

MATEUS LOPES E FREITAS

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM SECADOR DE
TABACO PARA REDUÇÃO DE CONSUMO DE GÁS
LIQUEFEITO DE PETRÓLEO**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2018

MATEUS LOPES E FREITAS

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM SECADOR DE TABACO PARA
REDUÇÃO DE CONSUMO DE GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO**

Projeto de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de graduação em
Engenharia Aeronáutica da Universidade
Federal de Uberlândia, como parte dos
requisitos para a obtenção do título de
BACHAREL em **ENGENHARIA
AERONÁUTICA.**

Orientador: Prof. Dr. Daniel Dall'Onder dos
Santos

UBERLÂNDIA – MG

2018

MATEUS LOPES E FREITAS

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM SECADOR DE TABACO PARA REDUÇÃO
DE CONSUMO DE GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO**

Projeto de conclusão de curso
APROVADO pelo Colegiado do Curso de
Graduação em Engenharia Aeronáutica da
Faculdade de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Daniel Dall'Onder dos Santos
Universidade Federal de Uberlândia

Profa. Dra. Ana Marta de Souza
Universidade Federal de Uberlândia

Engenheiro Vitor Taha Sant'Ana
Universidade Federal de Uberlândia

UBERLÂNDIA – MG

2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Allisson e Aroânia, pelo imensurável apoio durante toda a minha vida, principalmente nos anos de faculdade. Sem eles, nada do que conquisei seria possível. Agradeço também à minha irmã Melina por todo carinho e por estar sempre ao meu lado.

Ao meu professor orientador Prof. Dr Daniel Dall'Onder dos Santos, agradeço pelo apoio constante, pela amizade e pela oportunidade oferecida.

Aos meus companheiros de trabalho, agradeço grandemente pela oportunidade e pela confiança investida no meu trabalho para que juntos pudéssemos realizar esse estudo.

Agradeço aos meus amigos de faculdade, pessoas que estarão sempre nos meus pensamentos, por todo apoio e companheirismo.

Aos meus professores, agradeço por terem contribuído muito para o meu crescimento técnico e meu amadurecimento, tanto pessoal, quanto profissional.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica.

FREITAS, MATEUS LOPES. **Estudo experimental de um secador de tabaco para redução de consumo de gás liquefeito de petróleo.** Projeto de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, 2018, 45p.

RESUMO

Esse trabalho tem como objetivo reduzir os custos com gás liquefeito de petróleo em um secador de tabaco. O secador é composto por três trocadores de calor e uma câmara de combustão que operam para garantir a rápida secagem do tabaco. A umidade de entrada do tabaco no secador tem influência direta em dois importantes parâmetros para a indústria, que são o consumo energético do equipamento e o parâmetro de qualidade denominado poder de enchimento. Acreditava-se, baseado em estudo feito pela indústria, que quão maior fosse a umidade de entrada no secador, maior seria o poder de enchimento do produto. Contudo, se a umidade na entrada é alta, o consumo energético aumenta porque parte do fluido que retira água do tabaco é redirecionado para a câmara de combustão, aumentando a ineficiência da mesma. Esse trabalho foi realizado para contestar o resultado do estudo feito pela indústria e verificar se a umidade na entrada do secador teria influência no poder de enchimento do tabaco com interesse no benefício que a alteração da umidade ocasionaria, que é a redução expressiva no consumo de gás liquefeito de petróleo do equipamento. Com a conclusão do projeto, o consumo do gás foi reduzido em 33% com uma pequena variação do poder de enchimento, que se manteve no patamar requerido pela indústria.

Palavras Chave: *Secador de tabaco, Qualidade, Consumo energético.*

FREITAS,M.L.. **Experimental study on a tobacco dryer to reduce the liquefied petroleum gas consumption.** Graduation Project, Federal University of Uberlandia, 2018, 45p.

ABSTRACT

This work aims to reduce the consumption of liquefied petroleum gas in a tobacco dryer. The dryer is composed of three heat exchangers and a combustion chamber that operate in thermodynamic equilibrium to ensure the fast drying of the tobacco. The input humidity of the tobacco in the dryer has a direct influence on two important parameters for the industry: the energetic consumption of the equipment and the parameter of quality named filling power. Previous studies done by the industry showed that the greater the moisture entering the dryer, the greater the filling power of the product. However, if inlet moisture is high, the energy consumption increases because part of the fluid that draws water from the tobacco is redirected to the combustion chamber, increasing the burning efficiency. This work was carried out to contest the previous study results, that is, if the humidity at the entrance of the dryer would not have influence on the tobacco filling power. Therefore, a change of humidity would cause an expressive reduction in gas consumption liquefied petroleum from the equipment. At the end of the project, the gas consumption was reduced in 33% with a small change on the filling power of the product, but within the limits established by the industry.

Keywords: *Tobacco Dryer, Quality, Energetic consumption.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de propaganda de cigarro (Fonte: https://br.pinterest.com)	2
Figura 2 - Esquema do secador analisado (Fonte: Indústria de tabaco)	8
Figura 3 - Câmara de combustão e suas entradas (Fonte: Indústria de tabaco).....	9
Figura 4 - Ciclone e coluna de secagem (Fonte: Indústria de tabaco).....	10
Figura 5 - Trocadores de calor (Fonte: Indústria de tabaco)	11
Figura 6 – Sistema térmico do secador (Fonte: Indústria de tabaco)	12
Figura 7 - Esquema do secador com os fluidos envolvidos na secagem do tabaco	13
Figura 8 - Consumo mensal de GLP até o início do projeto	14
Figura 9 - Volume de controle do trocador de calor principal	18
Figura 10 - Histograma dos resultados de poder de enchimento do projeto	23
Figura 11 - Função densidade de probabilidade com umidade de entrada de 28%.....	24
Figura 12 - Função densidade de probabilidade com umidade de entrada de 26%.....	25
Figura 13 - Função densidade de probabilidade com umidade de entrada de 24%.....	25
Figura 14 - Função densidade de probabilidade com umidade de entrada de 22,5%.....	26
Figura 15 - Funções densidade de probabilidade com diferentes umidades de entrada no secador	26
Figura 16 - Evolução do consumo de gás durante o período de testes	27
Figura 17 - Diminuição do consumo de gás até novembro de 2018	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros utilizados na equação.....	21
Tabela 2 - Média e desvio padrão por modo de secagem.....	26

LISTA DE SÍMBOLOS

GLP	Gás liquefeito de petróleo
BPF	Baixo ponto de fluidez
ADM 22,5	Modo de secagem do secador em que a umidade de entrada é 22,5%
ADM 24	Modo de secagem do secador em que a umidade de entrada é 24%
ADM 26	Modo de secagem do secador em que a umidade de entrada é 26%
ADM 28	Modo de secagem do secador em que a umidade de entrada é 28%
\dot{m}_{fp}	Vazão mássica do fluido de processo
\dot{m}_{fq}	Vazão mássica do fluido de queima
$T_{e,fp}$	Temperatura de entrada do fluido de processo
$T_{s,fp}$	Temperatura de saída do fluido de processo
$T_{s,fq}$	Temperatura de saída do fluido de queima
$T_{e,fq}$	Temperatura de entrada do fluido de queima
$\frac{dE_{v.c.}}{dt}$	Taxa da variação da energia no volume de controle
$\dot{Q}_{v.c.}$	Transferência de calor no volume de controle
$\dot{W}_{v.c.}$	Trabalho realizado pelo sistema no volume de controle
\dot{m}_e	Vazão mássica na entrada do trocador de calor
\dot{m}_s	Vazão mássica na saída do trocador de calor
h_e	Entalpia de entrada no trocador de calor
h_s	Entalpia de saída no trocador de calor

V_e	Velocidade de entrada no trocador de calor
V_s	Velocidade de saída do trocador de calor
gZ_e	Energia potencial na entrada do trocador de calor
gZ_s	Energia potencial na saída do trocador de calor
\dot{Q}_{fq}	Fluxo térmico do fluido de queima
\dot{Q}_{fp}	Fluxo térmico do fluido de processo
h_{fqs}	Entalpia do fluido de queima de saída no trocador de calor
h_{fps}	Entalpia do fluido de processo de saída no trocador de calor
h_{fpe}	Entalpia do fluido de processo de entrada no trocador de calor
h_{fqe}	Entalpia do fluido de queima de entrada no trocador de calor

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE SÍMBOLOS	ix
CAPÍTULO I.....	1
1.1 O mercado de cigarro	1
1.2 Descrição do trabalho	3
CAPÍTULO II.....	4
CAPÍTULO III	7
3.1 O secador	7
3.2 Histórico de consumo	14
3.3 Oportunidades de otimização	14
CAPÍTULO IV	16
4.1 Relação entre poder de enchimento e umidade de entrada no secador	16
4.2 Divisão do projeto	17
4.3 Primeira etapa – Previsão de benefício energético.....	17
4.4 Segunda etapa - Testes	22
4.5 Terceira etapa – Análise de resultados	23
4.5 Ganhos do projeto.....	27
CAPÍTULO V	30
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 O mercado de cigarro

Ao comparar o mercado de cigarro da atualidade com os anos passados, percebe-se uma redução drástica no consumo do produto. Essa indústria, que já faturou bilhões de dólares, hoje, vê suas vendas caindo com expressividade. Segundo dados do IBGE, em 1989 a parcela da população de fumantes no Brasil era 33%, e que, em 2009, esse número já havia sido reduzido para 17%.

Na década de 90, o mercado tabagista associava o consumo do cigarro a um estilo de vida moderno e com glamour. As propagandas de cigarro marcavam presença em todos os meios de comunicação e estavam associadas à comportamentos como o afastamento do conservadorismo e à independência do consumidor. Logo após à revolução industrial, em que os meios de comunicação ganharam força, o cigarro surgiu como um produto fácil de se produzir e bastante rentável para as grandes indústrias, e por isso, esses foram os pioneiros na indústria da propaganda e das relações públicas. Um exemplo dessas propagandas é ilustrado na Fig. 1, em que se pode perceber claramente a associação do consumo desse produto à liberdade do consumidor.

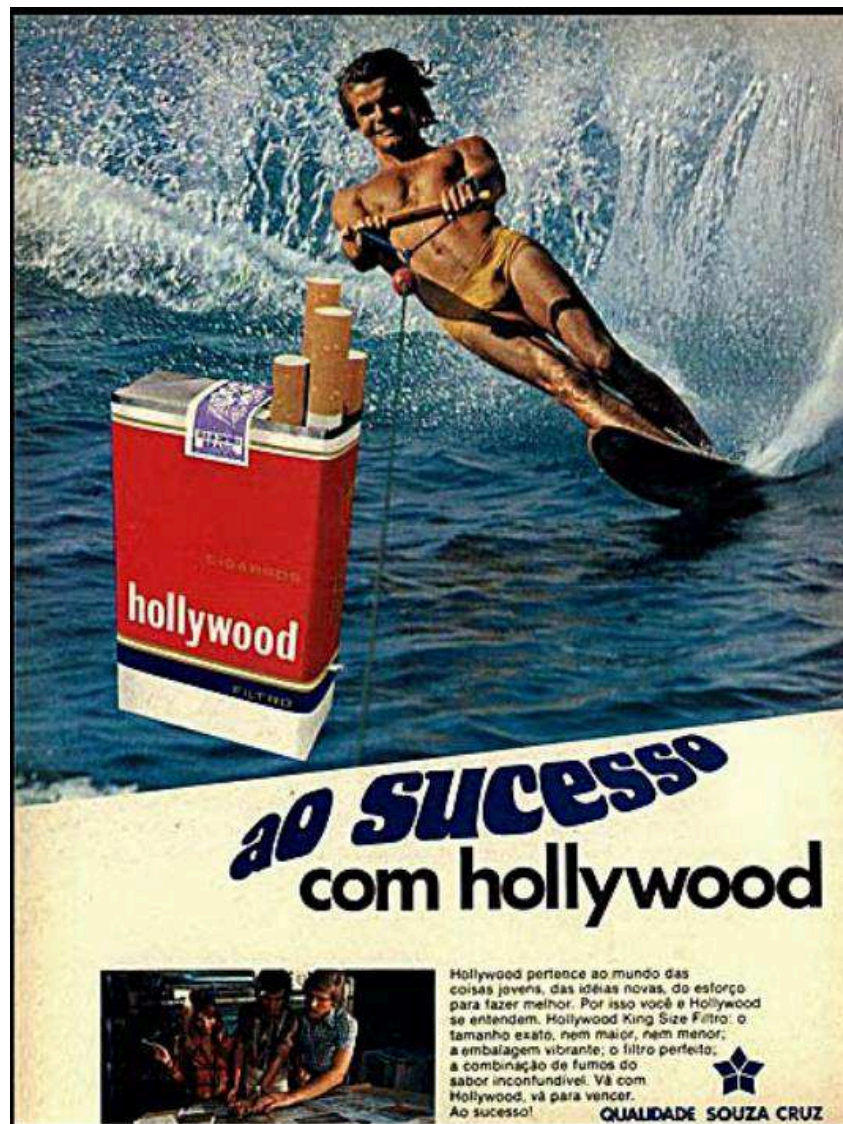


Figura 1 - Exemplo de propaganda de cigarro (Fonte: <https://br.pinterest.com>)

Durante o período em que o uso do cigarro era extremamente comum entre as diversas classes sociais, os estudos em relação aos malefícios desse produto se intensificaram e impactaram drasticamente o mercado. Pesquisas científicas mostraram que a relação entre doenças como enfisema pulmonar e câncer e o consumo do tabaco era forte e, por meio de restrições ao fumo em locais coletivos, da regulamentação do conteúdo e da divulgação de informações sobre o tabaco, o consumo do cigarro foi caindo com velocidade. Por fim, o aumento dos impostos diminuiu ainda mais a atuação da indústria, assim como provocou o aumento da competitividade do produto fabricado no Brasil e o contrabando.

Diante desse cenário, a indústria do tabaco, que tinha foco em volumes de produção sem grandes preocupações com produtividade e consumo de energéticos, teve que criar condições para que esses dois grandes pilares de uma fábrica sustentável pudessem amadurecer. Desde o início dos anos 2000, a preocupação da indústria tabagista passou a ser diminuir custos e otimizar processos. Atualmente, altos níveis de produtividade foram atingidos graças a metodologias de gestão criadas nesse tempo. Por esses motivos, o foco em redução de consumo de energéticos para produzir o cigarro tornou-se a prioridade das fábricas.

O secador de tabaco estudado nesse trabalho é um equipamento que consome grandes volumes de gás liquefeito de petróleo, item que representa grande parte dos energéticos consumidos pela fábrica, e até então, havia sido pouco explorado em termos de parâmetros de funcionamento. O motivo pelo qual o secador havia sido pouco explorado, é porque acreditava-se que ele era o responsável por atribuir ao tabaco um importante parâmetro de qualidade chamado poder de enchimento. Portanto, o objetivo do trabalho foi reduzir o volume de GLP consumido por meio da alteração de parâmetros do secador garantindo que não houvesse impacto em nenhum parâmetro de qualidade.

1.2 Descrição do trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. O primeiro deles é a introdução, que tem por objetivo explicar o porquê de as indústrias estarem investindo em otimização de processos. O segundo constitui-se da revisão bibliográfica, que tem por objetivo mostrar outros trabalhos relacionados à otimização de secadores com o intuito da redução de consumo energético. O capítulo três apresenta o secador estudado nesse trabalho e mostra em detalhes seu funcionamento e componentes. O quarto capítulo descreve as etapas do projeto, mostra todos os estudos feitos e apresenta os resultados obtidos. Por fim, tem-se a conclusão do trabalho ilustrando os ganhos obtidos com a otimização do secador.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A otimização de secadores, que vem sendo foco de trabalho de diversas indústrias, é de grande importância pois o processo de secagem consome altos valores energéticos além de ser responsável pela emissão de gases nocivos ao meio ambiente. Por esses dois motivos, diversos trabalhos vêm sendo desenvolvidos para reduzir custos de plantas de secagem e para reduzir a emissão de componentes nocivos à atmosfera.

Seixas (2003) desenvolveu um trabalho focado na redução de emissões de gases através da redução do consumo de combustível fóssil, o óleo BPF. Para tal, foi desenvolvida uma análise energética e exergetica por meio de uma análise termodinâmica utilizando-se da primeira lei e a segunda lei da termodinâmica. A utilização da primeira lei da termodinâmica teve como objetivo encontrar os principais pontos de perdas térmicas no secador, enquanto a segunda lei possibilitou verificar onde aconteciam as maiores irreversibilidades. Para a realização dos balanços de massa e energia, o autor utilizou o programa EES (*Engineering Equation Solver*), programa que também será utilizado neste trabalho para análise termodinâmica do secador. Para realizar os cálculos, o programa utiliza propriedades termodinâmicas de acordo com equações clássicas de balanço de massa e energia. Como resultado de seu trabalho, constatou-se que o aquecedor do equipamento apresentou a maior irreversibilidade e que uma redução na vazão mássica de vapor em 94,29% resultaria em uma diminuição de vazão de combustível na caldeira em 94,30%, considerando que a produção de vapor da caldeira seria para uso exclusivo do aquecimento do ar no aquecedor.

Leonel (2014) contribuiu na aplicação de ferramentas de análise para o desenvolvimento de processos de secagem mais eficientes. Sua análise foi feita considerando secadores rotativos de aquecimento direto através de um modelo matemático e testes experimentais considerando

alimentação concorrente e contracorrente, analisando-se as diferenças energéticas entre as duas alimentações. Seu estudo avalia a influência de variáveis importantes do processo de secagem na qualidade do produto, o que se relaciona com o trabalho aqui apresentado, uma vez que a umidade do tabaco na saída do secador possui relação direta com as variáveis termodinâmicas do processo de secagem. Como conclusão de seu trabalho, constatou-se que o modelo matemático é capaz de prever valores de saída para temperatura do ar e umidade do produto ao alterar valores de entrada como temperatura do ar, umidade inicial e vazão de produto.

Mandolesi (2013) desenvolveu uma metodologia para a otimização da eficiência energética em sistemas de secagem com o intuito de viabilizar econômica e tecnicamente o aproveitamento de resíduos agroindustriais. Essa metodologia permite analisar todas as etapas do processo de secagem com o intuito de obter um produto com a qualidade demandada pelo mercado. No caso do mercado tabagista, busca-se altos níveis de qualidade para o produto, uma vez que os consumidores exigem altíssima qualidade tendo em vista o potencial de malefícios à saúde associados ao consumo do produto. Para comprovar a eficácia do método desenvolvido, aplicou-se a metodologia desenvolvida em um estudo de caso visando a desidratação de cascas de banana. Na conclusão de seu trabalho, constatou-se que a metodologia proposta no trabalho contribuiu para a redução do consumo de energia térmica por meio da redução de 93,8% do consumo de vapor no processo de secagem de cascas de banana.

Oliveira (2014) desenvolveu um trabalho para avaliar parâmetros energéticos e econômicos de possíveis secadores para a secagem de grãos. Foram feitos estudos conceituais e sobre princípios da secagem levando em consideração o fato que manter as qualidades físicas, químicas, e biológicas do grão após a secagem é o maior desafio. Em seu trabalho, constatou-se que o sistema de secagem com caldeira aquatubular é o mais atrativo, já que possui maior estabilidade e controle de temperatura, além permitir modular a vazão de ar. Esses fatores em conjunto resultam em economia de combustível e de energia elétrica. Como resultado do trabalho, a caldeira aquatubular oferece uma economia de 40% de consumo de lenha.

Abitante (2007) desenvolveu um trabalho para melhorar a qualidade da erva mate na saída de um secador, uma vez que o mercado atual apontava que a exportação era a única solução efetiva para a expansão do setor ervateiro. O aumento da qualidade se deu através de um modelo fenomenológico desenvolvido para reproduzir a cinética de secagem em um secador contínuo de camada delgada em regime transiente. A expressão matemática envolvida no projeto foi obtida ao aplicar um balanço de massa para a água na fase sólida ao passar pela câmara de

secagem. Para resolver o modelo transiente aplicou-se o método numérico das linhas com uma forma implícita de diferenças finitas. Aplicou-se ainda o método de otimização simplex para os parâmetros do controlador do PID com o intuito de diminuir o desvio padrão da umidade das folhas na descarga do secador, que deve estar entre 2,4 a 3,4%.

Meili (2009) realizou uma análise fluidodinâmica de leitos fluidizados e vibro fluidizados que operam com partículas de diâmetro inferior a 1 mm e analisou também a secagem fluidodinâmica do leito úmido com água e três diferentes pastas durante o período transiente. O objetivo do trabalho era entender a influência da aplicação da vibração em leitos de secagem e aumentar o conhecimento da comunidade científica acerca de um tema controverso, o adimensional de vibração. Como resultados do trabalho, observou-se que a vibração aliada à ação pneumática do leito fluidizado proporciona condições mais favoráveis para a secagem, e pode-se concluir que o adimensional de vibração deve ser sempre informado com a amplitude de vibração ou a frequência de vibração.

Larrosa (2012) desenvolveu um estudo para analisar a operação de secagem de pasta de vegetais em leito de jorro priorizando a manutenção das propriedades funcionais dos componentes do produto final. Foi utilizada uma programação linear para formular a pasta de vegetais, que se mostrou adequada para maximizar a atividade antioxidante por meio do método de sequestro do radical estável DPPH. Durante o trabalho, não foram verificados colapsos no leito ao secar o produto e estabeleceu-se que a condição de operação de vazão de alimentação de 100 mL h⁻¹ e temperatura de 100°C apresentava menor retenção de material no leito.

Ainda sobre o tema de secagem de pastas em leitos de jorro, Fernandes (2005) construiu um trabalho para analisar a eficiência energética da secagem de pastas nesses leitos e para estabelecer condições ótimas de operação do ponto de vista de consumo energético. Para quantificar a eficiência energética, a autora estabeleceu a razão entre a energia necessária para movimentar e aquecer o ar. As suas simulações mostraram que a eficiência é favorecida pelo aumento de vazão de pasta e pela diminuição das potências de aquecimento e do soprador. Por fim, observou-se que a eficiência energética do secador não é alterada com o aumento na temperatura de entrada da pasta no secador.

CAPÍTULO III

SECADOR E OPORTUNIDADE DE OTIMIZAÇÃO

3.1 O secador

O secador de tabaco estudado é um grande sistema composto por diversos subsistemas que possuem diferentes funções, mas com o mesmo objetivo de manter a umidade do tabaco na saída do equipamento de acordo com a receita do produto. Cada variável de controle é fundamental, já que a finalidade da secagem é produzir um nível de umidade do produto tão constante quanto possível na saída do secador, e para que isso aconteça, o volume de tabaco que entra no equipamento deve ser constante. O produto é secado durante sete segundos, tempo de permanência do produto dentro do equipamento, e deve sair com o valor de umidade que consta na receita do produto que será produzido. A manutenção das temperaturas dentro do equipamento é feita por um sistema térmico composto por três trocadores de calor, uma câmara de combustão e um simulador de carga. Um desenho do secador com os componentes mencionados é ilustrado na Fig. 2.

O equipamento promove a secagem do tabaco por meio da transferência de calor de três diferentes fluidos. Esses fluidos são direcionados em diferentes vazões mássicas para dentro dos trocadores de calor. Essas vazões podem variar conforme a necessidade de calor em cada fluido, já que cada um possui uma função diferente e é controlado por um sistema de controle regulado pelo fabricante.

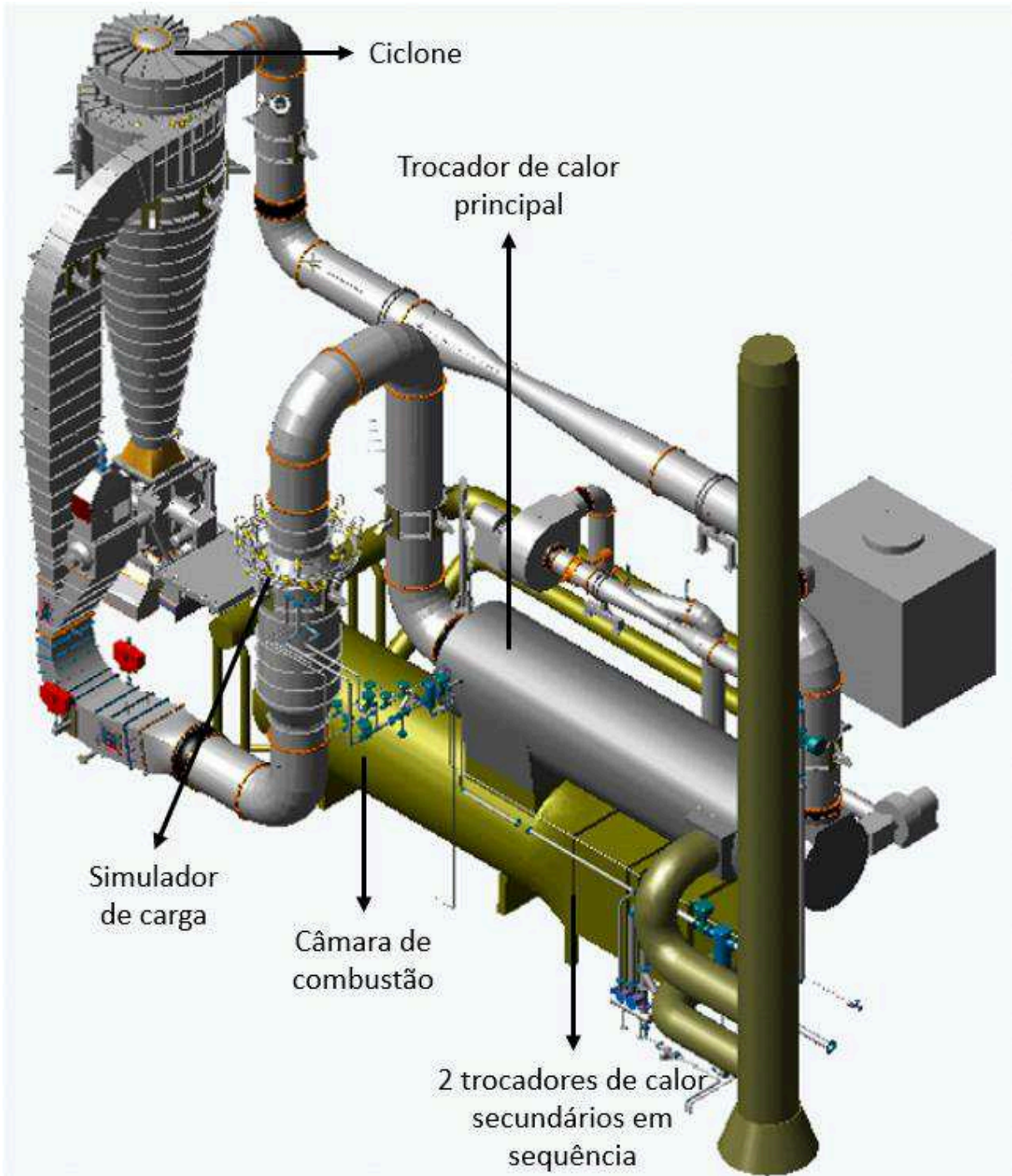


Figura 2 - Esquema do secador analisado (Fonte: Indústria de tabaco)

Os fluidos envolvidos no processo de secagem são:

- Fluido de queima: esse é gerado na câmara de combustão por meio da mistura de três componentes, ar em temperatura ambiente insuflado para dentro da câmara de combustão por meio de um sugador para dar o formato da chama, o fluido de purga, que será explicado em seguida e ar do meio ambiente aquecido após passar por um trocador de calor secundário. O fluido de queima é responsável por promover o aquecimento de todos os outros fluidos que passam pelos trocadores de calor. Após passar pelos trocadores de calor, esse fluido vai para a chaminé do secador. A câmara de combustão é ilustrada na Fig. 3.

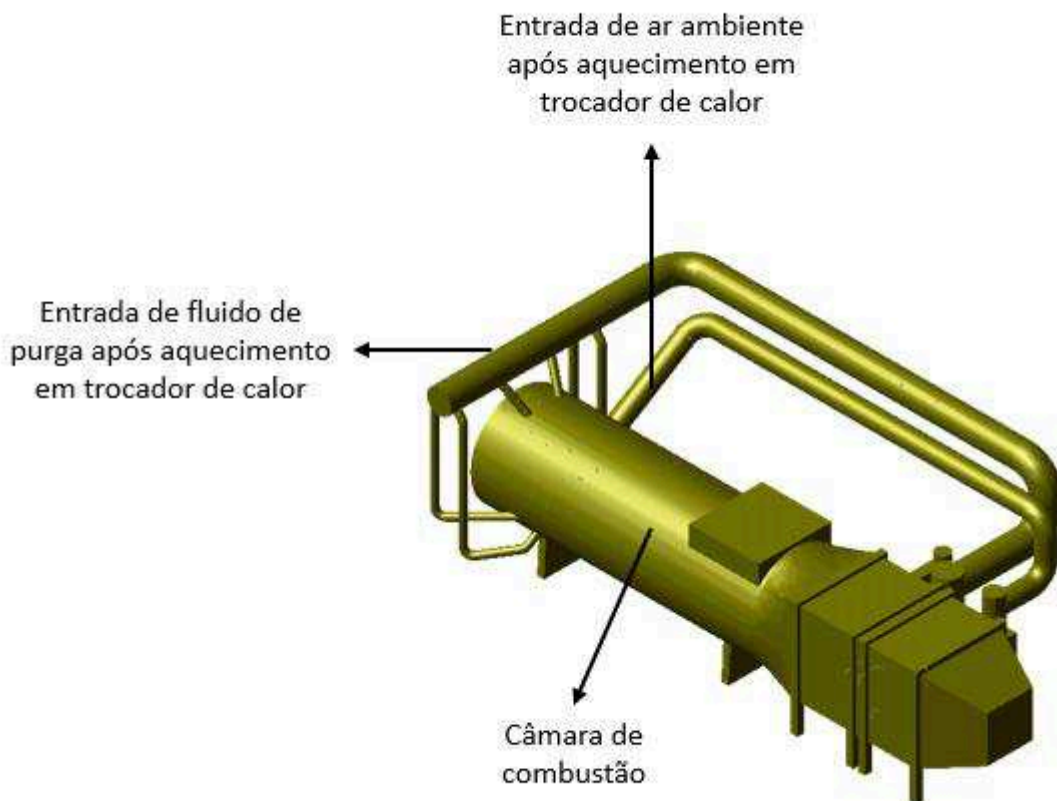


Figura 3 - Câmara de combustão e suas entradas (Fonte: Indústria de tabaco)

- Fluido de processo: esse fluido é o responsável pela secagem do tabaco. Seu ciclo começa no trocador de calor principal, em que é aquecido pelo fluido de queima e segue para a secagem do tabaco. Ao passar pelo trocador de calor principal, a vazão mássica desse

fluido é aproximadamente 21840 kg/h. Após ser aquecido, o fluido de processo passa pelo simulador de carga, em que recebe uma quantidade de água atomizada com vapor superaquecido. Esse processo aumenta a vazão mássica do fluido para 31200 kg/h, valor estabelecido pelo fabricante do equipamento. Esse valor de vazão mássica é de extrema importância para o processo, pois o tabaco, que é secado em uma coluna vertical, se junta com o fluido de processo na região mais baixa da coluna e é secado durante a subida até chegar no ciclone, onde é feita a separação dos dois e o fluido de processo é redirecionado para o trocador de calor principal. Segundo o manual do equipamento, para cada unidade de vazão mássica de produto, o fluido de processo deve ter três vezes essa unidade para proporcionar a força necessária para que o tabaco possa percorrer o caminho contrário às forças que contrapõem seu movimento na coluna de secagem. O ciclone e a coluna de secagem são ilustrados na Fig. 4, e os trocadores de calor são ilustrados na Fig. 5.

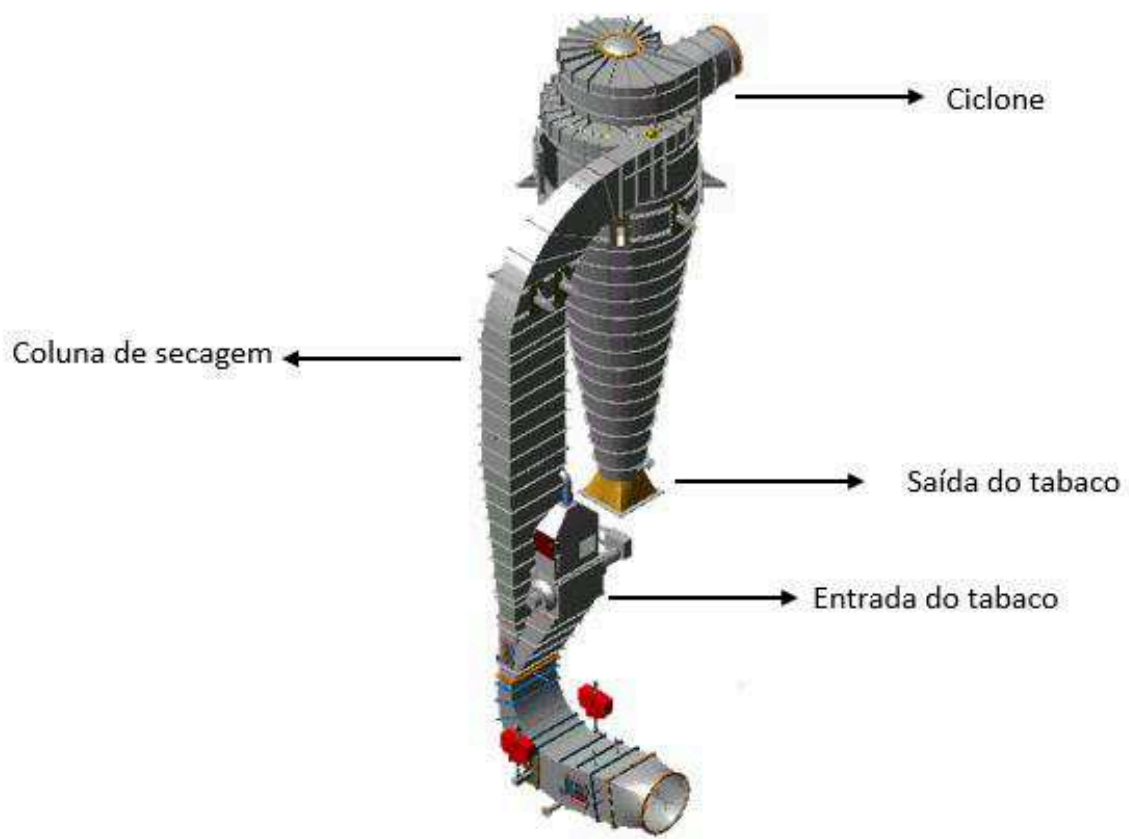


Figura 4 - Ciclone e coluna de secagem (Fonte: Indústria de tabaco)

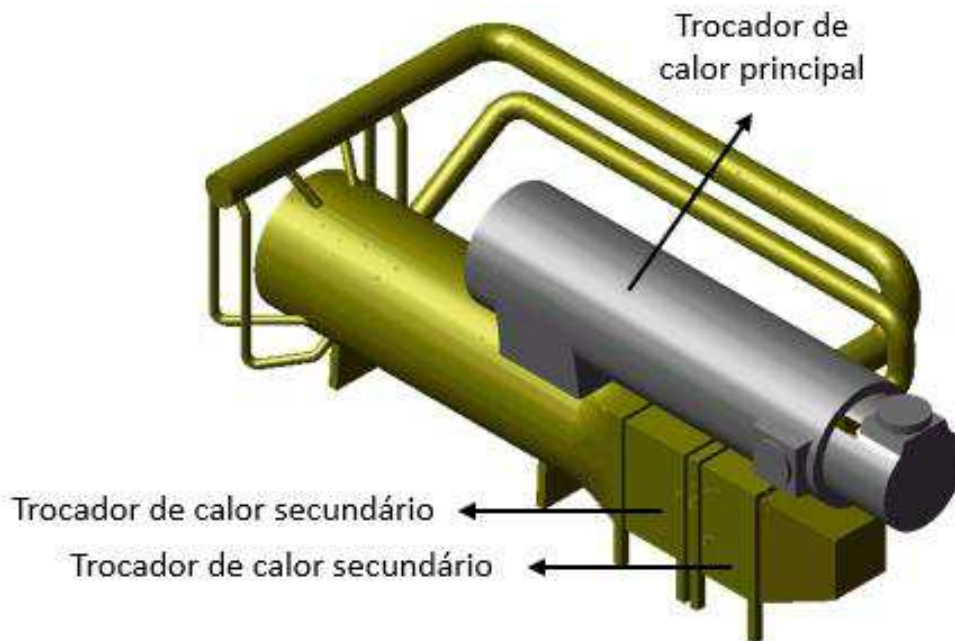


Figura 5 - Trocadores de calor (Fonte: Indústria de tabaco)

- Fluido de purga: durante o caminho entre o ciclone e o trocador de calor principal, um terço do fluido de processo é retirado, tornando-se o fluido de purga. Essa parte retirada do fluido de processo é necessária porque durante o processo de secagem, algum particulado sólido de tabaco fica suspenso e não é separado no ciclone. Esse particulado sólido não pode ser rejeitado para a atmosfera, por esse motivo, o fluido de purga é redirecionado para a câmara de combustão, onde esse particulado é queimado com a combustão. A vazão mássica do fluido de purga é um terço da vazão mássica do fluido de processo, aproximadamente 9360 kg/h.

Uma vez conhecidos os fluidos envolvidos no processo de secagem, deve-se entender como eles se relacionam com os trocadores de calor. Para isso, deve-se observar a Fig. 6. Nessa figura está representado todo o sistema térmico do processo, em que estão destacados os trocadores de calor e a câmara de combustão.

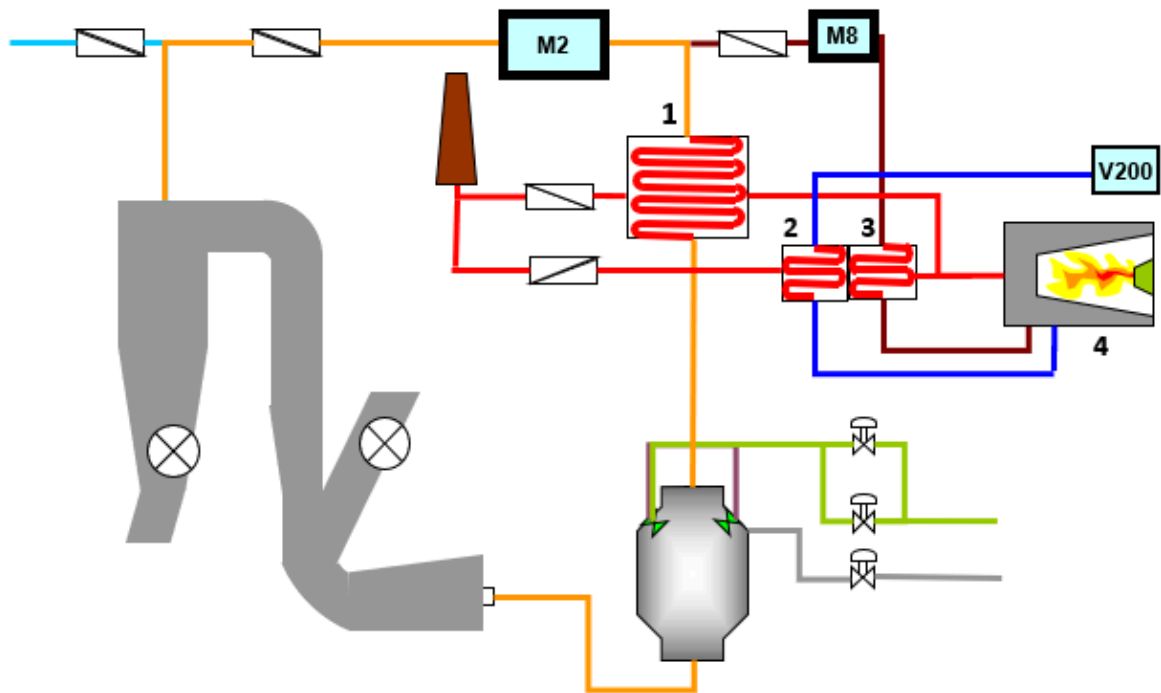


Figura 6 – Sistema térmico do secador (Fonte: Indústria de tabaco)

O número 1 da Fig. 6 representa o trocador de calor principal. Esse trocador é responsável pelo aquecimento do fluido de processo, que troca calor com o fluido de queima oriundo da câmara de combustão. Após esse trocador, o fluido de processo aquecido segue para o simulador de carga e o fluido de queima é direcionado para a chaminé.

É importante mencionar que o fluido de queima, após sair do queimador, tem seu fluxo mássico dividido em duas partes. Essas partes não são necessariamente iguais, inclusive, o sistema de controle do secador trabalha para garantir que 60% do fluido de queima vá para o trocador de calor principal e os outros 40% sejam direcionados para os trocadores de calor secundários. A divisão do fluxo é feita por dois flaps, que são modulados pelo sistema de controle de umidade do secador de acordo com a necessidade de calor. Por exemplo, se existe a necessidade de secar mais o produto, os flaps trabalham para garantir que mais de 60% do fluido de queima vá para o trocador de calor principal, o que aquece mais, por consequência, o fluido de processo utilizado para secar o produto.

Já os números 2 e 3 da Fig. 6 representam os trocadores de calor secundários. O trocador número três recebe o fluido de queima com a temperatura da câmara de combustão e aquece o

fluido de purga antes de retornar à câmara. Como mencionado anteriormente, o fluido de purga nada mais é do que o fluido de processo após a secagem com uma vazão mássica menor, portanto esse produto possui grandes quantidades de água. Esse fluido passa pelo trocador para que, quando entrar na câmara de combustão, sua temperatura seja a mais alta possível, o que permite que menos gás seja consumido para geração de calor. O trocador de calor número dois tem exatamente a mesma função, já que aquece o ar que é sugado do ambiente externo para dentro da câmara de combustão. Durante o trabalho, constatou-se que a temperatura média na região do secador é de 30°C, portanto esse é aquecido para entrar na câmara de combustão com uma temperatura consideravelmente maior. O GLP é o combustível consumido para garantir a temperatura da câmara de combustão que, antes do projeto, era de 630°C.

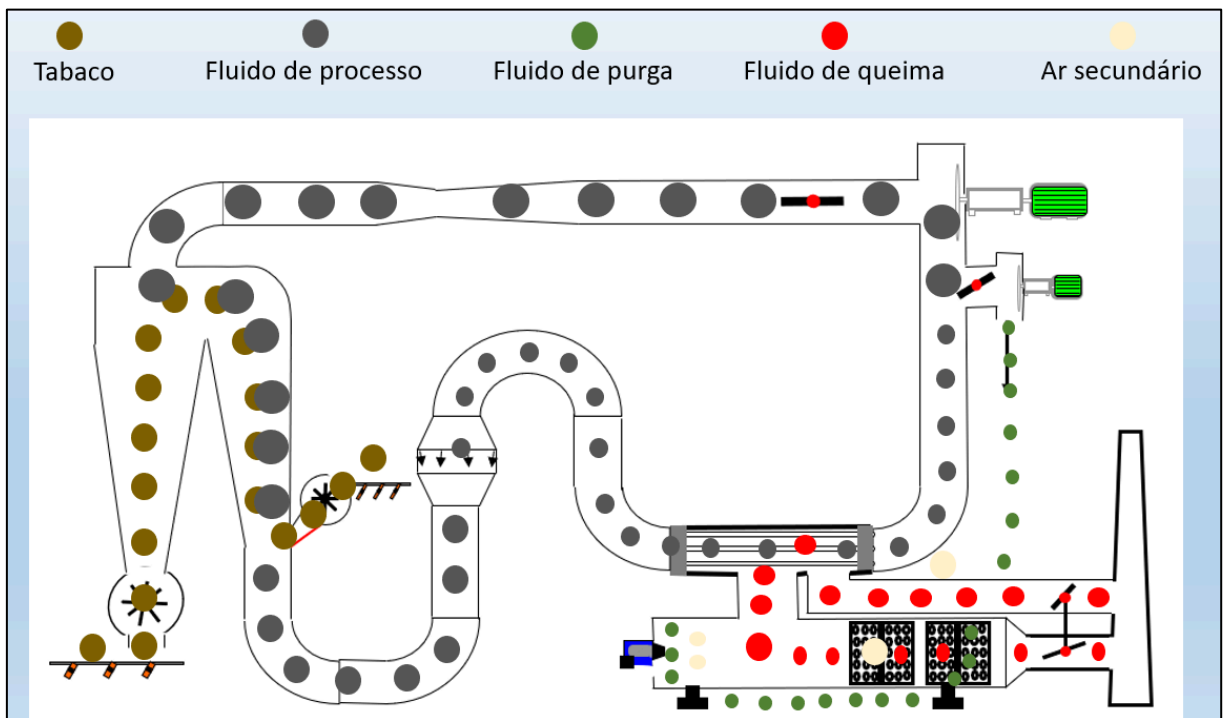


Figura 7 - Esquema do secador com os fluidos envolvidos na secagem do tabaco

A Figura 7 resume como os fluidos do secador se relacionam para garantir a secagem do tabaco, que teve sua entrada variada de 28% até 22,5% durante o projeto para 14% na saída do secador. Pode-se perceber que os círculos cinza, que representam o fluido de processo, mudam de tamanho em alguns pontos. Essa variação significa alteração de vazão mássica. Ao passar pela coluna de secagem, o fluido retira água do tabaco, aumentando sua vazão mássica, logo em seguida perde 30% de sua vazão mássica para o fluido de purga. Depois, passa pelo

trocador de calor principal e segue para o simulador de carga, que aumenta sua vazão mássica com vapor e água.

3.2 Histórico de consumo

Até o início desse trabalho (Setembro de 2017), o valor gasto com gás liquefeito de petróleo representava cerca de 20% da conta de energéticos paga pela área de processamento de tabaco, chamada PMD (*Primary Manufacturing Department*). Por ano, eram gastos cerca de R\$ 2.200.000,00 com esse energético. A Fig. 8 mostra a média de consumo mensal de GLP em metros cúbicos por tonelada de produto que passava pelo secador.

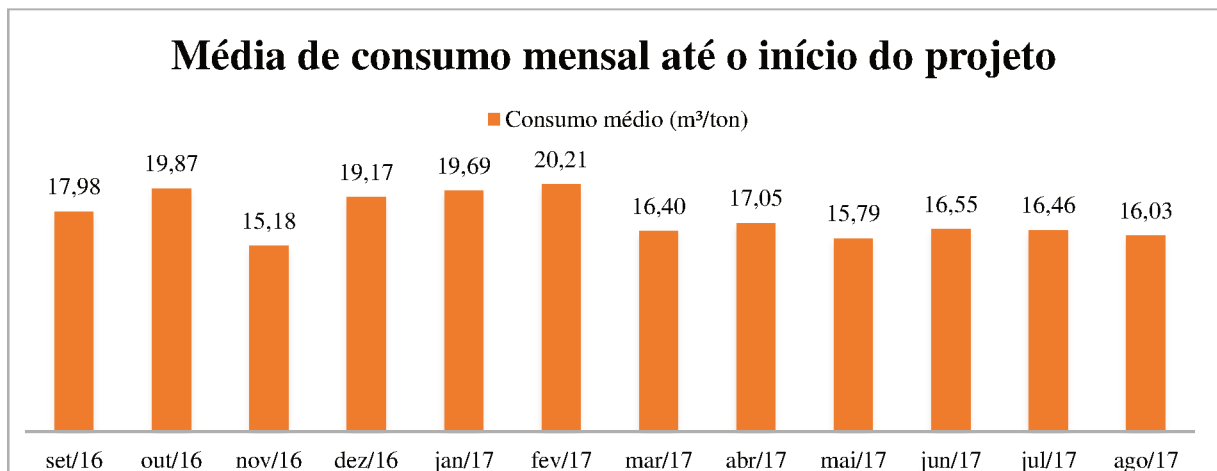


Figura 8 - Consumo mensal de GLP até o início do projeto

3.3 Oportunidades de otimização

Ao entender cada caminho dos fluidos envolvidos no processo de secagem e como eles se relacionam nos trocadores de calor, consegue-se evidenciar os porquês de esse secador ser um grande consumidor de gás liquefeito de petróleo. São dois os principais pontos que foram identificados como oportunidade de melhoria e que foram otimizados com o projeto: a umidade do produto na entrada da coluna de secagem e a temperatura da câmara de combustão.

A umidade do produto na entrada do secador tem influência direta na quantidade de água retirada durante o processo de secagem, já que na saída do secador a umidade do tabaco deve ser sempre a mesma e o tempo de residência do produto na coluna de secagem é de 7 segundos independente da umidade. A quantidade de água retirada está diretamente relacionada à temperatura do fluido de processo. Quanto mais baixa a umidade do tabaco na entrada, menor deve ser a temperatura do fluido de processo, pois uma menor quantidade de água deve ser retirada do tabaco no mesmo tempo. A temperatura do fluido de processo é garantida através do processo de troca de calor no trocador de calor principal. O fluido de queima, responsável pela manutenção da temperatura do fluido de processo, vem da câmara de combustão, portanto, se a temperatura do fluido de processo pode ser menor, a temperatura da câmara de combustão também pode ser menor.

Além disso, se o tabaco entra no secador com menos umidade, a quantidade de água absorvida pelo fluido de processo diminui, e conseqüentemente, a umidade no fluido de purga também diminui. Como esse fluido retorna para a câmara de combustão, a diminuição de sua umidade é de grande interesse para a otimização do processo, já que menos umidade dentro da câmara de combustão aumentaria a quantidade de calor disponível para o aquecimento dos fluidos de processo, purga, e do ar externo que é aquecido por um trocador de calor secundário antes de entrar na câmara de combustão. Portanto, para manter a temperatura na câmara de combustão, uma vazão menor de GLP poderia ser utilizada para fornecer a mesma quantidade de calor necessária para aquecer os outros fluidos envolvidos no processo de secagem.

CAPÍTULO IV

O PROJETO

4.1 Relação entre poder de enchimento e umidade de entrada no secador

Conforme mencionado no item 1.1, existe uma relação entre o parâmetro de qualidade chamado poder de enchimento e a umidade do tabaco na entrada do secador. De modo geral, o poder de enchimento do tabaco mede o volume que uma unidade de massa do produto consegue ocupar. A unidade desse parâmetro de qualidade é $\text{cm}^3/10\text{g}$ e o valor considerado ideal para o tabaco é de 57, com um desvio aceitável de 2.

Estudos realizados no passado pela indústria indicavam que quanto maior a umidade do tabaco na entrada do secador, maior seria o poder de enchimento. Contudo, quanto maior a umidade do produto, mais calor era demandado do secador e mais GLP era consumido. Em 2002, foi feito um estudo interno, e constatou-se que o produto com umidade de 28% trazia o maior benefício para o negócio levando em consideração o consumo de energético do secador e a economia gerada a partir de altos níveis de poder de enchimento.

Com o passar dos anos, a qualidade do produto mudou, pois o tabaco é um produto proveniente de produção agrícola, que está submetida a condições climáticas diferentes em cada ano e que recebe forte investimentos na otimização genética de sementes. Por consequência, as características do produto mudaram, e viu-se necessário realizar novamente o estudo para testar se a umidade de 28% ainda trazia benefício ao negócio.

4.2 Divisão do projeto

O projeto durou oito meses e foi dividido em três principais etapas. A primeira etapa do projeto consistiu do estabelecimento de quais valores de umidade de entrada no secador seriam testados e dos cálculos realizados para estimar qual seria a temperatura da câmara de combustão. A segunda etapa consistiu da realização dos testes e a terceira, por fim, da consolidação e análise dos resultados.

4.3 Primeira etapa – Previsão de benefício energético

Conforme mencionado no item 3.1, a umidade de entrada no secador antes do projeto era 28%. Para que o produto atinja a umidade de secagem, existe um cilindro rotativo no processo responsável pela aplicação de água e vapor que promove o aumento da umidade do produto de 22,5% para os 28% desejados. A umidade de 22,5% é uma consequência do processo de corte do tabaco, que exige este valor para que o corte seja bem feito.

Levando em consideração esses fatores, estabeleceu-se que seriam feitos testes gradativos, desde 28% até 22,5% para avaliar a correlação da diminuição da umidade do produto com os valores de poder de enchimento obtidos em testes de laboratório. Caso os resultados mostrassem que não havia redução do parâmetro de qualidade, a umidade de 22,5% elimina a necessidade do cilindro rotativo antes do secador, o que traria ainda mais benefícios em consumo energético para o negócio.

Para estimar a temperatura da câmara de combustão, que pode ser aproximada à temperatura do fluido de queima na entrada do trocador de calor principal, construiu-se o volume de controle mostrado na Figura 9.

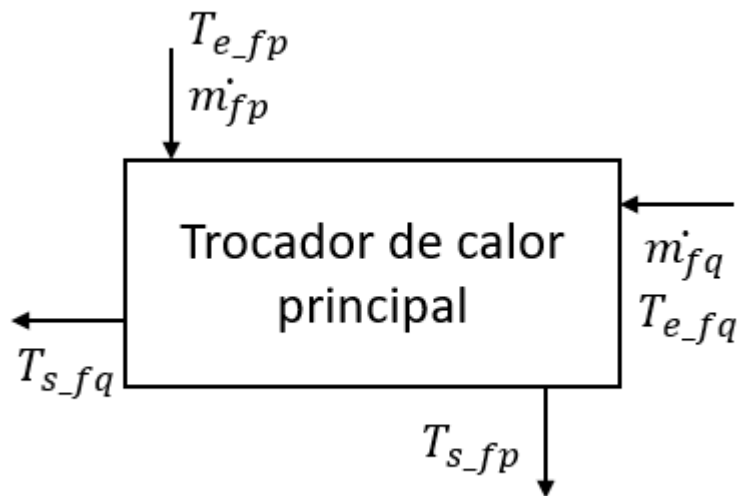


Figura 9 - Volume de controle do trocador de calor principal

Na Figura 8, as variáveis ilustradas são:

\dot{m}_{fp} : vazão mássica do fluido de processo

\dot{m}_{fq} : vazão mássica do fluido de queima

$T_{e_{fp}}$: temperatura de entrada do fluido de processo

$T_{s_{fp}}$: temperatura de saída do fluido de processo

$T_{e_{fq}}$: temperatura de entrada do fluido de queima

$T_{s_{fq}}$: temperatura de saída do fluido de queima

Para aplicar um balanço de energia no volume de controle descrito e estimar o valor da temperatura da câmara de combustão com 22,5% de umidade na entrada do secador é necessário fazer algumas considerações. Segundo Van Wylen (2003), como não há variação de massa e as taxas de calor que cruzam a superfície de controle não variam com o tempo nessa condição de operação do trocador, o regime do volume de controle é permanente. Além disso, segundo o autor, como o escoamento possui o número adimensional de Mach abaixo de 0,3, a variação da

massa específica dos gases pode ser desprezada. A partir dessas considerações e aplicando a primeira lei da termodinâmica ao volume de controle descrito, tem-se:

$$\frac{dE_{v.c.}}{dt} = \dot{Q}_{v.c.} - \dot{W}_{v.c.} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + gZ_e \right) + \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{1}{2} V_s^2 + gZ_s \right) \quad (4.1)$$

$\frac{dE_{v.c.}}{dt}$: taxa da variação da energia no volume de controle [kJ/s];

$\dot{Q}_{v.c.}$: transferência de calor no volume de controle [kJ/s];

$\dot{W}_{v.c.}$: trabalho realizado pelo sistema no volume de controle [kJ/s];

\dot{m}_e : vazão mássica na entrada do volume de controle [kg/s];

\dot{m}_s : vazão mássica na saída do volume de controle [kg/s];

h_e : entalpia de entrada no volume de controle [kJ/kg];

h_s : entalpia de saída no volume de controle [kJ/kg];

V_e : velocidade de entrada no volume de controle [m/s];

V_s : velocidade de saída no volume de controle [m/s];

gZ_e : energia potencial na entrada do volume de controle [kJ];

gZ_s : energia potencial na saída do volume de controle [kJ].

Segundo Çengel & Boles (2008), em um regime estacionário, a energia cinética e potencial do sistema não se altera e o trabalho realizado pelo sistema no volume de controle é igual a zero. Além disso, considera-se o volume de controle como adiabático, pois não há troca de calor entre o ambiente e o volume de controle, ou seja, sua fronteira está isolada. Todas as tubulações do equipamento possuem revestimento com material refratário para evitar a perda de calor durante o trajeto dos fluidos. Com todas essas considerações, têm-se que todo calor recebido pelo fluido de processo deve ser proveniente da perda de calor do fluido de queima:

$$\dot{Q}_{fq} = -\dot{Q}_{fp} \quad (4.2)$$

\dot{Q}_{fq} : fluxo térmico do fluido de queima [kW];

\dot{Q}_{fp} : fluxo térmico do fluido de processo [kW].

Segundo o autor, o fluxo térmico desses fluidos pode ser descrito com base na variação da entalpia de cada um:

$$\dot{Q}_{fq} = \dot{m}_{fq}(h_{fqs} - h_{fqe}) \quad (4.3)$$

$$\dot{Q}_{fp} = \dot{m}_{fp}(h_{fps} - h_{fpe}) \quad (4.4)$$

h_{fqs} : entalpia de entrada do fluido de queima no trocador de calor [kJ/kg];

h_{fqe} : entalpia de saída do fluido de queima no trocador de calor [kJ/kg];

h_{fps} : entalpia de entrada do fluido de processo no trocador de calor [kJ/kg];

h_{fpe} : entalpia de saída do fluido de processo no trocador de calor [kJ/kg];

Para os cálculos das entalpias e resolução da equação, foi utilizado o software EES. O fluido de processo, por entrar no trocador de calor após secar o tabaco, foi considerado como ar úmido, enquanto o fluido de queima foi considerado como gás ideal, uma vez que entra no trocador de calor após sua formação na câmara de combustão. Dentre os dados envolvidos nas equações 4.3 e 4.4, a única variável é a entalpia do fluido de queima na entrada do secador, uma vez que os outros são fornecidos pelo equipamento. As temperaturas de entrada e saída do fluido de processo são parâmetros diretamente relacionados à umidade do tabaco na entrada do secador, portanto, colocou-se o secador nessa condição e pelo supervisão do equipamento foi possível observar as temperaturas. Os fluxos mássicos são parâmetros fixos estipulados pelo fabricante do equipamento, e existe um medidor de temperatura na saída da chaminé para medir a temperatura em que o fluido de queima é expelido para a atmosfera. Esse valor foi considerado para a temperatura de saída do fluido de queima do trocador de calor. A razão de umidade w

representa o valor de massa de água no fluido de processo para cada unidade de massa de ar ideal dentro do secador e é um parâmetro fornecido pelo fabricante e controlado pelo PID do equipamento. Os dados utilizados no software estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros utilizados na equação

Fluido de processo (Ar úmido)		Fluido de queima (Ar seco)	
Temperatura de entrada	136°C	Temperatura de entrada	x
Temperatura de saída	234,8°C	Temperatura de saída	150°C
Fluxo mássico	5,1 kg/s	Fluxo mássico	3,16 kg/s
Pressão do sistema	100 kPa	Pressão do sistema	100 kPa
Razão de umidade	0,3 kg de água por kg de fluido de processo		

Para encontrar as entalpias, utilizou-se da base de valores termodinâmicos do EES:

$$h_{fqs} = \text{Enthalpy}(\text{Air}, T = 150) = 806,1 \text{ kJ/kg} \quad (4.5)$$

$$h_{fps} = \text{Enthalpy}(\text{AirH}_2\text{O}, T = 234,8; w = 0,3; P = 100) = 964 \text{ kJ/kg} \quad (4.6)$$

$$h_{fpe} = \text{Enthalpy}(\text{AirH}_2\text{O}, T = 136; w = 0,3; P = 100) = 1122 \text{ kJ/kg} \quad (4.7)$$

Com os valores utilizados, obteve-se um valor de entalpia do fluido de queima na entrada do trocador de calor de 806,1 kJ/kg, o que resulta em uma temperatura de 512°C, 18,7% menor que os 630°C praticados antes do projeto. Esse valor de temperatura foi considerado para a temperatura da câmara de combustão, uma vez que o fluido de queima sai da câmara e é direcionado para os trocadores com tubulações revestidas com materiais refratários. Uma vez estimada a temperatura da câmara de combustão com a umidade do produto na entrada do secador a 22,5%, passou-se para a etapa de testes.

4.4 Segunda etapa - Testes

A etapa de testes durou oito meses, pois havia a necessidade de uma grande quantidade de amostras para garantir a qualidade do tabaco. Os testes foram feitos de maneira gradativa, abaixando a umidade do tabaco na entrada do secador em uma taxa de 2%, portanto, foram coletadas amostras de tabaco seco com umidades prévias de entrada no secador de 28%, 26%, 24%, sendo que a última era limitada a 22,5%. Conforme a umidade na entrada diminuía, o sistema de controle do secador modulava os flaps de vazão de fluido de queima. Como a necessidade de calor no fluido de processo era menor, já que o produto estava menos úmido, o percentual de fluido de queima que vai para o trocador de calor principal saiu do ideal, que era 60%, e foi diminuindo conforme a umidade do tabaco na entrada do secador diminuía. Para voltar a abertura do flap para o número ideal, foram feitas diminuições gradativas na temperatura da câmara de combustão até que se estabilizasse no ideal a abertura do flap.

Cada operação de tabaco consiste de aproximadamente 7500 quilogramas, e diariamente, a indústria de tabaco em questão processa cerca de 13 operações. Desde o início dos testes, setembro de 2017, até abril de 2018, foram coletadas uma amostra por operação e enviadas para o laboratório de qualidade. No laboratório foram feitos os testes para determinar o poder de enchimento das amostras. Com os resultados foi construída uma base de dados para analisar os resultados e determinar se o poder de enchimento nas umidades testadas atendia à necessidade do processo industrial.

Durante os oito meses de testes, foram feitas anotações diárias do consumo do GLP. Essa quantidade, dividida pela massa de tabaco processada, representa a média de quanto de gás é consumido por tonelada de tabaco processado. Esse, além do parâmetro de qualidade poder de enchimento e a temperatura da câmara de combustão, foi outro parâmetro acompanhado durante a etapa de testes.

4.5 Terceira etapa – Análise de resultados

A terceira etapa do projeto, que aconteceu no final de abril de 2018, consistiu da análise dos resultados coletados durante a etapa de testes. Foram analisados tanto o poder de enchimento, quanto a temperatura da câmara de combustão e a diminuição do consumo de GLP.

A análise do poder de enchimento consistiu da utilização de um método gaussiano para avaliar a probabilidade de uma amostra encontrar-se perto da média e dentro dos limites permitidos pelo processo, através do desvio padrão. O método gaussiano foi escolhido pois trata-se de um trabalho experimental com números contínuos, além de tudo, quando analisa-se a Figura 10, percebe-se que as barras do histograma com os resultados de poder de enchimento de todas as amostras, independente da umidade de entrada, formam uma curva gaussiana, característica presente quando a distribuição dos dados é normal.

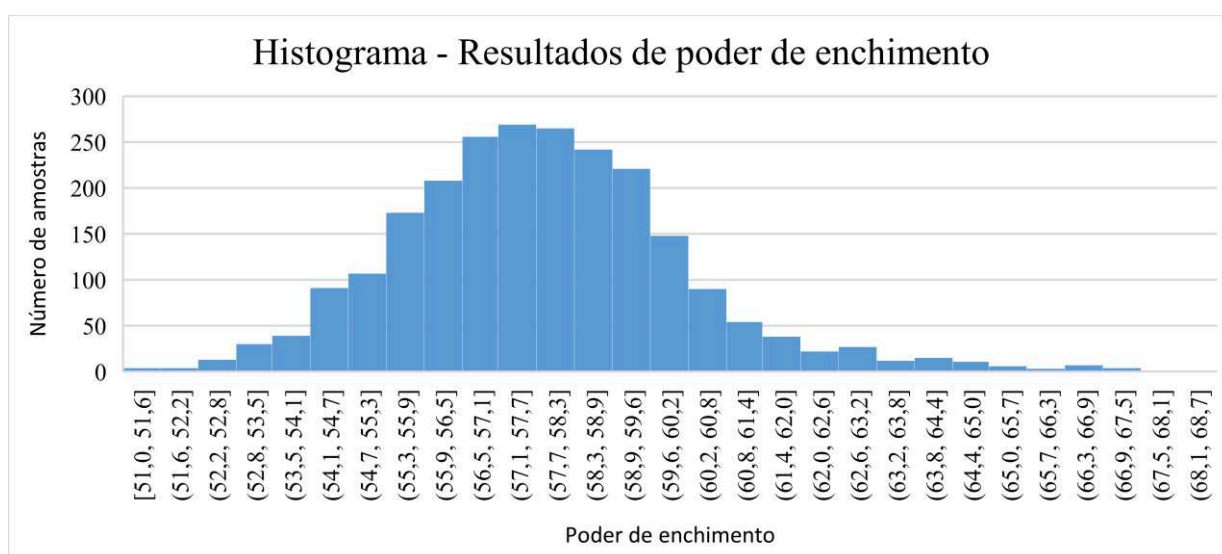


Figura 10 - Histograma dos resultados de poder de enchimento do projeto

Segundo o laboratório da indústria de tabaco, o valor ideal do poder de enchimento do tabaco é de $57 \text{ cm}^3/10\text{g}$ com um desvio aceitável de $2 \text{ cm}^3/10\text{g}$. Para avaliar o poder de enchimento do produto com as diferentes umidades de entrada, separou-se os dados e calculou-se a densidade de probabilidade para descrever a probabilidade relativa de uma amostra aleatória tomar o valor ideal estabelecido.

Na Figura 11 observa-se a função densidade de probabilidade da distribuição normal com a umidade de entrada no secador de 28%. A média de poder de enchimento obtida foi de 58,09 cm³/10g e o desvio padrão de 1,63 cm³/10g. Pode-se observar que com essa umidade, têm-se a média aproximadamente um ponto acima do que se é considerado ideal pela indústria. Esse valor não oferece riscos de qualidade, uma vez que apenas valores abaixo do ideal são considerados como prejudiciais ao produto.

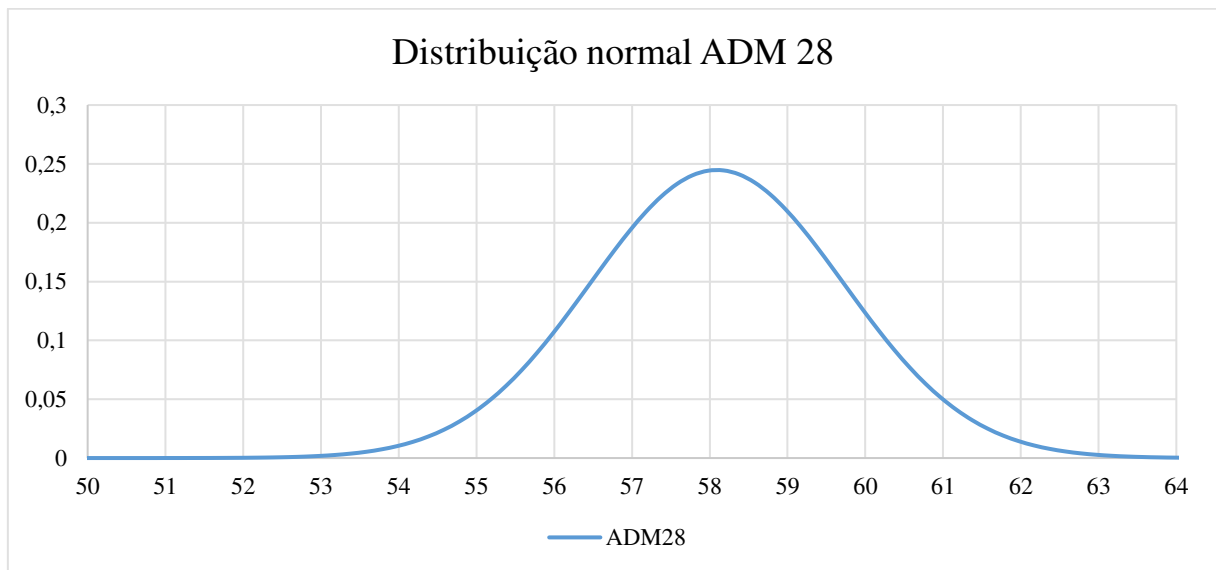


Figura 11 - Função densidade de probabilidade com umidade de entrada de 28%

Nas Figuras 12, 13 e 14, pode-se observar separadamente a função densidade de probabilidade da distribuição normal com as umidades de entrada de 26%, 24% e 22,5%, respectivamente. Para que seja mais fácil a visualização da diferença entre as funções de densidade com diferentes umidades de entrada do tabaco no secador, organizou-se as curvas na Figura 15.

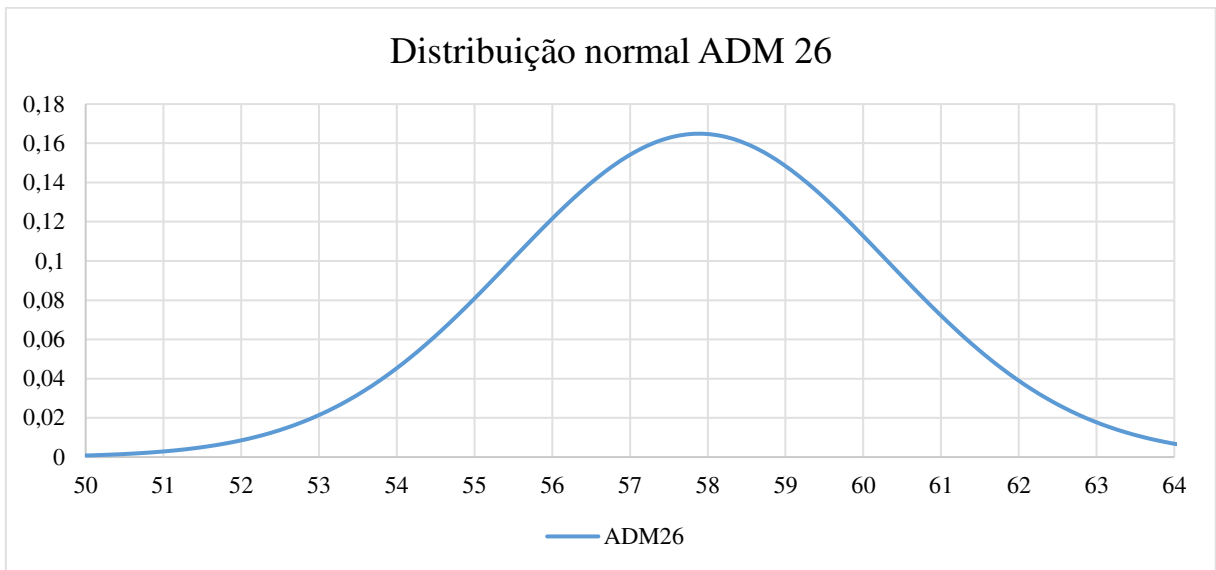


Figura 12 - Função densidade de probabilidade com umidade de entrada de 26%

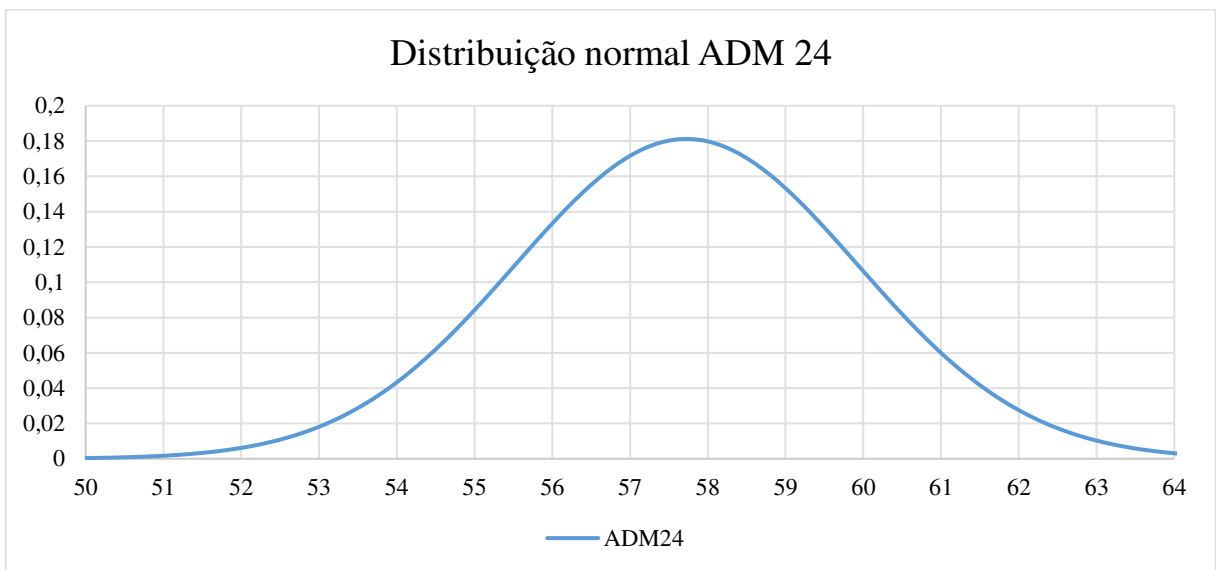


Figura 13 - Função densidade de probabilidade com umidade de entrada de 24%

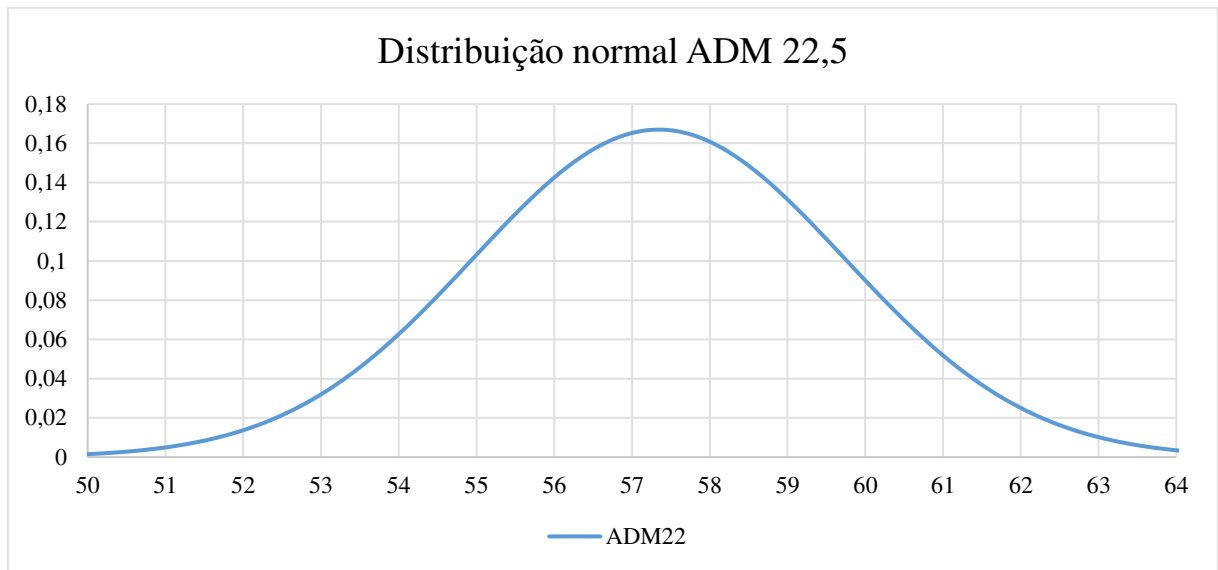


Figura 14 - Função densidade de probabilidade com umidade de entrada de 22,5%

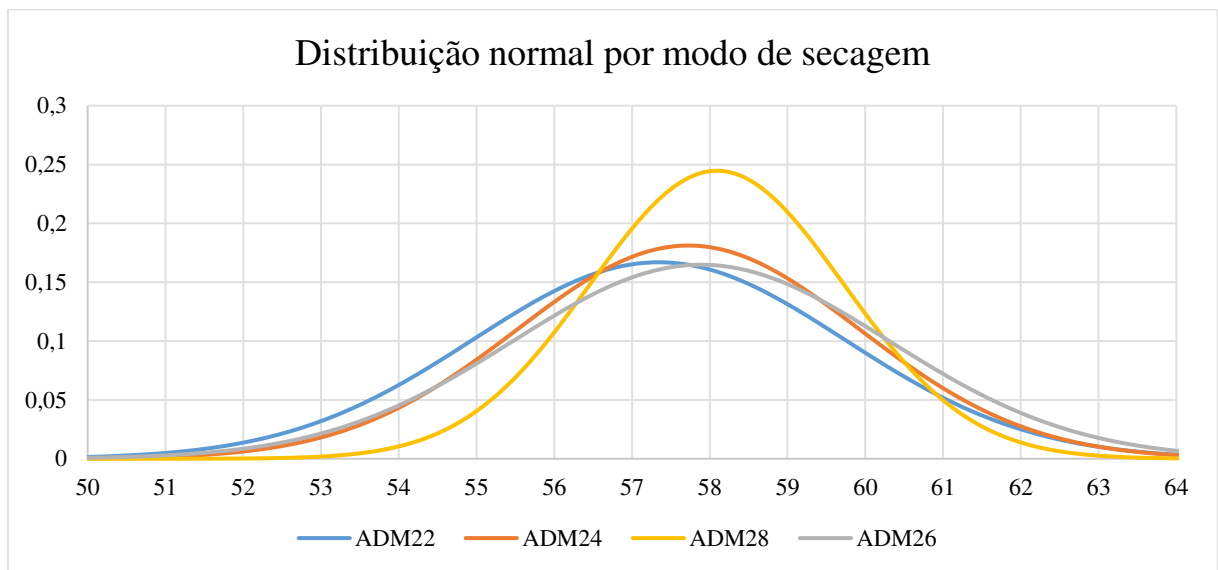


Figura 15 - Funções densidade de probabilidade com diferentes umidades de entrada no secador

Tabela 2 - Média e desvio padrão por modo de secagem

	ADM 22,5	ADM 24	ADM 26	ADM 28
Média (cm ³ /10g)	57,345	57,726	57,889	58,092
Desvio Padrão (cm ³ /10g)	2,389	2,202	2,419	1,630

Ao analisar a Figura 14 e a Tabela 2, percebe-se que conforme a umidade na entrada do secador diminui, a média das amostras diminui e o desvio padrão sofre alterações. Em nenhum dos modos de secagem, ou seja, umidade de entrada no secador, os valores de média ficaram abaixo dos 57 cm³/10g ideais estabelecidos pela indústria. Apesar do desvio padrão ficar acima de 2 cm³/10g para as umidades de entrada de 22,5%, 24 e 26%, a probabilidade de a amostra estar acima de 55 cm³/10g é maior que 90% independente da umidade de entrada, o que atende às necessidades do processo produtivo da indústria. Pelo fato de o tabaco ser um produto de origem agrícola, são esperadas variações de poder de enchimento atribuídas à forma que o tabaco foi produzido no campo devido a diversas variáveis, como a incidência de chuvas e sol.

4.5 Ganhos do projeto

Durante o período de teste, cada uma das umidades do tabaco na entrada do secador foi testada durante três meses. De setembro a novembro foi testada a umidade de 26%, de dezembro a fevereiro foi testada a umidade de 24%, e de fevereiro a abril foi testada a umidade de 22,5%. Foram estabelecidas rotinas diárias de acompanhamento do consumo de GLP com o intuito de confrontar o valor com o volume de tabaco produzido em cada dia. A média de consumo do gás, desde janeiro de 2017 até agosto do mesmo ano, em metros cúbicos por tonelada, foi de 17,27. A Figura 16 mostra a evolução do consumo durante o período de testes.

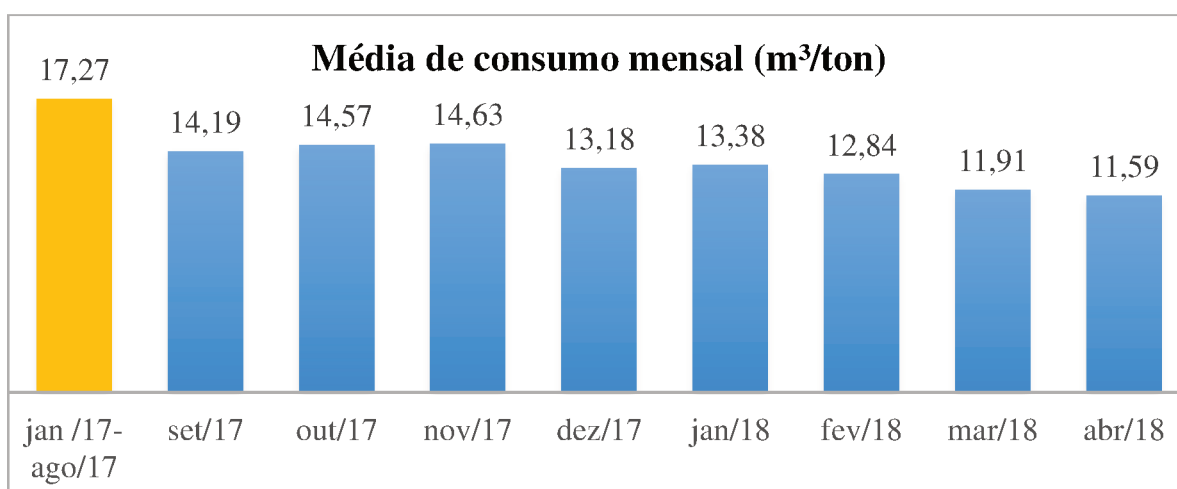


Figura 16 - Evolução do consumo de gás durante o período de testes

Ao analisar a Figura 16, observa-se uma redução de 33% no consumo de GLP em relação à média de janeiro a agosto de 2017. Essa redução está diretamente ligada à redução de temperatura necessária na câmara de combustão para aquecer o fluido de processo. Conforme mencionado no item 4.4, se a umidade do produto na entrada do secador diminuiu, a disposição dos flaps que dividem o fluxo do fluido de queima saía do ideal como consequência da automação do sistema de controle do secador. Inicialmente, a temperatura da câmara de combustão era 630°C e a parte de fluido de queima direcionada para o trocador de calor principal era 60%, enquanto outros 40% aqueciam os trocadores de calor secundários. Na última umidade testada, de 22,5%, a disposição ideal dos flaps estabilizou-se com uma temperatura de 500°C na câmara de combustão, bem próxima daquela estimada pelo trabalho, de 512°C.

Para se calcular o benefício financeiro do projeto durante o período de testes, foi considerada uma densidade de 2,25 kg/m³ e o preço de R\$ 6.07,00 por quilograma de gás. Levando em consideração o consumo médio de GLP antes do projeto, foram economizados aproximadamente R\$ 730.000,00 desde setembro de 2017 até abril de 2018. Além do benefício direto em gás, com a umidade de 22,5% validada, o equipamento que promovia o aumento da umidade do tabaco de 22,5% (umidade ideal para corte) para 28% foi descontinuado, o que adicionam ao pacote de benefícios do projeto mais R\$ 220.000,00 com custos de manutenção e vapor. O indicador da indústria de tabaco que avalia a performance energética é composto pelo valor em GJ/ton e é controlado pelo time de engenharia da indústria de tabaco. Segundo informe passado pela equipe, houve uma redução média de 18% nesse indicador.

Além do benefício financeiro com a manutenção do parâmetro de qualidade poder de enchimento, outros dois parâmetros de tamanha importância foram impactados positivamente. Dentre as diversas propriedades organolépticas avaliadas pela equipe de produto da indústria, a sensação de secura da boca e a irritação da garganta, percebidos ao consumir o produto, diminuíram substancialmente como consequência do projeto. Como o tabaco entra menos úmido no secador, a necessidade de calor é menor para secá-lo ao valor ideal de 14%. Por consequência, menor é a necessidade de temperatura do fluido de processo. Antes do projeto, a temperatura média do fluido de processo após o trocador de calor principal era 220°C, e, com a umidade de entrada em 22,5%, esse número baixou para 180°C. Essa diferença de temperatura faz com que a secagem seja menos agressiva ao tabaco, o que faz com que as duas propriedades organolépticas citadas sejam menos sentidas pelo consumidor.

Após o final do projeto, manteve-se a temperatura da câmara de combustão em 500°C e a umidade do produto na entrada do secador em 22,5%. O consumo de GLP do equipamento continuou diminuindo e estabilizou-se em uma média de 9,5 metros cúbicos de gás por tonelada de produto processado. A Figura número 17 mostra toda a redução do produto desde setembro de 2017 até novembro de 2018.

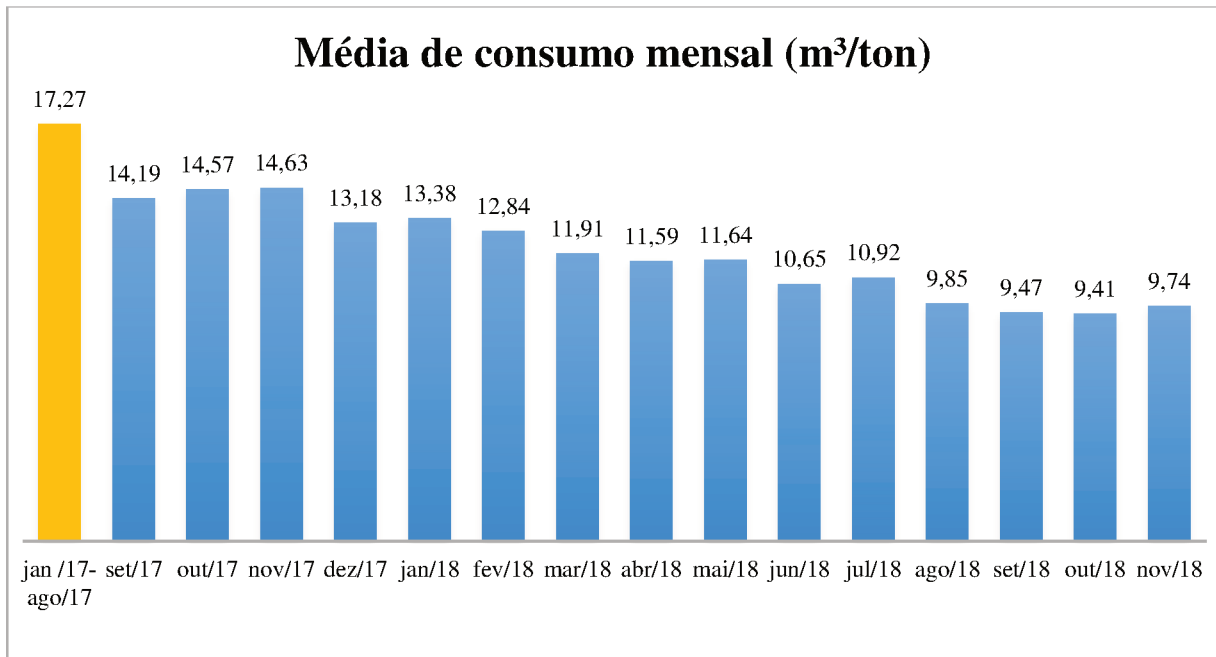


Figura 17 - Diminuição do consumo de gás até novembro de 2018

CAPÍTULO V

Conclusão

O trabalho apresentado consistiu da otimização de um secador de tabaco focado na redução do consumo do gás liquefeito de petróleo, produto utilizado para garantir uma temperatura constante na câmara de combustão do equipamento. Durante a análise do secador, observou-se a possibilidade de diminuir a umidade de entrada do tabaco no secador. Contudo, diretamente relacionado à essa umidade, está o parâmetro de qualidade poder de enchimento. Acreditava-se que quanto maior a umidade na entrada do secador, maior era o poder de enchimento do produto. Essa relação foi construída em testes realizados no início dos anos 2000, porém, desde então, o tabaco foi submetido a diferentes condições climáticas, além de ter sofrido grande desenvolvimentos genéticos. Por esse motivo, surgiu a necessidade de reavaliar se essa relação entre a umidade e a qualidade do produto ainda se perpetuava.

Para entender a relação entre a umidade e o poder de enchimento uma análise de densidade de probabilidade para avaliar qual a probabilidade de uma amostra estar dentro dos limites aceitáveis de poder de enchimento para cada umidade, que são: média de 57 cm³/10g com desvio de 2 cm³/10g. Os resultados mostraram que, com a umidade de 22,5%, uma amostra possui aproximadamente 90% de probabilidade de estar dentro dos limites aceitáveis, o que atende à necessidade da indústria.

Como consequência da diminuição da umidade do produto na entrada do secador, a temperatura da câmara de combustão foi reduzida de 630°C para 500°C. O fluido de processo, responsável pela secagem do tabaco, teve uma redução de temperatura de 220°C para aproximadamente 180°C. Houve uma redução de 33% de consumo de GLP e possibilitou descontinuar o equipamento que promovia o aumento da umidade do tabaco de 22,5% para 28%. Esse projeto trouxe como benefício para a indústria uma economia de R\$ 1.250.000,00

anuais gastos com GLP, além de R\$220.000,00 com custos de manutenção e energia gastos para manter o equipamento descontinuado em funcionamento. A diferença na temperatura de secagem trouxe ainda benefícios para o consumidor, pois melhorou duas importantes características organolépticas da fumaça do cigarro, a sensação de secura da boca e a irritação da garganta. Por ano, são investidos altos valores financeiros para reduzir essas sensações, e este trabalho conseguiu reduzi-las economizando no total R\$1.470.000,00 anuais. Como sugestão de trabalhos futuros, pode-se reduzir ainda mais o consumo de gás liquefeito de petróleo por meio da instalação de um purgador na linha em que passa o fluido de purga para retirar o excesso de umidade desse fluido. Com menos umidade na câmara de combustão, maior seria a eficiência da queima e menos gás seria necessário para fornecer a mesma quantidade de calor necessária para aquecer o fluido de processo. Esse projeto foi premiado como melhor projeto da indústria de tabaco no ano de 2018.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abitante, André Luís, **Modelagem dinâmica e análise de um sistema de controle de umidade de folhas erva-mate em secadores contínuos de esteira**, Curitiba: Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, 2003. 78 p. Dissertação (Mestrado).

Fernandes, Conceição Flores, **Análise da eficiência energética da secagem de pastas em leito de jorro**, São Carlos: Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, 2005. 96 p. Dissertação (Mestrado).

Larrosa, Ana Paula, **Secagem de pastas vegetais: Análise da operação em leito de jorro e caracterização do produto final**, Rio Grande: Universidade Federal de Rio Grande, 2012. 145 p. Dissertação (Mestrado).

Leonel, Edimilson Cândido, **Análise da eficiência energética e otimização de secadores rotativos**, São Carlos: Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, 2014. 76 p. Dissertação (Mestrado).

Mandolesi de Araújo, Carlos Daniel, **Eficiência energética em sistemas de secagem, Estudo de caso: Produção de farinha de cascas de banana**, Itajubá: Programa de Pós Graduação em Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá, 2013. 69 p. Dissertação (Mestrado).

Meili, Lucas, **Contribuições ao estudo da fluidodinâmica e da secagem de pastas em leitos fluidizado e vibrofluidizado**, São Carlos: Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, 2009. 260 p. Tese (Doutorado).

Oliveira, Vanderlei de, **Avaliação energética e econômica da secagem de grãos utilizando secador de coluna com caldeira aquatubular**, Cascavel: Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2014 84 p. Dissertação (Mestrado).

Seixas, Henriete Lima, **Análise termodinâmica e de emissões de uma planta para secagem de fermento**, Rio de Janeiro: Departamento de Engenharia Mecânica, Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2003. 102 p. Dissertação (Mestrado).

VAN Wylen, G.J.V.; SONNTAG, R.E.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da termodinâmica**. Ed. Edgard Blucher Ltda. 6ª ed. São Paulo – SP. 2003. 592 p.

Çengel, Y.A.; Boles, M.A. **Heat and Mass Transfer, A Practical Approach**. Ed. McGraw-Hill. 3ª ed. New York – NY 2007. 901p.

Çengel, Y.A.; Boles, M.A. **Thermodynamics, An Engineering Approach**. Ed. McGraw-Hill. 6ª ed. New York – NY 2008. 1018p.