLOCK, J. R. (1979). Brewing Science. London: Academic Press Inc.
25. PRIOR, G. (1996). Malting Technology. *The Brewer*, 82, pp. 117-124.
26. SEWARD, B. (1992). Malt Quality.
27. SILVA, F. e. (2008). Electrophoretic and HPLC methods for comparative study of the protein fractions of malts, worts and beers produced from Scarlett and Prestige barley (*Hordeum vulgare* L.) varieties. *Food Chemistry*, 106.2, pp. 820-829.
28. SILVA, J. S. (2008). Secagem e armazenagem de produtos agrícolas. Viçosa: Aprenda Fácil.
29. SMITH, J. S., & HUI, Y. H. (2008). Food processing: principles and applications. Ames: Blackwell Publishing.
30. TSCHOPE, E., & NOHEL, F. (1999). A malteação de cevada. Rio de Janeiro: SENAI.
31. WARPALA, I. W., & PANDIELLA, S. S. (2000). Grist Fractionation and Starch Modification During the Milling of Malt. *Food and bioproducts processing*, 78, n. 2, pp. 85-89.
32. ZSCHOERPER, O. P. (2009). Apostila Curso Cervejeiro e malteador - AMBEV. Porto Alegre: AMBEV.

Anexo A

O Anexo A apresenta os dados colhidos para as 60 bateladas amostrais, com os resultados de média e desvio padrão para os dois tipos de curva. Na Tabela A.1 encontram-se as 30 bateladas com curva em patamares, enquanto que na Tabela A.2 encontram-se os dados para curva contínua.

Tabela A.1: Dados bateladas com curva em patamares. Fonte: (O autor, 2015).

Bateladas Utilizando Curva em Patamares							
Data	Batelada	Tempo Médio (h)	Consumo (m ³)	Beta-Glucanos (ppm)	Poder Diastásico (WK)	Cor de Coção (EBC)	FAN (mg.L ⁻¹)
15/05/2014	167	16:57	15.287	127	299	5,3	175
15/05/2014	168	17:25	14.882	145	269	5,9	166
16/05/2014	169	16:50	15.312	86	308	5,4	150
17/05/2014	170	16:50	14.509	96	324	7,2	162
19/05/2014	173	16:05	17.353	46	357	5,7	165
23/05/2014	178	16:27	16.354	188	326	5,7	162
23/05/2014	179	17:20	16.717	122	332	5,6	165
24/05/2014	180	16:37	17.493	54	319	5,8	162
25/05/2014	181	16:02	15.046	54	298	5,7	150
26/05/2014	182	16:17	14.871	80	298	4,7	147
26/05/2014	183	19:17	16.750	107	297	5,3	146
27/05/2014	184	15:55	15.291	69	324	5,0	159
28/05/2014	185	16:50	16.495	105	315	5,1	150
18/06/2014	214	16:00	15.423	217	323	6,2	172
19/06/2014	215	14:57	17.449	227	323	6,8	166
20/06/2014	217	16:00	14.739	125	305	5,0	144
21/06/2014	218	16:15	16.276	56	305	6,0	163
21/06/2014	219	16:10	15.253	60	305	5,4	158
23/06/2014	221	17:02	14.309	62	301	5,1	150
23/06/2014	222	16:47	15.374	48	301	5,7	157
24/06/2014	223	21:05	14.598	59	301	5,2	144
25/06/2014	224	17:17	14.700	97	287	5,9	173
26/06/2014	225	18:00	15.893	147	287	6,3	160
26/06/2014	226	16:27	14.937	146	287	6,1	174
27/06/2014	227	18:05	15.749	30	310	6,7	165
28/06/2014	228	17:20	15.436	40	310	6,0	158
29/06/2014	229	15:55	14.495	57	310	4,7	130
29/06/2014	230	16:37	15.970	58	310	5,1	147
30/06/2014	231	17:05	15.049	80	310	5,1	147
01/07/2014	232	17:17	16.062	67	320	4,7	143
Média		16:54	15.602	95	309	5,6	157
Desvio Padrão		01:07	897	51	16	0,6	11
Desvio Padrão (%)		6,6%	5,8%	53,2%	5,3%	11,0%	6,8%

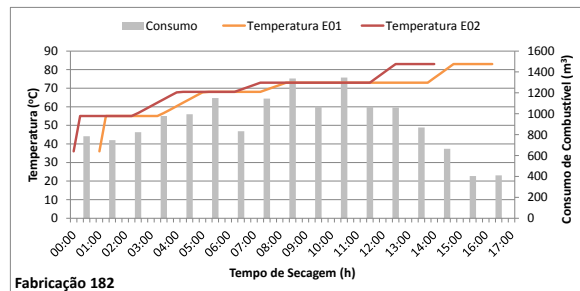
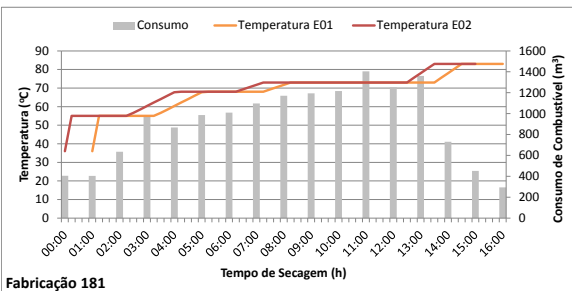
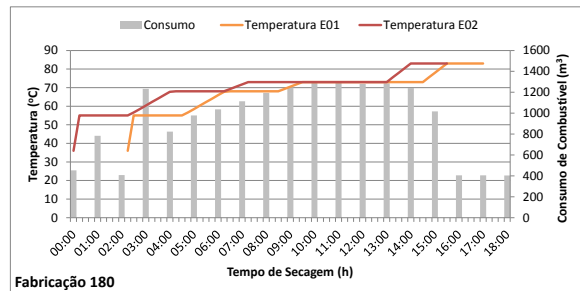
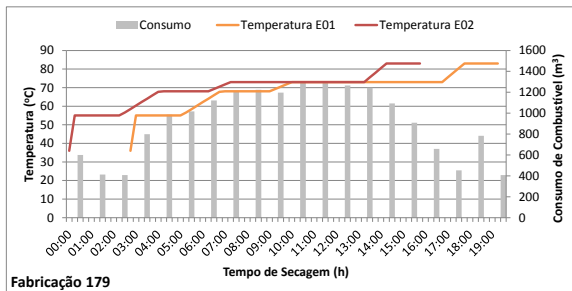
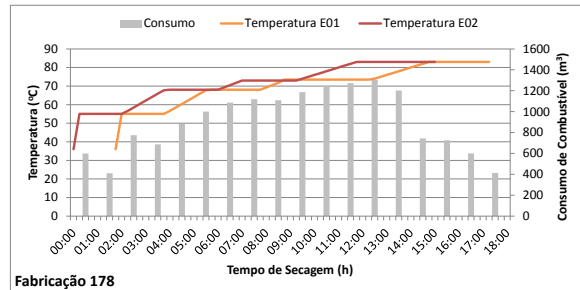
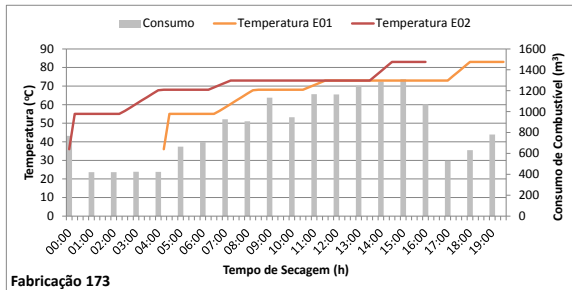
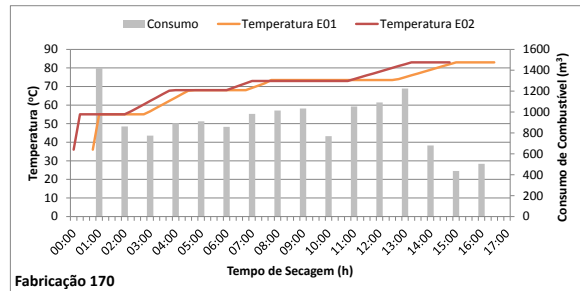
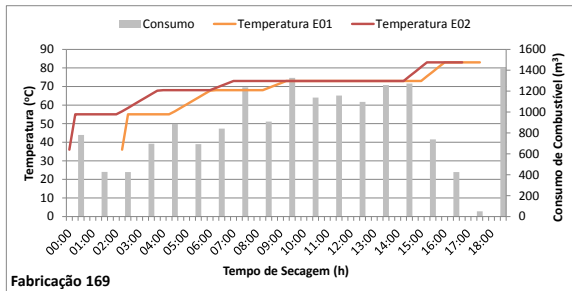
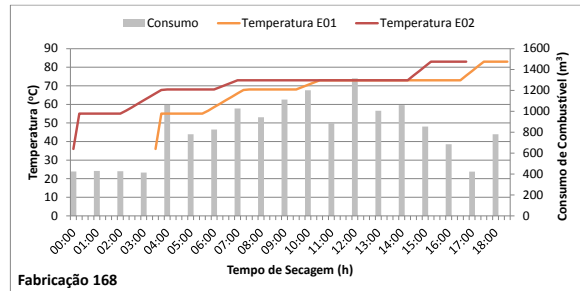
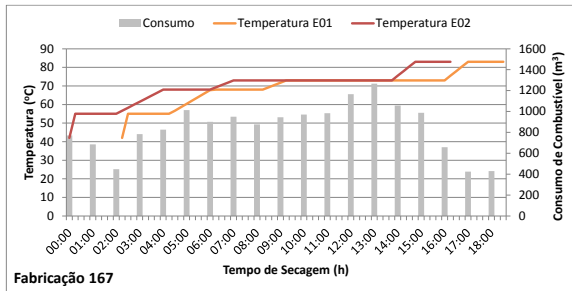
Tabela A.2: Dados bateladas com curva contínua. Fonte: (O autor, 2015).

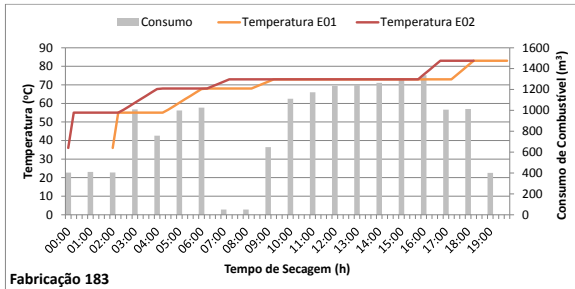
Bateladas Utilizando Curva Contínua							
Data	Batelada	Tempo Médio (h)	Consumo (m ³)	Beta-Glucanos (ppm)	Poder Diastásico (WK)	Cor de Cocção (EBC)	FAN (mg.L ⁻¹)
11/06/2014	204	15:55	15.628	117	283	5,6	157
11/06/2014	205	16:37	13.023	124	271	6,2	169
13/06/2014	207	18:32	15.760	177	265	5,3	149
14/06/2014	208	18:27	16.635	53	312	6,2	175
14/06/2014	209	16:07	14.057	67	324	5,3	157
15/06/2014	210	17:27	15.441	60	295	5,7	156
16/06/2014	211	16:22	14.046	58	307	5,5	150
16/06/2014	212	17:15	16.302	58	301	5,8	159
01/07/2014	233	17:45	15.967	81	320	4,8	147
02/07/2014	234	16:20	14.946	152	270	5,3	152
03/07/2014	235	16:37	12.938	140	270	5,8	159
04/07/2014	236	18:25	14.007	184	270	4,8	144
04/07/2014	237	17:20	14.522	60	286	5,5	156
05/07/2014	238	17:55	13.516	53	286	5,0	132
06/07/2014	239	16:52	14.366	24	299	5,5	151
06/07/2014	240	16:25	14.606	31	291	5,7	154
18/07/2014	256	16:52	15.893	110	318	6,7	184
19/07/2014	257	16:00	15.151	171	294	5,5	158
19/07/2014	258	17:05	14.048	132	294	5,6	158
20/07/2014	259	15:45	15.264	130	294	5,4	147
21/07/2014	260	17:00	15.115	450	285	7,7	182
21/07/2014	261	17:25	15.077	157	316	5,8	175
22/07/2014	262	17:05	13.341	98	316	6,9	205
23/07/2014	263	18:10	15.314	143	300	6,1	180
24/07/2014	264	17:40	15.124	174	300	6,0	152
24/07/2014	265	16:15	16.348	106	277	6,7	179
25/07/2014	266	17:32	15.024	152	277	5,9	169
26/07/2014	267	17:32	15.477	126	300	5,2	159
27/07/2014	269	17:07	15.213	113	349	5,8	145
28/07/2014	270	17:12	15.348	145	349	5,6	140
Média		17:06	14.917	122	297	5,8	160
Desvio Padrão		00:45	950	76	21	0,6	15
Desvio Padrão (%)		4,4%	6,4%	62,5%	7,1%	10,6%	9,5%

Anexo B

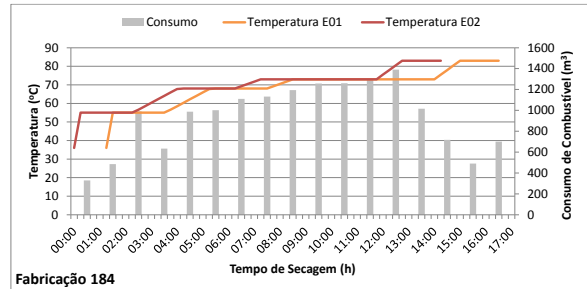
O Anexo B apresenta os gráficos de consumo hora a hora para as fabricações do grupo amostral. Os gráficos estão divididos entre bateladas com curva em patamares e bateladas com curva contínua.

Gráficos com Curva em Patamares

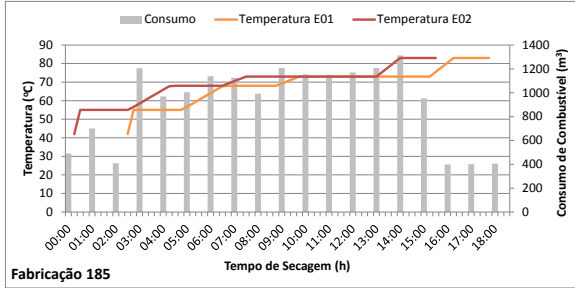




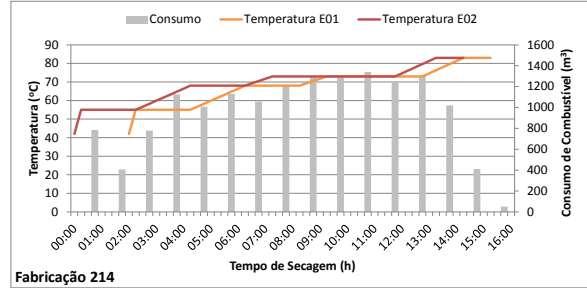
Fabricação 183



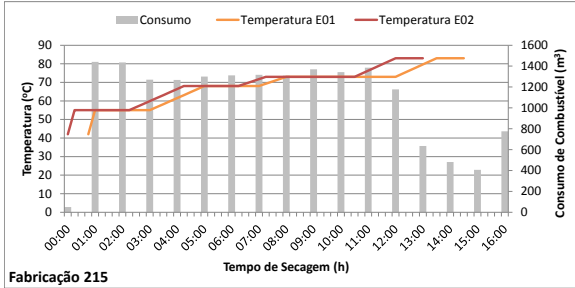
Fabricação 184



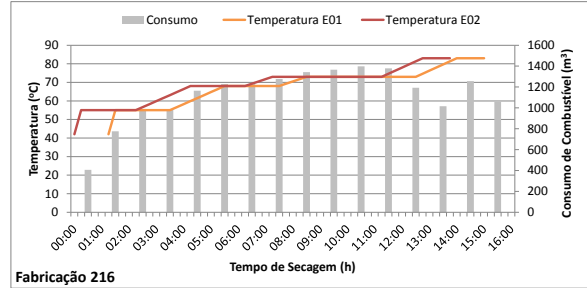
Fabricação 185



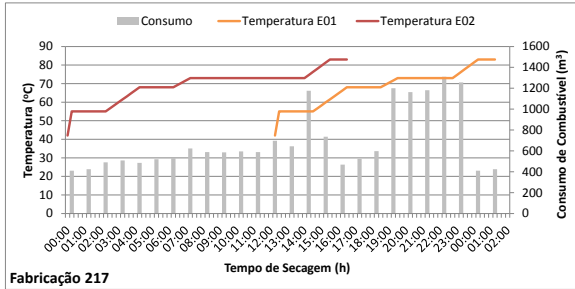
Fabricação 214



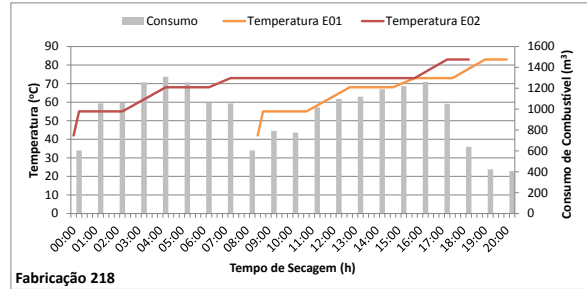
Fabricação 215



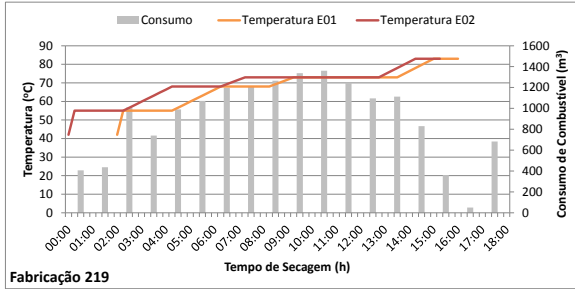
Fabricação 216



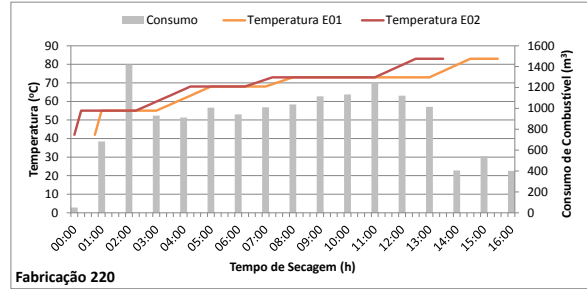
Fabricação 217



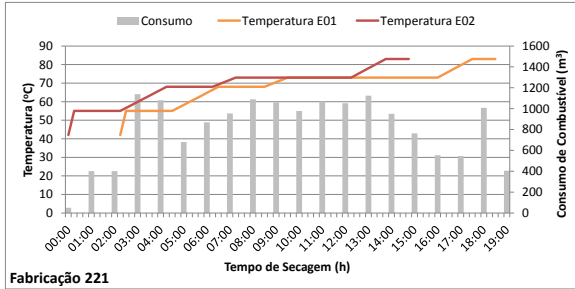
Fabricação 218



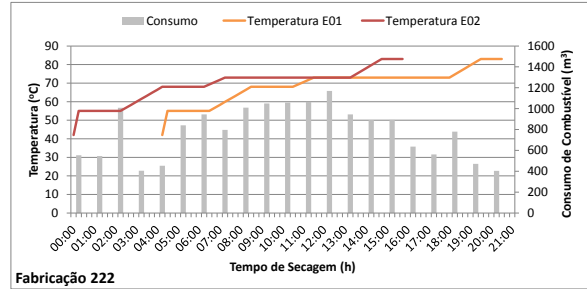
Fabricação 219



Fabricação 220



Fabricação 221



Fabricação 222

