

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

Débora Luana Pasa

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E EMISSÕES DE GEE DO PROCESSO DE  
COMBUSTÃO DE BIOMASSA FLORESTAL**

Santa Maria, RS  
2022

Débora Luana Pasa

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E EMISSÕES DE GEE DO PROCESSO DE  
COMBUSTÃO DE BIOMASSA FLORESTAL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Manejo Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutora em Engenharia Florestal**.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Antonio de Farias

Santa Maria, RS  
2022

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Pasa, Débora Luana  
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E EMISSÕES DE GEE DO PROCESSO DE  
COMBUSTÃO DE BIOMASSA FLORESTAL / Débora Luana Pasa.-  
2022.  
144 p.; 30 cm

Orientador: Jorge Antonio de Farias  
Coorientador: Cristiane Pedrazzi  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós  
Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2022

1. Economia de baixo carbono 2. Lenha 3. Pellets 4.  
Tabaco 5. tCO<sub>2</sub>e I. Farias, Jorge Antonio de II.  
Pedrazzi, Cristiane III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, DÉBORA LUANA PASA, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Tese) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

**Débora Luana Pasa**

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E EMISSÕES DE GEE DO PROCESSO DE  
COMBUSTÃO DE BIOMASSA FLORESTAL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Manejo Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutora em Engenharia Florestal**.

**Aprovada em 12 de maio de 2022:**

---

**Jorge Antonio de Farias, Dr. (UFSM)**  
**(Presidente/Orientador)**

---

**Angélica de Cassia Oliveira Carneiro, Dr.<sup>a</sup> (UFV)**  
(por videoconferência)

---

**Martha Andreia Brand, Dr.<sup>a</sup> (UDESC)**  
(por videoconferência)

---

**Luana Dessbesell, Dr.<sup>a</sup> (U. Montréal)**  
(por videoconferência)

---

**Elder Eloy, Dr. (UFSM)**  
(por videoconferência)

Santa Maria, RS  
2022

## RESUMO

### EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E EMISSÕES DE GEE DO PROCESSO DE COMBUSTÃO DE BIOMASSA FLORESTAL

AUTORA: Débora Luana Pasa  
ORIENTADOR: Jorge Antonio de Farias

O impacto ambiental das atividades econômicas vem sendo cada vez mais monitorado, com o intuito de minimizar as emissões de GEE para atmosfera. No setor agrícola, o tabaco, além de sua importância econômica para os pequenos produtores rurais do Sul do Brasil, possui forte apelo ambiental em todo seu processo produtivo. Parte desse apelo se deve a secagem do tabaco, variedade Virginia, que utiliza biomassa florestal como fonte de energia para geração térmica necessária ao processo. O objetivo dessa pesquisa foi avaliar a eficiência energética e as emissões de gases poluentes do processo de combustão utilizando diferentes biomassas florestais em distintas unidades de cura (UC) de tabaco, bem como verificar a possível obtenção de créditos de carbono nos cenários analisados. O método incluiu a análise da eficiência energética e do consumo de lenha da lenha de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus dunnii* em três UCs tecnologicamente distintas, das mais tecnológicas às menos tecnológicas, a saber: UC de carga contínua, UC de ar forçado e UC convencional. Além disso, foi analisada a biomassa de pellets de pinus em UC convencional adaptada. As emissões de gases poluentes (CO<sub>2</sub>, CO, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> e NO<sub>x</sub>) do processo de combustão também foram quantificadas. O cenário base foi o uso de lenha de *E. saligna*, em UC convencionais. De acordo com os resultados, o menor consumo de lenha por kg de tabaco foi obtido na UC carga contínua, com valores de 2,38 e 1,98 kg/kg para uso de lenha de *E. dunnii* e *E. saligna*, respectivamente. O pior desempenho foi observado nas UC convencionais, chegando a um aumento de 50,75% no consumo de biomassa. O uso de pellets acarretou no consumo de 1,44 kg/kg, sendo o resultado mais eficiente. Em relação às emissões de GEE, as menores emissões foram observadas com uso de pellets, em UC convencionais, (0,0022 tCO<sub>2</sub>e) por kg de tabaco, seguido da UC carga contínua (0,0068 tCO<sub>2</sub>e) e convencional (0,0129 tCO<sub>2</sub>e), ambas com uso de *E. dunnii*. As maiores emissões de GEE foram obtidas quando se utilizou a UC Ar forçado. Por fim, foi possível obter créditos de carbono em três dos sete cenários avaliados, sendo eles: pellets em UC convencionais adaptadas; lenha de *E. dunnii* em UC carga contínua e lenha de *E. dunnii* em UC convencional.

**Palavras-chave:** Economia de baixo carbono. Lenha. Pellets. Tabaco. tCO<sub>2</sub>e.

## ABSTRACT

### ENERGY EFFICIENCY AND GHG EMISSIONS FROM THE FOREST BIOMASS COMBUSTION PROCESS

AUTHOR: Débora Luana Pasa

ADVISOR: Jorge Antonio de Farias

The environmental impact of economic activities has been increasingly monitored, with the aim of minimizing GHG emissions to the atmosphere as much as possible. In the agricultural sector, tobacco, in addition to its economic importance for small rural producers in southern Brazil, has a strong environmental appeal throughout its production process. Part of this appeal is due to the drying of tobacco, Virginia variety, which uses forest biomass as a source of energy for the thermal generation necessary for the process. The objective of this research was to evaluate the energy efficiency and the emissions of polluting gases from the combustion process using different forest biomass in different curing units (UC) of tobacco, as well as to verify the possible obtainment of carbon credits in the analyzed scenarios. The method included the analysis of energy efficiency and firewood consumption of *Eucalyptus saligna* and *Eucalyptus dunnii* firewood in three technologically distinct UCs, from the most technological to the least technological, namely: continuous load UC, forced air UC and conventional UC. Furthermore, the biomass of pine pellets in adapted conventional UC was analyzed. The GHG emissions (CO<sub>2</sub>, CO, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> and NO<sub>x</sub>) from the combustion process were also quantified. The base scenario was the use of *E. saligna* firewood in conventional UCs. According to the results, the lowest consumption of firewood per kg of tobacco was obtained in the continuous load UC, with values of 2,38 and 1,98 kg/kg for the use of firewood from *E. dunnii* and *E. saligna*, respectively. The worst performance was observed in conventional PAs, reaching an increase of 50,75% in biomass consumption. The use of pellets resulted in consumption of 1.44 kg/kg, being the most efficient result. Regarding GHG emissions, the use of pellets in conventional UC was where the lowest emissions occurred (0,0022 tCO<sub>2</sub>e) per kg of tobacco, followed by continuous load UC (0,0068 tCO<sub>2</sub>e) and conventional (0,0129 tCO<sub>2</sub>e), both using *E.dunnii*. The worst result of the emission factors was obtained with the use of the UC Forced air. Finally, it was possible to obtain carbon credits taking into account three of the seven emission scenarios analyzed, namely: Use of pellets in adapted conventional UCs and use of *E.dunnii* firewood in continuous and conventional load PAs. The financial return is viable and thus, there is the possibility of promoting low carbon activities in tobacco drying.

**Keywords:** Low carbon economy. Firewood. Pellets. Tobacco. tCO<sub>2</sub>e.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – 17 Objetivos do desenvolvimento sustentável.....	23
Figura 2 – Emissões até 2021 .....	26
Figura 3 – Croqui de localização da área de pesquisa .....	47
Figura 4 – Unidade de cura Carga contínua para lenha .....	49
Figura 5 – Unidade de cura Ar forçado para lenha .....	50
Figura 6 – Unidade de cura Convencional .....	50
Figura 7 – Unidade de cura Convencional adaptada para pellets .....	51
Figura 8 – Posições/Classes colhidas na planta de tabaco da variedade "Virgínia" .....	52
Figura 9 – Demonstração da coleta dos discos a campo .....	53
Figura 10 – Fluxograma das etapas do levantamento do consumo de lenha .....	54
Figura 11 – Eficiência no consumo de biomassa para as diferentes unidades de cura .....	59
Figura 12 – Eficiência energética para os diferentes tipos de unidades de cura do tabaco em função da biomassa .....	61
Figura 13 – Demonstração gráfica da capacidade de secagem das UC avaliadas .....	63
Figura 14 – Croqui de localização da área de pesquisa .....	77
Figura 15 – Unidade de cura Carga contínua para lenha .....	79
Figura 16 – Unidade de cura Ar forçado para lenha .....	79
Figura 17 – Unidade de cura Convencional .....	80
Figura 18 – Unidade de cura Convencional adaptada para pellets. ....	80
Figura 19 – Equipamento utilizado na análise dos gases de combustão – Chemist 500 x .....	81
Figura 20 – Equipamento Chemist 500x em funcionamento .....	82
Figura 21 – Comportamento dos gases emitidos para cada UC em relação às biomassas .....	90
Figura 22 – Porcentagem de importância em função dos fatores de emissão por kg de biomassa consumida .....	96
Figura 23 – Nível de importância dos fatores de emissão por kg de tabaco seco .....	96
Figura 24 – Eficiência da combustão e eficiência de combustão modificada em função do tipo de biomassa e unidade de cura (UC).....	97
Figura 25 – Emissão em tCO <sub>2</sub> e para cada gás, em relação a cada UC e biomassa <i>E. saligna</i> . 99	
Figura 26 – Emissão em tCO <sub>2</sub> e para cada gás, em relação a cada UC e biomassa <i>E. dunnii</i> .. 99	
Figura 27 – Emissão em tCO <sub>2</sub> e para cada gás, em relação a UC convencional adaptada com uso de pellets de Pinus.....	99
Figura 28 – Emissões totais em tCO <sub>2</sub> e por kg de tabaco eco, levando em consideração as diferentes UCs e biomassas .....	100
Figura 29 – Fases da combustão da UC convencional com uso de lenha.....	108
Figura 30 – Análise de VPL e VAE para os cenários analisados .....	125
Figura 31 – Análise da TIR para os cenários .....	126

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fases da secagem do tabaco Virgínia .....	20
Tabela 2 – Descrição dos objetivos que se enquadram no escopo da tese.....	24
Tabela 3 – Descrição das Unidades de cura utilizadas na pesquisa.....	48
Tabela 4 – Caracterização das unidades de cura avaliadas .....	49
Tabela 5 – Análises laboratoriais de qualificação da madeira .....	53
Tabela 6 – Esquema fatorial duplo .....	56
Tabela 7 – Esquema fatorial único .....	56
Tabela 8 – Características da biomassa avaliada .....	58
Tabela 9 – Análise de Variância para consumo de biomassa. ANOVA Bifatorial para UC x biomassas lenha de <i>E. dunnii</i> e Lenha de <i>E. saligna</i> .....	60
Tabela 10 – Análise de Variância. ANOVA monofatorial para o consumo de biomassa em UC convencionais, utilizando lenha de <i>E. saligna</i> , Lenha de <i>E. dunnii</i> e pellets.....	60
Tabela 11 – Análise de Variância para eficiência energética. ANOVA Bifatorial para UC x biomassas lenha de <i>E. dunnii</i> e Lenha de <i>E. saligna</i> .....	61
Tabela 12 – Teste de médias para biomassa lenha de <i>E. dunnii</i> e lenha de <i>E. saligna</i> e UC, em relação a eficiência energética .....	61
Tabela 13 – Análise de Variância. ANOVA monofatorial para eficiência energética em UC convencionais, utilizando lenha de <i>E. saligna</i> , Lenha de <i>E. dunnii</i> e pellets.....	62
Tabela 14 – Teste de médias para três biomassas testadas na UC convencional, em relação eficiência energética.....	62
Tabela 15 – correlação de Pearson para consumo de biomassa em relação à quantidade de tabaco seco por ciclo .....	63
Tabela 16 – Análise de Variância para capacidade de secagem. ANOVA Bifatorial para UC x biomassas lenha de <i>E. dunnii</i> e Lenha de <i>E. saligna</i> .....	64
Tabela 17 – Teste de médias para UCs e biomassa (lenha de <i>E. saligna</i> e lenha de <i>E. dunnii</i> ) em relação à capacidade de secagem .....	64
Tabela 18 – Análise de Variância. ANOVA monofatorial para capacidade de secagem em UC convencionais, utilizando lenha de <i>E. saligna</i> , Lenha de <i>E. dunnii</i> e pellets.....	64
Tabela 19 – Descrição das Unidades de cura utilizadas na pesquisa.....	77
Tabela 20 – Caracterização das unidades de cura avaliadas .....	78
Tabela 21 – Padrão de emissões de CO e NO <sub>x</sub> .....	83
Tabela 22 – PAG para cada gás de efeito estufa .....	86
Tabela 23 – Média e desvio padrão das análises de emissões de gases poluentes do processo de combustão. Análise demonstrando os resultados a 8% de O <sub>2</sub> de referência .....	89
Tabela 24 – Análise de Variância para emissões de CO. ANOVA Bifatorial para UC x biomassas (lenha de <i>E. dunnii</i> e Lenha de <i>E. saligna</i> ).....	90
Tabela 25 – Teste de médias para biomassa (lenha de <i>E. dunnii</i> e lenha de <i>E. saligna</i> ) e UC, em relação às emissões de CO.....	91

Tabela 26 – Análise de Variância para emissões de CO. ANOVA monofatorial para as diferentes biomassas em relação à UC convencional .....	91
Tabela 27 – Estatística de Kruskal-Wallis para emissões de CO <sub>2</sub> levando em consideração Biomassa lenha de <i>E. saligna</i> e lenha de <i>E. dunnii</i> .....	91
Tabela 28 – Estatística de Kruskal-Wallis para emissões de CO <sub>2</sub> nas UC .....	91
Tabela 29 – Estatística de Kruskal-Wallis para as três biomassas testadas na UC convencional, em relação às emissões de CO <sub>2</sub> .....	92
Tabela 30 – Análise de Variância para emissões de NO <sub>x</sub> . ANOVA Bifatorial para UC x biomassas lenha de <i>E. dunnii</i> e Lenha de <i>E. saligna</i> .....	92
Tabela 31 – Análise de Variância para emissões de NO <sub>x</sub> . ANOVA monofatorial para as diferentes biomassas em relação a UC convencional .....	92
Tabela 32 – Teste de médias para três biomassas testadas na UC convencional, em relação as emissões de NO <sub>x</sub> .....	92
Tabela 33 – Análise de Variância para emissões de C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> . ANOVA Bifatorial para UC x biomassas lenha de <i>E. dunnii</i> e Lenha de <i>E. saligna</i> .....	93
Tabela 34 – Análise de Variância para emissões de C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> . ANOVA monofatorial para as diferentes biomassas em relação à UC convencional .....	93
Tabela 35 - Teste de médias para três biomassas testadas na UC convencional, em relação às emissões de C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> .....	93
Tabela 36 – Fatores de emissão .....	95
Tabela 37 – Eficiência de combustão em função do tipo de unidade de cura e biomassa .....	97
Tabela 38 – Emissões de gases em tCO <sub>2</sub> e em função do tipo de biomassa e unidade de cura (UC) .....	100
Tabela 39 – Cenários de análise .....	117
Tabela 40 – Dados para o fluxo de caixa .....	121
Tabela 41 – Resultados obtidos pela análise de emissões de GEE.....	123
Tabela 42 – Créditos de carbono na análise financeira dos diferentes cenários.....	124

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>CAPÍTULO I – APRESENTAÇÃO</b>	13
1.1	INTRODUÇÃO	13
1.2	PROBLEMA DA PESQUISA	16
1.3	OBJETIVOS	16
<b>1.3.1</b>	<b>Objetivo geral</b>	16
<b>1.3.2</b>	<b>Objetivos específicos</b>	16
1.4	ESTRUTURA DA TESE	17
	<b>REFERÊNCIAS</b>	17
<b>2</b>	<b>CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	19
2.1	ASPECTOS DA CULTURA DO TABACO	19
2.2	IMPORTÂNCIA ECONÔMICA DO TABACO	20
2.3	ASPECTOS AMBIENTAIS: EFEITO ESTUFA E MUDANÇAS CLIMÁTICAS	21
2.4	ABORDAGEM TEÓRICA SOBRE A EVOLUÇÃO DO CONCEITO DE SUSTENTABILIDADE	22
2.5	O BRASIL FRENTE ÀS EMISSÕES E ÀS METAS DE MITIGAÇÃO	25
2.6	MECANISMOS DE MERCADO PARA CUMPRIR AS METAS DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE GEE	27
2.7	O CONTEXTO DA FUMICULTURA NA SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL	29
2.8	O PROCESSO DE COMBUSTÃO DE BIOMASSA FLORESTAL	32
<b>2.8.1</b>	<b>Gases provenientes do processo de combustão</b>	33
2.9	IMPORTÂNCIA DOS PLANTIOS FLORESTAIS PARA A SUSTENTABILIDADE NA CULTURA DO TABACO	35
2.10	ECONOMIA DE BAIXO CARBONO: UMA ABORDAGEM TEÓRICA SOBRE CONCEITO E APLICAÇÕES	38
	<b>REFERÊNCIAS</b>	39
<b>3</b>	<b>CAPÍTULO III – EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE BIOMASSAS FLORESTAIS PARA SECAGEM DO TABACO EM DIFERENTES UNIDADES DE CURA</b>	45
3.1	INTRODUÇÃO	45
3.2	MATERIAIS E MÉTODOS	46
<b>3.2.1</b>	<b>Caracterização da região da pesquisa</b>	47
<b>3.2.2</b>	<b>Caracterização das unidades de cura</b>	48
<b>3.2.3</b>	<b>Biomassas avaliadas</b>	51
<b>3.2.4</b>	<b>Processo de cura (secagem) do tabaco</b>	51
<b>3.2.5</b>	<b>Caracterização da biomassa florestal</b>	52

3.2.6 Consumo de biomassa florestal.....	54
3.2.7 Eficiência energética da biomassa florestal .....	54
3.2.8 Capacidade de secagem.....	56
3.2.9 Alinhamento experimental e análise de dados.....	56
3.3 RESULTADOS.....	57
3.3.1 Caracterização da biomassa florestal .....	57
3.3.2 Consumo de biomassa florestal.....	59
3.3.3 Eficiência energética da biomassa florestal .....	60
3.3.4 Capacidade de secagem.....	62
3.4 DISCUSSÕES.....	64
3.4.1 Análise química .....	64
3.4.2 Eficiência no consumo de biomassa florestal.....	67
3.4.3 Eficiência energética.....	69
3.4.4 Capacidade de secagem.....	71
3.5 CONCLUSÕES.....	72
REFERÊNCIAS .....	72
<b>4 CAPÍTULO IV – EMISSÕES DE GASES POLUENTES ORIUNDOS DO PROCESSO DE GERAÇÃO DE ENERGIA PARA SECAGEM DO TABACO .....</b>	<b>75</b>
4.1 INTRODUÇÃO .....	75
4.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	76
4.2.1 Caracterização da região da pesquisa .....	76
4.2.2 Caracterização das unidades de cura .....	77
4.2.3 Biomassas avaliadas .....	81
4.2.4 Quantificação das emissões de gases poluentes .....	81
4.2.5 Fatores de Emissão.....	83
4.2.6 Eficiência de combustão.....	84
4.2.7 Quantidade de carbono associado a cada gás.....	85
4.2.8 Carbono equivalente .....	85
4.2.9 Análise dos dados .....	87
4.3 RESULTADOS.....	87
4.3.1 Concentração de emissões de gases poluentes .....	87
4.3.2 Fator de Emissão .....	93
4.3.3 Eficiência da Combustão.....	97
4.3.4 Emissão em toneladas de carbono equivalente.....	98
4.4 DISCUSSÕES.....	101

4.4.1	Concentração de emissão de gases poluentes .....	101
4.4.2	Fatores de emissão .....	105
4.4.3	Eficiência de combustão .....	106
4.4.4	Emissão em toneladas de carbono equivalente por kg de produto seco .....	109
4.5	CONCLUSÕES .....	110
	REFERÊNCIAS .....	111
<b>5</b>	<b>CAPÍTULO V – IMPACTO AMBIENTAL E FINANCEIRO DA IMPLANTAÇÃO DE NOVAS TECNOLOGIAS DE BAIXO CARBONO NA CURA DO TABACO: OBTENÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO .....</b>	<b>115</b>
5.1	INTRODUÇÃO .....	115
5.2	MATERIAIS E MÉTODOS .....	116
5.2.1	Análises dos Cenários de sensibilidade .....	116
5.2.2	Avaliação dos impactos ambientais .....	117
5.2.3	Avaliação financeira .....	118
5.2.4	Variáveis utilizadas na avaliação do impacto ambiental e na análise financeira ..	119
5.3	RESULTADOS .....	122
5.3.1	Avaliação dos impactos ambientais da secagem do tabaco .....	122
5.3.2	Avaliação financeira .....	123
5.4	DISCUSSÕES .....	126
5.4.1	Avaliação ambiental .....	126
5.4.2	Avaliação financeira .....	128
5.5	CONCLUSÕES .....	131
	REFERÊNCIAS .....	131
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>133</b>
	APÊNDICE A – EFICIÊNCIA DE CONSUMO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	137
	APÊNDICE B – CONCENTRAÇÃO DE GASES POLUENTES EMITIDOS NAS ANÁLISES – DADOS COMPLETOS .....	139
	APÊNDICE C – FATORES DE EMISSÃO – DADOS COMPLETOS .....	140
	APÊNDICE D – FATORES DE EMISSÃO EM TONELADAS DE CO <sub>2</sub> e – DADOS COMPLETOS .....	142
	APÊNDICE E – ANÁLISE FINANCEIRA DOS INVESTIMENTOS .....	143

# 1 CAPÍTULO I – APRESENTAÇÃO

## 1.1 INTRODUÇÃO

O debate sobre o desenvolvimento sustentável vem tomando forma principalmente após a primeira conferência das nações unidas em Estocolmo, onde deu-se o início da discussão sobre problemática ambiental, em 1979.

Um dos efeitos mais discutidos da atividade econômica sobre o meio-ambiente são as mudanças climáticas, originadas pela acumulação de gases de efeito estufa (GEE). Desde o início do século XXI fortaleceram-se as evidências empíricas de que a atividade humana alterou de maneira significativa a concentração de gases de efeito estufa na atmosfera (MAGALHAES, 2013). Assim, ao concordar com essa mudança climática acontecendo, vários países sinalizaram para a necessidade de mudança rumo a uma economia global de baixo carbono.

O *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2021) demonstra que as alterações do clima provocadas pelo aquecimento já estão causando impactos significativos para a vida das pessoas e no ambiente natural tais como perda de produtividade agrícola, aceleração da extinção e deslocamento de espécies, ampliação de danos à infraestrutura e economia por extremos de chuva e seca, e afirma que a forma mais efetiva de reduzir os riscos é a redução das emissões de GEE que também são impactadas pelas emissões históricas acumuladas.

Assim, dentro do tema da “sustentabilidade” tem despertado muitos questionamentos e polêmicas e a visão do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente enfatiza aspectos que concebem o novo conceito de “Economia Verde” ou a “Economia de baixo carbono”, sustentada em três pilares: pouca intensidade em carbono, eficiente no uso dos recursos naturais e socialmente inclusiva.

As mudanças climáticas trazem uma série de implicações para diversos setores da sociedade, necessitando de medidas de mitigação e de readaptação capazes de minimizar os riscos envolvidos (NICOLETTI; LEFÈVRE, 2016). Descarbonização é o grande tema das discussões climáticas, e, cada vez mais, das econômicas ao redor do mundo.

A vulnerabilidade do Brasil diante das mudanças climáticas, em razão de suas dimensões continentais e de diferenças regionais de caráter geográfico e socioeconômico, torna imprescindível a contribuição do país ao esforço global de mitigação das emissões de GEE, de forma a garantir a segurança e o bem-estar dos brasileiros, por meio de políticas de mitigação com o desenvolvimento sustentável, sendo estes objetivos já firmados pelo Brasil no Acordo de Paris, em 2015 e pela Agenda 2030.

Diante desses compromissos, setores público e privado, e sociedade civil tem conjuntamente, a responsabilidade de liderar os esforços de redução de emissões de GEE e evoluir na construção de uma economia de baixo carbono, de mitigação dos impactos, além de mecanismos de compensação ambiental.

Assim, na luta contra as alterações climáticas, reduzir as emissões por meio do uso sustentável de recursos naturais, bem como com a implantação de tecnologias apropriadas para aumento da eficiência energética são medidas imprescindíveis para efetivação de uma economia de baixo carbono.

Associado a isso, estratégias que visem reduzir as emissões são alvo de projetos de créditos de carbono, que por sua vez podem ser utilizadas no fomento de tecnologias mais limpas. Segundo Brasil (2021), o desenvolvimento de um mercado funcional de créditos de carbono é seguramente uma opção razoável, particularmente válido no Brasil, que tem áreas invejáveis em termos de potencial para florestamento e uso dessas florestas. Segundo estimativas recentes do ICC Brasil (braço da *International Chamber of Commerce*), o mercado de créditos de carbono no Brasil tem o potencial de movimentar USD 100 bilhões até 2030.

Dentre as principais energias renováveis, destaca-se a biomassa florestal. Essa cadeia produtiva tem a oportunidade de gerar vários produtos (madeira em tora, lenha, carvão, celulose, chapas de fibras, bio-óleo, gás, eletricidade etc.), muitos dos quais geradores de energia capazes de substituir, com vantagens sociais, ambientais e econômicas, os derivados de petróleo e outros combustíveis fósseis (LAVORANTI *et al.*, 2021).

Dessa forma, as florestas desempenham papel fundamental na mitigação das mudanças climáticas pelo sequestro e armazenamento de carbono, além da comercialização dos produtos madeireiros, gerando benefícios ambientais e econômicos (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2015). Ainda, são fonte de energia renovável, tendo um papel muito importante na redução do desmatamento de remanescentes florestais nativos.

Levando em consideração o grande potencial do uso de biomassa florestal na geração de energia, destaca-se seu uso pelo setor primário agrícola. Para a secagem de grãos, por exemplo, se se utiliza 0,0574 m<sup>3</sup> de madeira de eucalipto por tonelada de milho, 0,0218 m<sup>3</sup> por tonelada de soja, 0,0224 m<sup>3</sup> por tonelada de trigo e 0,0258 m<sup>3</sup> por tonelada de cevada (DRESCH *et al.*, 2014). Dessa forma, a madeira torna-se uma matéria-prima importante no processo produtivo de várias bases de commodities.

Nesse contexto, o cultivo do tabaco, variedade Virgínia, também possui papel relevante no consumo de biomassa florestal, visto que faz uso de lenha para geração de energia destinada a secagem/cura de suas folhas, por meio do processo de combustão.

Pode-se afirmar que o tabaco é a cultura mais importante dentro de uma economia baseada na agricultura familiar no Sul do Brasil. A alta rentabilidade do tabaco em pequenas áreas permite que essa tradição centenária seja a principal atividade econômica de pequenas propriedades, o que viabiliza a permanência das famílias no campo, conferindo ao Brasil a posição de segundo lugar mundial no ranking de produção de tabaco em folha (SINDITABACO, 2019).

Comparativamente a outras atividades agrícolas de relevância nacional como soja, trigo, milho, feijão, entre outros, o cultivo de tabaco alcança altos níveis de geração de renda sem absorver grandes quantidades de área produtiva. Conforme o SINDITABACO (2020), são 146.430 propriedades produtoras de tabaco, com área plantada em 2020/2021 de 273.317 hectares, sendo que desse total 245.041 são de produtores de tabaco Virgínia. O valor bruto de produção totaliza aproximadamente R\$ 5,9 bilhões para os produtores e 15,8 bilhões em impostos.

Devido à importância social e econômica do setor, este também é responsável por auxiliar na mitigação e redução das emissões de GEE, por, entre outros motivos, utilizar biomassa florestal em uma das etapas de seu processo produtivo. Pode-se afirmar que o uso de biomassa vinda de fontes sustentáveis para geração de energia, com os plantios comerciais de florestas, já pode ser considerado um grande avanço ambiental, sendo o princípio para uma economia baseada em baixo carbono. No entanto, é de extrema importância estudar as formas de reduzir cada vez mais o consumo de combustível associado à redução dos impactos ambientais.

Nesse sentido, levando em consideração que o Brasil se comprometeu em reduzir as emissões GEE em 37% até 2025 e em 43% até 2030, bem como aumentar o uso de energias renováveis em 45% (EPE, 2016), a otimização do uso de biomassa florestal, bem como a redução das emissões de GEE do processo de queima se faz importante para auxiliar o país a alcançar as metas propostas. O processo de combustão da biomassa gera emissões de gases poluentes, como CO, CO<sub>2</sub>, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> e NO<sub>x</sub>. As partículas e gases derivados de combustão incompleta são um dos principais problemas, causadores de danos ambientais e de saúde. Dessa forma, além de auxiliar o Brasil a cumprir as metas de redução de GEE, a crescente pressão ambiental sobre as indústrias tabacaleiras faz com que sejam fundamentais as pesquisas sobre a relação entre consumo do biocombustível e as emissões de GEE.

Nessa perspectiva e tendo por base o conhecimento científico acumulado sobre o tema, formulou-se de forma geral o seguinte problema e objetivos de pesquisa:

## 1.2 PROBLEMA DA PESQUISA

Avaliar a melhor relação entre o uso de diferentes biomassas florestais associadas a diferentes unidades de cura do tabaco, a fim de poder avaliar o menor impacto ambiental da atividade.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo geral

Quantificar as emissões atmosféricas decorrentes do processo de combustão de biomassa florestal, considerando diferentes níveis tecnológicos das unidades de cura do tabaco.

### 1.3.2 Objetivos específicos

✓ Obter a eficiência energética e o consumo de biomassa florestal, na forma de lenha, provenientes de *Eucalyptus dunnii* e *Eucalyptus saligna* e também de pellets de *Pinus* para secagem de tabaco, considerando diferentes níveis tecnológicos;

- ✓ Avaliar as emissões de gases de combustão, fatores de emissão, eficiência de combustão, e emissões em toneladas de carbono equivalente em relação às unidades de cura de tabaco e diferentes biomassas florestais utilizadas no processo de geração de energia para secagem do tabaco;
- ✓ Avaliar ambiental e financeiramente a implantação de cenários de baixo carbono na cultura do tabaco, por meio da disponibilização de créditos de carbono no investimento.

#### 1.4 ESTRUTURA DA TESE

O capítulo um é definido pelas considerações iniciais sobre o tema escolhido, contendo a problematização, justificativa da pesquisa e formulação dos objetivos. A proposição de hipótese será realizada para cada um dos objetivos apresentados, ou seja, no capítulo III, IV e V.

O capítulo dois apresenta uma revisão bibliográfica abordando os principais assuntos sobre o tema, formando uma visão panorâmica sob o contexto de sustentabilidade e a sua relação com a linha de pesquisa no âmbito da agricultura familiar produtora de tabaco e suas interligações com o uso de biomassa florestal e a redução das emissões de gases poluentes do processo de secagem do tabaco.

Os capítulos três, quatro e cinco tratarão dos materiais e métodos utilizados para cada objetivo proposto, bem como os resultados e as discussões de cada etapa do desenvolvimento da pesquisa.

#### REFERÊNCIAS

BRASIL, Gabriel. **O Mercado de Créditos de Carbono no Brasil**. Temas de economia aplicada. 2021. Informações FIPE. Nº 495, p. 33. ISSN: 1678-6335. Disponível em: <https://downloads.fipe.org.br/publicacoes/bif/bif495.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2022.

DRESCH, André Ramos *et al.* Projeções de consumo de madeira com fins energéticos para secagem de grãos na região de Guarapuava, PR, **Floresta**, v. 44, n. 1, p. 81-92, 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **O Compromisso do Brasil no Combate às Mudanças Climáticas: Produção e Uso de Energia**. Ministério de Minas e Energia, 2016. 96 p.

LAVORANTI, Osmir José *et al.* **Florestas energéticas**. Embrapa Florestas. Brasília: DF, 2021. 40 p.

MAGALHÃES, Aline Souza. **Economia de baixo carbono no Brasil: alternativas de políticas e custos de redução de emissões de gases de efeito estufa**. 290 p. Tese (Doutorado em Economia) – Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

NICOLLETTI, Mariana Xavier; LEFÈVRE, Guilherme Borba. **Precificação de carbono no Brasil: perspectivas e aprendizados a partir de uma simulação de mercado cap-and-trade**. Cadernos Adenauer XVII. Nº 2, 2016. p. 145-169.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Mercado de carbono**. Observatório do Clima, 2015. Disponível em: <https://www.oc.eco.br/mercado-decarbono/>. Acesso em: 20 jan. 2022.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS – IPCC. **Mudança do Clima 2021**. A Base Científica: Sumário para Formuladores de Políticas. Contribuição do Grupo de Trabalho I ao Sexto Relatório de avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima. Suíça, 2021. 38 p. Disponível em: [https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/IPCC\\_mudanca2.pdf](https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/IPCC_mudanca2.pdf). Acesso em: 2 mar. 2022.

SINDITABACO. **Tabaco: relevância econômica e social**. Relatório Institucional. Santa Cruz do Sul: RS, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/camaras-setoriais-tematicas/documentos/camaras-setoriais/tabaco/2019/sinditabaco-relatorio-institucional-2019.pdf>. Acesso em: 05 maio 2021.

SINDITABACO. **Brasil & Tabaco: Liderança no mercado mundial**. Relatório Institucional. Santa Cruz do Sul: RS, 2020. Disponível em: <http://www.sinditabaco.com.br/site/wp-content/uploads/2020/02/Relat%C3%B3rio-institucional-2020-SindiTabaco.pdf>. Acesso em: 19 jan. 2022.

## 2 CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ASPECTOS DA CULTURA DO TABACO

O tabaco, cientificamente denominado de *Nicotiana tabacum* L., pertence à família Solanaceae e é originário da América do Sul (SOARES NETO *et al.*, 2008). A planta pode atingir dois metros de altura, e se encontra, coberta de pelos viscosos. As folhas são alternas, sésseis, ovais ou lanceoladas ponteagudas, inteiras, pegajosas, com nervuras muito salientes na página inferior e de cor verde mais carregado na página superior (BOIEIRO, 2008).

As principais classificações das folhas do fumo podem ser descritas conforme Oliveira e Costa (2012):

- Parte inferior - chamada “Livre Pé” ou “baixeira”, que produz folhas mais leves, importantes para a combustão, por possuírem um alto teor de nicotina.
- Parte intermediária - denominada de “Centro Pé” ou “Meio Pé”, responsável pela produção de folhas grandes.
- Parte superior - conhecida como “Corona” ou “ponteira” produtora de folhas menores, mas encorpadas.

Em relação ao plantio, destaca-se que, após a preparação do solo, o mesmo é realizado de forma manual, seja para a variedade Burley quanto para o Virgínia. O plantio ainda é convencional em muitas propriedades, com gradagens para formação dos sulcos no terreno. No entanto, nos últimos anos, vindo sendo implantado o plantio direto como forma de otimizar o manejo do solo e minimizar os impactos ambientais.

Já a colheita e a secagem do tabaco, divergem para as diferentes variedades. Para o tabaco do tipo Burley a planta é colhida inteira, cortando-se o talo. Após a colheita, o tabaco é curado por até dois meses em contato com o ar em galpões. Sua cor vai desde o castanho claro ao castanho escuro. Já o tabaco Virgínia, é colhido por folha e curado em estufas aquecidas e durante o processo adquire cor entre amarelo-dourado e laranja intenso. O processo de cura demora uma semana e é esta variedade que será tratada nesta pesquisa.

O ciclo de cura do tabaco Virgínia compreende quatro fases: Amarelção, Murchamento, Secagem da lâmina e do Talo, e dura em média de 132 a 168 horas, com temperaturas ascendentes de 90 a 155 °F (32,2 a 68,3 °C), conforme a Tabela 1:

Tabela 1 – Fases da secagem do tabaco Virgínia

<b>Fase</b>	<b>Atividades</b>	<b>Temperatura (°F)</b>	<b>Período (horas)</b>
Amarelção	O oxigênio ao penetrar nas folhas, através dos estômatos acelera a expulsão de água e dióxido de carbono, favorecendo a conversão em amido e demais atividades enzimáticas dessa fase	90 a 100	48 a 60
Murchamento	Desencadeado o processo de oxidação de polifenóis, com pontos escuros chamados de “guinea” ou teia de aranha	101 a 115	18 a 24
Secagem da lâmina	Fixação da cor e secagem da lâmina	116 a 135	48 a 60
Secagem do talo	Secagem do talo	136 a 155	18 a 24

Fontes: Adaptado de Profigen (2016).

Ainda, em relação à secagem das folhas do tabaco, cabe comentar que nas estufas há suspiros que são locais de entrada de ar e têm área um terço menor do que os suspiros de saída. Isso porque o ar que é admitido na estufa é mais denso e de temperatura inferior à temperatura interna da estufa. Quando aquece, esse ar se expande, aumenta seu volume e procura a sua saída para cima. Ao aquecer o ar sobe. Ao subir, encontra uma camada de umidade, que é a água liberada pelas folhas. A massa de ar perde temperatura em contato com a umidade, que carrega para fora da estufa. Uma vez iniciado o processo de exaustão da estufa, o ar sobe dentro da estufa, carrega a umidade para cima e para fora da estufa. O ar admitido pelos suspiros inferiores é aquecido e sobe entre as folhas, independentemente de perder temperatura em contato com a umidade que encontra pelo caminho.

## 2.2 IMPORTÂNCIA ECONÔMICA DO TABACO

A produção de tabaco faz parte da economia de grande parte dos pequenos produtores familiares do Brasil. O Rio Grande do Sul é responsável por 48,2% da produção (destacando as microrregiões de Pelotas e Santa Cruz do Sul), Santa Catarina responde por 28,9% (com destaque para a microrregião de Canoinhas no norte do estado) e o Paraná é responsável por 21,7% (ZAJONZ; VILLWOCK; SILVEIRA, 2017).

A produção é desenvolvida basicamente pela agricultura familiar e possui 137.618 famílias produzindo tabaco nas variedades comerciais Virgínia, Burley e comum, sendo a produção do tipo Virgínia a mais expressiva, chegando a 91,12 % da produção.

A safra da produção sul-brasileira de tabaco 20/2021 chegou a 628.489 toneladas. A variedade Virgínia chegou a 572.732 toneladas, o Burley, 49.260 toneladas; e o Galpão Comum, 6.497 toneladas (AFUBRA, 2021).

Conforme dados da Associação dos Fumicultores do Brasil (AFUBRA, 2021), mais de 31,3 mil famílias não possuem terra e trabalham em regime de parceria, encontrando uma forma digna de se integrarem e permanecerem no meio rural, sendo que a média das propriedades produtoras chega a 12,3 hectares, ou seja, menos do que um módulo fiscal (em torno de 18 hectares).

### 2.3 ASPESCTOS AMBIENTAIS: EFEITO ESTUFA E MUDANÇAS CLIMÁTICAS

O efeito estufa natural é parte de um sistema equilibrado de transferência e transformação de energia na atmosfera, na superfície terrestre e nos oceanos. No entanto, mesmo sendo um fenômeno natural, o efeito estufa está diretamente ligado as mudanças climáticas, devido ao aquecimento global. O aquecimento global pode ser definido como um aumento da temperatura média global, provado por fatores naturais (atividade solar, composição físico-química da atmosfera, tectonismo e vulcanismo) ou por fatores antropogênicos (emissões de GEE por queima de combustíveis fósseis, queimadas, etc.) (SILVA; PAULA, 2015).

A principal causa do aquecimento global é o aumento da concentração de gases poluentes na atmosfera, o que vem se intensificando desde a Revolução Industrial, no final do século XVIII (JUNGES *et al.*, 2018).

As emissões antropogênicas de gases de efeito estufa (GEE) são as principais responsáveis pelo aumento da temperatura global. Conforme Brysse *et al.* (2013), as trajetórias atuais de emissões podem levar a mudanças catastróficas no clima.

Assim, diversos cientistas não apenas observam mudanças passadas no clima, mas também tentam analisar possíveis mudanças futuras.

As projeções do 6º relatório do IPCC (2021), desenha 5 possíveis cenários para o futuro, batizados de Projeto de Intercomparação de Modelos Climáticos Versão 6 (CMIP6). São eles: SSP3 – 7,0 e SSP 5 – 8,5, cenários com altas emissões de gases de efeito estufa e CO<sub>2</sub>; SSP 2 – 4,5, cenário intermediário de emissões; e SSP 1 – 1,9 e SSP1 – 2,6, cenários com baixa emissão de gases de efeito estufa e CO<sub>2</sub>. No melhor cenário, haverá aumento do nível da temperatura em 1,5 °C.

Ainda, segundo o IPCC, para diminuir em qualquer medida o aquecimento global em curso é fundamental que as emissões líquidas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) sejam zeradas. Cada trilhão de toneladas de CO<sub>2</sub> emitidas cumulativamente na atmosfera causa um aquecimento global de 0,27°C a 0,63°C, o que é conhecido como resposta climática transitória às emissões. Além disso, a concentração de outros gases de efeito estufa, como o metano (CH<sub>4</sub>), precisam ser substancialmente reduzidas.

Os níveis de CO<sub>2</sub> na atmosfera têm aumentado de forma constante ao longo dos últimos 200 anos. Isto se deve à utilização de combustíveis fósseis, bem como a um aumento no desmatamento, ambos eventos que liberam grandes quantidades de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) para a atmosfera. As concentrações continuaram a aumentar na atmosfera, chegando a médias anuais de 410 ppm para CO<sub>2</sub>, 1.866 ppb para metano (CH<sub>4</sub>), e 332 ppb para óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) em 2019 (IPCC, 2021).

As mudanças climáticas são um problema ambiental de longo prazo e difícil de gerir. Alguns GEEs permanecem na atmosfera centenas de anos (ADLER; GROSSO; PARTON, 2007). Nenhum país sozinho é capaz de enfrentar os desafios impostos pela mudança climática, que incluem decisões políticas, mudanças tecnológicas e consequências globais de longo alcance. Apenas de forma conjunta essa situação poderá ser mitigada.

Dessa forma, cada país, organização, empresa, sociedade civil tem um papel importante na atenuação dos impactos ambientais e por isso, todas as pesquisas voltadas a redução das emissões de GEE são fundamentais para, de forma conjunta, obter gradativamente a redução dos impactos ambientais, principalmente das atividades econômicas.

## 2.4 ABORDAGEM TEÓRICA SOBRE A EVOLUÇÃO DO CONCEITO DE SUSTENTABILIDADE

Historicamente, tem-se observado um desencadeamento de fatos contribuintes e agravantes da degradação ambiental vivenciada globalmente, que vão desde o advento do desenvolvimento das atividades agrícolas, passando pela Revolução Industrial, até culminar no atual modo de vida (BORGES; TACHIBANA, 2005).

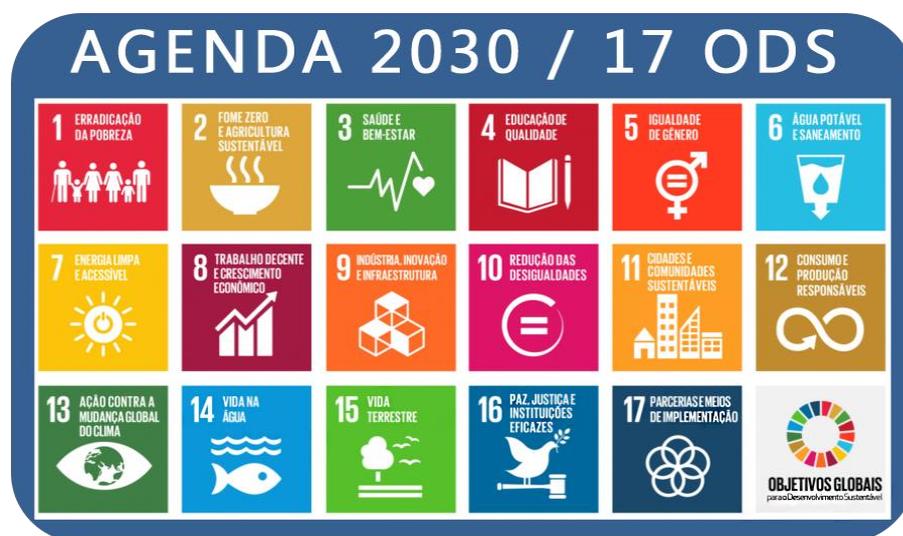
A preocupação com os efeitos dos impactos ambientais negativos, oriundos direta ou indiretamente da ação humana na natureza, foram percebidos a partir da década de 1960 onde a queda da qualidade de vida em algumas regiões do planeta foi substancialmente notada. Em ordem cronológica, a consciência ou preocupação ambiental pode ser dividida em três fases:

A primeira fase é chamada de estágio reativo e vai do início do século XX até 1972. Nesse período prevalece um tratamento pontual das questões ambientais desvinculado de qualquer preocupação com os processos de desenvolvimento. A segunda fase começa com a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente Humano, realizada na cidade de Estocolmo em 1972, e vai até 1992 e caracteriza-se pela busca de uma nova relação entre meio ambiente e desenvolvimento. A terceira fase, chamada de estágio proativo, é a fase atual que tem início com a realização da Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento, em 1992, no Rio de Janeiro. Essa fase caracteriza-se pelo aprofundamento e implementação das disposições e recomendações dos estados nacionais, governos locais, empresas e outros agentes (UNITED NATIONS, 2012).

O acordo de Paris foi o último protocolo assinado, firmado em 2015 e em vigor, substituindo o Protocolo de Kyoto. O objetivo do acordo foi fortalecer a resposta global à ameaça das mudanças climáticas por meio do atendimento das metas e desafios propostos em convenções anteriores. Manter a temperatura média da Terra abaixo de 2°C, acima dos níveis pré-industriais, além de esforços para limitar o aumento da temperatura até 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais e apoiar os países menos industrializados na adaptação de suas emissões (SILVA; AFONSO; DONZELLES, 2012). Assim, o Acordo de Paris foi aprovado pelos 195 países da *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC) para reduzir emissões de GEE no contexto do desenvolvimento sustentável.

Conjuntamente ao Acordo de Paris, foi aprovada em 2015 na Cúpula das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável, a Agenda 2030, foi assinada por 193 países, incluindo o Brasil, estabelecendo 17 objetivos e 169 metas para o enfrentamento da fome e da pobreza. Os objetivos, conforme a (ONU, 2015), podem ser observados na Figura 1.

Figura 1 – 17 Objetivos do desenvolvimento sustentável



Fonte: ODS Brasil (2015).

O avanço na implementação dos ODS traz um reconhecimento da definição de desenvolvimento sustentável que é internacionalmente aceita e a integração entre as três dimensões – econômico, social e ambiental.

Assim, de todos os objetivos citados, esta tese abordará de forma direta os assuntos relacionados à energia limpa e acessível, consumo e produção responsável, combate as alterações climáticas e vida terrestre, objetivos 7, 12, 13 e 14 respectivamente. No entanto, também não deixa de contribuir com os objetivos 2 e 8, relacionados à Fome zero e agricultura sustentável e trabalho decente e crescimento econômico.

Na Tabela 2, elencou-se objetivo geral e os subobjetivos associados ao tema da tese:

Tabela 2 – Descrição dos objetivos que se enquadram no escopo da tese

(continua)

ODS	Relação com o tema da tese
	<p>Dobrar a produtividade agrícola e a renda dos pequenos produtores de alimentos, particularmente das mulheres, povos indígenas, agricultores familiares, pastores e pescadores, inclusive por meio de acesso seguro e igual à terra, outros recursos produtivos e insumos, conhecimento, serviços financeiros, mercados e oportunidades de agregação de valor e de emprego não agrícola;</p> <p>Garantir sistemas sustentáveis de produção de alimentos e implementar práticas agrícolas resilientes, que aumentem a produtividade e a produção, que ajudem a manter os ecossistemas, que fortaleçam a capacidade de adaptação às mudanças climáticas, às condições meteorológicas extremas, secas, inundações e outros desastres, e que melhorem progressivamente a qualidade da terra e do solo.</p>
	<p>Aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global;</p> <p>Dobrar a taxa global de melhoria da eficiência energética;</p> <p>Expandir a infraestrutura e modernizar a tecnologia para o fornecimento de serviços de energia modernos e sustentáveis para todos nos países em desenvolvimento, particularmente nos países menos desenvolvidos.</p>
	<p>Atingir níveis mais elevados de produtividade das economias por meio da diversificação, modernização tecnológica e inovação, inclusive por meio de um foco em setores de alto valor agregado e dos setores intensivos em mão de obra;</p> <p>Melhorar progressivamente, até 2030, a eficiência dos recursos globais no consumo e na produção, e empenhar-se para dissociar o crescimento econômico da degradação ambiental, de acordo com o Plano Decenal de Programas sobre Produção e Consumo Sustentáveis, com os países desenvolvidos assumindo a liderança.</p>
	<p>Alcançar a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais;</p> <p>Garantir que as pessoas, em todos os lugares, tenham informação relevante e conscientização para o desenvolvimento sustentável e estilos de vida em harmonia com a natureza.</p>

(conclusão)

	<p>Integrar medidas da mudança do clima nas políticas, estratégias e planejamentos nacionais; Melhorar a educação, aumentar a conscientização e a capacidade humana e institucional sobre mitigação, adaptação, redução de impacto e alerta precoce da mudança do clima.</p>
	<p>Promover a implementação da gestão sustentável de todos os tipos de florestas, deter o desmatamento, restaurar florestas degradadas e aumentar substancialmente o florestamento e o reflorestamento globalmente; Mobilizar e aumentar significativamente, a partir de todas as fontes, os recursos financeiros para a conservação e o uso sustentável da biodiversidade e dos ecossistemas; Otimizar recursos significativos de todas as fontes e em todos os níveis para financiar o manejo florestal sustentável e proporcionar incentivos adequados aos países em desenvolvimento para promover o manejo florestal sustentável, inclusive para a conservação e o reflorestamento.</p>

## 2.5 O BRASIL FRENTE ÀS EMISSÕES E ÀS METAS DE MITIGAÇÃO

Os eventos descritos no item 2.4, influenciaram (e influenciam), de forma direta na estratégia de desenvolvimento e de inovação tecnológicas de todos os setores (primário, secundário e terciário) visto que norteiam as políticas públicas voltadas a cada segmento.

Com o Acordo de Paris, o Brasil se comprometeu a reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 37% abaixo dos níveis de 2005, até 2025, com uma contribuição indicativa subsequente de reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 43% abaixo dos níveis de 2005, até 2030. Para isso, o país se comprometeu a aumentar a participação de bioenergia sustentável na sua matriz energética para aproximadamente 18% até 2030, restaurar e reflorestar 12 milhões de hectares de florestas, bem como alcançar uma participação estimada de 45% de energias renováveis na composição da matriz energética até 2030 (SILVA; AFONSO; DONZELLES, 2012), impactando diretamente o setor agrícola e de florestas.

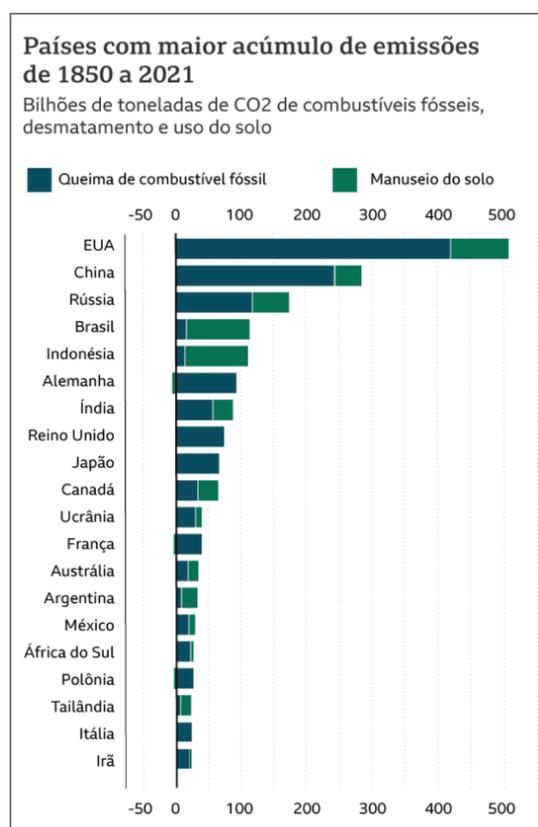
No entanto, conforme Trentini e Silva (2019), a adoção dessas medidas já foi iniciada. Em dezembro de 2017, foi promulgada a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) que instituiu um mercado de créditos de descarbonização (CBIO), dando oportunidade para o setor de biocombustíveis. Já em relação ao uso da terra, destaca o projeto de “desmatamento ilegal zero na Amazônia brasileira”, bem como o incentivo e fortalecimento do Plano ABC (atividades de baixo carbono) para agricultura.

No âmbito do Acordo de Paris, os compromissos assumidos pelo Brasil, estão alinhados com sua legislação interna, no entanto, em vias opostas para cumprir as metas pré estabelecidas, o Brasil passou de 14º país que mais emitiu GEE até 2018 para o 4º lugar nas emissões de GEE de 2018-2021, segundo dados da Carbon Brief (2021).

A mudança de metodologia altera a lista de top 20 maiores poluidores históricos. Pesquisa de 2019 da *Carbon Brief*, que só considerava emissões por queima de combustível, apontava EUA, China, Rússia, Alemanha e Reino Unido com os cinco maiores emissores. Conforme esse novo ranking, os cinco países que mais poluíram desde a Revolução Industrial, de 1850 a 2021, são: EUA, China, Rússia, Brasil e Indonésia. No Brasil e na Indonésia, a maior parte das emissões vem da derrubada de florestas e uso do solo para pecuária e agricultura, não da queima de combustíveis fósseis, como ocorre com os demais grandes poluidores.

Na Figura 2 é possível verificar a evolução do Brasil nas emissões de CO<sub>2</sub> em relação aos demais países.

Figura 2 – Emissões até 2021



Fonte: Carbon Brief, 2021.

Percebe-se uma emissão significativa de GEE do Brasil, passando de um país que poderia ser considerado um sumidouro de carbono, para um país de importância negativa na redução das mudanças climáticas.

Na fomicultura, bem como de todo setor primário agrícola, a participação da biomassa florestal é uma forma efetiva de redução de emissões.

Além disso, a utilização de biomassa oriunda de florestas plantadas, além de ser um recurso renovável, armazena carbono e elimina a pressão sobre florestas nativas, auxiliando na redução do desmatamento ilegal. Dessa forma, o estudo sobre a sustentabilidade ambiental dessa cultura, associado à utilização de energias renováveis se faz de interesse não só regional, como também mundial, visto que possui formas de auxiliar na redução das emissões de GEE, no aumento de áreas de floresta plantada e na maximização e eficiência do uso de energia renovável. O contexto da fomicultura na sustentabilidade ambiental será tema tratado no item 2.7.

## 2.6 MECANISMOS DE MERCADO PARA CUMPRIR AS METAS DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE GEE

A redução de emissões de GEE tem sido buscada a partir de diversas políticas governamentais, em diferentes países, que utilizam instrumentos econômicos (subsídios, taxas de carbono, isenção de impostos, mercados de carbono), regulatórios (limite de emissões, controle de emissão veicular) e também processos políticos. Com o protocolo de Quioto iniciado em 1997 e firmado em 2005, veio a possibilidade de utilização de mecanismos de mercado para que os países desenvolvidos pudessem cumprir os compromissos quantificados de redução e limitação de emissão de GEE (MOREIRA; GIOMETTI, 2008), sendo eles:

- Comércio de Emissões
- Implementação Conjunta
- Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)

Conforme assegurado pelo Protocolo de Quioto, o Comércio de Emissões permite que países que consigam reduzir emissões além da meta nacional possam negociar o excesso na forma de créditos com outros países, criando um comércio internacional de emissões entre países industrializados. Os Projetos de Implementação Conjunta permitem que um país industrializado invista em outro, em projetos que colaborem para a redução de GEEs. Já o terceiro mecanismo devem buscar formas de reduzir as emissões de GEE ou aumentar a remoção desses gases, via investimento em tecnologias mais evoluídas ambientalmente, substituição de fontes de energia fósseis por renováveis, racionalização do uso energético, reflorestamento, florestamento, entre outras alternativas. Além disso, é o único mecanismo do Protocolo que admite a participação voluntária de países em desenvolvimento (AMARAL; CORREA; MOREIRA, 2011).

Levando em consideração que os projetos de redução das emissões geram créditos de carbono, estes devem possuir uma normativa para serem mensuráveis e comercializáveis. Por convenção, uma tonelada de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) corresponde a um crédito de carbono. Essa medida internacional foi criada com o objetivo de medir o potencial de aquecimento global (*Global Warmig Potencial* – GWP).

No Brasil, ainda há uma dificuldade em fazer com que esses projetos saiam do papel, principalmente, para que sejam mais acessíveis a todas as pessoas físicas, empresas e produtores rurais. No entanto, mesmo não tendo um mercado regulado, determinou por meio da Lei nº 12.187/09 (Política Nacional de Mudanças Globais do Clima) as suas metas voluntárias de reduções de emissões de gases Efeito Estufa, conforme mencionado por Godoy e Saes (2015) bem como no Acordo de Paris. Além disso, foi aprovado o projeto de lei 528/21, que regulamenta o Mercado Brasileiro de Redução de Emissões (MBRE). Ainda, vale destacar o início dos projetos das CPRs Verdes e os projetos de pagamento por serviços ambientais, os quais tem por objetivo o pagamento ao proprietário rural pela conservação e preservação ambiental (MAPA, 2021).

Ressalta-se que nesses projetos o proprietário rural, pequenas empresas e sociedade civil terão mais acesso, visto que se trata de projetos a nível regional e até mesmo municipal, que podem e devem ser implementados de forma a poder fazer com que toda a parcela da população tenha direito de obter ou gerar créditos de carbono e o dever de preservação ambiental e redução das emissões de GEE.

Sendo assim, pode-se verificar que o Brasil possui metas e projetos importantes para redução das emissões, no entanto, ainda possui uma morosidade na regulamentação desses projetos e na fiscalização.

Ainda nesse contexto, inicia-se a discussão sobre a precificação do carbono. Conforme o Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável (CEBDS), a precificação de carbono consiste na atribuição de um preço, explícito ou não, sobre as emissões de gases de efeito estufa de determinada instalação, organização ou jurisdição. A designação de um valor monetário a cada unidade de emissão de gases de efeito estufa (GEE) em tCO<sub>2</sub>e (toneladas de dióxido de carbono equivalente) corresponde ao envio de um sinal de preços aos tomadores de decisão, desencorajando a adoção de tecnologias carbono-intensivas e incentivando o desenvolvimento de atividades que impliquem redução de emissões de GEE.

Os preços de carbono observados nos arranjos de precificação de emissões, no Brasil, variam de R\$12,00 reais e chegam até 365,00 reais, ou seja US\$2/tCO<sub>2</sub>e a US\$/66tCO<sub>2</sub>e (CRED CARBO, 2022). Conforme Santos et al. (2018), a *Carbon Pricing Leadership Coalition* (CPLC), iniciativa global do Banco Mundial que incentiva a adoção de mecanismos de precificação de carbono evidencia que a mesma é parte indispensável da estratégia de redução eficiente das emissões de GEE.

Logo, estabelecer um preço para o carbono será crucial para o cumprimento do Acordo de Paris e dos objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS), garantindo o desenvolvimento e crescimento econômico sustentável.

Sendo assim, diante das opções de minimizar ou cessar as emissões de GEE das atividades, associada às formas de mitigação ou compensação que podem ser propostas, é de fundamental importância analisar as diferentes opções de tecnologia e de insumos ou produtos (disponíveis ou não no mercado) que possam ser utilizados para proporcionar uma atividade econômica de baixo carbono. O balanço positivo, ou seja, a redução das emissões de GEE da atividade, podem ser utilizadas como forma de fomentar o uso de tecnologias limpas, ou de proporcionar o financiamento de projetos que visem a preservação ambiental, que consequentemente permitirão a apreensão de carbono e redução de emissões.

## 2.7 O CONTEXTO DA FUMICULTURA NA SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL

Para a produção do tabaco Virgínia é necessário a secagem das folhas em unidades de cura (estufas) por um ciclo médio de 7 dias a calor constante, mediante o processo de combustão de biomassa florestal. Assim, deve haver florestas para produzir lenha e é nesse contexto que a fumicultura entra como uma atividade importante no desenvolvimento sustentável, visto que a origem da biomassa é de florestas plantadas, reduzindo (ou eliminando totalmente) o uso de madeira nativa ilegal e utilizando energia renovável.

Destaca-se que o setor fumageiro, é muito evidenciado pelo aspecto econômico e apelo ambiental que traz consigo, mas nos últimos anos vem chamando atenção pelo esforço em relação ao meio ambiente (FREY; WITTMANN, 2007). Além dos próprios produtores, as empresas parceiras e as representações dos produtores, como sindicatos e associações, envolvidas também possuem uma coparticipação na responsabilidade ambiental dessa cultura, sendo que a preocupação ambiental vem aumentando ao longo dos últimos anos devido às metas de redução das emissões de GEE derivadas dos acordos internacionais, sendo o último, o Acordo de Paris, além do cumprimento dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

Atualmente o Sistema Integrado de Produção do Tabaco, entre empresa e produtor, auxilia na manutenção e na fiscalização de uma atividade ambientalmente sustentável. Conforme Reis *et al.* (2017), por intermédio de contratos de compra e venda da produção, cabe às empresas viabilizar as atividades, como fornecimento de insumos (herbicidas, fertilizantes etc.), prestação de assistência técnica e classificação final do produto para o pagamento da produção, entre outras obrigações. Dentre os deveres das famílias figuram a venda integral da produção para as empresas, o cumprimento de dispositivos legais relacionados à proteção ambiental e saúde no trabalho.

Conforme Troian; Eichler; Soglio (2014), percebe-se que existem iniciativas ambientalmente adequadas que vêm sendo divulgadas pelas empresas fumageiras junto aos fumicultores vinculados a elas, como redução e eliminação de agrotóxicos, introdução do uso de agentes de controle biológico, uso de cultivares resistentes às principais doenças, monitoramento de resíduos de pesticidas, uso de equipamentos de proteção individual (EPI's), adoção de práticas de preservação e conservação do solo, silvicultura e conservação de matas nativas.

Todas essas iniciativas são elencadas nos relatórios de sustentabilidade das empresas fumageiras, onde se verifica os objetivos de redução de emissões de GEE e de uso de energias renováveis, por exemplo. O relatório da empresa Philip Morris Brasil (2020), destaca que a substituição dos modelos convencionais de estufas pelas de ar forçado possibilitou a redução em 23% da lenha utilizada no processo de cura do tabaco desde 2014, auxiliando na redução das emissões de GEE, que atualmente totalizam 6.246,70 toneladas de CO<sub>2</sub> e oriundas de fontes não renováveis e 70,74 toneladas de CO<sub>2</sub>e de fontes renováveis, anualmente. Além disso, tem como objetivo atingido o uso de 100% da lenha utilizada proveniente de fontes sustentáveis (florestas plantadas) e rastreável e metas de desmatamento bruto zero de floresta nativa e protegida. A *Japan Tabaco International (JTI)* de 2019/2020 evidencia uma redução de 17% nas emissões de GEE e 30% de aumento no uso de energias renováveis (JAPAN TOBACCO INTERNATIONAL, 2020). Para a BAT Brasil, do ponto de vista ambiental, há adoção de uma série de práticas mais sustentáveis em fábricas, usinas e demais operações, alcançando a neutralização de 83% das suas emissões de carbono, conforme relatório de sustentabilidade do ano de 2015 (BAT BRASIL, 2015).

Percebe-se que as empresas são pleiteadas a seguir um desenvolvimento sustentável da produção de tabaco e assim, também exigem de seus produtores a garantia de uma produção ambientalmente adequada. Para isso, um dos primeiros itens a serem implantados foi a produção de florestas para lenha sustentável e rastreada.

Devido a isto, o Sindicato da Indústria do Tabaco (SINDITABACO) e AFUBRA, bem como as empresas tabacaleiras desenvolvem inúmeros projetos de incentivo aos florestamentos nas propriedades produtoras de tabaco (HILSINGER, 2016).

Ao analisar os modelos de fomento florestal do setor fumageiro, nota-se que, estes visam, principalmente, atender às necessidades de lenha para as estufas de tabaco, buscando a autossuficiência dos fumicultores. Ainda, os plantios florestais permitem o uso de áreas inadequadas para agricultura, possibilitando uma melhor utilização das propriedades, e ambientalmente, esses plantios amenizam a pressão sobre as florestas naturais remanescentes (FREY; WITTMANN, 2007).

Além disso, os plantios florestais têm como objetivo garantir a oferta de madeira e incluir a floresta como atividade econômica do meio rural, desempenhando diferentes funções ao mesmo tempo, como: sombra, provendo conforto térmico para as criações de animais e quebra-ventos para as culturas agrícolas (RODIGHERI, 2000). Wang *et al.* (2019), evidenciam que o Brasil é um dos principais países que desenvolvem o cultivo de árvores do mundo. O objetivo é tornar cada agricultor autossuficiente em biomassa florestal, principalmente lenha, sem repercutir nas matas nativas. Ressalta-se que, o aumento da eficiência em consumo está relacionado com a redução do gasto com a biomassa, ou seja, possui impacto econômico atrativo, mas também um impacto ambiental positivo, visto que o menor consumo de biomassa ocasiona maior disponibilidade de árvores plantadas sequestrando carbono na atmosfera.

No entanto, além da produção de lenha sustentável, oriunda de plantios energéticos, o processo de combustão para geração de calor também deve ser levado em consideração, pois a queima de biomassa florestal para secagem das folhas de tabaco emite gases poluentes, aumentando a concentração de GEE na atmosfera e contribuindo para o efeito estufa e consequentemente para o aquecimento global.

A maioria das unidades de cura implantadas atualmente para secagem de tabaco possuem pouca ou nenhuma tecnologia, porém, são de menor custo para o produtor. São estufas rudimentares, onde se faz a queima da biomassa em fornalhas não padronizadas, tornando-as pouco eficientes em relação ao consumo de combustível. Assim, um aspecto importante na definição de prioridades e estratégias para a gestão ambiental, em nível de empresa-produtor, é a identificação e a avaliação dos impactos ambientais causados pela atividade (FREY; WITTMANN, 2007).

Dessa forma, a pesquisa elaborada ao longo desta tese se torna importante para definir os padrões de emissões de gases poluentes, levando em consideração a biomassa oriunda de plantios florestais e considerando as diferentes unidades de cura utilizadas pelos produtores. O objetivo final é proporcionar uma atividade ambientalmente e financeiramente mais atrativa, condizente com a realidade de baixo carbono dos investimentos.

## 2.8 O PROCESSO DE COMBUSTÃO DE BIOMASSA FLORESTAL

A secagem do tabaco necessita de calor que é produzido pela combustão da lenha ou derivados. Assim, ocorre a transferência de energia térmica para o ar que é aquecido, produzindo posteriormente um gradiente térmico responsável pela secagem das folhas de tabaco (GREFF; FARIAS; SCHULTE, 2015). Em 2019, foram produzidos no sul do Brasil 33,3 milhões de metros cúbicos (m<sup>3</sup>) de lenha, sendo 12,2 milhões de m<sup>3</sup> no Rio Grande do Sul, 8,5 milhões de m<sup>3</sup> em Santa Catarina e 12,6 milhões de m<sup>3</sup> no Paraná (IBGE, 2021).

A combustão de biomassa é o principal método de conversão de biomassa para energia, responsável por mais de 90% da contribuição global para a bioenergia. É uma reação química de oxidação de materiais combustíveis. Denomina-se combustão o conjunto de reações químicas exotérmicas nas quais os elementos combustíveis se combinam com o oxigênio, liberando energia quando o combustível atinge a temperatura de ignição.

A combustão da biomassa é influenciada por vários fatores diretos da biomassa. O teor de umidade é um deles, pois a apresenta grande variação de acordo com o tipo biomassa, armazenamento e pré-tratamento a que foi sujeita. Elevado teor de umidade reduz a eficiência do sistema de combustão (saída de calor da caldeira/entrada de energia do combustível (BERNDES *et al.*, 2008). A densidade de diferentes biocombustíveis também é variável, existindo uma significativa diferença entre folhosas e coníferas (resinosas). As madeiras de folhosas têm densidade mais elevada, o que influencia o volume da câmara de combustão, a proporção de entrada de energia e as características de combustão do combustível (BERNDES *et al.*, 2008). Além disso, a o poder calorífico, teor de extrativos, componentes voláteis e cinzas também alteram o processo de combustão.

Ainda, outros fatores, além da biomassa, também devem ser levados em consideração, tais como: a temperatura de ignição, turbulência do comburente e tempo disponível para a combustão (tecnicamente chamados de três Ts: temperatura, turbulência e tempo). A disponibilidade desses elementos fundamentais está relacionada com a ocorrência da combustão, da seguinte forma, conforme Souza (2018).

- a) Disponibilidade de combustível e oxigênio: para que haja uma combustão perfeita, o combustível deve ser dosado de forma correta e deve contemplar um excesso de oxigênio, ou seja, mais do que o necessário para a reação química completa. Para os combustíveis sólidos, líquidos e gasosos são recomendados, respectivamente, 30 a 60%; 10 a 30%; e 5 a 20%. por exemplo, para a queima de 1 Kg de lenha seca é necessário 4,75 m<sup>3</sup> de ar. para uma queima perfeita, seria necessário um excesso de ar, ou seja, 7,1 m<sup>3</sup>. Portanto, ao alimentar uma fornalha, devemos verificar se o combustível e o ar injetado na fornalha estão na dose certa. Geralmente, para as fornalhas comuns, a quantidade de ar é comandada pela abertura do ar primário e pela chaminé.
- b) Contato do combustível com o oxigênio: o combustível e a fonte do comburente (ar ambiente), durante o processo de combustão, devem ter maior contato, para facilitar as reações químicas de oxidação, sendo isso facilitado com a pulverização, desintegração e/ou aumentando a turbulência do comburente no interior da câmara de combustão.
- c) Disponibilidade de tempo e espaço: para uma combustão perfeita e completa, o processo deve dispor de espaço físico e tempo suficiente para a realização das reações químicas.
- d) Ocorrência da temperatura de ignição: a mistura combustível e a substância comburente devem ser aquecidas até atingirem a temperatura de ignição do combustível.

### **2.8.1 Gases provenientes do processo de combustão**

Uma combustão eficiente (sem geração de fumaça) é aquela em que todos os elementos, resultantes do processo de queima, são transformados totalmente em dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), água (H<sub>2</sub>O) e calor (o que mais interessa no processo). Abaixo, verificam-se as etapas do processo de combustão de sólidos, como a biomassa florestal, conforme Moraes (2013).

- a) Aquecimento e Secagem – é o processo de retirada da umidade contida no combustível sólido através da adição de calor, que provoca a evaporação da água.
- b) Pirólise – após a secagem do combustível sólido, se a sua temperatura for elevada a níveis adequados, acontecerá a liberação dos gases inflamáveis contidos no sólido.

- c) Combustão – nessa fase, os gases formados no processo de pirólise reagem com o oxigênio numa reação exotérmica tendo como produtos  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{Calor}$  (produtos hipotéticos para uma reação ideal estequiométrica). O fogo normalmente é visível nesta fase.
- d) Pós-Combustão – ao final da pirólise, a biomassa tornou-se uma massa sólida composta de carvão e cinza. As partículas de menores dimensões são arrastadas pelos gases e saem na chaminé com a denominação de particulados. Uma fração do carbono e cinzas consegue gasificar e entra no escoamento na forma de  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{H}_2$  e outros gases.

Os principais gases poluentes que são oriundos do processo de combustão de biomassa florestal, podem ser considerados o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), identificado na forma de hidrocarbonetos ( $\text{C}_x\text{H}_y$ ) e óxidos nitrosos ( $\text{NO}_x$ ), sendo esses que serão mensurados e discutidos ao longo desta tese. A formação de gases poluentes pode estar relacionada a muitos fatores, visto que cada gás contém uma composição diferente.

Segundo o painel intergovernamental de mudanças do clima (IPCC, 2021), o  $\text{CO}_2$  é o principal gás poluente, sendo que aproximadamente 78% de sua emissão é realizada pelos humanos e é emitido, principalmente, pelo uso de combustíveis fósseis (petróleo, carvão e gás natural) e pela conversão do uso do solo. Conforme (IPCC, 2021), desde 2011 as concentrações continuaram a aumentar na atmosfera, chegando a médias anuais de 410 ppm para o  $\text{CO}_2$ , contabilizando um aumento de 47% desde 1750.

O gás metano ( $\text{CH}_4$ ) é o segundo GEE antrópico mais significativo, que contribui para aproximadamente 17% do total de forçamento radiativo por GEEs de longa vida. Cerca de 60% vem de atividades humanas (por exemplo, pecuária, cultivo de arroz, exploração de combustíveis fósseis, aterros sanitários e queima de biomassa) (WMO, 2018). A concentração de  $\text{CH}_4$  aumentou por um fator de 2,5 desde a era pré-industrial, de 722 ppb em 1750 para 1.866 ppb em 2019, totalizando um aumento de 146% (IPCC, 2021).

O óxido de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) é composto por sete compostos que apresentam átomos de nitrogênio e oxigênio em sua fórmula molecular. Segundo Virmond (2007), os óxidos de nitrogênio, são produtos de todos os processos de combustão. É o terceiro GEE mais significativo e contribui para cerca de 6% do forçamento radiativo. As concentrações de  $\text{N}_2\text{O}$  aumentaram em 23% desde 1750 chegando a 332 ppb em 2019 (IPCC, 2021).

Por fim o monóxido de carbono (CO) também é considerado um gás muito importante na química da atmosfera, é um gás inodoro, incolor e extremamente tóxico, formado na combustão incompleta de compostos que possuem carbono em sua fórmula. Virmond (2007) afirma ser um gás que resulta da oxidação parcial do carbono presente no combustível de origem orgânica, e sua formação depende, principalmente, de dois fatores: excesso de ar e mistura ar-combustível. Além disso, o CO é o maior precursor do ozônio troposférico, poluente presente nas camadas mais baixas da atmosfera, e é usado como indicador de atividades humanas uma vez que sua origem é principalmente a queima incompleta de carbono. Conforme o relatório do IPCC de 2013 e 2021, é praticamente certo que as emissões de CO podem causar um forçamento positivo e contribuem para o aumento dos gases de efeito estufa na atmosfera. Embora não sejam incluídas na contabilização das emissões totais de gases de efeito estufa com base no potencial de aquecimento global, a emissão de CO é relatada nos inventários de GEE (RODRIGUES, 2011). Sendo assim, é de suma importância quantificar as emissões de GEE do processo de combustão, objetivando uma eficiência de combustão que reduza os impactos ambientais associados ao processo de secagem.

## 2.9 IMPORTÂNCIA DOS PLANTIOS FLORESTAIS PARA A SUSTENTABILIDADE NA CULTURA DO TABACO

Conforme Souza (2018), os estudos sobre biomassa e carbono por parte dos pesquisadores em várias regiões do planeta foram fortemente impulsionados pela entrada em vigor do Protocolo de Quioto e depois pelo Acordo de Paris.

O setor do tabaco também foi influenciado, visando auxiliar no cumprimento das metas de redução de emissões, vem implementando juntamente com seus produtores, a tentativa de tornar a atividade cada vez menos prejudicial ao meio ambiente.

Segundo SEEG (2020), em 2020 as emissões do setor de agropecuária totalizaram 577 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, um aumento de 2,5% em relação ao ano anterior (562,9 milhões). Já as mudanças no uso da terra foram responsáveis pela emissão de 998 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> em 2020. Isso consolida o setor como a maior fonte de emissão bruta de gases do efeito estufa do país, representando 46% do total nacional.

Uma parte do processo produtivo do tabaco, especificamente da variedade Virgínia, faz uso de biomassa florestal para geração de energia utilizada na secagem das folhas.

O consumo de biomassa florestal para a cura do tabaco e demais *commodities* agrícolas, em uma primeira instância, trouxe diversos problemas com relação ao uso irracional de recursos madeireiros provenientes de florestas nativas até a década de 60 (PRECCI *et al.*, 2008). Muitos autores ainda consideram a produção de tabaco como uma atividade de grande impacto e degradação ambiental conforme relatos de Leppan; Lecours; Buckles (2014); Drope e Schluger (2018) e Araújo (2019), no entanto Farias (2010) e Teixeira (2021) evidenciam que o setor vem trazendo um importante apelo ambiental em busca da sustentabilidade, principalmente na utilização de recursos renováveis, como a biomassa florestal, e no incentivo ao plantio de florestas de rápido crescimento.

Assim, a conscientização de que os recursos nativos são limitados gerou uma preocupação acerca da disponibilidade contínua dos mesmos. A partir deste momento, deu-se o início das implantações de plantios florestais comerciais para prover madeira e seus coprodutos para diversos fins, inclusive para a secagem de produtos do setor primário, como o tabaco.

O setor florestal vem se tornando um importante fomentador de combustíveis renováveis, seja por meio da lenha de forma direta, ou por meio de produtos processados como pellets, carvão, serragem e cavacos, sendo promovida como alternativa sustentável para a substituição do uso de combustíveis fósseis nos processos de geração de energia.

Além da importância econômica e da segurança energética, o uso de biomassa florestal possui grande respaldo ambiental, devido a necessidade de geração de energia a partir de recursos renováveis.

Sartori *et al.* (2006), salientam que uma das grandes vantagens das plantações energéticas de madeira é que elas conseguem aumentar os reservatórios de carbono não atmosféricos por três vias: a primeira, aumentando o sequestro de carbono fixando-o na biomassa e no solo; a segunda, pela manutenção do carbono já sequestrado (ERICSSON, 2003), e a terceira, pela substituição de combustíveis fósseis e carvão mineral (BARAL; GUHA, 2004).

A produção de energia a partir da biomassa pode ser considerada um processo de carbono neutro uma vez que os indivíduos vegetais tem a capacidade de assimilar o CO<sub>2</sub> atmosférico a partir da atividade fotossintética durante o seu crescimento e liberá-lo quando transformada em energia via combustão completa, diferentemente dos combustíveis fósseis que apenas contribuem para aumento da quantidade de CO<sub>2</sub> atmosférico durante a sua degradação térmica (CROW *et al.*, 2016).

Ainda, o plantio florestal em pequenas e médias propriedades rurais, caracterizadas como de agricultura familiar, representa um importante fator na conservação ambiental e na produção de madeira para os mais diversos usos e proporciona uma fonte adicional de renda para o proprietário rural (JANKOWSKY; GALVÃO, 2000).

Diante do aumento das concentrações dos GEE, principalmente do CO<sub>2</sub>, o potencial das florestas em fixar carbono em sua biomassa passou a ganhar destaque no cenário de sustentabilidade. As florestas são importantes meios de subsistência para milhões de pessoas e contribuem para a economia e desenvolvimento de muitos países e, além disso, elas são fontes e sumidouros de carbono (KÖHL *et al.*, 2015). Segundo Sanquetta *et al.*, (2014), a quantificação do carbono estocado nos diferentes compartimentos da biomassa é fundamental para dimensionar o potencial de mitigação do efeito estufa pelas florestas.

As florestas podem ser a solução para minimizar os efeitos do aquecimento global, pois a sua conservação evita as emissões de GEE a partir da substituição das florestas por outras atividades, e os plantios florestais permitem a remoção de CO<sub>2</sub> da atmosfera através da fotossíntese e podem ser utilizados como recurso energético renovável. Além disso, o uso da madeira como um substituto para outras matérias-primas, originárias ou não de fontes fósseis, reduz as emissões de carbono nos produtos finais (SANQUETTA; CORTE; SILVA, 2011).

Ao longo dos anos, o plantio de árvores vem desempenhando um papel importante no atendimento das necessidades de matéria-prima florestal, bem como poupando as reservas florestais nativas (AMS, 2013). Para Thibau (2000), é importante considerar que além do quantitativo crescente em substituição à madeira de origem nativa, o eucalipto, por exemplo, apresenta características como desenvolvimento do incremento muito superior, ou seja, uma mesma área geográfica produz mais madeira, em um mesmo intervalo de tempo, quando comparada a outras espécies nativas.

Dessa forma, a utilização de biomassa florestal proveniente de plantios comerciais pode ser considerada um avanço no tripé da sustentabilidade. No entanto, a geração de energia pelo processo de combustão ainda emite poluentes atmosféricos, necessitando assim do aperfeiçoamento da combustão para evitar ou minimizar possíveis danos ambientais causados pela combustão incompleta, principalmente.

## 2.10 ECONOMIA DE BAIXO CARBONO: UMA ABORDAGEM TEÓRICA SOBRE CONCEITO E APLICAÇÕES

O crescimento econômico envolve diretamente o desenvolvimento social e também o ambiental, por isso, vincula-se o efeito desse crescimento a degradação ambiental e ao uso de recursos naturais que propiciam o aquecimento global de forma mais acelerada. A discussão das relações entre meio ambiente e economia remete à discussão de limites ao crescimento econômico (BELLEN; PETRASSI, 2016).

Conforme Magalhães e Domingues (2016), o efeito estufa, ou aquecimento global, é um dos temas predominantes na economia do meio ambiente, pois a magnitude do impacto desse fenômeno é suficiente para mudar largamente o clima na Terra e afetar intensamente algumas regiões, países e continentes.

Desde 2005, no âmbito das políticas de mudança climática, o debate em torno de planos e propostas de mitigação de gases de efeito estufa tem se intensificado, em busca de uma economia de baixo carbono. Mitigação pode ser definida com uma das estratégias de resposta à mudança do clima, que busca reduzir as emissões de gases de efeito estufa e fortalecer as remoções por sumidouros de carbono, tais como florestas e oceanos.

Do ponto de vista econômico, o objetivo de uma política ambiental deve ser assegurar que os custos externos da poluição sejam totalmente absorvidos por aqueles responsáveis por ela. Uma política ambiental ótima exigiria um equilíbrio entre os custos de poluição e os custos de controle da poluição. Entretanto, há uma grande dificuldade em se valorar economicamente os benefícios associadas à redução da poluição, de modo a maximizar o benefício social líquido do conjunto dos indivíduos afetados (MAGALHÃES, 2013).

Assim, busca-se uma “Economia de baixo carbono”, que seja aplicada e efetiva na redução das emissões de GEE. Esse termo foi pela primeira vez utilizado no relatório do Departamento de Transporte e do Meio Ambiente do Reino Unido, em 2003, intitulado “*Our energy future-creating a low carbon economy*”. Uma economia de baixo carbono pode ser definida como uma economia com baixa emissão de gases de efeito estufa, incluindo, dentre outras ações, implementações de políticas de mitigação de GEE (IISD, 2011).

Para uma economia mais sustentável, a difusão de novas tecnologias é primordial no crescimento dos resultados e aumento da produtividade, e é definida como a maneira que uma inovação é disseminada desde a sua primeira aplicação para outro país, região, indústria, mercado ou empresa (PINSKY; KRUGLIANSKAS, 2017).

O objetivo de umaecoinovação pode ser, por exemplo, a redução de custo por meio do uso eficiente de recursos naturais (HORBACH; RAMMER; RENNINGS, 2012). Segundo Pinsky e Kruglianskas (2017), as metas de redução das emissões e de adaptação dos países devem direcionar a transformação das sociedades, incluindo profundas mudanças nas matrizes energéticas, nos sistemas de produção e no consumo da população mundial. Esse contexto demandará inovações tecnológicas orientadas para a sustentabilidade, disponibilidade de capital de risco, e deverá contar com a liderança das empresas, suportados por políticas públicas condizentes com os desafios impostos pelas mudanças climáticas, e desenvolvimento de uma nova economia de baixo carbono.

Sendo assim, a implantação de uma economia de baixo carbono é de extrema importância para que ocorra a continuidade das atividades que geram recursos financeiros, associadas ao menor dano ambiental possível. Neste contexto, a comparação entre os cenários existentes de emissões na cultura do tabaco, em especial na secagem, se torna uma parte importante para obtenção das metas do Acordo de Paris. A associação de tecnologia eficiente com a fonte combustível adequada pode trazer resultados satisfatórios na redução das emissões de GEE, bem como no aumento da renda do proprietário rural, devido a redução do uso de biomassa no sistema produtivo.

## REFERÊNCIAS

ADLER, Paul R.; GROSSO, Stephen J. Del; PARTON, William. J. Life-Cycle Assessment of Net Greenhouse Gas Flux for Bioenergy Cropping Systems. **Ecological Applications**, v. 17, n. 3, p. 675-691, 2007.

AFUBRA. **Relatório de Atividades Afubra**. 2021. Disponível em: [https://issuu.com/afubra/docs/relatorio\\_de\\_atividades\\_afubra\\_2021\\_issu](https://issuu.com/afubra/docs/relatorio_de_atividades_afubra_2021_issu). Acesso em: 22 jan. 2022.

AMARAL, Pedro Camargo; CORREA, Rodnei Barbosa; MOREIRA, Helena Margarido. Avaliação dos benefícios secundários de projetos MDL: contribuição ao controle de poluição e ao desenvolvimento local e regional. **Holos**, v. 2, p. 28-51, 2011.

ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA – AMS. **Anuário Estatístico de 2012**. Biblioteca Florestal, 2013. Disponível em: <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/13199>>. Acesso em: 15 fev. 2022.

ARAÚJO, Denise Almeida de. **Avaliação do ciclo de vida do tabaco: uma visão geral dos impactos ambientais associados ao tabaco no âmbito mundial**. 79 p. Monografia de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Faculdade Doctum, Juiz de Fora, 2019.

BARAL, Anil; GUHA, Gauri Shankar. Trees for carbon sequestration or fossil fuel substitution: the issue of cost vs. carbon benefit. **Biomass and Bioenergy**, v. 27, n. 1, p. 41-55, 2004.

BAT BRASIL. **Tradição e ação**. British American Tobacco, 2015. Disponível em: [https://www.batbrasil.com/group/sites/SOU\\_AG6LVH.nsf/vwPagesWebLive/DOAGFM5Q](https://www.batbrasil.com/group/sites/SOU_AG6LVH.nsf/vwPagesWebLive/DOAGFM5Q). Acesso em: 21 fev. 2022.

BELLEN, Hans Michael van; PETRASSI, Anna Cecília Mendonça Amaral. Dos limites do crescimento à gestão da sustentabilidade no processo de desenvolvimento. **Revista NECAT**, v. 5, n. 10, p. 8-30, 2016.

BOIEIRO, M. **Tabaco**. Portugal, 2008. Disponível em: <http://institutohipocratesonline.com/index.php/medicinasnaoconvencionais/fitoterapia/192-tabaco.html>. Acesso em: 11 mar. 2022.

BRYSSSE, Keynyn *et al.* Climate change prediction: Erring on the side of least drama? **Global Environmental Change**, v. 23, n. 1, p. 327-337, 2013.

BORGES, Fernando Hagihara; TACHIBANA, Wilson Kendy. O quadro evolutivo do ambientalismo e os impactos no ambiente dos negócios. In: Simpósio de Engenharia de Produção, 2005, Bauru. **Anais...** Bauru: UNESP, 2005.

CARBON BRIEF. **Analysis: Which countries are historically responsible for climate change?** Clear on Climate, 2021. Disponível em: <<https://www.carbonbrief.org/analysis-which-countries-are-historically-responsible-for-climate-change>>. Acesso em: 3 mar. 2022.

CRED CARBO. **Qual o valor de 1 crédito de carbono (tonelada de CO<sub>2</sub>) no mercado internacional hoje?** Assessoria em Créditos de Carbono. 2022. Disponível em: <https://credcarbo.com/carbono/qual-o-valor-de-1-credito-de-carbono-tonelada-de-co2-no-mercado-internacionalhoje/#:~:text=Isso%20equivale%20a%20US%24%20176,ou%20di%C3%B3xido%20de%20carbono%20equivalente>. Acesso em: 18 abr. 2022.

CROW, Susan E. *et al.* Carbon balance implications of land use change from pasture to managed eucalyptus forest in Hawaii. **Carbon Management**, v. 7, n. 3-4, p. 171-181, 2016.

DROPE, Jeffrey; SCHLUGER, Neil W. **The Tobacco Atlas**. Atlanta: American Cancer Society and Vital Stragies, 2018.

ERICSSON, Erik. Carbon accumulation and fossil fuel substitution during different rotation scenarios. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 18, n. 3, p. 269-278, 2003.

FARIAS, Jorge Antonio de. **Atividade florestal no contexto da fumicultura: oportunidade de desenvolvimento regional, diversificação, geração de emprego e renda**. 168 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

FREY, Márcia Rosane; WITTMANN, Milton Luiz. Práticas de fomento florestal e incentivo à preservação das matas nativas na fumicultura. **Redes**, v. 12, n. 3, p. 99-117, 2007.

GODOY, Sara Gurfinkel Marques de; SAES, Maria Sylvia Macchione. Cap-and-trade e projetos de redução de emissões: comparativo entre mercados de carbono, evolução e desenvolvimento. **Ambiente & Sociedade**, v. 18, n. 1, p. 141-160, 2015.

GREFF, Henrique Pinton; FARIAS, Jorge Antonio de; SCHULTE, Tiago Felipe. Mercado de lenha voltado ao beneficiamento de grãos e tabaco na região central do Rio Grande do Sul. **Caderno de Pesquisa**, v. 27, n. 1, p. 22-37, 2015.

HILSINGER, Rony. **O território do tabaco no Sul do Rio Grande do Sul diante da convenção quadro para o controle do tabaco**. 223 p. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

HORBACH, Jens; RAMMER, Christian; RENNINGS, Klaus. Determinants of eco-innovations by type of environmental impact – The role of regulatory push/pull, technology push and market pull. **Ecological Economics**, v. 78, p. 112-122, 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura**. 2021. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/pnadcm>. Acesso em: 3 mar. 2022.

IISD. **A Reporting Service for Environment and Development Negotiations**. Summary of the durban climate change conference, 2011, p. 34, 2011.

JANKOWSKY, Ivaldo Pontes; GALVÃO Antonio Paulo Mendes. Principais usos da madeira de reflorestamento. In: GALVÃO A. P. M. **Reflorestamento de propriedades rurais para fins produtivos e ambientais: um guia para ações municipais e regionais**. Brasília: [s.n.], 2000. p. 57-70.

JAPAN TOBACCO INTERNATIONAL. **Relatório de sustentabilidade: 2019/2020**. Disponível em: [https://www.jti.com/sites/default/files/local-files/br/portuguese/documents/related-documents/At%20a%20glance%202019-2020\\_Ptgs.pdf](https://www.jti.com/sites/default/files/local-files/br/portuguese/documents/related-documents/At%20a%20glance%202019-2020_Ptgs.pdf). Acesso em: 2 mar. 2022.

JUNGES, Alexandre Luis *et al.* Efeito estufa e aquecimento global: uma abordagem conceitual a partir da física para educação básica. **Experiências em Ensino de Ciências**, v. 13, n. 15, p. 126-151, 2018.

KÖHL, Michael *et al.* Changes in forest production, biomass and carbon: Results from the 2015 UN FAO Global Forest Resource Assessment. **Forest Ecology and Management**, v. 352, n. 7, p. 21-34, 2015.

LEPPAN, Wardie; LECOURS, Natacha; BUCKLES, Daniel. **Tobacco control and tobacco farming: separating myth from reality**. Editora Anthem Press, 2014. 298 p.

MAGALHÃES, Aline Souza. **Economia de baixo carbono no Brasil: alternativas de políticas e custos de redução de emissões de gases de efeito estufa**. 290 p. Tese (Doutorado em Economia) – Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

MAGALHÃES, Aline Souza; DOMINGUES, Edson Paulo. Increased Energy Efficiency in Brazil: an option for a low carbon economy? **Economia Aplicada**, v. 20, n. 3, p. 273, 20 set. 2016.

MAPA. **CPR Verde: título irá recompensar o produtor pela preservação ambiental**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/cpr-verde-titulo-ira-recompensar-o-produtor-pela-preservacao-ambiental>. Acesso em: 2 mar. 2022.

MORAES, Francisco de Assis Bertini. **Uso de caldeira de biomassa e turbo gerador**. Revista da Madeira. Edição N° 135, 2013. Disponível em: [http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira\\_materia.php?num=1671&subject=Caldei](http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1671&subject=Caldei). Acesso em: 08 mar. 2022.

MOREIRA, Helena Margarido; GIOMETTI, Analúcia Bueno dos Reis. Protocolo de Quioto e as possibilidades de inserção do Brasil no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo por meio de projetos em energia limpa. **Contexto Internacional**, v. 30, n. 1, p. 9-47, 2008.

OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL – ODS. **Indicadores Brasileiros para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. 2015. Disponível em: <https://odsbrasil.gov.br/>. Acesso em: 08 mar. 2022.

OLIVEIRA, F.; COSTA, M. C. F. **Dossiê técnico Cultivo de fumo (*Nicotina Tabacum L.*)**. 2012. Serviço Brasileiro de respostas técnicas. Universidade de São Paulo – USP. Disponível em: <http://respostatecnica.org.br/dossie-tecnico/downloadsDT/NTcwMg>. Acesso em: 20 mar. 2022.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU. **Objetivos de desenvolvimento sustentável**. Indicadores Brasileiros para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, 2021. Disponível em: <https://odsbrasil.gov.br/>. Acesso em: 3 mar. 2022.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS – IPCC. **Resumo para Decisores**. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribuição do Grupo de Trabalho I para o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido e Nova Iorque, NI, EUA.: WMO, UNEP, 2013.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS – IPCC. **Mudança do Clima 2021**. A Base Científica: Sumário para Formuladores de Políticas. Contribuição do Grupo de Trabalho I ao Sexto Relatório de avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima. Suíça, 2021. 38 p. Disponível em: [https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/IPCC\\_mudanca2.pdf](https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/IPCC_mudanca2.pdf). Acesso em: 2 mar. 2022.

PHILIP MORRIS BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade**. 2020. Disponível em: [https://www.pmi.com/resources/docs/default-source/brazil-market-page/relat%C3%B3rio-de-sustentabilidade-pmb-2020.pdf?sfvrsn=f86726b7\\_4](https://www.pmi.com/resources/docs/default-source/brazil-market-page/relat%C3%B3rio-de-sustentabilidade-pmb-2020.pdf?sfvrsn=f86726b7_4). Acesso em: 2 mar. 2022.

PINSKY, Vanessa; KRUGLIANSKAS, Isak. Inovação tecnológica para a sustentabilidade: aprendizados de sucessos e fracassos. **Estudos Avançados**, v. 31, n. 90, p. 107-126, 2017.

PRECCI, R. L. *et al.* Fontes de Energia para Secagem. In: LACERDA FILHO, A. F. de; et al. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. 2. ed. Viçosa, MG: Aprenda Fácil, 2008. Cap. 4. p. 11-132.

PROFIGEN. **Fases da cura do tabaco**. 2016. Disponível em: <https://profigen.com.br/informacoes/aprenda-a-cultivar/cura-100>. Acesso em: 25 fev. 2022.

REIS, Marcelo Moreno dos *et al.* Conhecimentos, atitudes e práticas de agricultoras sobre o processo de produção de tabaco em um município da Região Sul do Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 33, n. 3, p. 148-161, 2017.

RODIGHERI, Honorino Roque. **Rentabilidade Econômica Comparativa entre Plantios Florestais, Sistemas Agroflorestais e Cultivos Agrícolas**. In: Embrapa agricultura digital. Capítulo 17. 2000. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/300459/1/cap17RentabilidadeEconomica001.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2022.

RODRIGUES, Juliane de Melo. **Análise de emissões de CO<sub>2</sub>, CO e NO<sub>x</sub>: estudo de caso em usinas termelétricas a gás natural e carvão mineral**. 82 p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia) – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), Curitiba, 2011.

SANQUETTA, Carlos Roberto; CORTE, Ana Paula Dalla; SILVA, Fernando da. Biomass expansion factor and root-to-shoot ratio for Pinus in Brazil. **Carbon Balance and Management**, v. 6, n. 1, p. 1-8, 2011.

SANQUETTA, Carlos Roberto *et al.* Estimativa de carbono individual para *Araucaria angustifolia*. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 44, n. 1, p. 1-8, 2014.

SANTOS, Luan *et al.* Impacts of carbon pricing on Brazilian industry: domestic vulnerability and international trade exposure. **Sustainability**, v. 10, n. 7, p. 1-19, 2018.

SARTORI, Fabio *et al.* Potential Soil Carbon Sequestration and CO<sub>2</sub> Offset by Dedicated Energy Crops in the USA. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 25, p. 441-472, 2006.

SEEG. **Análise das emissões brasileiras de gases do efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970-2020**. Brasília: IMAFLORA, 2021. 55 p. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br/produto/analise-dasemissoes-brasileiras-de-gases-de-efeito-estufa-e-suas-implicacoes-para-as-metasclimaticas-do-brasil-1970-2020>. Acesso em: 10 mar. 2022

SILVA, Juarez de Souza e; AFONSO, Adriano, Divino Lima; DONZELLES, Sérgio Maurício Lopes. **Secagem e Secadores**. Capítulo 5, 2012. 32 p. Disponível em: <https://www.agricultura.rs.gov.br/upload/arquivos/201811/23093833-secagem-e-armazenagem-cap5.pdf>. Acesso em: 05 maio 2022.

SILVA, Robson Willians da Costa; PAULA, Beatriz Lima de. Causa do aquecimento global: antropogênica versus natural. **Terrae Didatica**, v. 5, n. 1, p. 42-49, 2015.

SOARES NETO, T. G *et al.* **Determinação de fatores de emissão das principais espécies químicas liberadas na combustão de biomassa da Amazônia.** *In:* Conference Abstracts, 2008, Manaus. *In:* International Scientific Conference - Amazon in Perspective Integrate Science for a Sustainable Future. Manaus: 2008.

SOUZA, P. H. D. **Biomassa e estoque de carbono em povoamento de *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg sob diferentes espaçamentos.** 113 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2018.

TEIXEIRA, Debora da Silva. **Estratégia de desenvolvimento sustentável na produção florestal em pequenas propriedades tabacaleiras.** 100 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2021.

THIBAU, Carlos Eugenio. **Produção sustentada em florestas: conceitos e tecnologias, biomassa energética, pesquisas e constatações.** Belo Horizonte. Editor C. E. Thibau, 2000.

TRENTINI, Flavia; SILVA, Leonardo Cunha. Consultório Jurídico - **Principais impactos do Acordo de Paris na agricultura brasileira.** 2019. Disponível em: <https://www.conjur.com.br/2019-fev-15/direito-agronegocio-principais-impactos-acordo-paris-agricultura-brasileira>. Acesso em: 3 mar. 2022.

TROIAN, Alessandra; EICHLER, Marcelo Leandro; SOGLIO, Fábio Kessler dal. A Convenção Quadro para Controle do Tabaco (CQCT) nas percepções de produtores de tabaco e agentes de desenvolvimento. **Revista Brasileira De Gestão E Desenvolvimento Regional**, v. 10, n. 1, p. 281-304, 2014.

UNITED NATIONS. **Resolution adopted by the General Assembly on 27 July 2012, 11 set. 2012.** Disponível em: [https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A\\_RES\\_66\\_288.pdf](https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_66_288.pdf). Acesso em: 14 mar. 2022.

VIRMOND, Elaine. **Aproveitamento do lodo de tratamento primário de efluentes de um frigorífico como fonte de energia.** 137 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

WANG, Jian-an *et al.* Integrated Furnace for Combustion/Gasification of Biomass Fuel for Tobacco Curing. **Waste and Biomass Valorization**, v. 10, p. 2037-2044, 2019.

WMO. **WMO statement on the state of the global climate in 2017.** World Meteorological Organization, 2018. 40 p. Disponível em: [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=4453](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4453). Acesso em: 06 mar. 2022.

ZAJONZ, Bruna Tadielo; VILLWOCK, Ana Paula Schervinski; SILVEIRA, Vicente Celestino Pires. A fumicultura brasileira e as políticas públicas associadas ao Programa Nacional de Diversificação em Áreas Cultivadas com Tabaco. **Revista Nera**, v. 37, n. 20, p. 278-293, 2017.

### **3 CAPÍTULO III – EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE BIOMASSAS FLORESTAIS PARA SECAGEM DO TABACO EM DIFERENTES UNIDADES DE CURA**

#### **3.1 INTRODUÇÃO**

As florestas têm sido uma importante fonte de energia desde o início da história humana e conforme Lopes, Brito e Moura (2016), foi a principal fonte de energia primária no Brasil por mais de 450 anos, sendo substituída por derivados do petróleo e, em seguida, pela hidroeletricidade a partir da década de 1970, devido sobretudo pelo atendimento das novas demandas energéticas do país.

No entanto, com o conceito de sustentabilidade envolvido em todas as atividades econômicas do Brasil e do mundo, o uso de combustíveis fósseis para geração de energia vem diminuindo, fazendo com que a biomassa florestal retorne como fonte principal de energia.

O Acordo de Paris, firmado em 2015, foi um dos fatores que incentivaram o uso de energia de fonte renovável, pois traz como objetivo brasileiro, o aumento da participação em 45% no que se refere a energias renováveis na matriz energética, além de ampliar medidas de eficiência energética, de infraestrutura e de atividades de baixo carbono.

Conforme Magalhães e Domingues (2016), novos equipamentos e hábitos de consumo estão passando a ser pautados sob o prisma da eficiência energética, verificando-se que muitos deles são “economicamente viáveis”, ou seja, o custo de sua implantação é menor que o custo da energia evitada. Essas medidas provocam menor uso da energia para auferir o mesmo serviço prestado e receberam o nome de “medidas de eficiência energética”. Em outras palavras, melhorar a eficiência energética significa reduzir o consumo de energia necessário para produzir um determinado serviço de energia (PATTERSON, 1996).

Assim, o uso de biomassa florestal para fins energéticos tem aumentado nas últimas décadas, destacando a importância desse recurso economicamente e ambientalmente sustentável, devido ao seu potencial para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e as emissões de GEE. Para Lopes, Brito e Moura (2016), a biomassa lenhosa é uma importante fonte alternativa energética renovável, econômica, técnica e ambientalmente viável, disputando espaço com outras fontes energéticas, mais caras ou não renováveis, tais como gás natural, óleo diesel e GLP.

O setor tabacaleiro, importante na economia da agricultura familiar da região sul do Brasil, é dependente de biomassa florestal para secagem das folhas do tabaco Virginia, tornando a produção conexas a essa *commodity*.

Os produtores são incentivados a realizar o plantio de florestas para uso próprio, fazendo com que a produção de lenha por propriedade tenda a ser autossustentável, ou seja, o produtor deve possuir no estoque da floresta, toda a lenha que utilizar durante a safra anual. Sendo assim, se torna imprescindível entender a dinâmica da floresta, para melhor identificar as variáveis produtivas, e a forma de manejo para a otimização do seu uso de forma mais eficiente. Ressalta-se também que as variações na composição química da madeira, ou seja, na proporção de lignina, extrativos e cinzas, assim como as mudanças na conformação anatômica e nas características físicas, especialmente na densidade, influenciam sobremaneira suas propriedades energéticas (FURTADO *et al.*, 2012).

Além dos fatores intrínsecos da floresta, a eficiência energética também é influenciada pelo tipo de fornalha das unidades de cura utilizadas nas propriedades, visto que em sua maioria, são rudimentares. Segundo Souza (2018), em torno de 62% das unidades de cura ainda são convencionais no estado do Rio Grande do Sul, ou seja, as mais tradicionais e mais rudimentares.

Sendo assim, pode-se mencionar que o aumento da eficiência energética está sendo tratado como um dos mecanismos chaves para cumprir os objetivos de redução de emissões de GEE. Nessa linha de pensamento, o objetivo desse capítulo foi verificar a eficiência do consumo de diferentes biomassas florestais em relação às unidades de cura de tabaco tecnologicamente distintas, a fim de verificar a relação mais vantajosa ambientalmente, levando em consideração a quantidade de biomassa consumida para cada quilo de tabaco seco. Sendo assim, estabeleceram-se as seguintes hipóteses:

H1 Aumentar a tecnologia das unidades de cura e associar o uso de biomassas energéticas, reduz o consumo de combustível na secagem do tabaco.

H0 Aumentar a tecnologia das unidades de cura e associar o uso de biomassas energéticas, não reduz o consumo de combustível secagem do tabaco.

### 3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

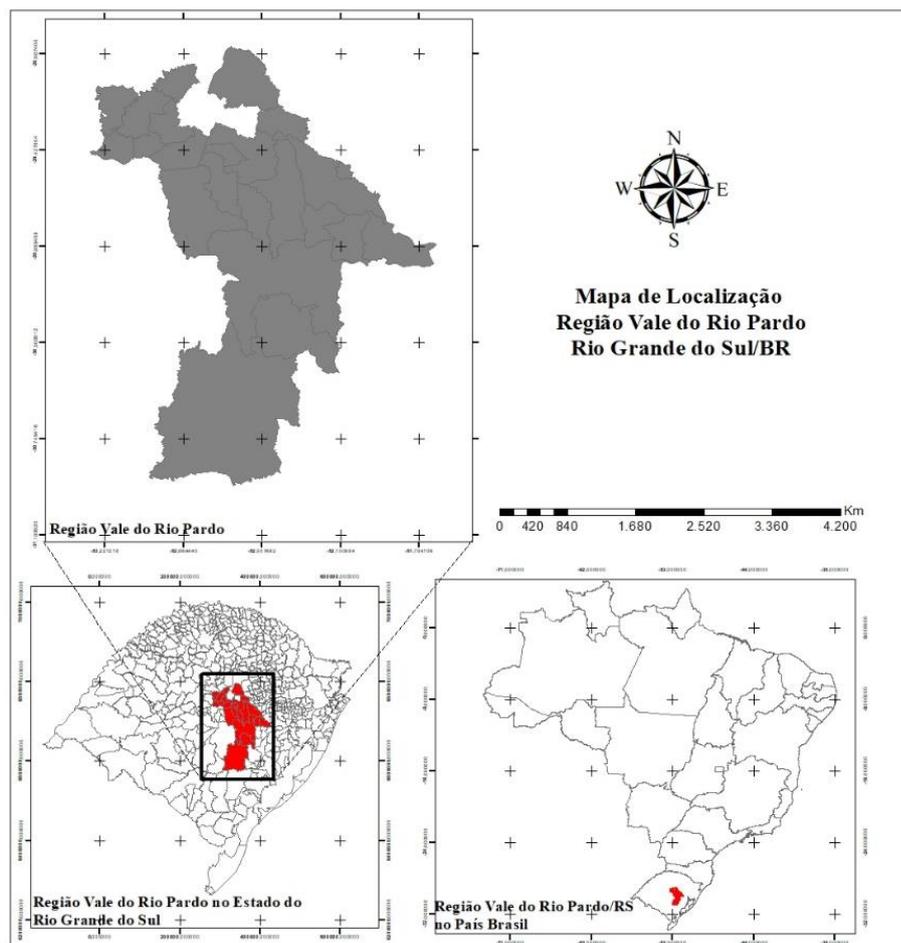
Essa etapa da pesquisa levou em consideração a biomassa utilizada para a secagem de um ciclo completo de tabaco, em relação ao nível tecnológico das unidades de cura.

### 3.2.1 Caracterização da região da pesquisa

O estudo foi realizado em propriedades rurais familiares, produtoras de tabaco na região do Vale do Rio Pardo, no Rio Grande do Sul, Brasil. A região do Vale do Rio Pardo, conforme o relatório do COREDE para a região, representa um importante elo na indústria fumageira do Brasil, com cerca de 20% da produção nacional de fumo (ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL, 2015), sustentando uma extensa rede que conecta pequenos agricultores a empresas fumageiras transnacionais e aos mercados globais. A maioria dos 25 municípios que integram essa região é substancialmente dependente das atividades associadas à cultura do fumo e à indústria fumageira, sendo que na análise realizado por Vargas e Oliveira (2012), em nenhum dos municípios da região a participação relativa do fumo no total do valor da produção agrícola municipal é inferior a 60%.

Na Figura 3 segue o mapa de localização da região:

Figura 3 – Croqui de localização da área de pesquisa



Fonte: A autora (2022).

### 3.2.2 Caracterização das unidades de cura

Foram avaliadas quatro unidades de cura (UC) existentes no mercado, todas com diferentes níveis tecnológicos. Cada UC possui uma característica que a difere das demais, sendo que três delas utilizam fornalha com lenha e uma delas foi adaptada para utilização de biomassa do tipo pellets, conforme descrito na Tabela 3 e 4 e Figura 4, 5, 6 e 7.

Tabela 3 – Descrição das Unidades de cura utilizadas na pesquisa

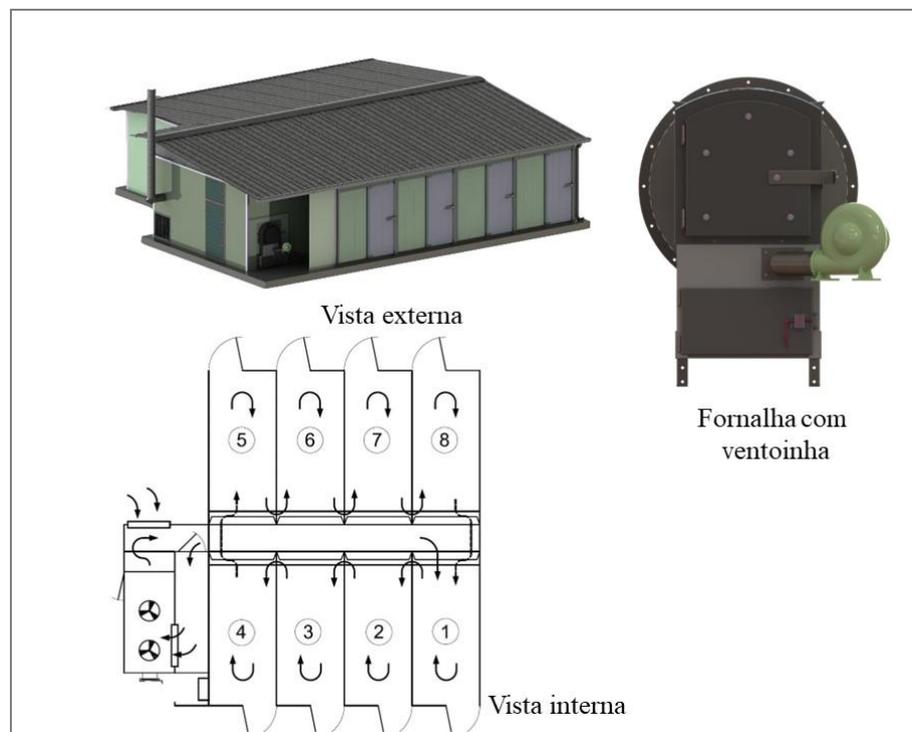
UC	Características
Carga Contínua	<p>As UC de carga contínua são a mais alta tecnologia de secagem do tabaco atualmente disponibilizadas no mercado. Este tipo de UC é composta por oito compartimentos (box) de 4 x 2 m, que cabem 76 grampos. A ideia é colher um box por dia, começando no primeiro e, assim, o calor de um box é aproveitado no seguinte. A estufa conta com um duto central de calor, onde é controlada a entrada de ar quente individualmente para cada box. O abastecimento da fornalha é manual. Ainda, há um ventilador de entrada que injeta ar dentro da fornalha, com o objetivo de aumentar o excesso de ar e otimizar o processo de combustão. Quando a temperatura geral da UC baixa além do que o estabelecido, a ventoinha é acionada e injeta ar dentro da fornalha, reacendendo a chama. Assim, a temperatura volta a subir, desligando a ventoinha. Esse processo ocorre até o acionamento do alerta para abastecimento da fornalha. Assim, o calor que é produzido é conduzido para cada um dos compartimentos por meio circulação de ar forçado. Ainda, deve-se levar em consideração que cada compartimento deve ter um teor de umidade e temperatura específico para a cura, o que é controlado por um sistema digital e individual. Nessas UC, a combustão se dá em sistema de fornalhas, compostos por câmara de combustão, grelha, ventiladores de ar e cinzeiro.</p>
Ar forçado	<p>As UCs de Ar forçado são denominadas assim, por serem as pioneiras na circulação de ar forçado dentro das estufas, e são consideradas a segunda melhor tecnologia relacionado a secagem do tabaco. Em relação a combustão, também ocorre a injeção de ar com auxílio de ventoinha, no mesmo sistema da UC carga contínua, no entanto, o que difere ambas é o tipo de estufa. Na Ar forçado, há apenas um compartimento, onde o calor produzido na fornalha é direcionado por circulação de ar forçado para dentro da estufa, secando o tabaco. O sistema de fornalha é composto por câmara de combustão, grelha, ventiladores de ar e cinzeiro. A alimentação da biomassa é realizada de forma manual.</p>
Convencional com lenha	<p>As UC convencionais são as mais rudimentares e tradicionais, fazendo parte da cultura do tabaco há muitos anos e por isso são consideradas o último nível tecnológico (terceiro nível). Nas estufas convencionais, não há presença de ventoinha para injeção de ar na fornalha. O processo de combustão ocorre com a presença de ar natural que entra na fornalha por meio de um suspiro denominado “abafador” que é interligado com a temperatura dentro da UC. Assim, quando temperatura diminuiu, o abafador abre, deixando o ar entrar na fornalha e quando a temperatura dentro da fornalha estabiliza, o suspiro é fechado. Similar ao que acontece com a ventoinha, nas UC Ar forçado e Carga contínua.</p> <p>Para a passagem de calor gerado pelo processo de combustão para dentro da estufa, são utilizados canos por toda a base da UC, sob o tabaco pendurado nas varas, e o calor é passado por convecção natural, sem nenhum sistema de ventilação ou exaustão. O sistema de fornalha é composto por câmara de combustão, grelha, abafador e cinzeiro. A alimentação da biomassa é realizada de forma manual.</p>
Convencional adaptada para pellets	<p>Na UC convencional com uso de pellets, segue-se o mesmo padrão de estufa da UC com lenha, no entanto, o sistema de combustão é modificado para utilização de pellets. A combustão da biomassa é feita em um queimador automatizado, que promete maior uniformidade e eficiência no processo, visto que o abastecimento é realizado de forma automática. Por isso, essa UC não entrou no <i>hanking</i> das mais tecnológicas, visto que a biomassa é diversa das demais e não pode ser comparada.</p>

Tabela 4 – Caracterização das unidades de cura avaliadas

Nível tecnológico	UC	Capacidade	Tecnologia aplicada	Estrutura	Área útil da chaminé
1º	Carga Contínua	608 grampos	Ventoinha para injeção de ar dentro da fornalha Controle de temperatura e umidade	Aço	0,045 m <sup>2</sup>
2º	Ar forçado	207 grampos	Ventoinha para injeção de ar dentro da fornalha Controle de temperatura e umidade	Aço	0,049 m <sup>2</sup>
3º	Convencional com lenha	500 varas	Abafador automático Controle de temperatura e umidade	Alvenaria	0,045 m <sup>2</sup>
-1	Convencional adaptada para pellets	500 varas	Ventoinha para injeção de ar dentro da fornalha Controle de temperatura e umidade	Alvenaria	0,045 m <sup>2</sup>

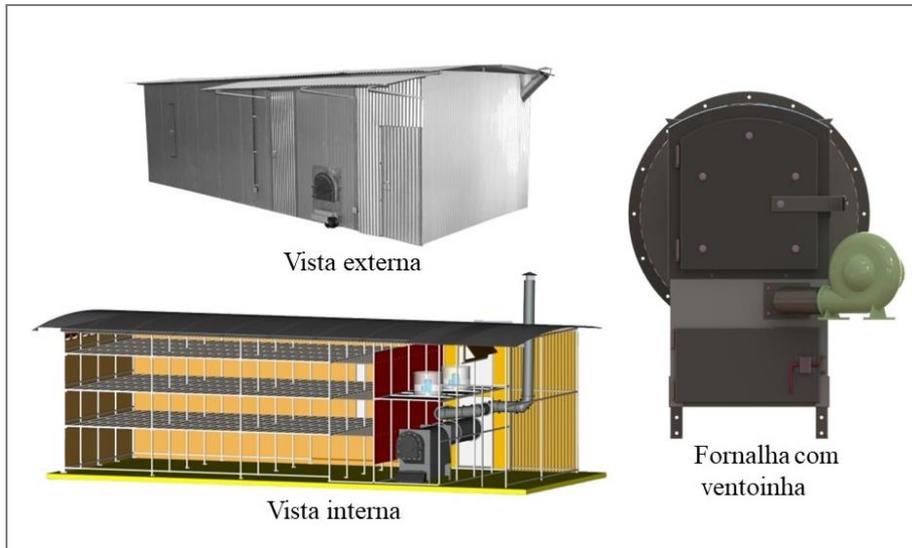
Fonte: Elaborado pela autora. <sup>1</sup> não é utilizada no comparativo de tecnologia das UCs com lenha.

Figura 4 – Unidade de cura Carga contínua para lenha



Fonte: BE1 tecnologia.

Figura 5 – Unidade de cura Ar forçado para lenha



Fonte: BE1 tecnologia

Figura 6 – Unidade de cura Convencional



Fonte: A autora (2022).

Figura 7 – Unidade de cura Convencional adaptada para pellets



Fonte: IB Caldugno Equipamentos Industrias e A autora (2022).

### 3.2.3 Biomassas avaliadas

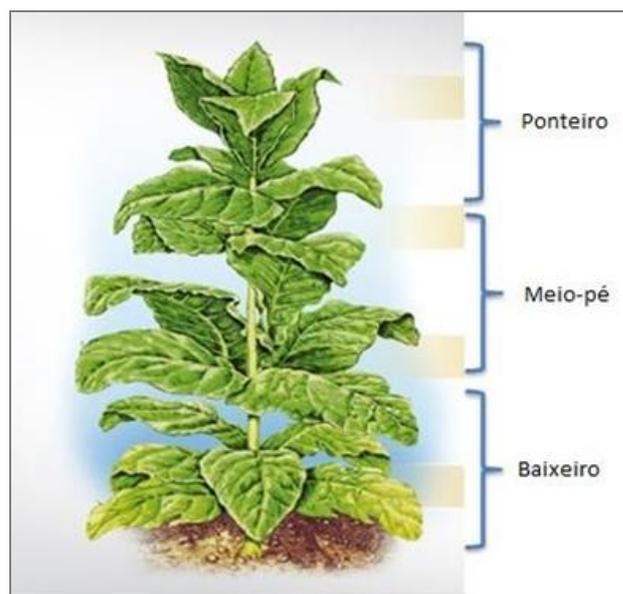
Foram analisadas três diferentes biomassas florestais no processo de combustão: lenha de *Eucalyptus dunnii*, lenha de *Eucalyptus saligna* e Pellets de *Pinus* sp. Conforme Farias (2010), o eucalipto na forma de lenha é a biomassa mais barata e também a mais utilizada na produção de tabaco. O Pellet de pinus é menos utilizado, visto que se trata de um combustível ainda sendo testado em unidades de cura de tabaco que, para ser usado, devem ser adaptadas. A utilização de pellets é uma forma de realizar o aproveitamento de resíduos florestais e por isso tem papel importante nas pesquisas sobre eficiência energética e emissões de GEE.

### 3.2.4 Processo de cura (secagem) do tabaco

Em relação ao processo de secagem, deve-se levar em consideração que as folhas do tabaco são divididas em três tipos: Folhas de baixeiro, meio pé e ponteira. As folhas de baixeiro, são aquelas encontradas na parte mais baixa do pé, são folhas mais leves se comparada às demais e é onde é realizada a primeira colheita.

As folhas de meio pé são denominadas assim, por justamente se encontrarem na fase intermediária da planta, fazendo parte da segunda etapa da colheita. São folhas que possuem um peso maior do que as folhas de baixeiro. Por fim, as folhas de ponteira, fazem parte da última etapa da colheita, sendo essas folhas mais pesadas do que as demais e mais espessas. A ilustração da planta e as etapas de colheita, assim como a classificação das posições das folhas do tabaco podem ser verificadas na Figura 8.

Figura 8 – Posições/Classes colhidas na planta de tabaco da variedade "Virgínia"



Fonte: Farias (2015).

### 3.2.5 Caracterização da biomassa florestal

Os plantios florestais onde a lenha foi retirada possuem 8 anos de idade e para a análise química da biomassa lenha, foram selecionadas 5 árvores aleatoriamente para cada espécie florestal. Destas, retiraram-se 6 discos a alturas definidas [(na base, DAP diâmetro a altura do peito ou 1,3 m), 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial], conforme observa-se na Figura 9, de acordo com a metodologia utilizada na UFSM, adaptação da norma ASTM D-143 (1994). Os discos foram destinados ao laboratório para análises de teor de extrativos, lignina, cinzas, poder calorífico superior e densidade básica da madeira, conforme normativas apresentadas na Tabela 5.

Figura 9 – Demonstração da coleta dos discos a campo



Tabela 5 – Análises laboratoriais de qualificação da madeira

Parâmetro	Métodos de análise
Densidade básica	ABNT NBR 11.941
Teor de Extrativos	TAPPI T264 cm-97 (adaptada)
Teor de Lignina	TAPPI T222 om-98
Teor de cinzas	TAPPI T211 om-93
Poder Calorífico Superior	ABNT NBR 8633

O teor de umidade foi definido a partir da amostragem de três toretes de lenha em cada uma das análises realizadas por unidade de cura e por biomassa. Foi realizada pesagem das amostras com teor de umidade até então desconhecido ( $P_u$ ), anotando-se o seu peso. Em seguida as amostras foram levadas à estufa, a  $103 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , até sua secagem completa. Para verificar secagem completa, pesagens periódicas foram realizadas até a observância de peso constante, indicando a total remoção da água. Procedeu-se então nova pesagem com a madeira seca ( $P_o$ ).

$$TU (\%) = \frac{(P_u - P_o)}{P_u} * 100 \quad (1)$$

Em que: TU = Teor de umidade da madeira, em porcentagem;  $P_u$  = peso da madeira úmida; e  $P_o$  = peso da madeira seca a  $(103 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ , ou seja, a 0% de umidade.

Em relação aos pellets, as análises foram fornecidas pelo fabricante da biomassa, no entanto a densidade dos pellets informada foi a densidade aparente, a qual não pode ser comparada com a densidade básica da lenha.

Para a comparação da lenha e pellets determinou-se a Densidade Energética (DE) de cada combustível. A densidade energética é expressa pela fórmula (MOREIRA; LIMA; GOULART, 2012):

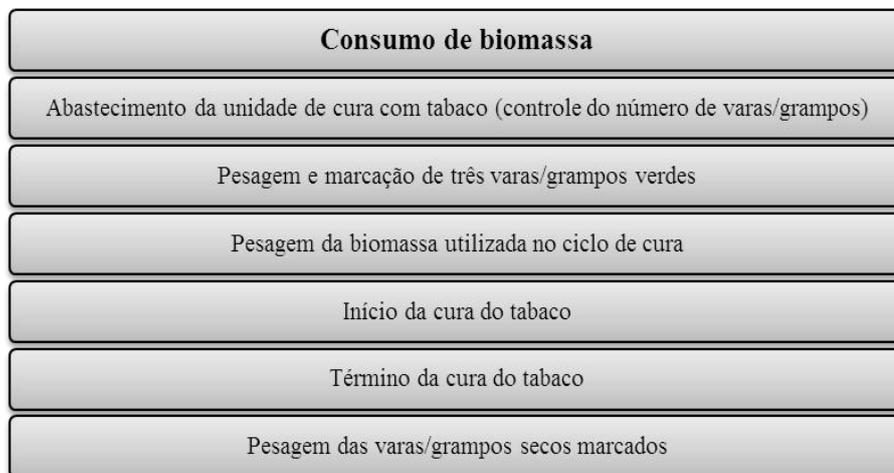
$$DE = \frac{DB \times PCU}{1000} \quad (2)$$

Sendo: DE = Densidade Energética (Gcal.(m<sup>3</sup>); DB = Densidade Básica (g.cm<sup>-3</sup>); PCU = Poder Calorífico Útil (kcal.kg<sup>-1</sup>); Divisão por 100 para conversão para Gigacaloria (Gcal).

### 3.2.6 Consumo de biomassa florestal

O consumo de biomassa foi obtido por meio da cubagem e pesagem da biomassa utilizada durante o ciclo de cura do tabaco, que teve duração média de 168 horas, conforme fluxograma de operação demonstrado na Figura 10.

Figura 10 – Fluxograma das etapas do levantamento do consumo de lenha



Fonte: Adaptado de Welter (2017).

### 3.2.7 Eficiência energética da biomassa florestal

Para verificar a eficiência energética, os cálculos foram baseados na metodologia adotada por Campos *et al.* (2004). A energia proveniente do combustível utilizado para o aquecimento, do ar, dentro da unidade de cura foi determinada pela equação abaixo:

$$EPC = QC \times PCU \quad (3)$$

Em que:

EPC = energia proveniente da biomassa, kcal;

QC = quantidade de biomassa consumida, kg;

PCU = poder calorífico útil do combustível, kcal.kg<sup>-1</sup>.

O Poder Calorífico Útil (PCU) considera o Poder Calorífico Inferior (PCI) e o teor de umidade presente na madeira. O PCU pode ser determinado pela seguinte equação (MOREIRA; LIMA; GOULART, 2012):

$$PCU = PCI \times \frac{(100-U)}{100} - 6 \times U \quad (4)$$

Sendo: PCI = Poder Calorífico Inferior (kcal.kg<sup>-1</sup>) e U = umidade a base úmida (%).

O PCI é obtido com base no PCS (Poder Calorífico Superior), que é medido através de bomba calorimétrica. O PCI considera o teor de hidrogênio presente na madeira, valor relativamente constante em todas as madeiras (6%). Para a obtenção do PCI, desconta-se a energia necessária para retirar o hidrogênio da madeira, representado pelo 324 da equação abaixo (BRAND, 2010; MOREIRA; LIMA; GOULART, 2012).

$$PCI = PCS - 324 \quad (5)$$

Em que: PCS = Poder Calorífico Superior (kcal.kg<sup>-1</sup>).

A eficiência energética de secagem, ou seja, a quantidade de energia necessária para evaporar uma unidade de massa de água do tabaco, foi obtida da seguinte forma:

$$EEs = \frac{EPC}{(M1 - Mf)} \quad (6)$$

Em que:

EEs = eficiência energética de secagem, kcal.kg<sup>-1</sup>

EPC = energia consumida em forma de combustível, kcal;

Mi = massa inicial do produto, kg;

Mf = massa final do produto, kg.

### 3.2.8 Capacidade de secagem

Também foi calculado a produtividade de cada estufa, ou seja, a capacidade que a mesma tem de secagem uma quantidade X de tabaco em um tempo Y. Esse cálculo é importante para definirmos o consumo de biomassa associado à capacidade instalada de cada Unidade de cura, para verificar a influência no consumo de biomassa em relação a sua capacidade.

A capacidade de secagem foi calculada pela seguinte equação:

$$C_s = \frac{MP}{ts} \quad (7)$$

Em que:

$C_s$  = capacidade de secagem de tabaco úmido,  $\text{kg.h}^{-1}$ ;

MP = massa de produto úmido, kg;

ts = tempo total de operação da estufa, h.

### 3.2.9 Alinhamento experimental e análise de dados

Para melhor entendimento da análise experimental da pesquisa, elaborou-se a Tabela 6 e 7 para definir os fatores analisados e suas interações e repetições.

Tabela 6 – Esquema fatorial duplo

Biomassa	Unidades de cura		
	Carga contínua	Ar forçado	Convencional
Lenha de <i>Eucalyptus Saligna</i>	3	3	3
Lenha de <i>Eucalyptus dunnii</i>	3	3	3

Tabela 7 – Esquema fatorial único

Biomassa	Unidade de cura	Repetições
Lenha de <i>Eucalyptus Saligna</i>	Convencional	3
Lenha de <i>Eucalyptus dunnii</i>	Convencional	3
<i>Pellets de Pinus</i>	Convencional	3

Os pellets foram utilizados para comparação apenas da UC convencional, visto que não foram testados nas demais e por isso, não podem ser comparados.

As análises foram realizadas levando em consideração o fator biomassa em relação aos tratamentos, sendo estes, as unidades de cura. Cada fator foi repetido 3 vezes em cada tratamento.

Os resultados foram avaliados por uma análise fatorial (análise de variância - ANOVA) e teste de médias de Tukey. Em todas as análises estatísticas, foi adotado 5% de probabilidade, utilizado o software estatístico R. Quando não atendida as condicionantes de normalidade e/ou homogeneidade dos resíduos, o protocolo de análise levou em consideração o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis. Ainda, em algumas variáveis foi realizada a correlação de Pearson, que mede o grau da correlação entre duas variáveis.

### 3.3 RESULTADOS

#### **3.3.1 Caracterização da biomassa florestal**

Na Tabela 8 são apresentados os valores médios das propriedades das biomassas utilizadas no experimento para secagem do tabaco.

Tabela 8 – Características da biomassa avaliada

<b>Biomassa</b>	<b>Umidade</b>	<b>Cinza (%)</b>	<b>Extrativos (%)</b>	<b>Lignina (%)</b>	<b>Densidade (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>PCS (Kcal/kg)</b>	<b>PCI (Kcal/kg)</b>	<b>PCU (Kcal/kg)</b>	<b>DE (Gcal /m<sup>3</sup>)</b>
Lenha de <i>Eucalyptus saligna</i>	30% b.u	0,41	2,73	15,96	440,00	4.686,60	4.362,60	2.873,82	1,26
Lenha de <i>Eucalyptus dunnii</i>	30% b.u	0,54	2,69	21,64	560,00	4.715,00	4.391,00	2.893,70	1,62
Pellets de Pinus	8% b.u	0,33	6,54	28,02	700,00 <sup>2</sup>	4.728,00	4.404,00	4.003,68	2,80

<sup>1</sup>DB: densidade básica; <sup>2</sup> DA: Densidade aparente; PCS: poder calorífico superior; PCI: poder calorífico inferior, PCU: poder calorífico útil; DE: densidade energética.

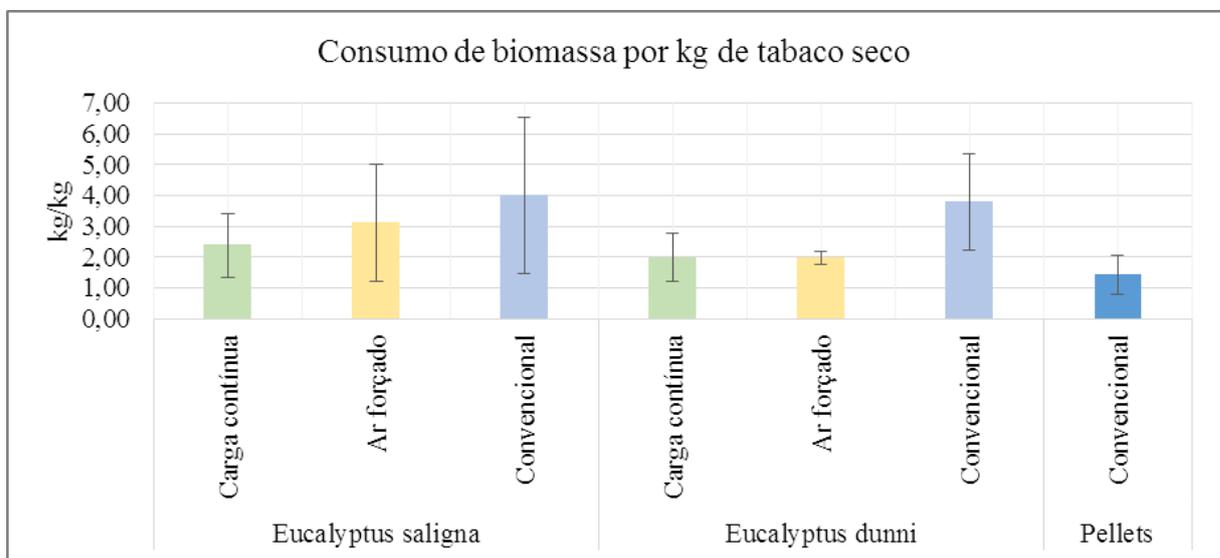
### 3.3.2 Consumo de biomassa florestal

Levando em consideração as análises realizadas nesta pesquisa, foi possível perceber que, dentre a biomassa lenha, o uso de *E. dunnii* obteve melhores resultados se comparado a lenha de *E. Saligna*, no que tange a eficiência de consumo, sendo 1,98 kg/kg (kg de lenha por kg de tabaco seco) para a UC de carga contínua e 1,97 kg/kg para Ar Forçado. A redução no consumo de lenha de *E. Saligna* em relação a lenha de *E. dunnii*, foi em média 20,02% para a mais alta tecnologia de estufa (carga contínua), 58,37% para a Ar forçado e 5,26% para a UC convencional. O pior desempenho foi observado nas UC convencionais, chegando a um aumento de 50,75% no consumo de biomassa.

Já a utilização dos pellets obteve uma eficiência de 1,44 kg/kg, chegando a 37,75% de aumento na eficiência em consumo em relação à UC de carga contínua com lenha de *E. dunnii* e *E. saligna*.

Na Figura 11 é possível verificar o gráfico demonstrativo dos resultados. Maiores informações sobre os resultados obtidos podem ser verificadas no apêndice A.

Figura 11 – Eficiência no consumo de biomassa para as diferentes unidades de cura



A análise de variância não apontou significância entre os fatores, ou seja, não há interação significativa entre os fatores Biomassa e Unidades de Cura. Da mesma forma não houve significância dentro de cada fator. Portanto não há diferença significativa entre as médias dos tratamentos analisados (Tabela 9 e 10).

Tabela 9 – Análise de Variância para consumo de biomassa. ANOVA Bifatorial para UC x biomassas Lenha de *E. dunnii* e Lenha de *E. saligna*

Fonte de variação	GL	SQ	QM	FC	Pr>Fc
Biomassa	1	1,531	3	0,65110	0,43542 <sup>ns</sup>
Unidades de Cura	2	9,890	5	2,10261	0,16488 <sup>ns</sup>
Biomassa x Unidades de Cura	2	0,755	2	0,16042	0,85358 <sup>ns</sup>
Resíduos*	12	28,221	4		
Total	17	40,397	1		

<sup>ns</sup>Não significativo a 95% de probabilidade.

\*De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais, (p-valor: 0,3762643).

Tabela 10 – Análise de Variância. ANOVA monofatorial para o consumo de biomassa em UC convencionais, utilizando lenha de *E. saligna*, Lenha de *E. dunnii* e pellets

Fonte de variação	GL	SQ	QM	FC	Pr>Fc
Biomassa	2	12,210	6,1052	1,9897	0,21734 <sup>ns</sup>
Resíduos*	6	18,410	3,0684		
Total	8	30,621			

<sup>ns</sup>Não significativo a 95% de probabilidade.

\*De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais, (p-valor: 0,6218321).

\*De acordo com o teste de Bartlett a 5% de significância, os resíduos possuem homogeneidade de variâncias (p-valor: 0,2865429).

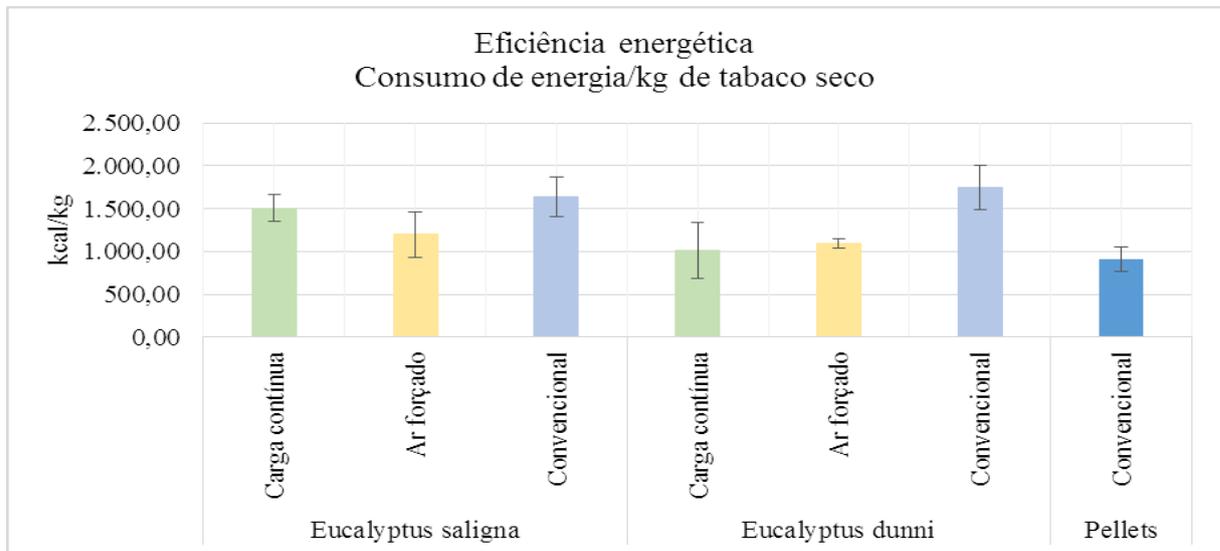
### 3.3.3 Eficiência energética da biomassa florestal

Verificou-se um consumo médio, em energia, de 910,04 kcal/kg para secar 1 kg de tabaco utilizando-se pellets de Pinus, em unidade de cura convencional adaptada, sendo esse mais eficiente em relação aos demais.

Considerando apenas a biomassa na forma de lenha, verificou-se menor demanda de energia quando se utilizou *E. dunnii* em UC carga contínua, com média de 1.011,47 Kcal para secar 1 kg de tabaco.

Os principais dados obtidos nesse estudo podem ser observados na Figura 12. Maiores informações estão dispostas no apêndice A.

Figura 12 – Eficiência energética para os diferentes tipos de unidades de cura do tabaco em função da biomassa



A análise de variância não apontou significância entre os fatores, ou seja, não há interação significativa entre os fatores Biomassa e Unidades de Cura, como observado na Tabela 11 e 12. Dentro do fator biomassa também não houve significância. Já dentro do fator unidades de cura existe diferença significativa, ou seja, o tratamento da UC Convencional difere dos demais.

Tabela 11 – Análise de Variância para eficiência energética. ANOVA Bifatorial para UC x biomassas lenha de *E. dunnii* e Lenha de *E. saligna*

Fonte de variação	GL	SQ	QM	FC	Pr>F <sub>c</sub>
Biomassa	1	118460	2	2,1524	0,168057 <sup>ns</sup>
Unidades de Cura	2	1003045	4	9,1128	0,003916 <sup>***</sup>
Biomassa x Unidades de Cura	2	282648	3	2,5679	0,117941 <sup>ns</sup>
Resíduos*	12	660421	5		
Total	17	2064573	1		

\*\*\* Significativo a 95% de probabilidade.

<sup>ns</sup>Não significativo a 95% de probabilidade.

\*De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais, (p-valor: 0,7623373).

Tabela 12 – Teste de médias para biomassa lenha de *E. dunnii* e lenha de *E. saligna* e UC, em relação a eficiência energética

Biomassa	Médias	Grupos	Unidade de cura	Médias	Grupos
Lenha de <i>Eucalyptus dunnii</i>	1285,501	a	Convencional	1694,022	a
Lenha de <i>Eucalyptus saligna</i>	1447,749	a	Chongololo	1259,457	b
			Ar forçado	1146,397	b

\*Médias seguidas de mesma letra minúsculas, na coluna, não diferem entre si

Em relação à análise dos fatores biomassas (Lenha de *E.dunnii*, lenha de *E. saligna* e pellets) em UC convencionais, identifica-se diferença significativa, com os pellets se diferenciando dos demais, demonstrado na Tabela 13 e 14.

Tabela 13 – Análise de Variância. ANOVA monofatorial para eficiência energética em UC convencionais, utilizando lenha de *E. saligna*, Lenha de *E. dunnii* e pellets

Fonte de variação	GL	SQ	QM	FC	Pr>Fc
Biomassa	2	1246747	623374	12,902	0,0067***
Resíduos*	6	289909	48318		
Total	8	1536656			

\*\*\*Significativo a 95% de probabilidade.

\*De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais, (p-valor: 0,6675677).

\*De acordo com o teste de Bartlett a 5% de significância, os resíduos possuem homogeneidade de variâncias (p-valor: 0,7425166).

Tabela 14 – Teste de médias para três biomassas testadas na UC convencional, em relação eficiência energética

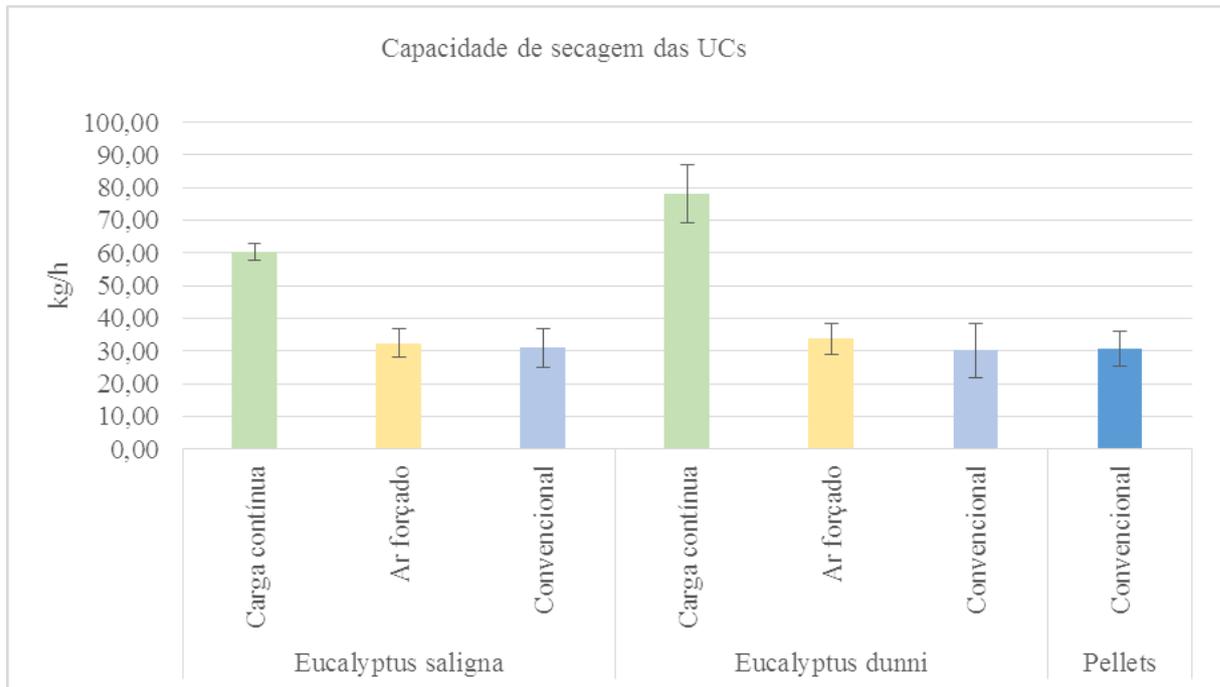
Biomassa	Médias	Grupos
Lenha de <i>Eucalyptus dunnii</i>	1748,017	a
Lenha de <i>Eucalyptus saligna</i>	1640,027	a
Pellets	910,04	b

\*Médias seguidas de mesma letra minúsculas, na coluna, não diferem entre si.

### 3.3.4 Capacidade de secagem

A capacidade de secagem está associada a quantidade de tabaco seco por hora, na unidade de cura, conforme observado na Figura 13. A UC com maior capacidade de secagem é a carga contínua, podendo chegar a secar 78,17 kg de tabaco por hora, seguida do Ar forçado com média de 33,07 kg/hora e das convencionais, com média de 30,61 kg/hora.

Figura 13 – Demonstração gráfica da capacidade de secagem das UC avaliadas



Verifica-se uma dependência direta entre o peso do tabaco seco por ciclo e o consumo de biomassa, comprovado pelo coeficiente de Pearson que obteve valores médios de -0,9, demonstrado na Tabela 15, ou seja, conforme uma variável aumenta, a outra diminui.

Tabela 15 – correlação de Pearson para consumo de biomassa em relação à quantidade de tabaco seco por ciclo

Biomassas	Tipo de secador	Correlação
Lenha de <i>E. saligna</i>	Carga contínua	-0,995345849
	Ar forçado	-0,994629056
	Convencional	-0,932452282
Lenha de <i>E. dunni</i>	Carga contínua	-0,990428533
	Ar forçado	-0,957592673
	Convencional	-0,972648155
Pellets de Pinus	Convencional	-0,996787400

A Tabela 16 mostra que a análise apontou um resultado significativo para a interação de fatores, sendo assim a análise das UC foi desdobrada dentro dos níveis de biomassa (lenha de *E. saligna* e lenha de *E. dunni*) para que fosse possível analisar a interação. Identificou-se que para a biomassa lenha de *E. saligna* a UC Carga contínua se diferiu das demais, assim como para a Lenha de *E. dunni*, observado na Tabela 17.

Tabela 16 – Análise de Variância para capacidade de secagem. ANOVA Bifatorial para UC x biomassa lenha de *E. dunnii* e Lenha de *E. saligna*

Fonte de variação	GL	SQ	QM	FC	Pr>Fc
Biomassa	1	168,4	3	4,384	0,058171 <sup>ns</sup>
Unidades de Cura	2	5632,5	4	73,314	0,000000 <sup>***</sup>
Biomassa x Unidades de Cura	2	309,5	2	4,029	0,045848 <sup>***</sup>
Resíduos*	12	461,0	5		
Total	17	6571,5	1		

\*\*\* Significativo a 95% de probabilidade.

<sup>ns</sup>Não significativo a 95% de probabilidade.

\*De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais, (p-valor: 0,6955955).

Tabela 17 – Teste de médias para UCs e biomassa (lenha de *E. saligna* e lenha de *E. dunnii*) em relação à capacidade de secagem

Unidade de cura com lenha de <i>E. dunnii</i>	Médias	Grupos	Unidade de cura com lenha de <i>E. saligna</i>	Médias	Grupos
Chongololo	78,17	a	Chongololo	60,39	a
Ar forçado	33,77	b	Ar forçado	32,37	b
Convencional	30,16	b	Convencional	30,98	b

\*Médias seguidas de mesma letra minúsculas, na coluna, não diferem entre si.

Já para as UC convencionais, não houve diferença significativa, conforme demonstrado na tabela 18.

Tabela 18 – Análise de Variância. ANOVA monofatorial para capacidade de secagem em UC convencionais, utilizando lenha de *E. saligna*, Lenha de *E. dunnii* e pellets

Fonte de variação	GL	SQ	QM	FC	Pr>Fc
Biomassa	2	1,053	0,527	0,011937	0,98816 <sup>ns</sup>
Resíduos*	6	264,715	44,119		
Total	8	265,768			

\*De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais, (p-valor: 0,3415823).

\*De acordo com o teste de Bartlett a 5% de significância, os resíduos possuem homogeneidade de variâncias (p-valor: 0,8205153).

### 3.4 DISCUSSÕES

#### 3.4.1 Análise química

Para um combustível sólido ideal, conforme Purohit e Nautiyal (1987), as características desejadas são: alto poder calorífico, alta densidade de madeira, baixo teor de cinzas, e baixo teor de umidade. Batista, Klitzke e Santos (2010), encontraram densidades de 0,42 a 0,56 g/cm<sup>3</sup> para a espécie de *E. saligna* e *E. dunnii*, respectivamente. Foelkel (2015), afirma que o *E. saligna* é uma madeira de baixa densidade básica (0,40 a 0,48 g/cm<sup>3</sup>) e que o *E. dunnii* apresenta maiores densidades, em torno de 0,524 g/cm<sup>3</sup> (RIBEIRO; FILHO, 1993). A densidade da lenha de *E. dunnii* foi 21,43% maior do que a lenha de *E. saligna*.

Foi possível verificar que quanto maior a densidade da madeira, maior a densidade energética (DE) contida por unidade de volume, o que estimula o interesse por madeiras mais densas para a queima. A DE pode ser considerada a principal característica da biomassa, pois expressa a quantidade de energia por unidade de volume de um combustível, e depende da densidade básica, poder calorífico, umidade e do teor de hidrogênio da madeira (CARASCHI; GARCIA; VENTORIM, 2012). A DE para os pellets foi 20,6% maior em relação à lenha de *E. dunnii* e 37,27% maior em relação a lenha de *E. saligna*. Este resultado permite validar a informação de que pellets possuem maior energia por unidade de volume, devido à redução dos espaços vazios em função da compactação da biomassa.

Os pellets são oriundos do processo de densificação da biomassa, ou seja, transformação física do material lignocelulósico particulado em um biocombustível sólido. Eles foram criados em função da demanda por um novo tipo de combustível compactado com alta densidade energética, visando à otimização do armazenamento e transporte, mas principalmente para o uso em equipamentos de queima mais modernos (PROTÁSIO *et al.*, 2015).

Atualmente, pesquisas vêm combinando a técnica de densificação com a torrefação do material, aumentando o poder calorífico e diminuindo a umidade da biomassa, com o objetivo final de aumentar a disponibilidade de energia por unidade de volume. Diante disso, pode-se afirmar que a maior vantagem dos pellets em relação ao uso da lenha é o aumento do potencial de geração de energia com um volume muito menor de biomassa, que, associado à redução da umidade, aumenta seu potencial energético.

Para Foelkel (2016), o poder calorífico é um dos constituintes mais importantes para definir a qualidade energética de uma biomassa e os constituintes da biomassa que mais afetam este fator são por ordem de importância: teor de lignina, teor de carbono e teor de extrativos. Pode-se observar as características favorecendo pellets evidenciadas na Tabela 8.

Ainda, em estudo realizado por Welter (2017), os pellets também apresentaram as melhores características para produção de energia, com destaque para o maior poder calorífico, lignina e maior densidade de energia, se comparada à lenha de eucalipto.

Ainda, segundo Lavoranti *et al.* (2021), a densidade da madeira não tem correlação com o poder calorífico, entretanto determina o volume de biomassa a ser transportado e inserido nas fornalhas. Uma baixa densidade resulta em aumento de custos de transporte (maior volume), além de exigir mais trabalho na alimentação das fornalhas. Para a produção de lenha, em geral, os entraves mais comuns são o teor de umidade e a densidade da madeira.

Roman *et al.* (2021), quantificaram o poder calorífico de lascas de madeira e obtiveram valor médio de 19,40 MJ/kg, ou 4.6330,61 kcal/kg, sendo esse superior aos observados em casca de girassol, casca de aveia, palha de trigo, e feno. Por outro lado, o poder calorífico inferior das lascas de madeira foi de 10,4 MJ/Kg (2.484 kcal/kg) com teor de umidade de 40% em base úmida. Nesta pesquisa, a umidade da madeira de eucalipto obteve uma média de 30%, resultando no PCU maior, se comparado ao trabalho de Roman *et al.* (2021). Em contrapartida, os pellets possuem, além de alta densidade, menor teor de umidade (8% bu), o que influencia consideravelmente o processo de combustão.

Conforme Cardoso, Moraes e Silva (2020), a umidade da madeira está diretamente relacionada ao seu poder calorífico, sendo que quanto mais seca a madeira estiver, maior será o seu rendimento energético. Para Pereira *et al.* (2000), a queima da madeira úmida proporciona menos energia devido ao consumo no aquecimento e vaporização da água. Dessa forma, a umidade se torna uma variável de extrema importância na análise de eficiência em produção de energia, o que justifica o uso de pellets no processo de combustão, visto que este possui menor quantidade de água.

No entanto, mesmo os pellets possuindo as melhores características energéticas, a lenha é a fonte de combustível renovável mais utilizada levando em consideração a realidade do Brasil, devido a sua disponibilidade e valores mais atraentes se comparado aos pellets. A lenha de *E. dunnii* se mostrou promissora em relação ao *E. saligna* no aumento do potencial energético, devido principalmente à sua característica de densidade básica.

A utilização de pellets na secagem dos produtos agrícolas, como o tabaco, soja, milho, trigo, entre outros, ainda é muito incipiente no Brasil, devido à falta de tecnologia voltada à queima dessa biomassa nas estufas. É necessário um aporte tecnológico que seja capaz de adaptar as fornalhas já existentes no mercado e que seja atrativo, no intuito de poder iniciar o uso dessa biomassa também considerando pequenos e médios produtores e empresas.

### 3.4.2 Eficiência no consumo de biomassa florestal

A eficiência de consumo de biomassa está relacionada com a quantidade de biomassa necessária para secar um quilo (kg) de tabaco. Essa relação é definida em quilo de biomassa por quilo de tabaco seco (kg/kg), sendo que quanto menor essa relação, melhor é a eficiência de consumo.

Os resultados desta pesquisa demonstram melhor eficiência em consumo para a UC convencional, adaptada para o uso de pellets, justificado principalmente pelas características energéticas dos pellets, pelo baixo teor de umidade e pela elevada área de contato do combustível com oxigênio. Ainda, se destaca pela eficiência no sistema de queima. A queima por dosagem, ou seja, automática, é uma maneira muito eficaz para reduzir o uso excessivo de biomassa, além de manter a temperatura da estufa sempre regulável.

Já em relação ao uso da lenha, verificou-se que *E. dunnii* foi mais eficiente, pois consumiu menos lenha para secagem do tabaco, provavelmente devido a sua maior densidade básica. O aumento da densidade básica proporciona maior densidade energética, ou seja, maior energia por unidade de volume. Sendo assim, o volume de lenha a ser inserida na fornalha também tende a ser menor, aumentando a superfície de contato entre ar e combustível, melhorando a combustão. Conforme Carneiro *et al.* (2014), a densidade básica da madeira está diretamente relacionada com a produção de energia, ou seja, quanto maior a densidade, maior a quantidade de energia estocada por metro cúbico. Assim, a temperatura de queima dentro da câmara de combustão permanece alta, proporcionando a ignição constante das partículas de combustível, mesmo no momento da abertura da fornalha para abastecimento.

Em relação ao nível tecnológico das UCs, verificou-se que a UC de carga contínua e ar forçado consumiram menores quantidades de biomassa por kg de tabaco. Este fato está associado ao sistema construtivo das fornalhas. Nestas fornalhas, o sistema de injeção de ar é automático e tem o objetivo melhorar a homogeneização entre ar e combustível. A ventoinha é utilizada para enviar o ar em excesso necessário para combustão, permitindo a entrada de maior quantidade de oxigênio no processo, e reagindo diretamente com o combustível.

A boa eficiência na combustão exige a queima completa do combustível, associada à máxima transferência de calor. É necessário dosar corretamente o ar de combustão, promover boa mistura desse ar com os gases combustíveis, criar condições para a circulação turbulenta dos gases e reduzir a perda de calor para o ambiente.

Assim, controlar a vazão de ar também é um fator importante, pois para cada kg de biomassa há uma quantidade específica de excesso de ar estimada devido a sua composição elementar (além do cálculo da quantidade de ar por kg de biomassa). O fator ar é função do tipo de biomassa do dispositivo de queima.

No entanto, mesmo as UCs Carga contínua e Ar forçado possuindo fornalhas com o mesmo sistema de combustão, ainda há diferença na queima, devido à lenha ser um material heterogêneo, e pelo fato de que o abastecimento, em ambas, é realizado de forma manual, o que interfere no processo de queima, devido a quantidade de lenha inserida dentro da fornalha, controle da quantidade de ar necessário para as reações de combustão, existência ou não de ar em excesso para completar a queima, entre outros.

Em estudo realizado por Dessbesell, Farias e Roesch (2017), em uma UC de tabaco de Ar Forçado com uso de lenha de *Eucalyptus* sp., os autores encontraram um valor de consumo de 3,96 kg/kg, superior ao observado nessa pesquisa. A capacidade produtiva da UC não foi disponibilizada no estudo para comparação, logo essa variável somada ao teor de umidade da lenha são fatores que podem explicar a diferença dos resultados.

Boettcher *et al.* (2020), em pesquisa realizada para a produção de tabaco na região Sul do Brasil, evidenciam a utilização de 2,7 toneladas de lenha para produzir 1 tonelada de tabaco seco, ou seja, uma média de 2,7 kg de lenha por kg de tabaco seco, valores similares ao encontrado para as UCs Ar forçado e Carga Contínua neste pesquisa.

Campbell (1995), em estudo realizado no Zimbábue, evidencia que o menor consumo de biomassa está relacionado com a combinação eficaz do processo de combustão e o *design* de construção de unidades de cura. O autor comenta que aumentando a tecnologia das UCs, passando da convencional para UC de folha solta (também denominada Ar forçado, no Brasil) obteve como resultado a redução do consumo de carvão mineral (combustível utilizado na região), que passou de 2,5 kg (equivalente a 4 kg de lenha) por kg de tabaco para 1 kg/kg.

Percebe-se diferenças nos dados utilizando-se biomassas distintas, o que torna essa uma variável importante no que tange o processo de combustão eficiente, com evidências positivas do potencial de redução de consumo com o uso de pellets, mesmo em UCs convencionais que foram adaptadas. No entanto, mesmo demonstrando a diferença no consumo de biomassa em UCs que são tecnologicamente distintas, a análise estatística demonstra que essa diferença não é significativa. Este fato pode ser explicado pela grande variação dentro de cada tratamento, por isso na comparação entre os diferentes tratamentos a tendência é não haver significância no teste estatístico.

No Brasil, o uso de lenha para a secagem do tabaco é um processo há muito tempo empregado. Não se tem relatos de uso de outras biomassas como fonte de energia para a cultura do tabaco. No entanto, até meados dos anos 2000, o uso de lenha estava associado ao uso de florestas nativas, o que impacta negativamente o meio ambiente. Em países como a China, o uso de biomassa florestal vem sendo estudado com mais ênfase a partir da década de 90, onde Campbell (1995) menciona que o plantio de florestas para secagem do tabaco possui melhor custo benefício do que a utilização de carvão mineral, usado com maior frequência no país, onde a eficiência varia de 2-3 kg em UC convencionais.

Wang *et al.*, (2019) mencionam que na China, cerca de 4 milhões de toneladas de carvão mineral foram usadas no país, para curar o tabaco nos últimos anos com aumento considerável da poluição atmosférica. Desde então, o governo está tentando incentivar o uso de energia limpa para desenvolver uma economia verde, a qual a indústria do tabaco local respondeu ativamente.

Comparando os dois países, o Brasil já possui um avanço significativo na utilização de biomassa renovável, oriunda de florestas plantadas, sendo esse um processo já inserido dentro do contexto da fumicultura brasileira. Dessa forma, o maior desafio do país atualmente é tornar o uso dessa biomassa mais eficiente. Esta, por sua vez, pode ser realizada por meio da readequação das próprias estufas de secagem, da reavaliação da qualidade da biomassa, levando em consideração a espécie florestal mais adequada, menor teor de umidade, e outras características químicas e físicas da espécie, e de produtividade, as quais afetam diretamente no consumo, como visto até o momento nesta pesquisa.

### **3.4.3 Eficiência energética**

A eficiência energética (EE) do processo de combustão está associada a quantidade de energia que é gasta para secar um kg de tabaco. Esse dado tem relação direta com a quantidade de biomassa utilizada no processo, com a densidade energética da biomassa e com a relação entre o peso de tabaco verde que entra na estufa e a quantidade de tabaco seco que é retirado. Quanto menor o valor de EE mais eficiente será a secagem do tabaco, ou seja, ocorrerá maior retirada de água de uma quantidade maior de tabaco com a mesma quantidade de biomassa utilizada no processo de combustão.

Há poucas pesquisas voltadas ao estudo da eficiência energética da biomassa florestal para secagem do tabaco, dentre essas, destaca-se o estudo realizado por Welter (2017) que verificou consumo de energia no sistema de cura de tabaco em UCs convencionais com lenha (sem definição de espécie) de 11.665,73 kJ.kg<sup>-1</sup> (2.788,17 kcal/kg) e de 8.836,65 kJ.kg<sup>-1</sup> (2.112,01 kcal/kg) para pellets, ambos valores superiores aos que foram encontrados nesta pesquisa.

Ademais, evidencia-se a existência de pesquisas voltadas a secagem de grãos. Em estudos realizados por Campos *et al.* (2004), os autores encontraram valores de 12.752 kJ.kg<sup>-1</sup> (3.047,80 kcal/kg) de EE utilizando lenha em um secador tradicional, para cada kg de grão seco, considerando apenas a energia da lenha (sem considerar a energia elétrica do processo). Já Lacerda Filho (1986), obteve uma eficiência energética de 10.000 kJ.kg (2.390,05 kcal/kg) em um experimento com café em um secador de camada fixa, com temperatura do ar de secagem de 55 °C com fôrnelha de fogo direto, que tem rendimento energético maior. Esses valores foram ainda superiores aos encontrados na pesquisa em questão, sendo que a temperatura interna da câmara de secagem em todas as unidades de cura variou entre 90 a 155 °F (32,2 a 68,3 °C) durante todo o ciclo.

Ressalta-se que o resultado de eficiência em consumo e energia foi similar nas UC carga contínua e Ar forçado, devido às mesmas características do processo de queima dentro da fôrnelha e por isso não houve diferenças significativas entre as UC e as biomassas.

No entanto, como o cálculo da eficiência energética leva em consideração, além do poder calorífico útil (PCU), a quantidade de tabaco úmido que entra e a quantidade de tabaco seco no final do processo, essas variáveis tiveram grande influência no resultado final, visto que há diferença entre esses valores em todas as UCs avaliadas. A água presente no tabaco representa entre 80,58% e 86,27% do peso total úmido (verificar Apêndice A).

A UC convencional com lenha foi a que obteve o pior desempenho em eficiência energética e por isso, se diferiu das demais, com uso de lenha de *E. dunnii* e *E. saligna*, pois trata-se de uma estufa rudimentar, construída sem nenhum nível tecnológico, basicamente sem nenhum fator que impulse o processo de combustão e auxilie na queima, visto que se trata de um sistema de convecção natural do ar.

No entanto, a mesma UC convencional, adaptada para uso de pellets, obteve o melhor resultado, sendo que os pellets se diferiram da biomassa lenha de *E. dunnii* e lenha de *E. saligna* na análise em UC convencionais. A adaptação realizada contempla a injeção de ar, similar ao que acontece na UC Carga contínua e Ar forçado, bem como o abastecimento da fôrnelha é realizado de forma automática.

Segundo Camargo (2019), o pellet é uma forma de energia alternativa e com grande potencial energético, possuem baixa umidade, forma homogênea, alta densidade energética e área superficial elevada, o que aumenta a eficiência no processo de combustão. Ainda, o pellets apresentou umidade de 8%, muito inferior a biomassa lenha (média de 30%). Assim, não ocorreu perda de energia para secagem da biomassa dentro da fornalha (como acontece com a lenha), e todo o calor produzido foi utilizado para gerar energia para secagem do tabaco.

Lopes, Brito e Moura (2016), comentam que o uso de biomassa florestal já possui a vantagem de possuir tecnologia já desenvolvida para a conversão em energia. No entanto, fatores internos da fornalha devem ser analisados no momento de se pensar na eficiência de um processo de combustão. Conforme Magalhães (2007), o tamanho da fornalha, quantidade e distribuição das grelhas, cinzeiros, entrada de ar, saída dos gases, depósito do combustível e sistema de alimentação são alguns dos itens que devem ser projetados conforme a característica da biomassa utilizada. Porém, conforme o mesmo autor, no meio rural, as fornalhas instaladas se caracterizam por possuírem pequena ou média potência, o que torna inviável o sistema com tecnologia muito avançada. Dessa forma, alternativas viáveis que melhorem o desempenho dos equipamentos já existentes e possibilitem o maior aproveitamento dos combustíveis com dispositivos simples são de grande interesse.

#### **3.4.4 Capacidade de secagem**

A capacidade de secagem influencia significativamente a eficiência de consumo de biomassa. As UCs com menor consumo correspondem aquelas que possuem as maiores capacidades de secagem, ou seja, a UC carga contínua, independentemente do tipo de espécie florestal utilizada como lenha, se diferindo estatisticamente das demais.

Welter (2017) obteve consumo de lenha em 2,71 kg/kg na UC convencional, com capacidade de 800 varas por ciclo. Ressalta-se que o estudo mencionado foi realizado em UC com 37,5% a mais de capacidade produtiva em relação a UC utilizada nesta pesquisa, que obteve um consumo médio de lenha variando de 3,8 à 4,0 kg/kg. Essa comparação entre as pesquisas evidencia que a capacidade de secagem de uma unidade de cura altera o consumo de biomassa. Sendo assim, é possível inferir que há perda de energia utilizada no processo de secagem do tabaco, ao longo da combustão, devido a falta de dimensionamento das câmaras de combustão e da quantidade de biomassa a ser inserida na mesma.

### 3.5 CONCLUSÕES

Para a biomassa lenha, o aumento do nível tecnológico das UCs ocasionou um aumento na eficiência no uso de biomassa florestal, sendo esse benefício mais expressivo com uso de Lenha de *Eucalyptus dunnii*. Dessa forma, a hipótese H1 é aceita.

Em relação ao uso de pellets, testou-se em apenas uma UC, a qual mostrou resultados mais satisfatórios se comparado a lenha, sendo que dentre as biomassas analisadas o uso de pellets obteve maior eficiência energética (4.113,20 kcal /kg<sup>-1</sup>) e menor consumo (1,44 kg/kg).

Mesmo não havendo interação entre os fatores, a redução do consumo de biomassa na relação kg/kg é um grande passo para a implantação de uma economia de baixo carbono no setor, pois melhorar a eficiência no consumo de biomassa é fundamental para a redução da dependência energética, o que proporciona o aumento na segurança do fornecimento de energia e de sustentabilidade.

### REFERÊNCIAS

- ASTM. American Society for Testing and Materials. **ASTM D 143-94**. Standard Test Methods for small clear specimens of timber. West Conshohocken. 2000.
- BATISTA, Djeison Cesar; KLITZKE, Ricardo Jorge; SANTOS, Carlos Vinícius Taborda. Densidade básica e retratibilidade da madeira de clones de três espécies de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 4, p. 665-674, 2010.
- BOETTCHER, Ricardo *et al.* Carbon Footprint of agricultural production and processing of tobacco (*Nicotiana tabacum*) in southern Brazil. **Environmental Technology & Innovation**, v. 18, 2020.
- BRAND, Martha Andreia. **Energia de Biomassa Florestal**. 1 ed. São Paulo: Interciência, 2010. 131 p.
- CAMARGO, Bruno Silva. **Desenvolvimento de pellets provenientes de madeira e finos de carvão vegetal**. 77 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2019.
- CARNEIRO, Angélica de Cássia Oliveira *et al.* Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore**, v. 38, n. 2, p. 375-381, 2014.

CAMPBELL, John S. Tobacco and the Environment: The Continuous Reduction of Worldwide Energy Source Use for Green Leaf Curing. **Beiträge zur Tabakforschung International/Contributions to Tobacco Research**, v. 16, n. 3, p. 107-117, 1995.

CAMPOS, Alessandro Torres *et al.* Balanço energético na produção de feno de alfafa em sistema intensivo de produção de leite. **Ciência Rural**, v. 34, n. 1, p. 245-251, 2004.

CARASCHI, José Cláudio; GARCIA, Dorival Pinheiro; VENTORIM, Gustavo. Caracterização física e química dos pellets de madeira produzidos no Brasil. **Anais do XIII EBRAMEN**, Natal, RN, 2012.

CARDOSO, Josimara Santos; MORAES, Jorge André Ribas; SILVA, André Luiz Emmel. Otimização dos recursos energéticos por meio do acompanhamento e controle da secagem da lenha. **Navus**, v. 10, p. 01-11, 2020.

DESSBESELL, Luana; FARIAS, Jorge Antonio de; ROESCH, Fábio. Complementing firewood with alternative energy sources in Rio Pardo Watershed, Brazil. **Ciência Rural**, v. 47, n. 9, 2017.

ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. **Perfil Socioeconômico COREDE Vale do Rio Pardo**. Porto Alegre, RS, 49 p. 2015. Disponível em: <https://planejamento.rs.gov.br/upload/arquivos/201603/17095302-perfis-regionais-2015-vale-do-rio-pardo.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2022.

FARIAS, Jorge Antonio de. **Atividade florestal no contexto da fumicultura: oportunidade de desenvolvimento regional, diversificação, geração de emprego e renda**. 168 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

FOELKEL, Celso. **Qualidade da Madeira do Eucalipto**. *Eucalyptus* Online Book. Capítulo 41, 2015. 199 p.

FOELKEL, Celso. **Utilização da Biomassa do Eucalipto para Produção de Calor, Vapor e Eletricidade**. *Eucalyptus* Online Book. Capítulo 43, 2016. 239 p.

FURTADO, Thielly Schimidt *et al.* Correlação entre teor de umidade e eficiência energética de resíduos de *Pinus taeda* em diferentes idades. **Revista Árvore**, v. 36, n. 3, p. 577-582, 2012.

LACERDA FILHO, Adílio Flauzino de. **Avaliação de diferentes sistemas de secagem e suas influências na qualidade do café (*Coffea arabica* L)**. 136 p. Tese – (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1986.

LAVORANTI, Osmir José *et al.* **Florestas energéticas**. Embrapa Florestas. Brasília: DF, 2021. 40 p.

LOPES, Guilherme de Andrade; BRITO, José Otávio; MOURA, Luiz Fernando de. Uso energético de resíduos madeireiros na produção de cerâmicas no estado de São Paulo. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 679–686, 2016.

- MAGALHÃES, Edney Alves. **Desenvolvimento e análise de uma fornalha para aquecimento direto e indireto de ar utilizando biomassa polidispersa**. 213 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção ) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.
- MAGALHÃES, Aline Souza; DOMINGUES, Edson Paulo. Increased Energy Efficiency in Brazil: an option for a low carbon economy? **Economia Aplicada**, v. 20, n. 3, p. 273, 20 set. 2016.
- MOREIRA, J.M. M. A. P.; LIMA, E. A. de; GOULART, I. C. G. dos, R. Impacto do teor de umidade e da espécie florestal no custo da energia útil obtida a partir da queimada lenha. **Informativo Técnico Embrapa**, Colombo, 1 ed. 2012.
- PATTERSON, Murray G. What is energy efficiency? **Energy Policy**, v. 24, n. 5, p. 377-390, 1996.
- PEREIRA, José Carlos Duarte *et al.* **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil**. Embrapa Florestas, n. 38, 2000. 113 p.
- PROTÁSIO, Thiago de Paula *et al.* Caracterização energética de pellets in natura e torreficados produzidos com madeira residual de Pinus. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 84, p. 435, 2015.
- PUROHIT, A. N.; NAUTIYAL, A. R. Fuelwood Value Index of Indian Mountain Tree Species. **International Tree Crops Journal**, v. 4, n. 2-3, p. 177-182, 1987.
- RIBEIRO, Francisco de Assis.; FILHO, José Zani. Variação da densidade básica da madeira em espécies/procedências de *Eucalyptus* spp. **IPEF**, n. 46, p. 76-85, 1993.
- ROMAN, Kamil *et al.* Production of Electricity and Heat from Biomass Wastes Using a Converted Aircraft Turbine AI-20. **Processes**, v. 9, p. 1-15, 2021.
- SOUZA, P. H. D. **Biomassa e estoque de carbono em povoamento de *Anadenanthera peregrina* (L.) Spig sob diferentes espaçamentos**. 113 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2018.
- VARGAS, Marco Antonio; OLIVEIRA, Bruno Ferreira de. Estratégias de diversificação em áreas de cultivo de tabaco no Vale do Rio Pardo: uma análise comparativa. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 50, n. 1, p. 175-192, 2012.
- WANG, Jian-an *et al.* Integrated Furnace for Combustion/Gasification of Biomass Fuel for Tobacco Curing. **Waste and Biomass Valorization**, v. 10, p. 2037-2044, 2019.
- WELTER, Carline Andréa. **Uso da biomassa florestal como estratégia de redução dos gases de efeito estufa: um estudo de caso na fumicultura do Sul do Brasil/RS**. 69 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal De Santa Maria Santa Maria, 2017.

## **4 CAPÍTULO IV – EMISSÕES DE GASES POLUENTES ORIUNDOS DO PROCESSO DE GERAÇÃO DE ENERGIA PARA SECAGEM DO TABACO**

### **4.1 INTRODUÇÃO**

A mudança do clima tornou-se nos últimos tempos uma questão de grande relevância para a sociedade, estando cada vez mais presente nos discursos políticos, sociais e econômicos (OJIMA, 2011). As principais fontes de emissão são as mudanças de uso da terra (44%), a agropecuária (28%), o setor de energia (19%), processos industriais (5%) e resíduos (4%) (SEEG, 2020). Entre estas fontes, pode-se mencionar a geração de energia pelos processos de combustão, pois emitem gases e partículas, aumentando a concentração de GEE na atmosfera.

Neste contexto, torna-se primordial a postura proativa por parte do setor agropecuário, assim como de toda a sociedade, em relação a diminuição das emissões dos GEEs e a intensificação das propostas de medidas mitigadoras.

Em um momento em que a humanidade discute massivamente as questões ambientais, o setor fumageiro, inserido no agronegócio brasileiro, pode auxiliar de forma significativa na redução da poluição ambiental, primeiramente pelo uso de energia renovável, utilizando biomassa florestal (lenha, pellets, cavaco, serragem) no processo de geração de energia e por outro lado, identificando gargalos nas tecnologias utilizada para a secagem do tabaco. Aliando estas duas variáveis, o setor pode contribuir satisfatoriamente para uma economia de baixo carbono para o cumprimento das metas de redução das emissões propostas pelo Brasil, onde o país se comprometeu a reduzir até o ano de 2025, a emissão de GEE em 37% abaixo dos níveis encontrados em 2005, chegando em 43% até o ano de 2030 (MMA, [s.d]).

Na fumicultura, há a utilização de biomassa florestal, em forma de lenha, que é queimada para fornecer gás quente para a unidade de cura (UC) e realizar a secagem do tabaco, principalmente da variedade Virginia, e, conseqüentemente, essa combustão direta é fonte de emissão de GEE.

Assim, além do estudo sobre a eficiência energética com uso de biomassa florestal, é de extrema importância avaliar a emissões de gases poluentes que são oriundos do processo da queima, identificando os fatores que podem diminuir esse impacto.

Dessa forma, o objetivo desse capítulo foi avaliar as emissões de gases poluentes do processo de combustão de diferentes biomassas florestais ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  e  $\text{C}_x\text{H}_y$ ) em UC tecnologicamente distintas, oportunizando a implantação de uma atividade ambientalmente mais adequada nesta etapa do processo produtivo do tabaco, embasados nas seguintes hipóteses:

H1: Aumentar a tecnologia das Unidades de cura, reduz as emissões de GEE, desde que associada a uma biomassa que seja eficiente na secagem do tabaco;

H0: Aumentar a tecnologia das Unidades de cura, não reduz as emissões de GEE, mesmo que associada a uma biomassa que seja eficiente na secagem do tabaco.

## 4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

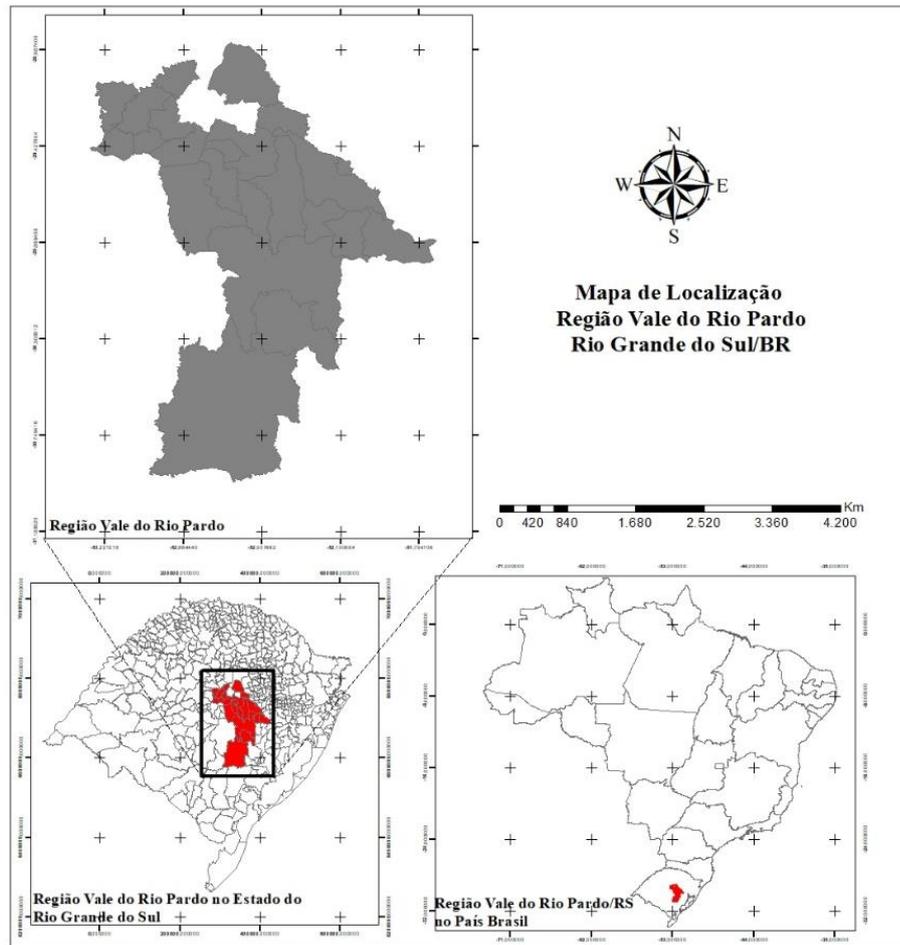
Essa etapa da pesquisa levou em consideração a biomassa utilizada para a secagem de um ciclo completo de tabaco, em relação ao nível tecnológico das unidades de cura, para verificar as emissões de gases poluentes no processo de combustão.

### 4.2.1 Caracterização da região da pesquisa

O estudo foi realizado em propriedades rurais familiares, produtoras de tabaco na região do Vale do Rio Pardo, no Rio Grande do Sul, Brasil. A região do Vale do Rio Pardo, conforme o relatório do COREDE para a região representa um importante elo na indústria fumageira do Brasil, com cerca de 20% da produção nacional de fumo (ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL, 2015), sustentando uma extensa rede que conecta pequenos agricultores a empresas fumageiras transnacionais e aos mercados globais. A maioria dos 25 municípios que integram essa região é substancialmente dependente das atividades associadas à cultura do fumo e à indústria fumageira, sendo que na análise realizado por Vargas e Oliveira (2012), em nenhum dos municípios da região a participação relativa do fumo no total do valor da produção agrícola municipal é inferior a 60%.

Na Figura 14 segue o mapa de localização da região:

Figura 14 – Croqui de localização da área de pesquisa



Fonte: A autora (2022).

#### 4.2.2 Caracterização das unidades de cura

Foram avaliadas quatro unidades de cura (UC) existentes no mercado, todas com diferentes níveis tecnológicos. Cada UC possui uma característica que a difere das demais, sendo que três delas utilizam fornalha utilizando lenha e uma delas foi adaptada para utilização de biomassa do tipo pellets, conforme descrito na Tabela 19 e 20 e Figura 15, 16, 17 e 18.

Tabela 19 – Descrição das Unidades de cura utilizadas na pesquisa

(continua)

UC	Características
Carga Contínua	AS UC de carga contínua são a mais alta tecnologia de secagem do tabaco atualmente disponibilizadas no mercado. Este tipo de UC é composta por oito compartimentos (box) de 4x2 m, que cabem 76 gramas. A ideia é colher um box por dia, começando no primeiro e, assim, o calor de um box é aproveitado no seguinte. A estufa conta com um duto central de calor, onde é controlada a entrada de ar quente individualmente para cada box. O

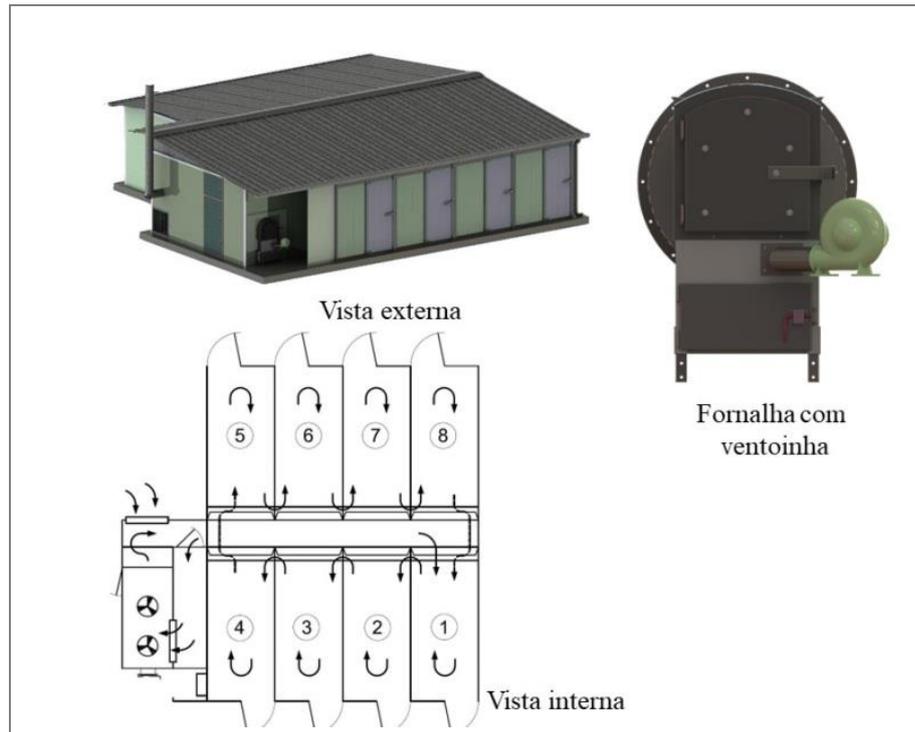
	<p>abastecimento da fornalha é manual. Ainda, há um ventilador de entrada que injeta ar dentro da fornalha, com o objetivo de aumentar o excesso de ar e otimizar o processo de combustão. Quando a temperatura geral da UC baixa além do que o estabelecido, a ventoinha é acionada e injeta ar dentro da fornalha, reacendendo a chama. Assim, a temperatura volta a subir, desligando a ventoinha. Esse processo ocorre até o acionamento do alerta para abastecimento da fornalha. Assim, o calor que é produzido é conduzido para cada um dos compartimentos por meio circulação de ar forçado. Ainda, deve-se levar em consideração que cada compartimento deve ter um teor de umidade e temperatura específico para a cura, o que é controlado por um sistema digital e individual. Nessas UC, a combustão se dá em sistema de fornalhas, compostos por câmara de combustão, grelha, ventiladores de ar e cinzeiro.</p>
Ar forçado	<p>As UCs de Ar forçado são denominadas assim, por serem as pioneiras na circulação de ar forçado dentro das estufas, e são consideradas a segunda melhor tecnologia relacionado a secagem do tabaco. Em relação a combustão, também ocorre a injeção de ar com auxílio de ventoinha, no mesmo sistema da UC carga contínua, no entanto, o que difere ambas é o tipo de estufa. Na Ar forçado, há apenas um compartimento, onde o calor produzido na fornalha é direcionado por circulação de ar forçado para dentro da estufa, secando o tabaco. O sistema de fornalha é composto por câmara de combustão, grelha, ventiladores de ar e cinzeiro. A alimentação da biomassa é realizada de forma manual.</p>
Convencional com lenha	<p>As UC convencionais são as mais rudimentares e tradicionais, fazendo parte da cultura do tabaco há muitos anos e por isso são consideradas o último nível tecnológico (terceiro nível). Nas estufas convencionais, não há presença de ventoinha para injeção de ar na fornalha. O processo de combustão ocorre com a presença de ar natural que entra na fornalha por meio de um suspiro denominado “abafador” que é interligado com a temperatura dentro da UC. Assim, quando temperatura diminuiu, o abafador abre, deixando o ar entrar na fornalha e quando a temperatura dentro da fornalha estabiliza, o suspiro é fechado. Similar ao que acontece com a ventoinha, nas UC Ar forçado e Carga contínua.</p> <p>Para a passagem de calor gerado pelo processo de combustão para dentro da estufa, são utilizados canos por toda a base da UC, sob o tabaco pendurado nas varas, e o calor é passado por convecção natural, sem nenhum sistema de ventilação ou exaustão. O sistema de fornalha é composto por câmara de combustão, grelha, abafador e cinzeiro. A alimentação da biomassa é realizada de forma manual.</p>
Convencional adaptada para pellets	<p>Na UC convencional com uso de pellets, segue-se o mesmo padrão de estufa da UC com lenha, no entanto, o sistema de combustão é modificado para utilização de pellets. A combustão da biomassa é feita em um queimador automatizado, que promete maior uniformidade e eficiência no processo, visto que o abastecimento é realizado de forma automática. Por isso, essa UC não entrou no <i>hanking</i> das mais tecnológicas, visto que a biomassa é diversa das demais e não pode ser comparada.</p>

Tabela 20 – Caracterização das unidades de cura avaliadas

Nível tecnológico	UC	Capacidade	Tecnologia aplicada	Estrutura	Área útil da chaminé
1º	Carga Contínua	608 grampos	Ventoinha para injeção de ar dentro da fornalha Controle de temperatura e umidade	Aço	0,045 m <sup>2</sup>
2º	Ar forçado	207 grampos	Ventoinha para injeção de ar dentro da fornalha Controle de temperatura e umidade	Aço	0,049 m <sup>2</sup>
3º	Convencional com lenha	500 varas	Abafador automático Controle de temperatura e umidade	Alvenaria	0,045 m <sup>2</sup>
-1	Convencional adaptada para pellets	500 varas	Ventoinha para injeção de ar dentro da fornalha Controle de temperatura e umidade	Alvenaria	0,045 m <sup>2</sup>

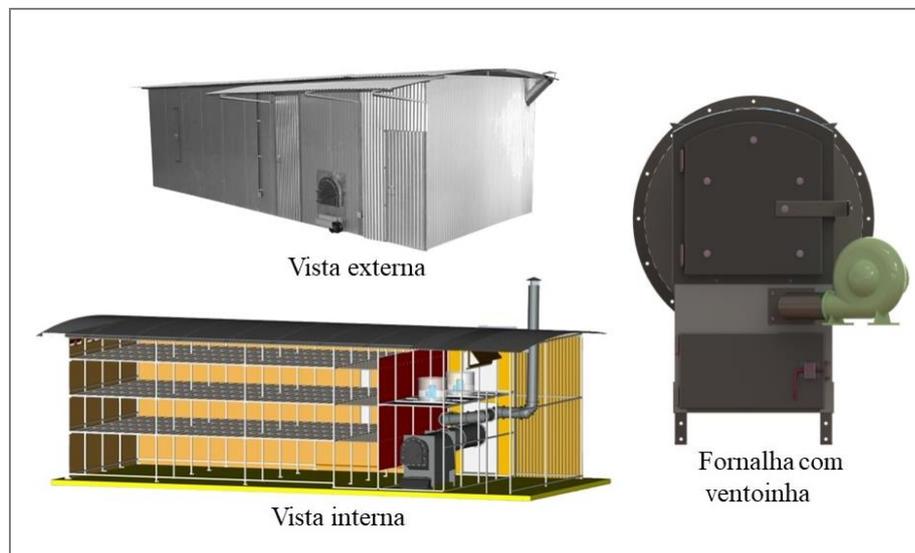
Fonte: Elaborado pela autora. <sup>1</sup> não é utilizada no comparativo de tecnologia das UCs com lenha.

Figura 15 – Unidade de cura Carga contínua para lenha



Fonte: BE1 tecnologia.

Figura 16 – Unidade de cura Ar forçado para lenha



Fonte: BE1 tecnologia.

Figura 17 – Unidade de cura Convencional



Fonte: A autora (2022).

Figura 18 – Unidade de cura Convencional adaptada para pellets



Fonte: IB Caldogen Equipamentos Industriais e A autora (2022).

### 4.2.3 Biomassas avaliadas

Foram analisadas três diferentes biomassas florestais no processo de combustão: lenha de *Eucalyptus dunnii*, lenha de *Eucalyptus saligna* e Pellets de *Pinus* sp. Conforme Farias (2010), o eucalipto na forma de lenha é a biomassa mais barata e também a mais utilizada na produção de tabaco. O Pellet de pinus é menos utilizado, visto que se trata de um combustível ainda sendo testado em unidades de cura de tabaco que, para ser usado, devem ser adaptadas. A utilização de pellets é uma forma de realizar o aproveitamento de resíduos florestais e por isso tem papel importante nas pesquisas sobre eficiência energética e emissões de GEE.

### 4.2.4 Quantificação das emissões de gases poluentes

Para a quantificação das emissões de gases de combustão, foram realizadas medições das concentrações, temperatura do gás na chaminé e velocidade dos gases, na chaminé, em cada etapa da colheita do tabaco (baixeiro, meio pé e ponteira) para cada unidade de cura, com o auxílio do analisador de gases de combustão modelo Chemist 500x, da marca Seitron, como demonstra na Figura 19. Os gases analisados foram: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxido nítrico (NO<sub>x</sub>), Hidrocarbonetos (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>) e oxigênio (O<sub>2</sub>).

Figura 19 – Equipamento utilizado na análise dos gases de combustão – Chemist 500 x



Fonte: Ecil-Seitron.

Este equipamento funciona com uma bomba elétrica interna, que retira a amostra do gás por meio de uma sonda inserida na chaminé da UC. Um filtro retém as partículas e a água condensada, limpando a amostra antes da bomba a expelir para o tubo coletor, onde os sensores eletrônicos estão expostos aos gases. Quando o gás chega até os sensores, os sinais de saída analógicos são amplificados por meio de um multiplexor e convertidos em sinais digitais adequados para leitura por um microprocessador. Cada sensor tem sua própria placa de circuito impresso, contendo um amplificador e um chip de memória que contém a identificação do sensor e os dados de calibração (ECIL, 2015).

Para a coleta dos dados foram abertos orifícios de 10 mm na estrutura das chaminés (a uma altura mínima, de 2 vezes o diâmetro interno da tubulação, após último distúrbio do fluxo gasoso (ABNT NBR 10.700/1989), possibilitando a estimativa dos fatores de emissão, observado na Figura 20.

Figura 20 – Equipamento Chemist 500x em funcionamento



Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Foram realizadas medições em intervalos padronizados de 10 segundos, durante 1 hora, totalizando 360 amostras por ciclo de secagem.

O início da análise deu-se na metade do ciclo de cura do tabaco, quando a estufa apresentava temperatura interna entre 120 e 135 °F. Após a coleta dos dados, estes foram transferidos para um computador por meio de *software* específico do equipamento, e analisados no Microsoft Excel®.

Os resultados foram transformados para 8% de O<sub>2</sub> de referência, conforme equação 1, para atender a Resolução 491 de 2018 sobre os parâmetros de qualidade do ar (CONAMA, 2018) e a Diretriz técnica da FEPAM nº 001/2018 a que estabelece condições e os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos a serem adotados pela FEPAM para fontes fixas e dá outras providências, conforme a Tabela 21.

A fórmula para calcular as emissões levando em consideração o oxigênio de referência pode ser verificada na equação abaixo:

$$\text{CO mg/m}^3 = \frac{(21-8)}{(21-\text{O}_2)} \times \text{CO mg/m}^3 \quad (8)$$

Tabela 21 – Padrão de emissões de CO e NO<sub>x</sub>

Potência Térmica Nominal (MW)	CO	NO <sub>x</sub>
Até 0,05	6500	NA
Maior que 0,05 até 0,15	3250	NA
Maior que 0,15 até 1,0	1700	NA
Maior que 1,0 até menor que 10	1300	NA
De 10 até 30	1300	650
Maior que 30 até 70	1000	650
Maior que 70	1000	650

Fonte: Diretriz técnica da FEPAM nº 001/2018. Valor a 8% de oxigênio de referência.

#### 4.2.5 Fatores de Emissão

Fator de emissão significa a quantidade de massa emitida de um gás quando é consumido um quilograma de biomassa na combustão, ou seja, é um indicador de poluição que expressa a relação entre a quantidade de poluição produzida e a quantidade de matéria processada. Esse fator é expresso como a razão entre o peso do poluente e uma unidade de peso ou volume (AMORIM, 2012).

O fator de emissão (FE<sub>x</sub>) foi calculada de acordo com a Equação 2, conforme proposto por França *et al.*, (2012) e Amorim (2012), considerando g/kg (gramas de tabaco por kg de biomassa seca queimada).

$$\text{FE}_x = \frac{V_{\text{total-chaminé}} [l]_X M_X}{m_{\text{combustível}} V_X} \left[ \frac{\text{g}_x}{\text{kg}_{\text{combustível}}} \right] \quad (9)$$

Em que:

FE<sub>x</sub>: Fator de emissão em gramas de poluente por kg de biomassa consumida;

$V_{\text{total - chaminé}}$  = volume total de gases que flui pela chaminé ( $\text{m}^3$ ) ao longo do ciclo de secagem

$[\text{X}]$  = concentração média de gás X (ppmv)

$M_{\text{X}}$  = massa molar do gás X (g/mol)

$M$  (combustível) = massa do combustível em (kg)

$V_{\text{X}}$  = volume molar de 1 mol a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  e 1 atm (L/mol) ( $=0.0224\text{ m}^3$ )

Para a quantificação dos fatores de emissão por kg de tabaco seco, foi utilizada a seguir:

$$FE_y = (FE_x) \cdot (\text{kg/kg}) \quad (10)$$

Em que:

$FE_y$  = Fator de emissão por kg de tabaco seco

$\text{kg/kg}$  = kg de biomassa consumida por kg de tabaco seco

As variáveis relacionadas à quantificação da biomassa e a eficiência de consumo foram obtidas junto ao Capítulo III.

#### 4.2.6 Eficiência de combustão

A eficiência de combustão (EC) é calculada como a razão do carbono emitido como  $\text{CO}_2$  e o carbono total emitido na forma de  $\text{CO}_2$ , CO, NMHC (hidrocarboneto não metano) e  $\text{MP}_{2,5}$  (material particulado com diâmetro menor que  $2,5\text{ }\mu\text{m}$ ). Porém, neste caso o cálculo do carbono total levou em consideração  $\text{CO}_2$ , CO, e  $\text{C}_x\text{H}_y$ , que foram os gases medidos nesse trabalho.

A eficiência de combustão modificada (ECM) é obtida pela razão entre a concentração do carbono emitido como  $\text{CO}_2$  e a concentração do carbono emitido como  $\text{CO}_2 + \text{CO}$ . Dados da literatura reportam que valores de EC maiores que 0,9 caracterizam a combustão de biomassa na fase de chama, enquanto valores de EC compreendidos entre 0,75 e 0,85 caracterizam a fase de incandescência/ignição. Assim a eficiência de combustão (EC) e eficiência da combustão modificada (ECM) podem ser calculadas pelas equações abaixo:

$$EC = \frac{[\text{CO}_2]}{C_{\text{total}}} \quad (11)$$

$$ECM = \frac{[CO_2]}{[CO_2]+[CO]} \quad (12)$$

Em que:

ECM = Eficiência de combustão modificada

[CO<sub>2</sub>] = Concentração de carbono emitido como CO<sub>2</sub> (%)

[CO] = Concentração de carbono emitido como CO (%)

[Ctotal] = Concentração do carbono total emitido

#### 4.2.7 Quantidade de carbono associado a cada gás

A quantidade de carbono emitido associado a cada gás é calculada a partir da equação dos gases ideais e admitindo-se que os gases se encontram à temperatura de 25 °C e 1 atm. Na equação abaixo é apresentada a equação para o cálculo de carbono emitido associado ao CO<sub>2</sub>, utilizado para o cálculo da eficiência da combustão.

$$C - CO_2 = \frac{[CO_2] \times M_{CO_2} \times 10^3 \text{ mg} \times 12 \text{ gC}}{V_{CO_2} \times 10^{-3} \times 44 \text{ gCO}_2} \quad (13)$$

Em que:

[CO<sub>2</sub>] é a concentração de CO<sub>2</sub> em ppm

M<sub>CO<sub>2</sub></sub> = é a massa molecular do CO<sub>2</sub> (44,01)

V<sub>CO<sub>2</sub></sub> = Volume igual a 24,5 litros para 1 mol de CO<sub>2</sub> nas condições apresentadas.

#### 4.2.8 Carbono equivalente

Para avaliar a influência de um determinado combustível no aquecimento global é usada a medida conhecida como Potencial de Aquecimento Global, comumente chamada de “Pegada de Carbono”, (PAG, do inglês, *Global Warming Potential*, GWP).

O PAG é o impacto que esse combustível causa no aquecimento global em relação a uma unidade equivalente de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>e) durante um determinado período de tempo (normalmente, 20, 100 ou 500 anos).

Embora não sejam incluídas na contabilização das emissões totais de GEE com base no potencial de aquecimento global, as emissões de CO e de NO<sub>x</sub> são relatadas nos inventários. Esses gases, além de outros compostos, na presença de luz solar contribuem para a formação do ozônio (O<sub>3</sub>) na troposfera e, portanto, são frequentemente chamados de “precursores do ozônio”.

Outros poluentes não têm seu PAG definido pelo IPCC, mas alguns pesquisadores sugerem valores, embora não haja concordância. Por exemplo, considerando um período de 100 anos o PAG, sugerido por FUGLESTVEDT *et al.* (2010) para o CO global é de 2 a 3,3. As informações sobre o PAG de cada gás podem ser identificadas na Tabela 22.

O CO<sub>2e</sub> é dado pela equação abaixo:

$$CO_{2e} = \sum (PAG_t \times GEE_i) \quad (14)$$

Em que:

CO<sub>2e</sub> = Emissões de GEE

PAG: Potencial de aquecimento global do gás i

GEE: Massa do gás i

i = gás de efeito estufa

Tabela 22 – PAG para cada gás de efeito estufa

GEE	Fórmula Química	PAG (100 anos)
Dióxido de carbono*	CO <sub>2</sub>	1
Metano*	CH <sub>4</sub>	21
Óxido nitroso	N <sub>2</sub> O (Nox)	310
Hexafluoroeto de metano	SF <sub>6</sub>	23.900
HFC-134a	CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub>	1.300
HFC-143 a	CH <sub>3</sub> CF <sub>3</sub>	3.800
Trifluoreto de nitrogênio	NF <sub>3</sub>	17.200
Monóxido de carbono*	CO	2

\*gases que serão convertidos em CO<sub>2e</sub>

O aparelho utilizado nas análises não verifica separadamente as emissões de metano, apenas a totalidade dos hidrocarbonetos, logo será utilizado o valor de referência proveniente do *GHG protocol 2019.2*, que reporta valor de CH<sub>4</sub> = 0,54. Ressalta-se, também, que o analisador de gases chemix 500x não separa os gases que compõem o No<sub>x</sub>, dessa forma, o valor total das emissões deste gás foi utilizado na contabilização do N<sub>2</sub>O.

Para obter uma estimativa mais ampla dos resultados, as emissões de GEE em toneladas de carbono equivalente foram extrapoladas para totalidade da produção anual de tabaco no Brasil. Segundo dados da Afubra (2021), a safra 2020/2021 produziu 572.732 toneladas de tabaco, variedade Virgínia. Dessa forma, foram criados cenários, objetivando verificar qual a totalidade de redução de emissão utilizando as diferentes unidades de cura e biomassas.

#### **4.2.9 Análise dos dados**

Os resultados foram avaliados por análise estatística univariada (análise de variância - ANOVA) e teste de médias de Tukey. Em todas as análises estatísticas, foi adotado 95% de probabilidade, utilizado o software estatístico R. Quando não atendida as condicionantes de normalidade e/ou homogeneidade dos resíduos, o protocolo de análise levou em consideração o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis. Ocorreu repetição de cada método rigorosamente por três vezes.

### **4.3 RESULTADOS**

#### **4.3.1 Concentração de emissões de gases poluentes**

O limite estabelecido pela Resolução 491 de 2018 (legislação nacional) e Diretriz técnica da FEPAM nº 001/2018 (legislação estadual) serviu como parâmetro de cálculo dos teores de CO (monóxido de carbono) e NO<sub>x</sub> (óxidos de nitrogênio). Na tabela 5, os resultados médios de concentração de CO obtidos, quando comparados ao limite máximo de emissões de 7.800 mg.m<sup>3</sup> para Resolução 491/2018 e 6.500 para Diretriz técnica 001/2018, mostram que o processo de combustão das fornalhas em UC carga contínua e Ar forçado alimentados por lenha, emitem além dos limites normativos. Esse resultado é ainda mais expressivo com uso de lenha de *E. saligna*. Já as UC convencionais com uso de lenha de *E. dunnii* e pellets estão dentro da norma padrão para ambas as legislações, sendo que com utilização de biomassa de lenha de *E. saligna*, a quantidade de CO emitida está fora dos padrões estaduais e dentro dos padrões nacionais. Em relação às emissões de NO<sub>x</sub>, todas as UCs associadas as diferentes biomassas estão dentro do padrão estabelecido.

As emissões de CO foram maiores na UC de carga contínua, perfazendo um total de 29.577,55 e 14.896,03 mg/m<sup>3</sup>, respectivamente para lenha de *E. saligna* e *E. dunnii*. A UC ar forçado obteve valores semelhantes, seguindo a mesma tendência de redução de emissões com uso de lenha de *E. dunnii*. As UCs convencionais obtiveram os menores valores de emissão de CO.

As emissões de CO<sub>2</sub> variaram de 10,02 e 11,65 % para a UC ar forçado com uso de lenha de *E. saligna* e *E. dunnii*, respectivamente.

Em relação as emissões de C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>, as maiores concentrações foram observadas nas unidades de cura, com lenha de *E. dunnii*, chegando a 3,45 % na UC Carga contínua. O menor valor foi obtido com uso de pellets, com 0,05% de emissões (em 8% de O<sub>2</sub> de referência).

Já para as emissões de NO<sub>x</sub> não se observou tendências em função da biomassa e UC.

Em relação às emissões de O<sub>2</sub>, verifica-se que as menores emissões foram na UC Ar forçado, variando entre 11,77 e 11,97 % de oxigênio. Já a UC convencional com uso de pellets foi a que mais eliminou oxigênio pela chaminé, com 16,62%.

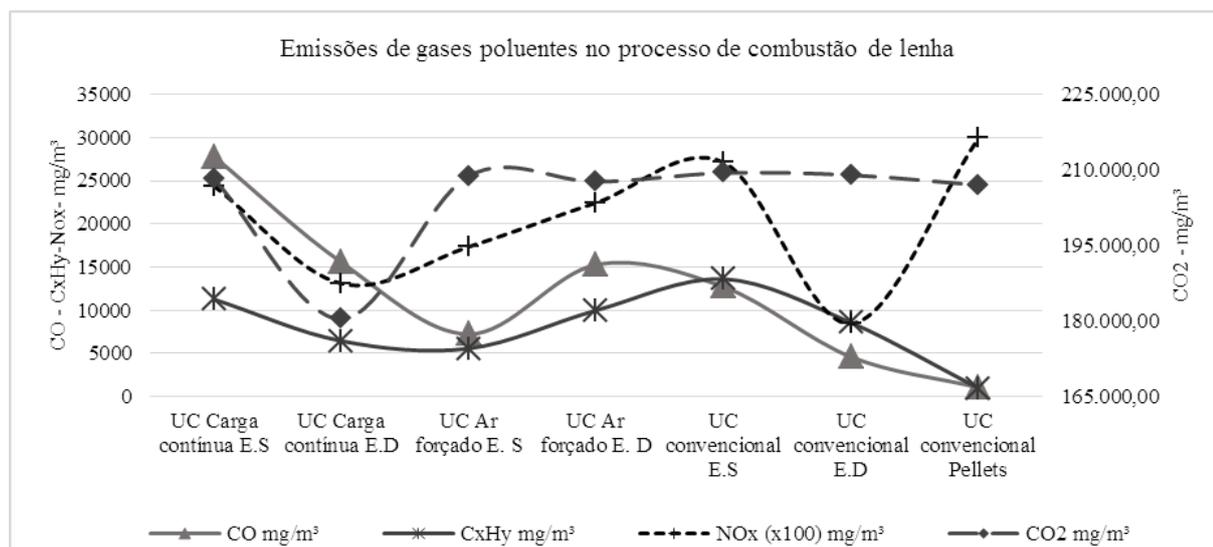
A temperatura de saída dos gases foi maior nas UC Carga contínua e Ar forçado, chegando a 269,19°C, sendo que a menor temperatura foi registrada nas UC convencionais. O mesmo padrão acontece para a velocidade de saída dos gases na chaminé, que varia em função do sistema de alimentação utilizado.

As concentrações dos gases resultantes da combustão das biomassas durante o processo de secagem do tabaco podem ser observadas na Tabela 23. Na Figura 21 é demonstrada a tendência do comportamento dos gases emitidos. Demais informações podem ser verificadas no Apêndice B.

Tabela 23 – Média e desvio padrão das análises de emissões de gases poluentes do processo de combustão. Análise demonstrando os resultados a 8% de O<sub>2</sub> de referência

		O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	NO <sub>x</sub>	T do gás	Vel do gás
Biomassa	UC	%	8%	8% mg/m <sup>3</sup>	8%	8% mg/m <sup>3</sup>	°C	m/s
Lenha de <i>E. saligna</i>	Carga contínua	15,8 ±0,92	11,55±0,04	29.577,55±7.451,8	1,55±0,3	140,58±178,89	204,05±44,77	10,65±0,75
	Ar forçado	11,92±4,36	10,02±1,37	15.557,85±5.542,56	1,05±0,51	130,86±84,8	269,19±25,95	7,9±0,19
	Convencional	14,27±0,99	11,6±0,02	7.230,73±4.711,87	0,56±0,42	173,51±18,95	136,14±17,74	7,11±0,58
Lenha de <i>E.dunnii</i>	Carga contínua	13,36±0,64	11,54±0,41	14.896,03±3.037,96	1,86±1,39	218,22±37,89	256,77±72,95	7,21±1,25
	Ar forçado	11,77±3,41	11,65±2,28	11.069,44±1.994,16	2,08±0,31	291,3±105,98	242,09±11,42	7,00±0,77
	Convencional	12,97±1,83	11,62±1,13	4679±841,49	1,31±0,65	85,12±10,35	122,99±23,25	6,37±0,87
Pellets de Pinus	Convencional	16,62±1,33	11,5±0,02	954,99±1.029,02	0,15±0,16	293,53±31,72	132,76±20,06	5,66±0,80

Figura 21 – Comportamento dos gases emitidos para cada UC em relação às biomassas



Para todos os gases analisados, nas diferentes UCs, as menores emissões foram observadas quando se utilizou os pellets.

Para as emissões de CO, a análise de variância não apontou significância entre os fatores, ou seja, não há interação significativa entre Biomassa (lenha de *E. saligna* e lenha de *E. dunnii*) e Unidades de Cura. Da mesma forma não houve significância entre os fatores biomassa, como se observa na Tabela 24. Na Tabela 25, em UCs houve diferença significativa entre a UC carga contínua e Convencional. E por fim, levando em consideração o uso de diferentes Biomassas em UC convencional, não ocorreu diferenças estatísticas para as emissões de CO, demonstrado na Tabela 26.

Tabela 24 – Análise de Variância para emissões de CO. ANOVA Bifatorial para UC x biomassas (Lenha de *E. dunnii* e Lenha de *E. saligna*)

Fonte de variação	GL	SQ	QM	FC	Pr>Fc
Biomassa	1	162833630	2	4.1203	0.06515 <sup>ns</sup>
Unidades de Cura	2	734381873	3	9.2912	0.00365 <sup>***</sup>
Biomassa x Unidades de Cura	2	95745709	5	1.2114	0.33175 <sup>ns</sup>
Resíduos*	12	474242984	4		
Total	17	1467204196	1		

<sup>\*\*\*</sup>Significativo a 95% de probabilidade.

<sup>ns</sup>Não significativo a 95% de probabilidade.

\*De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais, (p-valor: 0,2954763).

Tabela 25 – Teste de médias para biomassa (lenha de *E. dunnii* e lenha de *E. saligna*) e UC, em relação às emissões de CO

Biomassa	Médias	Grupos	Unidade de cura	Médias	Grupos
Lenha de <i>Eucalyptus dunnii</i>	10852,41	a	Carga contínua	21546,11	a
Lenha de <i>Eucalyptus saligna</i>	16867,83	a	Ar Forçado	14127,18	ab
			Convencional	5907,058	b

\*Médias seguidas de mesma letra minúsculas, na coluna, não diferem entre si.

Tabela 26 – Análise de Variância para emissões de CO. ANOVA monofatorial para as diferentes biomassas em relação à UC convencional

Fonte de variação	GL	SQ	QM	FC	Pr>Fc
Biomassa	2	57754270	28877135	3,4016	0,10292 <sup>ns</sup>
Resíduos*	6	50935565	8489261		
Total	8	108689835			

\*De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais, (p-valor: 0,3881766).

\*De acordo com o teste de Bartlett a 5% de significância, os resíduos possuem homogeneidade de variâncias (p-valor: 0,132828)..

Em relação ao CO<sub>2</sub>, a análise estatística demonstrou não haver normalidade dos resíduos e os resultados da ANOVA não podem ser considerados. Dessa forma foi necessário realizar o teste Kruskal-wallis para cada variável independente, onde identificou-se diferenças estatísticas entre as biomassas, mas não há diferenças significativas entre os tratamentos dentro das unidades de cura, como observa-se nas Tabelas 27 e 28. Já os pellets se diferiram das demais biomassas na UC convencional, no que tange as emissões de CO<sub>2</sub>, demonstrado na Tabela 29.

Tabela 27 – Estatística de Kruskal-Wallis para emissões de CO<sub>2</sub> levando em consideração Biomassa lenha de *E. saligna* e lenha de *E. dunnii*

	N	Média	Desvio padrão	Qui-Quadrado	p	Grupos
Lenha de <i>Eucalyptus dunnii</i>	9	208680	3844,802	5,080662	0,0241 <sup>***</sup>	a
Lenha de <i>Eucalyptus saligna</i>	9	199167,3	18706,92			b

\*\*\*Significativo a 95% de probabilidade.

\*Médias seguidas de mesma letra minúsculas, na coluna, não diferem entre si.

Tabela 28 – Estatística de Kruskal-Wallis para emissões de CO<sub>2</sub> nas UC

	N	Média	Desvio padrão	Qui-Quadrado	p	Grupos
Convencional	6	208899,7	489,9093	0,668046	0,7160 <sup>***</sup>	a
Carga contínua	6	207954,5	4751,515			a
Ar forçado	6	194916,8	22262,89			a

\*\*\*Não significativo a 95% de probabilidade.

\*Médias seguidas de mesma letra minúsculas, na coluna, não diferem entre si.

Tabela 29 – Estatística de Kruskal-Wallis para as três biomassas testadas na UC convencional, em relação às emissões de CO<sub>2</sub>

	N	Média	Desvio padrão	Qui-Quadrado	p	Grupos
Lenha de <i>Eucalyptus dunnii</i>	3	208980.0	6.235.383	5.467.787	0.064965***	a
Lenha de <i>Eucalyptus saligna</i>	3	208819.4	4.380.570			a
Pallets de <i>Pinus sp.</i>	3	207000.0	3.600.000			b

\*\*\*Não significativo a 95% de probabilidade.

\*Médias seguidas de mesma letra minúsculas, na coluna, não diferem entre si.

Para as emissões de NO<sub>x</sub> a análise de variância não apontou significância entre os fatores, ou seja, não há interação significativa entre os fatores Biomassa (lenha de *E. dunnii* e lenha de *E. saligna*) e Unidades de Cura, demonstrado na Tabela 30. Da mesma forma não houve significância dentro de cada fator. Portanto não há diferença significativa entre as médias dos tratamentos analisados. Já em relação às emissões de NO<sub>x</sub> em UC convencionais com diferentes biomassas, verifica-se que houve diferença significativa entre os três tratamentos, como se observa nas tabelas 31 e 32.

Tabela 30 – Análise de Variância para emissões de NO<sub>x</sub>. ANOVA Bifatorial para UC x biomassas Lenha de *E. dunnii* e Lenha de *E. saligna*

Fonte de variação	GL	SQ	QM	FC	Pr>Fc
Biomassa	1	510	5	0,04953	0,82763 <sup>ns</sup>
Unidades de Cura	2	34746	3	1,68755	0,22604 <sup>ns</sup>
Biomassa x Unidades de Cura	2	41468	4	2,01404	0,17612 <sup>ns</sup>
Resíduos*	12	123536	2		
Total	17	200259	1		

<sup>ns</sup>Não significativo a 95% de probabilidade.

\*De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais, (p-valor: 0,6537551).

Tabela 31 – Análise de Variância para emissões de NO<sub>x</sub>. ANOVA monofatorial para as diferentes biomassas em relação à UC convencional

Fonte de variação	GL	SQ	QM	FC	Pr>Fc
Biomassa	2	69902	34951	70,699	6.745e-05***
Resíduos*	6	2966	494		
Total	8	72869			

\*\*\*Significativo a 95% de probabilidade.

\*De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais, (p-valor: 0,8488394).

\*De acordo com o teste de Bartlett a 5% de significância, os resíduos possuem homogeneidade de variâncias (p-valor: 0,4255308).

Tabela 32 – Teste de médias para três biomassas testadas na UC convencional, em relação as emissões de NO<sub>x</sub>

Biomassa	Médias	Grupos
Pellets de <i>Pinus sp.</i>	299,32	a
Lenha de <i>Eucalyptus saligna</i>	173,51	b
Lenha de <i>Eucalyptus dunnii</i>	84,493	c

\*Médias seguidas de mesma letra minúsculas, na coluna, não diferem entre si.

Na Tabela 33, para  $C_xH_y$ , a análise de variância não apontou significância entre os fatores, ou seja, não há interação significativa entre os fatores Biomassa (lenha de *E. saligna* e lenha de *E. dunnii*) e Unidades de Cura. Da mesma forma não houve significância dentro de cada fator. Portanto não há diferença significativa entre as médias dos tratamentos analisados. Já na análise de emissões de  $C_xH_y$  nas UC convencionais considerando diferentes biomassas, houve diferença significativa entre pellets de pinus e lenha de *E. saligna*, não diferindo estatisticamente do *E. dunnii*, como observa-se nas Tabelas 34 e 35.

Tabela 33 – Análise de Variância para emissões de  $C_xH_y$ . ANOVA Bifatorial para UC x biomassas lenha de *E. dunnii* e Lenha de *E. saligna*

Fonte de variação	GL	SQ	QM	FC	Pr>Fc
Biomassa	1	39374707	5	3,5368	0,084505 <sup>ns</sup>
Unidades de Cura	2	43843770	3	1,9691	0,182159 <sup>ns</sup>
Biomassa x Unidades de Cura	2	53541707	4	2,4047	0,132369 <sup>ns</sup>
Resíduos*	12	133594891	2		
Total	17	270355075	1		

<sup>ns</sup>Não significativo a 95% de probabilidade.

\*De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais, (p-valor: 0,654772).

Tabela 34 – Análise de Variância para emissões de  $C_xH_y$ . ANOVA monofatorial para as diferentes biomassas em relação à UC convencional

Fonte de variação	GL	SQ	QM	FC	Pr>Fc
Biomassa	2	87753880	43876940	6.5961	0.030554 <sup>***</sup>
Resíduos*	6	39911543	6651924		
Total	8	127665423			

<sup>\*\*\*</sup>Significativo a 95% de probabilidade.

\*De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais, (p-valor: 0,114476).

\*De acordo com o teste de Bartlett a 5% de significância, os resíduos possuem homogeneidade de variâncias (p-valor: 0,1181416).

Tabela 35 – Teste de médias para três biomassas testadas na UC convencional, em relação às emissões de  $C_xH_y$

Biomassa	Médias	Grupos
Pellets de Pinus sp.	8550,783	a
Lenha de <i>Eucalyptus saligna</i>	5567,367	ab
Lenha de <i>Eucalyptus dunnii</i>	959,7833	b

#### 4.3.2 Fator de Emissão

Em relação ao fator de emissão por kg de biomassa consumida no processo de cura do tabaco, verifica-se que a lenha de *E. saligna* foi a que teve pior desempenho. Quanto as UC, observa-se que convencional, também, teve maior fator de emissão, seguido da UC Carga continua e UC Ar Forçado.

Para o uso de lenha de *E. dunnii*, a UC carga continua foi a que obteve o menor fator, seguido da UC convencional e Ar forçado. O uso de pellets em UC, convencionais adaptadas, obteve o pior resultado no fator de emissão em gramas de poluentes por kg de biomassa, totalizando 3.644,86 gramas, seguido da UC Ar forçado com uso de Lenha de *E. dunnii* com 3.023,17 g e lenha de *E. saligna* com 2.773,87 g por kg de biomassa.

Em relação aos fatores de emissão por kg de tabaco seco, obteve menores emissões utilizando lenha de *E. saligna* na UC carga continua, seguida da convencional e Ar forçado. Para a lenha de *E. dunnii*, a emissão foi menor UC carga continua, seguida da Ar forçado e Convencional. Já a UC convencional com uso de pellets obteve o melhor resultado, com 1.173,36 gramas de poluente.

Levando em consideração exclusivamente a biomassa lenha, verifica-se que todas as UC que utilizaram lenha de *E. saligna*, obtiveram fatores de emissão por kg de tabaco seco maior, se comparada a lenha de *E. dunnii*. A UC Carga contínua com uso de lenha de *E. dunnii*, obteve o menor valor com 2.475,83 g/kg de tabaco seco de poluentes.

A emissão de CO<sub>2</sub> representou entre 82,84 e 88,04% do valor final dos fatores de emissão, tanto em grama de poluente por kg de biomassa, quanto em kg de tabaco seco, para as UCs Carga contínua e Ar forçado, em ambas as espécies de *Eucalyptus* utilizadas como biomassa. A emissão de CO esteve na média entre 6,34 e 12,42%, N<sub>ox</sub> entre 3,52 e 5,77% e C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> entre 0,13 e 0,21%. Já para as UCs convencionais, o fator de emissão representado pelo gás CO<sub>2</sub> ultrapassou a importância de 94%, sendo que para os pellets a porcentagem foi 98,64%. Os demais gases obtiveram representatividade menores.

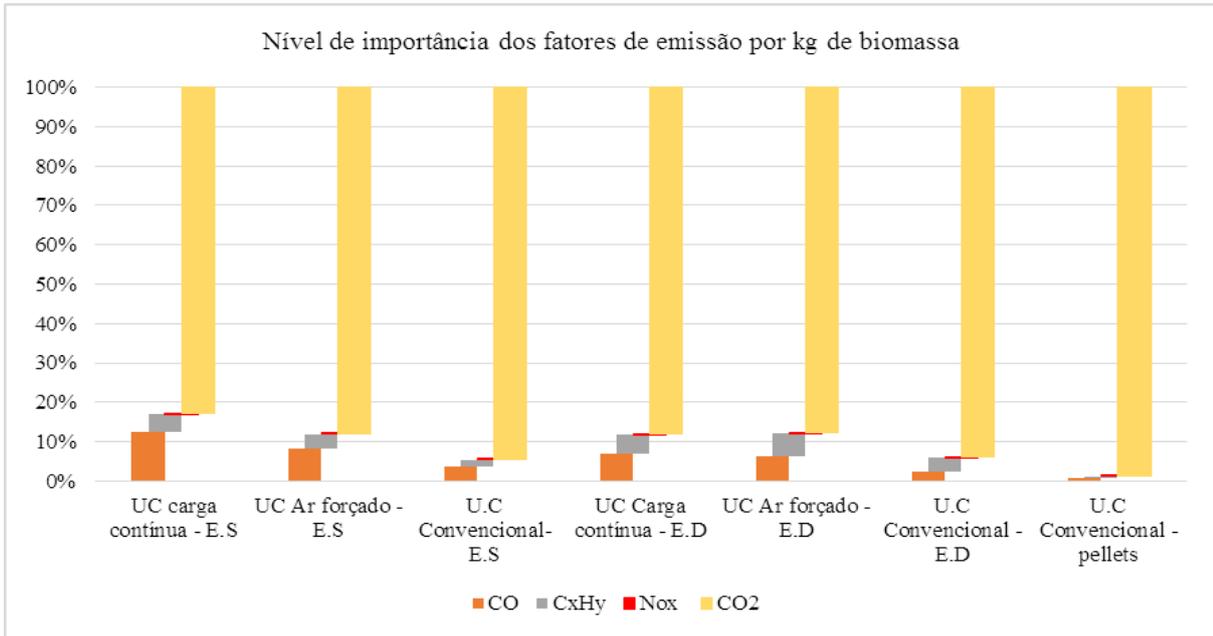
Maiores informações podem ser visualizadas na Tabela 36 e nas Figuras 22 e 23 e no Apêndice C.

Tabela 36 – Fatores de emissão

Biomassa	UC	Fatores de Emissão (g de poluente/kg de biomassa consumida)				Soma	kg/kg	Emissão (g de poluente/kg de tabaco curado)				Soma
		CO <sub>2</sub>	CO	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	NO <sub>x</sub>			CO <sub>2</sub>	CO	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	NO <sub>x</sub>	
Lenha de <i>E. saligna</i>	Carga contínua	2286,66±269,48	342,75±60,81	125,68±37,05	5,29±4,45	2760,39±253,4	2,38±1,04	5342,85±2103,14	848,06±477,18	286,3±106,4	10,08±5,16	6487,3±2657,25
	Ar forçado	2441,74±480,6	230,86±37,39	97,72±54,88	3,55±2,45	2773,87±471,96	3,12±1,89	7047,13±3258,78	745,88±476,61	303,77±286,43	11,08±11,68	8107,86±3980,37
	Convencional	1772,09±124,57	69,42±44,63	30,95±23,15	2,77±0,42	1875,24±125,3	4,00±2,51	6880,78±3806,7	295,87±297,96	128,5±130,46	10,6±5,27	7314,97±4189,49
Lenha de <i>E. dunnii</i>	Carga contínua	1120,14±225,58	88,36±41,74	61,69±40,04	2,13±0,86	1272,32±166,99	1,98±0,78	2133,83±557,33	194,99±163,73	142,61±144,69	4,4±2,74	2475,83±842,84
	Ar forçado	2651,81±245,17	190,56±113,77	174,45±41,03	6,35±1,78	3023,17±397,58	1,97±0,21	5255,45±984,27	388,66±245,12	348,54±108,5	12,3±2,63	6004,95±1325,64
	Convencional	1585,14±396,7	37,79±5,58	62,16±22,96	1,18±0,15	1686,26±390,79	3,80±1,57	6435,27±4306,74	140,48±46,02	228,51±101,45	4,65±2,5	6808,91±4435,95
Pellets de Pinus	Convencional	3595,38±835,47	22,80±26,4	16,73±17,59	9,95±3,37	3644,86±860,51	1,44±0,62	1156,82±507,71	7,71±10,17	5,59±5,97	3,24±1,73	1173,36±518,75

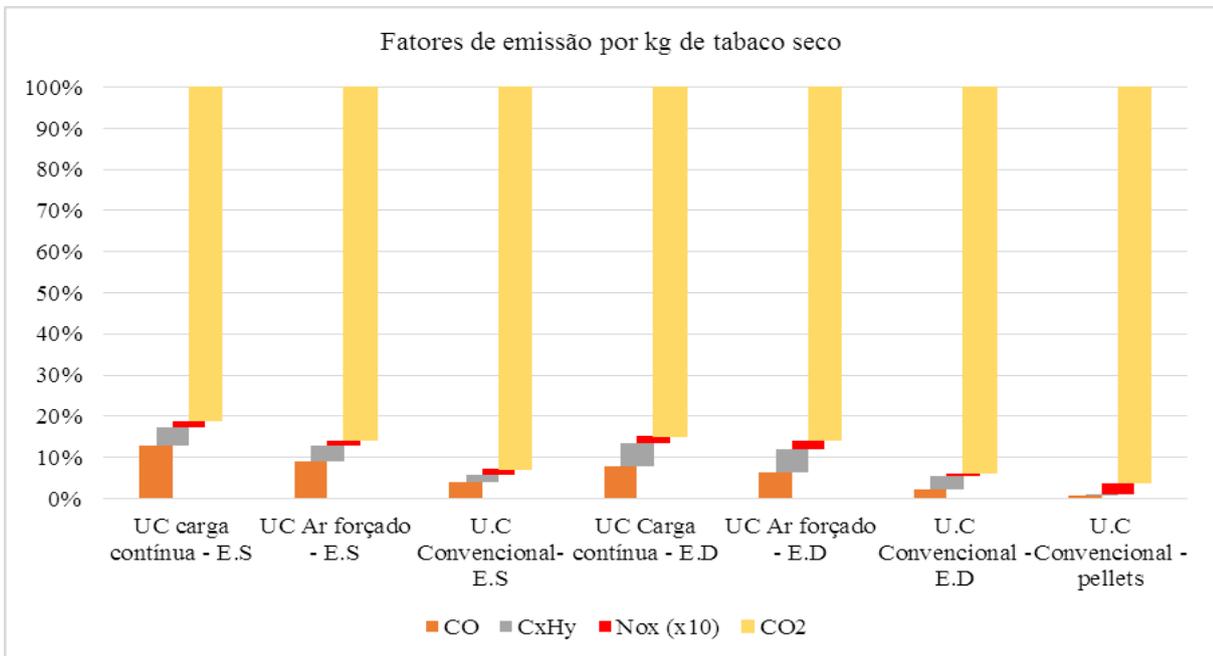
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 22 – Porcentagem de importância em função dos fatores de emissão por kg de biomassa consumida



E.S: Lenha de *Eucalyptus saligna* E.D: Lenha de *Eucalyptus dunnii*

Figura 23 – Nível de importância dos fatores de emissão por kg de tabaco seco



E.S: Lenha de *Eucalyptus saligna* E.D: Lenha de *Eucalyptus dunnii*

### 4.3.3 Eficiência da Combustão

Analisando a eficiência de combustão para cada uma das UCs em relação ao tipo de biomassa, verificou-se que a biomassa, na forma de pellets, utilizada na UC convencional, foi a que obteve a maior eficiência em combustão, apresentando valores de 0,9736 de EC e 0,9874 de ECM, ou seja, 97,36% e 98,74%, respectivamente.

Em relação a biomassa lenha, verifica-se que a utilização da espécie de *E. dunnii* acarretou em maior eficiência de combustão se comparado a lenha de *E. saligna*, em todas as UC avaliadas. A UC convencional foi a que obteve a maior eficiência de combustão, tanto de *E. saligna* quanto de *E. dunnii*, com EC = 0,9122 ECM = 0,9531 e EC= 0,8749 e ECM = 0,9695, respectivamente.

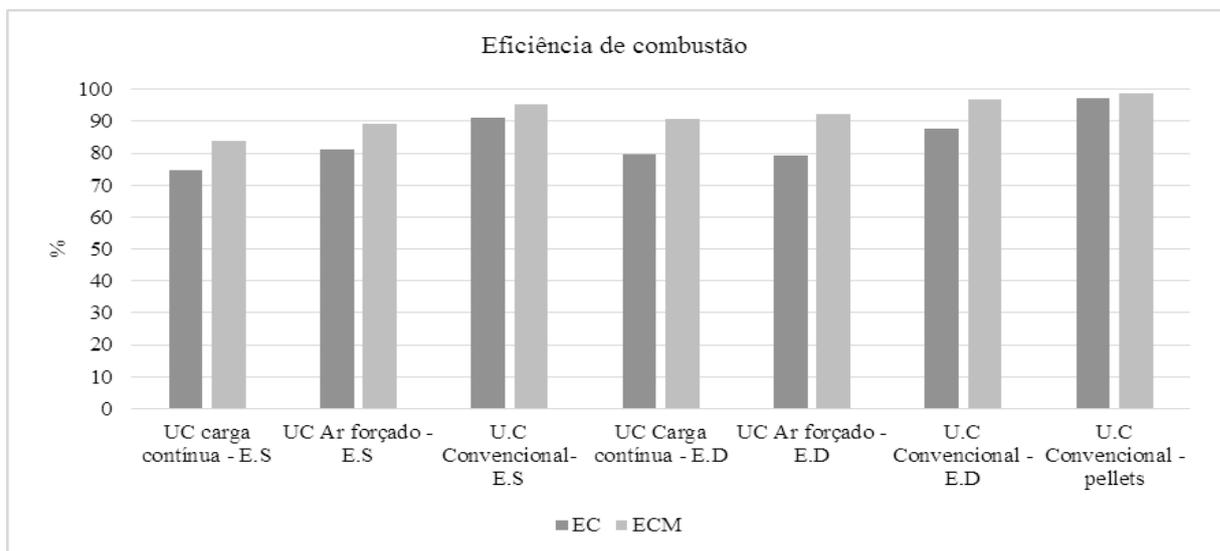
Os demais dados de eficiência de combustão e eficiência de combustão modificada são apresentados na Tabela 37 e Figura 24:

Tabela 37 – Eficiência de combustão em função do tipo de unidade de cura e biomassa

Biomassa	UC	C total	EC	ECM
		%		
Lenha de <i>E. saligna</i>	Carga contínua	3,32 ±0,49	0,75±0,02	0,84±0,04
	Ar forçado	4,11±1,76	0,81± 0,04	0,89±0,03
	Convencional	3,22±0,27	0,91±0,06	0,95±0,03
Lenha de <i>E. dunnii</i>	Carga contínua	4,19±0,34	0,80±0,11	0,91±0,05
	Ar forçado	5,06±1,57	0,79±0,05	0,92±0,04
	Convencional	4,05±1,16	0,87±0,04	0,97±0,01
Pellets de Pinus	Convencional	1,94±0,58	0,97±0,02	0,99±0,01

Fonte: Elaborado pela autora EC: Eficiência de combustão ECM: eficiência de combustão modificada.

Figura 24 – Eficiência da combustão e eficiência de combustão modificada em função do tipo de biomassa e unidade de cura (UC)



Fonte: EC: eficiência de combustão ECM: Eficiência de combustão modificada. E.S: lenha de *Eucalyptus saligna*, E.D: lenha de *Eucalyptus dunnii*.

#### 4.3.4 Emissão em toneladas de carbono equivalente

Analisando as emissões de carbono equivalente por kg de tabaco seco, verifica-se que as maiores emissões médias são derivadas das concentrações de CO<sub>2</sub>, principalmente nas UC convencionais. Com uso de pellets as emissões chegaram a 50,40% e para lenha 51,13% com *E. saligna* e 49,67% com *E. dunnii*. Já para as UCs Ar forçado e Carga contínua a emissão variou entre 30,61% e 38,39% de CO<sub>2e</sub>.

As emissões de CO foram as menores e conseqüentemente menos representativas, tendo valor de 0,67% com o uso de pellets, seguida das UC convencionais com lenha com média de 2,16% e 4,39% para *E. dunnii* e *E. saligna*, respectivamente. Para a UC Ar forçado e Carga contínua, as emissões foram maiores, variando entre 4,52 - 10,48%, sendo este último relacionada à UC Carga contínua com uso de lenha de *E. saligna*.

Para o C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>, novamente os pellets obtiveram o menor das emissões totais, tendo valor médio de 5,11%, sendo que o pior resultado foi obtido pela UC Carga contínua com lenha de *E. saligna* com 43,51%.

Por fim, as emissões de N<sub>ox</sub>, o uso de pellets obteve emissão de 43,80%, sendo o valor mais alto entre todas as análises. A menor porcentagem de emissão foi com UC convencional utilizando lenha de *E. dunnii*.

As UCs convencionais com uso de lenha emitiram em média 12,95 e 13,45 kg CO<sub>2e</sub>, para *E. dunnii* e *E. saligna*, respectivamente, sendo que o uso de pellets resultou em 2,29 kg de CO<sub>2e</sub> por kg de tabaco seco. As piores emissões por kg de tabaco seco são para a UC Ar forçado, com 17,16 e 18,35 kg CO<sub>2e</sub> para lenha de *E. dunnii* e *E. saligna*, respectivamente.

Os gráficos das Figuras 25, 26 e 27 demonstram a variação de emissões de cada gás, bem como na Figura 28 evidencia-se as emissões totais em CO<sub>2e</sub> para cada UC em relação a cada tipo de biomassa. No apêndice D é possível verificar demais informações.

Figura 25 – Emissão em tCO<sub>2</sub>e para cada gás, em relação a cada UC e biomassa *E. saligna*

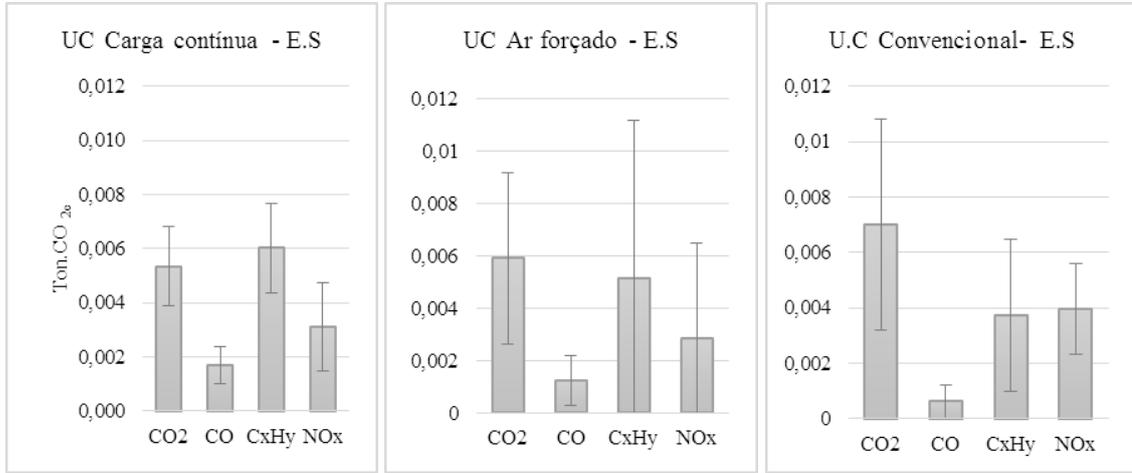


Figura 26 – Emissão em tCO<sub>2</sub>e para cada gás, em relação a cada UC e biomassa *E. dunnii*

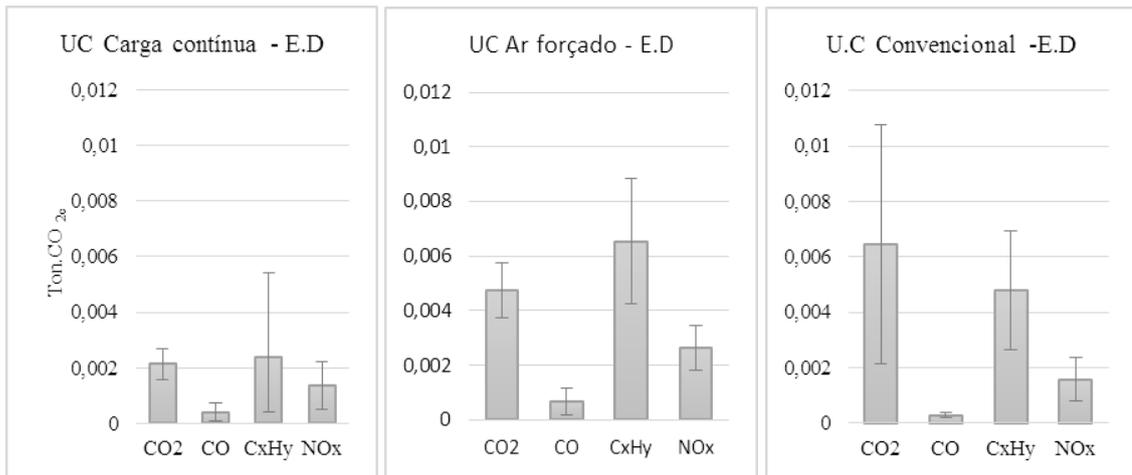


Figura 27 – Emissão em tCO<sub>2</sub>e para cada gás, em relação a UC convencional adaptada com uso de pellets de Pinus

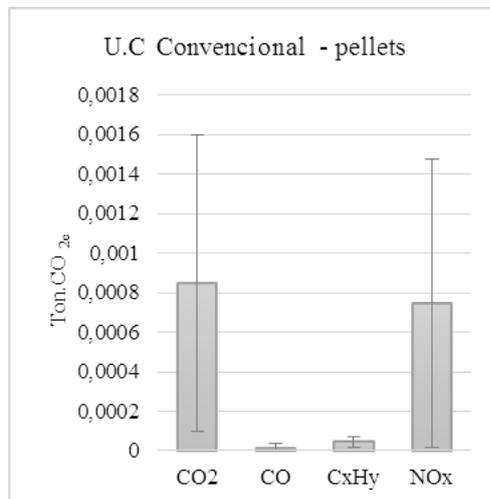
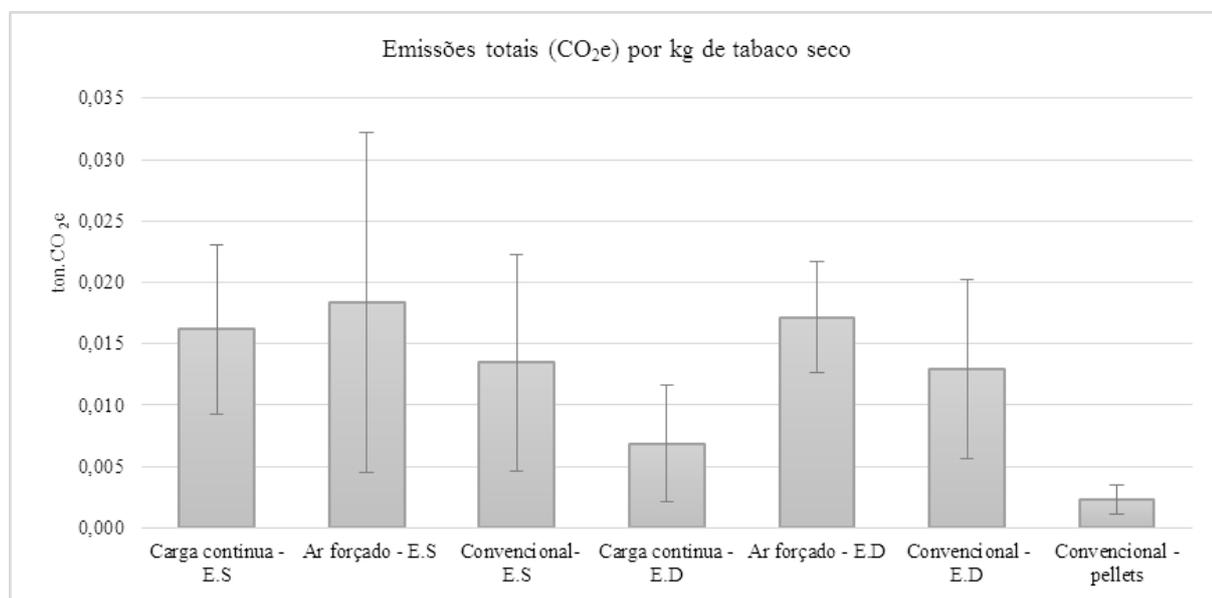


Figura 28 – Emissões totais em tCO<sub>2</sub>e por kg de tabaco eco, levando em consideração as diferentes UCs e biomassas



E.S: Lenha de *Eucalyptus saligna* E.D: Lenha de *Eucalyptus dunnii*

Analisado os cenários de emissões levando em consideração uma safra de tabaco para toda a região sul, ou seja, 572.732 toneladas de tabaco seco (AFUBRA, 2021), verifica-se que o melhor cenário, ou seja, aquele que emite a menor quantidade de gases para a atmosfera é o uso de UC convencionais adaptadas para a pellets com 1.314,45 tCO<sub>2</sub>e, seguido da UC Carga contínua utilizando lenha de *E. dunnii* que teve valor médio de 3.941,35 tCO<sub>2</sub>e. Verifica-se que as UCs Ar forçado obtiveram o pior resultado, principalmente com lenha de *E. saligna*.

Levando em consideração uma linha base com o pior cenário (UC Ar forçado com uso de lenha de *E. saligna*) para os dois melhores cenários, é possível atingir uma redução de 87,50% com uso de UC convencionais adaptadas com uso de pellets e 62,51% com uso de UC carga contínua com uso de lenha de *E. dunnii*. Demais informações na Tabela 38:

Tabela 38 – Emissões de gases em tCO<sub>2</sub>e em função do tipo de biomassa e unidade de cura (UC)

Biomassa	UC	tCO <sub>2</sub> e /kg tabaco seco	tCO <sub>2</sub> e/safra 2020/2021	Hanking	Redução de emissões
Lenha de <i>E. saligna</i>	Carga contínua	0,0161	9.265,19	5°	11,86
	Ar forçado	0,0183	10.511,82	7°	0,00
	Convencional	0,0134	7.706,27	4°	26,69
Lenha de <i>E. dunnii</i>	Carga contínua	0,0068	3.941,35	2°	62,51
	Ar forçado	0,0171	9.830,97	6°	6,48
	Convencional	0,0129	7.419,97	3°	29,41
Pellets de Pinus	Convencional	0,0022	1.314,45	1	87,50

tCO<sub>2</sub>e: toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente.

## 4.4 DISCUSSÕES

### 4.4.1 Concentração de emissão de gases poluentes

As análises realizadas demonstram que não há interação significativa entre o tipo de biomassa e unidade de cura, ou seja, os fatores são independentes, sendo que o comportamento de um fator (biomassa) independe da variação (ausência ou presença) de outro fator (unidades de cura), para os diferentes gases, tendo apenas efeito isolado das variáveis.

A lenha de *E. dunnii* não se difere significativamente da lenha de *E. saligna* para as emissões de CO nas diferentes UCs, mesmo o *E. dunnii* emitindo menores quantidades do gás poluente. Ainda, não ocorre diferenças entre a lenha e os pellets para a emissão de CO em UC convencionais, justificado pelo alto desvio padrão dos dados. Assim, mesmo as médias sendo diferentes, a análise aponta que não há significância.

Já, entre as UCs, ocorreu maior emissão de CO na Carga contínua, que se diferiu da UC convencional mas não se diferiu da UC Ar forçado. Este fato pode estar associado à presença de uma pequena turbina (ventilador ou chamado soprador), que injeta ar para melhorar o fator ar e a mistura entre o combustível e comburente dentro da fornalha, tecnologia utilizada em ambas UCs. O ar acionado artificialmente em grande volume e velocidade, acaba estimulando a formação de fumaça na queima, geralmente quando ocorre o reabastecimento manual da fornalha e a combustão volta ao processo de ignição.

A utilização da ventoinha nas UCs pode ser considerada um avanço tecnológico importante, pois se utilizada de forma regulada, elimina a falta de oxigênio no processo de combustão e aumenta a eficiência em relação ao consumo, auxiliando na melhor queima da biomassa e reduzindo as emissões, como acontece com a UC convencional adaptada para pellets. No entanto, a elevada rotação e velocidade de entrada de ar na fornalha, aumentam as concentrações dos gases emitidos, dispersando as cinzas e aumentando a fumaça. Este mesmo fato foi identificado na pesquisa de Welter (2017), em que define que as UC que detém o maior nível tecnológico, foram as que obtiveram maiores concentrações de emissões de gases poluentes, oriundos de uma combustão incompleta.

Para as emissões de CO<sub>2</sub>, ocorreu diferença entre as biomassas lenha de *E. dunnii* e *saligna*, justificado pelo fato de que o *E. dunnii* possui um processo de combustão melhor, emitindo mais CO<sub>2</sub> do que outros gases.

O aumento significativo da concentração desse gás demonstra indiretamente o potencial de eficiência do combustível para redução das emissões dos poluentes mais nocivos, como o CH<sub>4</sub>, composto dentro do C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>, uma vez que o CO<sub>2</sub> é produto da oxidação deste gás. Esse fato ainda pode ser comprovado, levando em consideração que as emissões de C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> foram em média 66,66% menores se comparado a lenha de *E. dunnii* (1,05%) em relação a lenha de *E. saligna* (1,75%).

Dessa forma, evidencia-se que o processo de combustão nas fornalhas pode ser mais eficiente, reduzindo as emissões, desde que sejam otimizados os parâmetros como a quantidade de ar injetado, quantidade de biomassa dentro da fornalha, associado a características energéticas da biomassa e umidade.

Já os pellets se diferiram das lenhas na emissão de CO<sub>2</sub> em UC convencionais, visto que o processo de combustão é mais eficiente com uso dessa biomassa. O queimador de pellets é automatizado, ou seja, o abastecimento ocorre de forma gradual, sem abertura da fornalha e de forma automática. Dessa forma, não ocorre a lotação da fornalha com biomassa, auxiliando no maior contato da biomassa com o ar.

Ainda, os pellets possuem como principal característica o alto poder calorífico, alta densidade e baixa umidade, associado a uma superfície de contato ar/combustível muito superior à lenha. Esses fatores são importantes para uma queima eficiente, permitindo que ocorra redução no consumo de biomassa e menores concentrações de emissão de gases poluentes.

A emissão de NO<sub>x</sub> foi superior nos pellets do que nas demais biomassas na combustão em UC convencional, e assim, diferindo-se das demais. Essa variável pode estar associada à quantidade de nitrogênio existente no próprio ar, necessário para a queima, como também relacionado a temperatura de queima dentro da fornalha, fator este não analisado na pesquisa.

Mesmo assim, os pellets não apresentaram a maior temperatura dos gases de combustão na saída da chaminé (132,76 °C), o que não era esperado, devido a baixa umidade e elevado PCS desse biocombustíveis sólido, em comparação com lenha, que possui umidade maior e menor PCS.

Porém, Francisco (2012) salienta que a emissão de NO<sub>x</sub> está diretamente relacionada ao percentual de O<sub>2</sub> nos gases de exaustão, ou seja, quanto maior o percentual de oxigênio nos gases de exaustão maior a emissão de NO<sub>x</sub>, o que justifica em partes as maiores concentrações de NO<sub>x</sub> para pellets, visto que, para a combustão dessa biomassa, foi emitido 16,62% de oxigênio.

A formação de  $\text{NO}_x$  pode ser reduzida atuando-se diretamente no processo, desde alterações operacionais (excesso de ar, potência dissipada, recirculação de gases de combustão) até modificações substanciais, como estagiamento no fornecimento de ar ou combustível.

Entre os resultados relacionados à biomassa lenha de *E. dunnii* e *E. saligna*, não há diferenças significativas para emissões de  $\text{NO}_x$ , bem como não há diferenças associadas às diferentes UCs utilizando lenha. Situação similar acontece com as emissões de  $\text{C}_x\text{H}_y$ , justificado pelo fato de que a lenha, independente da espécie, possui composição química elementar similar sendo aproximadamente 48% de carbono, 6% de hidrogênio, 45% de oxigênio, 0,15% de nitrogênio e 0,01% de enxofre (NEVES *et al.*, 2011).

No entanto, os pellets se diferem da biomassa lenha, seja de *E. dunnii* ou *E. saligna*, para as emissões de  $\text{C}_x\text{H}_y$ . Isto porque, durante a combustão dos pellets, a constituição elementar de carbono e hidrogênio, contribuirão, em maior proporção, na liberação de energia, e posteriormente para formação de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  (OBERNBERGER; THEK, 2010), fazendo com que a formação de  $\text{C}_x\text{H}_y$  seja menor do que com uso de lenha.

Em relação ao  $\text{O}_2$ , Francisco (2012) comenta que, quanto maior o percentual de oxigênio nos gases de exaustão maior o percentual de excesso de ar e que, a emissão de CO é inversamente proporcional ao percentual de oxigênio nos gases de exaustão, ou seja, quanto maior o percentual de oxigênio menor a emissão de CO. Esse resultado é também afirmado por Bhattacharya *et al.* (1999) e em partes nesta pesquisa, que identificou comportamento similar apenas para os pellets. Francisco (2012) ressalta também que a emissão de CO é diretamente proporcional à temperatura do gás, pois quanto menor a temperatura menor a emissão de CO. Esse resultado é ratificado nesta pesquisa, que evidenciou concentrações menores de CO nas UC convencionais, seja com biomassa de lenha de *E. saligna*, *dunni* ou pellets, nos quais eliminaram gás em menores temperaturas, variando entre 122 e 136°C.

Dessa forma, Pinheiro e Valle (1995) afirmam que a dificuldade da análise e do controle do processo de combustão é devido ao fato de que o coeficiente de excesso de ar afeta a eficiência e os níveis de emissão de maneiras diferentes e antagônicas.

Ainda, a velocidade de saída dos gases foram maiores nas UC Ar forçado e Carga contínua, independente da biomassa lenha (seja *E. saligna* ou *E. dunnii*) o que influencia negativamente as emissões de gases.

De forma teórica, se a velocidade de saída dos gases aumenta, significa que a pressão interior da câmara de combustão está diminuindo, pois, mais gás está saindo mais rapidamente. Dessa forma, os gases não ficam tempo suficiente na câmara para serem queimados, ocasionando maiores emissões de gases poluentes e também particulados.

De maneira contrária, se a velocidade é reduzida, a pressão no interior da câmara tende a ser maior, e os gases ficam retidos queimando por mais tempo. Dessa forma, essa também é uma das variáveis que ocasionam maiores emissões de gases nas UC que apresentam a injeção de ar pela ventoinha.

No entanto, segundo Francisco (2012), a chaminé também tem a função de aumentar a velocidade de descarga dos gases, produzindo uma tiragem natural que promove a entrada de ar à fornalha acelerando assim a combustão. Dessa forma, evidencia-se a necessidade de dimensionando da entrada de oxigênio e também da velocidade que o gás é expelido de dentro da fornalha, para que ocorra o processo de combustão de forma mais eficiente.

Comparando os resultados obtidos nesta pesquisa com o de Welter (2017), para análise em UC de tabaco convencional com lenha de *Eucalyptus* sp., a autora encontrou valores de 5.848,2 mg/m<sup>3</sup> de CO, sendo esse inferior ao encontrado nesta pesquisa com lenha de *E. saligna* a 8% de O<sub>2ref</sub>. No entanto, levando em consideração a lenha de *E. dunnii*, a pesquisa atual obteve concentrações menores. A autora também menciona a emissão de 174 mg/m<sup>3</sup> de NO<sub>x</sub>, a 8% O<sub>2ref</sub>, valor similar ao encontrado para o *E. saligna* em UC convencionais, mas superior em relação ao *E. dunnii*.

Na mesma pesquisa, Welter (2017) avaliou a utilização de pellets em UC de Ar forçado, adaptadas, e evidenciou emissões de 7.510,2 mg/m<sup>3</sup> de CO, valor superior ao encontrado na UC convencional adaptada desta pesquisa, que totalizou uma média de 954,99 mg/m<sup>3</sup>. Qiu (2013) analisando um método experimental para investigar emissões de gases de uma caldeira de biomassa doméstica com uso de pellets no Reino Unido, obteve emissões gasosas de 54,92 ppmv para NO<sub>x</sub>, 11,98 % para CO<sub>2</sub>, 0,24 % para CO e 8,19 % para O<sub>2</sub>.

Convertendo os valores para fins comparativos (NO<sub>x</sub> = 103,32 mg/m<sup>3</sup>; CO<sub>2</sub> = 11,98 % CO = 2749,448 mg/m<sup>3</sup> O<sub>2</sub> = 8,19 %), evidencia-se que os valores foram superiores aos resultados obtidos utilizando pellets em UC convencional adaptada, com exceção do oxigênio, que obteve valor de 11,50%.

Por fim, vale destacar que Garcia (2002) afirma que a etapa mais lenta da combustão é a conversão do CO em CO<sub>2</sub> na zona de pós-chama. Em pequenas câmaras de combustão, onde o tempo de residência é curto, as concentrações finais de CO serão maiores em relação fornalhas de maior porte, onde o tempo de residência é maior.

Logo, sugere-se a construção de uma segunda câmara de combustão, a fim de fazer com que os gases fiquem retidos por mais tempo na zona de queima/pós queima, antes de serem eliminados pela chaminé.

#### 4.4.2 Fatores de emissão

Fator de emissão significa a quantidade de massa emitida de um gás quando é consumido um quilograma de biomassa na combustão, ou seja, é um indicador de poluição que exprime a relação entre a quantidade de poluição produzida e a quantidade de matéria processada. Esse fator é expresso como a razão entre a massa do poluente e uma unidade de massa ou volume (EHSO, 2011). Deve-se entender que fator de emissão não é sinônimo de concentração de emissão, como demonstrado no item 4.2.4 e 4.2.5 que está associado às emissões por vazão de gás e não por quantidade de biomassa.

Chantara *et al.* (2019) encontraram fatores de emissão de  $898 \pm 99$  g/kg de CO<sub>2</sub> por kg de biomassa de palha de arroz. Para o CO o total foi de  $39,8 \pm 11,8$  g/kg e NO  $2,34 \pm 0,35$  g/kg. Soares Neto *et al.* (2011) ao analisar galhos secos no processo de combustão, encontraram valor de  $1.565 \pm 128$  g/kg para CO<sub>2</sub>,  $50,3 \pm 17,1$  g/kg para CO e  $2,74 \pm 0,75$  g/kg para NO<sub>x</sub>, sendo que todos menores aos observados nessa pesquisa em questão.

Amorim (2012) em seus estudos na Amazônia, estimou um fator de emissão de CO<sub>2</sub> médio de 1.616 g/kg de lenha queimada e França *et al.* (2012), obteve os valores de 1.303 g de CO<sub>2</sub>, 65 g de CO, 1,5 g de NO<sub>x</sub> e 16 g de C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> por kg de lenha.

Soares Neto *et al.* (2009), em estudo realizado com biomassa florestal nativa da Amazônia, quantificaram valores de CO<sub>2</sub> variando entre 1.548 e 1.741 g/kg de lenha e CO valores entre 59 e 181 g/kg de biomassa ressalta-se que esses valores foram obtidos pela queima controlada em floresta, sendo um local aberto, com velocidade do gás e conseqüentemente menor concentração dos poluentes, quando comparados à essa pesquisa. Em comparação com a pesquisa realizada, estes são valores menores do que os emitidos na combustão de lenha de *E. saligna* para a UC carga contínua e Ar forçado, porém maiores do que os emitidos nas UC convencionais e nas UCs carga contínua e Ar forçado com lenha de *E. dunnii*. Para o CO, os valores mencionados estão dentro dos limites encontrados pela maior parte das UC desta pesquisa, com exceção da Ar forçado e Carga continua com uso de lenha de *E. saligna*.

Gioda (2018), em estudo realizado com lenha utilizada na cocção de alimentos em fogões residenciais, quantificou a emissão de CO<sub>2</sub> em 3,767 kg/kg de biomassa consumida, valor maior do que foi encontrado na atual pesquisa com lenha. A autora ainda comenta que dentre os fatores que afetam a quantificação das emissões, está a velocidade de saída dos gases pela chaminé, que conseqüentemente afeta a vazão. Essa afirmação é ratificada em partes nesta pesquisa, visto que foi identificado maior velocidade nos gases de exaustão nas UC Carga continua e Ar forçado para biomassa lenha, que também possuem as maiores concentrações de gases emitidos e também maiores fatores de emissão por kg de lenha consumido. Assim, o aumento da velocidade do gás, proporciona maior vazão (m<sup>3</sup>/s) de gás, e associado a maior concentração de gases (em mg/m<sup>3</sup>), proporcionam maiores emissões totais por ciclo de secagem.

Evidencia-se que essa análise não é válida para os pellets na UC convencional adaptada, visto que obteve maior fator de emissão por kg de biomassa do que se comparado ao uso da lenha. Este fato é justificado pela quantidade de gases, principalmente CO<sub>2</sub> emitido no processo de combustão em relação à menor quantidade (em kg) de pellets consumida no processo de combustão, em relação a lenha, ou seja, a relação entre a emissão de CO<sub>2</sub> e biomassa é maior, proporcionando maior fator de emissão, inverso do que acontece com a lenha que possui essa relação menor, visto que para essa biomassa, ocorrem maior consumo ao longo do processo de combustão.

Em relação ao fator de emissão por kg de tabaco seco, verifica-se que, ao contrário do que os fatores de emissão por kg de biomassa, o uso de pellets no processo de combustão de UC convencional adaptada ocasionou um fator de emissão menor do que nas demais UCs com uso de lenha.

Este fato está associado a maior eficiência em consumo dos pellets, que utilizou uma menor quantidade de biomassa para secar 1 kg de tabaco (1,44 kg de pellets para 1 kg de tabaco seco). Neste caso, quanto maior a eficiência no consumo, menor os fatores de emissão por kg de tabaco seco.

#### **4.4.3 Eficiência de combustão**

A UC convencional foi a que obteve a maior eficiência de combustão, tanto de *E. saligna* quanto de *E. dunnii*, com EC = 0,9122; ECM = 0,9531 e EC = 0,8749; ECM = 0,9695, respectivamente.

Essa UC não possui injeção de ar via ventoinha (soprador), mas possui um “abafador” que permite a entrada de ar conforme a temperatura dentro da estufa.

Quando a temperatura diminui, ocorre a abertura do suspiro na fornalha, permitindo a entrada de ar, para assim maximizar a combustão. Fato inverso acontece quando a temperatura dentro da estufa diminuiu, quando o “abafador” é fechado. Sendo assim, esse sistema proporciona uma entrada de ar gradual, não diminuindo a temperatura dentro da fornalha e não gerando fumaça. Dessa forma, ocorre menores emissões de gases de combustão incompleta, proporcionando maior eficiência de combustão. Quanto maior as emissões de CO, menor será a eficiência de combustão. Conforme Soares Neto *et al.* (2008), a emissão de CO é maior quando a eficiência de combustão modificada é menor e que ocorre o inverso com a emissão de CO<sub>2</sub>.

A lenha possui a forma mais complexa de combustão dentre os combustíveis sólidos existentes, como por exemplo o cavaco, carvão, briquetes e pellets, devido a menor superfície de queima e elevada umidade, o que acarreta menor disponibilidade de energia, devido ao menor poder calorífico inferior, além da dificuldade de se obter uma melhor mistura entre o combustível e o comburente, demandando maior fator ar.

A combustão de biomassa se faz em três estágios: ignição, combustão com chama (*flaming*), e combustão com ausência de chama (incandescência ou *smoldering*) (ROWELL, 1991). Dados da literatura reportam que valores de EC maiores que 0,9 caracterizam a combustão de biomassa na fase de chama, enquanto valores de EC compreendidos entre 0,75 e 0,85 caracterizam a fase de incandescência (BABBITT *et al.*, 1996).

O cálculo da eficiência de combustão e eficiência de combustão modificada podem ser utilizadas para verificar em que fase a combustão se mantém, levando em consideração a média dos dados durante as avaliações. Assim, considera-se que as unidades de cura convencionais, tanto com uso de lenha quanto de pellets, estiveram em fase de chama na maior parte das análises, apresentando melhor eficiência. A fase de chama caracteriza-se pela maior emissão do CO<sub>2</sub>, pois tem-se uma combustão mais completa. As emissões de CO aumentam com a diminuição da emissão de CO<sub>2</sub>, visto que estas estão ligadas ao o processo de incandescência e ignição. Nas análises das UC carga contínua e Ar forçado, com uso de lenha de *E. saligna*, a combustão esteve na fase de incandescência/ignição, o que é evidenciado pelas maiores concentrações de CO.

Na figura 29 é possível verificar as fases de combustão identificadas durante a análise.

Figura 29 – Fases da combustão da UC convencional com uso de lenha



A: Ignição; B: Chama; C: Incandescência. Fonte: Arquivos pessoais da autora.

Ainda, entre outras questões, esses valores podem estar relacionados à: falta de limpeza periódica das grelhas, obstruindo a passagem de ar; má distribuição da lenha sobre a grelha, dificultando a homogeneização ar/combustível, abastecimento da fornalha com muito volume de biomassa e falta de oxigênio para a queima de toda a biomassa.

Para Pinheiro e Molina (1995), o excesso de ar é fator determinante da eficiência da combustão, pois controla o volume, temperatura e entalpia dos produtos da combustão. Um grande excesso de ar é indesejável, por que diminui a temperatura da chama retardando a reação de combustão, aumenta as perdas de calor devido à entalpia dos gases efluentes, reduzindo a eficiência global do sistema de combustão, além de diminuir o comprimento da chama. Por outro lado, ar em quantidade inferior ao ar teórico necessário deve ser evitado, pois propiciam a combustão incompleta - uma parte do carbono se une ao oxigênio para formar o monóxido de carbono (CO) e não o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), e o aparecimento de fuligem nos gases de combustão

Não foram encontrados na literatura trabalhos similares, que utilizem a mesma análise do processo de eficiência de combustão em fornalhas para secagem do tabaco, no entanto, estudo realizado por Amorim (2012) define a maior eficiência de combustão com a queima de biomassa florestal utilizando lenha de menores diâmetros (2,5 cm). A mesma autora ainda salienta que os experimentos realizados com madeiras de maiores, maior que 2,5 cm, tiveram os piores coeficientes para a eficiência da combustão.

Ressalta-se que a concentração de CO também influencia na eficiência da combustão, pois quanto maior for a concentração de CO, mais energia é perdida na combustão. A relação entre o processo de combustão e as emissões de gases está intimamente relacionada, pois quanto melhor for a queima, menor será a emissão de gases poluentes, principalmente do gás CO.

Garcia (2002), comenta que é praticamente impossível obter uma combustão completa com uso de biomassa, sendo dificilmente obtido o aproveitamento máximo do combustível. Dessa forma, a escolha da melhor biomassa, e a sua melhor preparação, baseado em suas características químicas e físicas deve ser levada em consideração, visto que, muitos fatores da biomassa interferem no processo de queima e conseqüentemente na eficiência de combustão.

#### **4.4.4 Emissão em toneladas de carbono equivalente por kg de produto seco**

Para todas as UCs analisadas, as emissões de CO<sub>2</sub> foram as mais, conforme também evidenciado por Teixeira, Hoinaski e Chaffe (2019), onde verificaram que 92,54% das emissões provenientes da queima de biomassa florestal no Estado de Santa Catarina, são originadas pelo CO<sub>2</sub>, seguida de 5,31% de CO.

As emissões de N<sub>ox</sub> também contribuem significativamente para as emissões de gases em tCO<sub>2e</sub> devido ao PAG do gás ser 310 vezes maior do que para o CO<sub>2</sub>, no entanto, mesmo o uso de pellets emitindo maior concentração desse gás em ton.CO<sub>2e</sub>, o resultado final foi mais positivo, totalizando 2,29 kg de CO<sub>2e</sub> por kg de tabaco seco, sendo este resultado justificado pela eficiência em consumo da biomassa e da UC convencional adaptada em relação as demais.

Boettcher *et al.* (2020), relatam que a emissão total da produção de tabaco na região Sul do Brasil é de aproximadamente 1.398,5 kg CO<sub>2e</sub> por tonelada de tabaco seco, sendo que a queima da lenha para secagem do produto emite em média 5,06 kg CO<sub>2e</sub>. Convertendo os valores encontrados pelos autores, tem-se 1,39 kg CO<sub>2e</sub> por kg de tabaco seco. Esse valor é significativamente inferior aos resultados encontrados nesta pesquisa para as emissões com lenha e até mesmo para os pellets que emitiram 2,29 kg CO<sub>2e</sub> por kg de tabaco seco.

Os estudos de Zafeiridou, Hopkinson e Voulvoulis (2018) e Hussain *et al.* (2017), no Paquistão, demonstram a emissão de 6,89 kg CO<sub>2</sub>e e 5,88 kg CO<sub>2</sub>e para 1 kg de tabaco seco, respectivamente, sendo esses valores similares aos encontrados nesta pesquisa para a UC carga continua com uso de lenha de *E. dunnii*, que obteve emissão de 6,88 kg CO<sub>2</sub>e. No entanto, as emissões para as demais UCs ainda estão acima dos valores identificados nas demais pesquisas, chegando a 18,35 kg de CO<sub>2</sub>e por kg de tabaco seco. Os autores, também consideraram apenas a contribuição da queima de madeira para as emissões de GEE e não as emissões de todo o ciclo produtivo da biomassa, tal qual realizado nesta pesquisa.

Boettcher *et al.* (2020) comentam que parte das emissões da etapa de cura está relacionada ao uso de fornos rudimentares tipicamente de baixa eficiência térmica, que além da queima incompleta da biomassa requerem grandes quantidades de biomassa para produzir a energia necessária para a cura.

No entanto, os resultados obtidos em relação aos cenários de emissão, ou seja, tipo de biomassa e unidade de cura (UC), e levando em consideração o total de produção de tabaco seco na safra 2020/2021, evidenciam que o setor, no que tange a secagem do tabaco, pode atingir as metas de redução de GEE propostas pelo Brasil no Acordo de Paris, que objetiva uma redução de 37% das emissões até 2025 e 43% até 2030. A meta pode ser atingida por meio da adaptação das UC convencionais para uso de pellets, bem como com a implementação de UC carga continua utilizando biomassa de lenha de *E. dunnii*.

#### 4.5 CONCLUSÕES

A concentração de CO, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> foram menores nas UC convencionais, principalmente com uso de pellets, devido a melhor eficiência nos processos de combustão. As emissões de CO<sub>2</sub> foram constantes em todas as UCs e biomassas e as emissões de No<sub>x</sub> não apresentaram padrão.

Em relação aos fatores de emissão por kg de biomassa consumida, destaca-se que o uso de pellets obteve o pior resultado na UC convencional, justificado pela relação entre CO<sub>2</sub> emitido e a menor quantidade de pellets consumida no ciclo de secagem em relação a lenha. As UCs carga continua com uso de *E. dunnii* seguida das UC convencionais obtiveram os melhores resultados, sendo que a Ar forçado alcançou os maiores (e piores) fatores de emissão por kg de biomassa.

Para os fatores de emissão por kg de tabaco seco, os pellets assumiram o melhor desempenho, justamente pela maior eficiência em consumo (menor consumo de biomassa por kg de tabaco seco), seguida da UC carga continua com uso de lenha de *E. dunnii*.

O uso de UC convencional adaptada para pellets obteve a menor emissão em tCO<sub>2</sub>e por kg de tabaco seco. Em relação a lenha, a UC mais tecnológica (carga continua) obteve o segundo melhor resultado com o uso de lenha de *E. dunnii*, no entanto, para a mesma UC, o uso de *E. saligna* deixou a tecnologia em quinto lugar. As UCs menos tecnológicas, convencionais, obtiveram o terceiro e quarto lugar, com uso de lenha de *E. dunnii* e *E. saligna*, respectivamente. As UCs Ar forçado, considerado inicialmente como a segunda melhor tecnologia de cura, foram as que obtiveram os piores resultados nas emissões, sendo que com uso de lenha de *E. saligna* obteve as piores emissões.

Sendo assim, pode-se afirmar que aumento do nível tecnológico das UCs não foi, em sua integridade, responsável pela diminuição das emissões de GEE, visto que as UCs Ar forçado obtiveram os piores resultados, mesmo utilizando biomassa eficiente em energia (*E. dunnii*). Dessa forma, rejeita-se a hipótese H1.

## REFERÊNCIAS

AFUBRA. **Relatório de Atividades Afubra 2021**. Disponível em: [https://issuu.com/afubra/docs/relatorio\\_de\\_atividades\\_afubra\\_2021\\_issu](https://issuu.com/afubra/docs/relatorio_de_atividades_afubra_2021_issu). Acesso em: 15 jan. 2022.

AMORIM, Emilian Bastos de. **Gases de efeito estufa produzidos pela combustão de biomassa**. 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

BABBITT, R. E. *et al.* “A comparison of concurrent airborne and ground-based emissions generated from biomass burning in the amazon basin”, In: SCAR-B: Smoke/Sulfate, Clouds and Radiation-Brasil: **Proceedings**. Transtec, São José dos Campos, SP, 1996, p. 23-26.

BHATTACHARYA, S. C. *et al.* “A Study on Wood Gasification for Low-Tar Gas Production”, **Energy**, v. 24, p. 285-296, 1999.

BOETTCHER, Ricardo *et al.* Carbon Footprint of agricultural production and processing of tobacco (*Nicotiana tabacum*) in southern Brazil. **Environmental Technology & Innovation**, v. 18, 2020.

CHANTARA, Somporn. *et al.* Emissions of pollutant gases, fine particulate matters and their significant tracers from biomass burning in an open-system combustion chamber. **Chemosphere**, v. 224, p. 407-416, 2019.

CONAMA. **Dispõe sobre padrões de qualidade do ar.** 19 nov. 2018. Disponível em: [https://www.in.gov.br/web/guest/materia/-/asset\\_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/51058895/do1-2018-11-21-resolucao-n-491-de-19-de-novembro-de-2018-51058603](https://www.in.gov.br/web/guest/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/51058895/do1-2018-11-21-resolucao-n-491-de-19-de-novembro-de-2018-51058603). Acesso em: 3 mar. 2022.

ECIL. **Manual de Instrução Chemist 500.** 2015.

EHSO. **Introduction to Emission Factors.** Environmental Health & Safety Online, 8000 Roswell Rd, Atlanta, GA 30350, 2011. Disponível em: [https://www.ehso.com/Air\\_AP\\_42.htm](https://www.ehso.com/Air_AP_42.htm). Acesso em: 1 mar. 2022.

ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. **Perfil Socioeconômico COREDE Vale do Rio Pardo.** Porto Alegre, RS, 49 p. 2015. Disponível em: <https://planejamento.rs.gov.br/upload/arquivos/201603/17095302-perfis-regionais-2015-vale-do-rio-pardo.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2022.

FARIAS, Jorge Antonio de. **Atividade florestal no contexto da fusicultura: oportunidade de desenvolvimento regional, diversificação, geração de emprego e renda.** 168 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

FRANÇA, Daniela de Azeredo *et al.* Pre-Harvest Sugarcane Burning: Determination of Emission Factors through Laboratory Measurements. **Atmosphere**, v. 3, n. 1, p. 164-180, 2012.

FRANCISCO, Rodrigo Pereira. **Estudo termoquímico da queima de combustíveis em caldeiras usando balanços de energia.** 147 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) – Universidade Federal de São João Del Rei, São João Del Rei, 2012.

FUGLESTVEDT, J. S. *et al.* Transport impacts on atmosphere and climate: Metrics. **Atmospheric Environment**, v. 44, n. 37, p. 4648-4677, 2010.

GARCIA, R. **Combustíveis e combustão industrial.** Rio de Janeiro: Interciência, 2002.

GIODA, Adriana. Comparação dos níveis de poluentes emitidos pelos diferentes combustíveis utilizados para cocção e sua influência no aquecimento global. **Química Nova**, v. 41, n. 8, p. 839-848, 2018.

HUSSAIN, Majid *et al.* Hazardous pollutants emissions and environmental impacts from fuelwood burned and synthetic fertilizers applied by tobacco growers in Pakistan. **Environmental Technology & Innovation**, v. 7, p. 169-181, 2017.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Acordo de Paris.** [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html#:~:text=No%20que%20diz%20respeito%20ao,adapta%C3%A7%C3%A3o%2C%20em%20pa%C3%ADses%20em%20desenvolvimento>. Acesso em: 20 out. 2020.

NEVES, Thiago Andrade *et al.* Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 68, p. 319-330, 2011.

OBERNBERGER, Ingwald; THEK, Gerold. **The pellet handbook: The production and thermal utilisation of pellets**. London: Earthscan, 2010. 593 p.

OJIMA, Ricardo. As dimensões demográficas das mudanças climáticas: cenários de mudança do clima e as tendências do crescimento populacional. **Revista Brasileira de Estudos de População**, v. 28, n. 2, p. 389-403, 2011.

PINHEIRO, Paulo César da Costa, VALLE, Ramon Molina. Controle de Combustão: Otimização do Excesso de Ar. In: II Congresso de Equipamentos e Automação da Indústria Química e Petroquímica, 1995, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, RJ: ABIQUIM, 1995, v. 1. p. 157-162.

QIU, Guoquan. Testing of flue gas emissions of a biomass pellet boiler and abatement of particle emissions. **Renewable Energy**, v. 50, p. 94-102, 2013.

ROWELL, Roger M. **Chemical Modification of Wood**. Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites p. 383–420, 1991.

SEEG. **Análise das emissões brasileiras de gases do efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970-2020**. Brasília: IMAFLORA, 2021. 55 p. Disponível em: <https://energiaambiente.org.br/produto/analise-dasemissoes-brasileiras-de-gases-de-efeito-estufa-e-suas-implicacoes-para-as-metasclimaticas-do-brasil-1970-2020>. Acesso em: 10 mar. 2022.

SOARES NETO, T. G. *et al.* **Determinação de fatores de emissão das principais espécies químicas liberadas na combustão de biomassa da Amazônia**. In: Conference Abstracts, 2008, Manaus. In: International Scientific Conference - Amazon in Perspective Integrate Science for a Sustainable Future. Manaus: 2008.

SOARES NETO, T.G. *et al.* Biomass consumption and CO<sub>2</sub>, CO and main hydrocarbon gas emissions in an Amazonian forest clearing fire. **Atmospheric Environment**, v. 43, n. 2, p. 438-446, 2009.

SOARES NETO, T.G. *et al.* Laboratory evaluation of Amazon forest biomass burning emissions. **Atmospheric Environment**, v. 45, n. 39, p. 7455-7461, 2011.

TEIXEIRA, N. C; HOINASKI, L; CHAFFE, P. L. B. **Emissões atmosféricas originadas pela queima de biomassa nas regiões do Estado de Santa Catarina em 2016**. p. 8. 2019.

VARGAS, Marco Antonio; OLIVEIRA, Bruno Ferreira de. Estratégias de diversificação em áreas de cultivo de tabaco no Vale do Rio Pardo: uma análise comparativa. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 50, n. 1, p. 175-192, 2012.

VIRMOND, Elaine. **Aproveitamento do lodo de tratamento primário de efluentes de um frigorífico como fonte de energia**. 137 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

WELTER, Carline Andréa. **Uso da biomassa florestal como estratégia de redução dos gases de efeito estufa: um estudo de caso na fumicultura do Sul do Brasil/RS**. 69 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal De Santa Maria Santa Maria, 2017.

ZAFEIRIDOU, Maria; HOPKINSON, Nicholas S.; VOULVOULIS, Nikolaos. Cigarette smoking: An assessment of tobacco's global environmental footprint across its entire supply chain. **Environ. Sci. Technol**, v. 52, n. 15, p. 8087–8094, 2018.

## **5 CAPÍTULO V – IMPACTO AMBIENTAL E FINANCEIRO DA IMPLANTAÇÃO DE NOVAS TECNOLOGIAS DE BAIXO CARBONO NA CURA DO TABACO: OBTENÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO**

### **5.1 INTRODUÇÃO**

Manter o padrão de consumo mundial nos níveis atuais, reduzindo as emissões de carbono, é uma tarefa difícil para governantes, empresas e sociedade. Aprender a conviver com a natureza, respeitando os seus limites, representará a maior evolução do homem e a condição indispensável para garantir a existência das próximas gerações (SOUZA *et al.*, 2013).

A transformação das atividades econômicas, que já estão consolidadas, para uma economia de baixo carbono é uma evolução no que tange a redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) e a poluição ambiental. O uso de fontes de energia renovável e o avanço tecnológico desse processo pode acarretar grandes avanços para preservação ambiental.

Os impactos ambientais do uso de recursos naturais podem ser irreversíveis, no entanto, o papel do homem como usuário desse meio é encontrar uma maneira de continuar suas atividades com menor dano ambiental e com menor uso de recurso natural possível, principalmente aqueles não renováveis.

Assim, a percepção das empresas privadas, dos órgãos públicos e da própria sociedade segue em direção a contemplação de oportunidades e gestão de riscos advindos do novo ambiente de negócios, que busca considerar o desenvolvimento econômico, social e ambiental, ao passo que focam em desafios futuros (KNOEPFEL, 2001).

As organizações têm sido cada vez mais exigidas quanto à elaboração de estratégias de enfrentamento de mudanças climáticas, mas não só isso. Na atualidade, os impactos climáticos já são estimados e ameaçam cada vez mais os negócios, recebendo atenção especial dos *stakeholders* (governo, acionistas, sociedade civil etc.) que veem a necessidade de analisar e verificar os resultados econômicos e financeiros das organizações e os impactos de suas atividades ao meio ambiente.

Considerar os fatores econômicos e financeiros juntamente com os fatores biofísicos, contextualizando-os na dinâmica do sistema de produção, representa um marco conceitual lógico no qual clima, solo, tecnologia, mercado e outros elementos, interagem, definindo a continuidade do processo produtivo.

Milani *et al.* (2012) destacam que investimentos em políticas de melhores práticas, como Responsabilidade Social Empresarial, Governança Corporativa e Sustentabilidade tem proporcionado retorno financeiro aos investimentos de empresas que lastreiam suas políticas nessas práticas.

Na cultura do tabaco, o processo de secagem é visto como um dos principais causadores dos impactos ambientais, pois utiliza recurso natural, no caso a biomassa florestal, e propicia emissões de gases poluentes pela geração de energia por meio da combustão dessa biomassa.

Diante disso, o setor vem se preocupando em diminuir essas emissões, seja por meio de tecnologia de cura ou por meio de otimização dos recursos naturais utilizados, com aumento da eficiência energética, diminuindo o uso de biomassa florestal no processo.

Nesse contexto, e diante de toda a base de resultados e análises já realizada até o momento, este capítulo tem por objetivo avaliar ambiental e financeiramente a implantação de cenários de baixo carbono na secagem do tabaco, por meio da disponibilização de créditos de carbono no investimento, tendo como base as seguintes hipóteses:

H1: É viável financeira e ambientalmente a implantação de tecnologias de baixo carbono na secagem do tabaco, por meio da implementação de créditos de carbono.

H0: Não é viável financeira e ambientalmente a implantação de tecnologias de baixo carbono na secagem do tabaco, por meio da implementação de créditos de carbono.

## 5.2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.2.1 Análises dos Cenários de sensibilidade

Foram construídas trajetórias de baixo carbono para as diferentes unidades de cura de tabaco relacionadas aos diferentes níveis tecnológicos e as diferentes biomassas.

Assim, foi empregada a metodologia de cenários, que é amplamente utilizada para a investigação de oportunidades de redução de emissões de GEE (DE GOVELLO, 2010; BORBA *et al.*, 2012; LA ROVERE *et al.*, 2016).

Denomina-se cenário o procedimento de análise dos efeitos de estados futuros possíveis. De forma geral, os cenários representam a concepção de um futuro possível, sendo necessário conceber as premissas e condições para que esse futuro ocorra.

Por isso, a construção de cenários está inerentemente associada a um conjunto de premissas formuladas pelo analista. A grande aplicação dos cenários está justamente na avaliação das mudanças que ocorrem ao se variar um conjunto de premissas. Dessa forma, é extremamente importante definir uma base de comparação comum.

O primeiro conjunto de trajetórias de emissões construído neste estudo é denominado de “cenário base”. Adicionalmente, serão testadas variações no conjunto de premissas, cujos resultados intitulam-se “cenários de sensibilidade”.

Os cenários foram escolhidos baseado na tecnologia mais utilizada pelos produtores de tabaco do Sul do Brasil. Segundo Slongo, Santos e Lionello (2016), 62,7 % das UCs dos produtores são do tipo convencionais.

Dessa forma, elaborou-se os seguintes cenários conforme a tabela 39:

Tabela 39 – Cenários de análise

Nível de tecnologia	Unidade de cura	Biomassa
1	Carga contínua	Lenha ( <i>Eucalyptus dunnii</i> )
2	Ar forçado	Lenha ( <i>Eucalyptus saligna</i> )
3	Carga contínua	Lenha ( <i>Eucalyptus dunnii</i> )
4	Ar forçado	Lenha ( <i>Eucalyptus saligna</i> )
5	Convencional	Lenha ( <i>Eucalyptus dunnii</i> )
6 <sup>1</sup>	Convencional	Lenha ( <i>Eucalyptus saligna</i> )
- <sup>2</sup>	Convencional adaptada	Pellets

<sup>1</sup>cenário base <sup>2</sup> não utilizado na análise tecnológica das UCs com uso de lenha.

### 5.2.2 Avaliação dos impactos ambientais

A inclusão dos impactos ambientais no processo de tomada de decisão de um investimento é uma tarefa complexa, pois trata-se de variáveis qualitativas e, portanto, difícil de ser quantificada monetariamente.

No entanto, essas informações devem, sobretudo, subsidiar as decisões de investimentos de forma sustentável e rentável, já que vem sendo cobrada uma mudança de postura a respeito das atividades nocivas ao meio ambiente.

Para poder quantificar o crédito de carbono verificado em cada uma das tecnológicas utilizadas nas unidades de cura do tabaco, será utilizado o CO<sub>2</sub> equivalente das emissões de GEE discutidas no capítulo IV, conforme as equações abaixo:

$$\text{Ton CO}_{2\text{eq P/A}} \times y = \text{Ton.CO}_{2\text{e}} \times q_{\text{TS}} \times \text{TS}_{\text{P/A}} \quad (15)$$

$$CC \text{ Ton.CO}_2e_{q P/Axy} = \text{Ton.CO}_2e_{q P/A xy} - \text{Ton.CO}_2e_{q P/A xb} \quad (16)$$

$\text{Ton CO}_{2eq P/A xy}$  = Tonelada de carbono equivalente por produtor/ano nas diferentes UC com diferentes biomassas

$\text{Ton.CO}_2e_{q TS}$  = toneladas de carbono equivalente por kg de tabaco seco

$TS_{P/A}$  = tabaco seco por produtor/ano

$CC \text{ Ton.CO}_2e_{q P/A xy}$  = Crédito de carbono em tonelada de carbono equivalente por produtor/ano na UCx e biomassa y

$\text{Ton.CO}_2e_{q P/A xy}$  = Tonelada de carbono equivalente por produtor/ano levando em consideração a UCx e biomassa y

$\text{Ton.CO}_2e_{q P/A xb}$  = tonelada de carbono equivalente por produtor/ano na UC convencional com biomassa lenha de *E. saligna*.

Análise foi realizada para o horizonte de 1, 10 e 20 anos.

### 5.2.3 Avaliação financeira

Com base em revisão bibliográfica e no acompanhamento das atividades de cura do tabaco realizadas, busca-se indicar as vantagens e desvantagens do ponto de vista financeiro para os modelos de unidades de cura observados, bem como para as diferentes biomassas a serem testadas. A construção dos fluxos de caixa deve ocorrer com base nas estimativas das receitas e dos custos de cada cenário no tempo. O resultado líquido foi utilizado como referência, no qual todos os valores serão atualizados por meio de fórmulas de acumulação ou desconto de juros.

Desse modo, para a previsão financeira das alternativas de investimento foram analisados os custos envolvidos no processo de produção de tabaco, da construção ou aquisição da UC bem como a quantidade e custo de biomassa utilizada. Ainda, na análise de cada cenário será realizada a quantificação do crédito de carbono, se existente. Para avaliar os cenários serão utilizados métodos que consideram os valores monetários no tempo, principalmente por serem mais confiáveis e eficientes.

Os métodos para avaliação financeira mais indicados, segundo Cordeiro e Silva (2009), são os que consideram o valor do capital no tempo, sendo eles:

*Valor Presente Líquido (VPL):* conforme a equação é uma função utilizada na análise da viabilidade de um projeto. Consiste em descapitalizar o fluxo de caixa para o ano zero e subtrair as receitas. É dado pela equação:

$$VPL = \sum R_j (1+i)^{-j} - \sum C_j (1+i)^{-j} \quad (17)$$

Em que:  $C_j$  = custos líquidos do período de tempo do projeto;  $R_j$  = receita líquida no final do período do projeto;  $i$  = taxa de desconto do projeto;  $n$  = duração de tempo do projeto.

*Taxa Interna de Retorno (TIR):* é a taxa que iguala o VPL de um projeto igual a zero, ou seja, é quando o valor atual das receitas seja igual ao valor atual dos custos, dada pela equação:

$$TIR = \sum \frac{F_n}{(1+i)^n} \quad (18)$$

Em que:  $i$  = Taxa de desconto = TIR;  $F_n$  são os fluxos de caixa no período  $n$ ;  $n$  = período.

*Valor Anual Equivalente (VAE):* é a parcela periódica e constante necessária ao pagamento de uma quantia igual ao VPL da opção de investimento em análise, ao longo de sua vida útil. Dito de outra forma, o VAE transforma o valor atual do projeto ou o seu VPL em fluxo de receitas ou custos periódicos e contínuos, equivalentes ao valor atual, durante a vida útil do projeto. O VAE é representado pela equação abaixo:

$$VAE = \frac{VPL[(1+i)^t - 1]}{1 - (1+i)^{-nt}} \quad (19)$$

Em que:  $n$  = duração do projeto;

$t$  = número de períodos de capitalização; os demais termos são conforme definidos.

#### 5.2.4 Variáveis utilizadas na avaliação do impacto ambiental e na análise financeira

Para o melhor entendimento da viabilidade ou não de um projeto de investimento relacionada à secagem do tabaco, utilizou-se como base as características das propriedades rurais onde ocorreu a análise das unidades de cura e biomassas na secagem do tabaco.

Levando em consideração a quantidade de tabaco plantado pelos produtores, obteve-se uma média de 100 mil plantas por propriedade rural, o que resulta em uma média de 19.387,50 kg de tabaco seco por safra.

Essa quantidade de tabaco pode ser plantada em uma área entre 6 e 7 hectares. Dessa forma, toda análise financeira esta baseada nas características de produção acima. Alterações na quantidade de tabaco plantado acarretam diferenças nos resultados a serem apresentados.

Para quantificar monetariamente o valor do crédito de carbono, utilizou-se como base o valor de R\$ 100,00 por tCO<sub>2</sub>e. Não se tem um valor pré-estabelecido no Brasil para créditos de carbono, dessa forma, o valor foi definido levando por base alguns sites financeiros que comercializam o crédito como o Investing.com.

Demais informações podem ser verificadas na Tabela 40 utilizada para o cálculo do fluxo de Caixa.



a = Valor obtido junto a empresa BE1.

b = Quantidade de unidades de cura necessárias para secar a quantidade de tabaco de 19.387,50 kg, levando em consideração a capacidade de secagem de cada UC.

c = Quantidade média de tabaco produzido pelos produtores rurais onde foi realizada a pesquisa.

d = Valor obtido pela AFUBRA na safra de 2021/2022. Este valor levou em consideração o custo de mão de obra, operações com máquinas e benfeitorias, insumos agrícolas para tabaco e para culturas de cobertura, energia elétrica, seguro da produção, Funrural e correção de solo.

e = Valor obtido pela AFUBRA na safra de 2021/2022.

f = Obtido no item sobre eficiência de consumo do capítulo III. Os cálculos levaram em consideração a relação kg de biomassa por kg de tabaco seco. Para transformar o valor em mst, utilizou-se o fator de correção 1,37 e a madeira a 25% de umidade, totalizando para o *E. dunnii* o peso de 700 kg/mst de lenha e para o *E. saligna* 550 kg/mst de lenha.

g = Para o uso de pellets, não foi necessário a transformação em mst.

h = Valor médio pago pela biomassa pelos produtores rurais.

i = cálculo da redução de emissões em toneladas de carbono equivalente, levando em consideração as emissões obtidas nos cálculos do capítulo IV por kg de tabaco seco.

j = Valor médio obtido entre 01/06/2021 e 01/02/2022. Disponível em: <https://br.investing.com/commodities/carbon-emissions-historical-data>. Acesso em: 20/02/2022.

Importante ressaltar que a produção de tabaco é considerada uma atividade vinculada a agricultura familiar, ou seja, o plantio e colheita é realizada por um grupo familiar que geralmente é composto por uma média de 3 a 5 pessoas. Dessa forma, o custo com mão de obra já foi inserido no cálculo do custo de produção, conforme dados da AFUBRA para a safra 2021/2022, e sendo assim, os valores obtidos pela análise financeira aqui realizada é considerada como o saldo líquido do produtor, visto que sua mão de obra já foi remunerada nos custos de produção.

### 5.3 RESULTADOS

#### 5.3.1 Avaliação dos impactos ambientais da secagem do tabaco

Analisando os cenários identificados na pesquisa, verifica-se que apenas três cenários são propícios a obtenção de créditos de carbono em relação ao cenário base, onde utilizou-se uma unidade convencional com utilização de biomassa na forma de lenha de *E. saligna* para queima.

O melhor cenário encontrado em relação ao menor impacto ambiental foi a utilização de UC convencional com uso de pellets, obtendo 216,37 toneladas de carbono reduzidas durante uma safra, para uma produção média de 19.387,50 kg de tabaco seco anual por produtor.

Levando em consideração o uso de lenha como forma de biomassa utilizada na geração de energia para secagem do tabaco, a UC carga contínua com uso de lenha de *E. dunnii* obteve o melhor resultado com 127,45 toneladas de carbono reduzidas em relação ao cenário base. Por fim, a utilização de UC convencional com lenha de *E. dunnii* também obteve um crédito de 9,69 tCO<sub>2</sub>e /ano.

Os demais cenários emitem mais carbono do que o cenário base. Maiores informações podem ser verificadas na Tabela 41:

Tabela 41 – Resultados obtidos pela análise de emissões de GEE

Biomassa	UC	t CO <sub>2</sub> e <sup>1</sup>	kg de tabaco por safra	tCO <sub>2</sub> e em uma safra	CC* 1 ano	CC* 10 anos	CC* 20 anos
Lenha de <i>E. saligna</i>	Carga contínua	0,0161	19.387,50 <sup>2</sup>	313,635	-52,77	-527,71	-1.055,42
	Ar forçado	0,0183	19.387,50	355,835	-94,97	-949,70	-1.899,41
	Convencional	0,0134	19.387,50	260,864	0,00	0,00	0,00
Lenha de <i>E. dunnii</i>	Carga contínua	0,0068	19.387,50	133,418	127,45	1.274,46	2.548,92
	Ar forçado	0,0171	19.387,50	332,787	-71,92	-719,23	-1.438,46
	Convencional	0,0129	19.387,50	251,173	9,69	96,91	193,83
Pellets de <i>Pinus</i>	Convencional	0,0022	19.387,50	44,495	216,37	2.163,69	4.327,38

<sup>1</sup> Informações disponibilizados no capítulo IV

<sup>2</sup> Média da produtividade de tabaco seco por safra levantado a campo, juntamente com os produtores rurais onde a análise de eficiência de queima e emissões de GEE nas UC foram analisadas.

\*CC = Crédito de carbono

### 5.3.2 Avaliação financeira

A análise financeira levou em consideração a aplicação ou não de créditos de carbono nos cenários analisados. Apenas três dos cenários obtiveram créditos de carbono para serem aplicados no investimento. Anualmente, considerando a obtenção de crédito de carbono em relação às emissões do cenário base e recebendo R\$ 100,00 por tCO<sub>2</sub>e, verifica-se que a UC carga contínua detém um valor de R\$ 12.744,61 e a UC convencional um valor de R\$ 969,14 reais por ano, ambas com uso de lenha de *E. dunnii*. Os pellets possuem um retorno de R\$ 21.636,88 reais por ano, conforme observa-se na Tabela 42.

Tabela 42 – Créditos de carbono na análise financeira dos diferentes cenários

Biomassa	UC	tCO <sub>2</sub> e em uma safra	Reais de carbono ano
Lenha de <i>E. saligna</i>	Carga contínua	313,635	-R\$ 5.277,08
	Ar forçado	355,835	-R\$ 9.497,04
	Convencional	260,864	R\$ 0,00
Lenha de <i>E. dunnii</i>	Carga contínua	133,418	R\$ 12.744,61
	Ar forçado	332,787	-R\$ 7.192,30
	Convencional	251,173	R\$ 969,14
Pellets de Pinus	Convencional	44,495	R\$ 21.636,88

Em relação à análise financeira, o cenário base obteve para o horizonte de 10 anos, VPL de R\$ 198.850,31, VAE de R\$ 25.130,47 e TIR de 83,11%, sendo que aos 20 anos o retorno foi de VPL totalizando R\$ 373.258,33, VAE de R\$ 28.694,66 e TIR de 83,47%.

Levando em consideração a análise financeira realizada baseada na linha do tempo bem como na presença ou não da utilização de créditos de carbono no investimento, verifica-se que na UC carga contínua, maior tecnologia das UCs, não obteve crédito de carbono.

Como resultado, pode-se destacar que o investimento é inviável financeiramente no horizonte de 10 anos quando se faz uso da biomassa lenha de *E. saligna*, obtendo TIR de -1,82% e VPL de -R\$ 54.616,81, tornando-se viável no horizonte de 20 anos, com TIR de 7,61% e VPL de R\$ 56.836,25.

Pra a mesma UC, com uso de lenha de *E. dunnii*, o investimento continua se tornando inviável aos 10 anos, no entanto com uso do crédito de carbono, na faixa de R\$ 12.744,61/ano é possível verificar VPL positivo de R\$ 73.806,46. Esse valor fica mais atrativo com o aumento do tempo no investimento, visto que aos 20 anos, o VPL sobe de R\$ 94.713,65 (sem crédito de carbono) para R\$ 267.954,82, aumento de 182,91% com uso de créditos de carbono. No entanto, em todas as análises, a UC carga continua obteve resultados financeiros menores do que o cenário base.

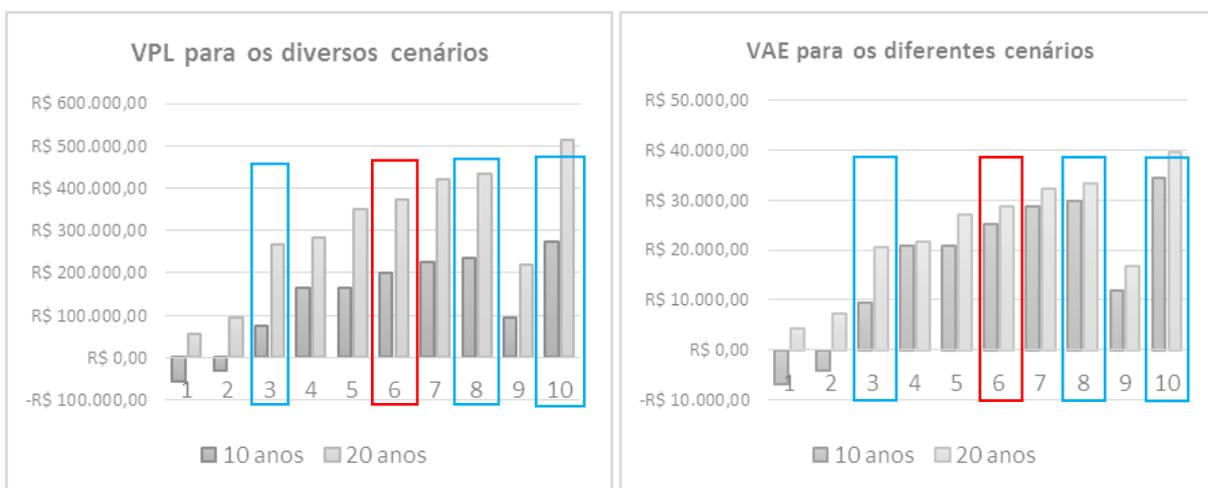
Para as UC Ar forçado, em ambos os cenários de uso de biomassa, não é possível utilizar créditos de carbono no investimento. No entanto, mesmo sem uso de créditos de carbono, a análise financeira demonstra uma atividade viável financeiramente, sendo que com o uso de *E. dunnii* em relação ao *E. saligna*, aumenta-se o VPL em 36,30% e 24,69% no horizonte de 10 e 20 anos, respectivamente. Em relação ao cenário base, as UC Ar forçado foram menos atrativas financeiramente.

Em relação às UC convencionais com uso de lenha, o investimento utilizando lenha de *E. dunnii* obteve o melhor resultado financeiro, apresentando TIR acima de 100% em todos os cenários. Para o horizonte de 10 anos, o aumento no VPL com uso de créditos de carbono no investimento foi de 3,53% e para 20 anos o aumento foi de 3,14%. Em relação ao cenário base, ocorreu aumento no retorno financeiro de 14,26% na análise sem crédito e 18,29% com crédito de carbono, no horizonte de 10 anos. Para o horizonte de 20 anos, o aumento no VPL foi de 12,49% sem crédito para 16,02% com crédito de carbono inserido no investimento.

O uso de pellets na UC convencional, se mostrou financeiramente mais viável com uso de créditos de carbono, com VPL de R\$ 273.014,64 aos 10 anos e VPL de R\$ 513.724,24 aos 20 anos, no entanto, a TIR foi inferior ao cenário base. Para o investimento sem a obtenção de créditos de carbono, o uso dos pellets se torna financeiramente menos atrativo do que o cenário base.

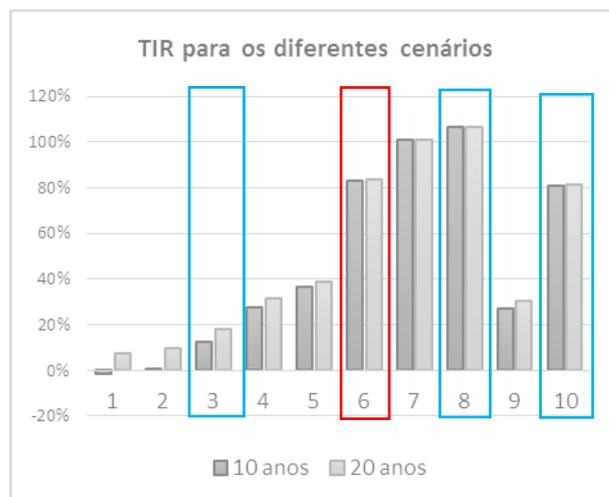
Graficamente, é possível verificar nas Figuras 30 e 31 os melhores cenários de VPL, VAE e TIR. Demais informações podem ser verificados no Apêndice E.

Figura 30 – Análise de VPL e VAE para os cenários analisados



Sendo que: 1= UC carga contínua com Uso de Lenha de *E. saligna* Sem crédito de Carbono, 2= UC carga contínua com Uso de Lenha de *E. dunnii* Sem crédito de Carbono, 3= UC carga contínua com Uso de Lenha de *E. dunnii* Com crédito de carbono, 4 = UC Ar forçado - Lenha de *E. saligna* Sem crédito de Carbono, 5= UC Ar forçado - Lenha de *E. dunnii* Sem crédito de Carbono, 6= UC Convencional - Lenha de *E. saligna* Sem crédito de Carbono, 7 = UC Convencional - Lenha de *E. dunnii* Sem crédito de Carbono, 8= UC Convencional - Lenha de *E. dunnii* Com crédito de carbono, 9= UC Convencional - Pellets de Pinus Sem crédito de Carbono, 10 = UC Convencional - Pellets de Pinus Com crédito de carbono. Obs: Em vermelho identifica-se o cenário base e em azul os cenários de obtenção de créditos de carbono na análise.

Figura 31 – Análise da TIR para os cenários



Sendo que: 1= UC carga contínua com Uso de Lenha de *E. saligna* Sem crédito de Carbono, 2= UC carga contínua com Uso de Lenha de *E. dunnii* Sem crédito de Carbono, 3= UC carga contínua com Uso de Lenha de *E. dunnii* Com crédito de carbono, 4 = UC Ar forçado - Lenha de *E. saligna* Sem crédito de Carbono, 5= UC Ar forçado - Lenha de *E. dunnii* Sem crédito de Carbono, 6= UC Convencional - Lenha de *E. saligna* Sem crédito de Carbono, 7 = UC Convencional - Lenha de *E. dunnii* Sem crédito de Carbono, 8= UC Convencional - Lenha de *E. dunnii* Com crédito de carbono, 9= UC Convencional - Pellets de Pinus Sem crédito de Carbono, 10 = UC Convencional - Pellets de Pinus Com crédito de carbono.

Obs: Em vermelho identifica-se o cenário base e em azul os cenários de obtenção de créditos de carbono na análise.

## 5.4 DISCUSSÕES

### 5.4.1 Avaliação ambiental

Descarbonização é o grande tema das discussões climáticas, e, cada vez mais, das econômicas ao redor do mundo, mas poucos estudos são realizados no Brasil a fim de quantificar as emissões de GEE quando se utiliza biomassa florestal para secagem de produtos agrícolas relacionados com a tecnologia aplicada para realização a combustão, e esses estudos são mais raros ainda quando se fala no setor de tabaco.

Nesta pesquisa, a redução das emissões em  $\text{toCO}_2\text{e}$  é verificada em maior porcentagem na UC convencional na forma de pellets, devido ao fato desta biomassa ser a mais eficiente no processo de combustão, obtendo menor consumo de biomassa por kg de tabaco seco e consequentemente reduzindo seu fator de emissão.

Nesta etapa do processo, ressalta-se que não foi levado em consideração a análise de emissões de GEE para a fabricação dos pellets, visto que esse pode ser oriundo de resíduos florestais, que deixariam de emitir gases pela decomposição de resíduos orgânicos, para a atmosfera (WELTER, 2017).

Ainda ser oriundo de outras formas de biomassa, como a própria lenha, passando por um processo industrial e aumentando assim as emissões para sua fabricação, se comparada a biomassa na forma natural como a lenha. Welfle *et al.* (2017) realizaram várias avaliações do ciclo de vida (LCA) de diferentes graus de biomassa usados para geração de calor no Reino Unido e descobriram que algumas vias de conversão reduzem a emissão geral de GEE enquanto outros aumentam a emissão de GEE.

A etapa de processamento com uso intensivo de energia aumenta o risco de aumentar a emissão geral de GEE, como no caso dos pellets. No entanto, Reid, Ali e Field (2019) destacaram que a bioenergia é importante para a transição para o baixo emissões, e que a longo prazo a bioenergia é benéfica.

Para a biomassa lenha, verifica-se que, a tendência de aumento do nível tecnológico das UCs não necessariamente reduz as emissões, visto que se identificou redução de emissão apenas com uso de UC carga contínua para *E. dunnii*.

Este resultado foi obtido devido ao menor fator de emissão por kg de tabaco seco obtido, resultado da melhor eficiência de consumo da biomassa. De maneira geral, o aumento do nível tecnológico das fornalhas tende a aumentar a eficiência no consumo do combustível, mas não está associado a diminuição das emissões de GEE. Costa *et al.* (2018), obtiveram resultados satisfatórios quando analisou as emissões de gases na combustão da lenha, aumentando o nível tecnológico da fornalha.

O cenário linha de base utilizados pelos autores foi a carbonização conduzida sem promover a queima dos gases na fornalha, tal como é feito nos métodos tradicionais frequentemente utilizados. Já no cenário alvo, considerou-se a carbonização em que se promoveu a combustão dos gases no interior da fornalha, ou seja, aumentando-se a tecnologia da fornalha, os autores conseguiram reduzir o equivalente a 99,8% de emissão em massa de CH<sub>4</sub>, obtendo uma redução de 21,45 tCO<sub>2</sub>e em um ano durante o processo de operação da fornalha. Tais dados estão em consonância com os encontrados por Cardoso, Moraes e Silva (2020), que relataram uma redução de 96% do CH<sub>4</sub> após a queima dos gases.

Para Jåstad *et al.* (2020), que analisaram um modelo energético alternativo ao uso de combustíveis fósseis no Norte da Europa, evidenciam que o uso de cavaco de madeira pode reduzir as emissões de GEE na faixa de 4 a 27% em 2030 e 7 a 43% em 2040 se os cavacos de madeira forem usados em tecnologia mais avançada para geração de calor e energia. Esses resultados sugerem que os cavacos de madeira reduzem efetivamente as emissões fósseis, bem como o custo do sistema para uma determinada parcela de energia renovável, como de energia eólica.

Ainda, vale ressaltar a simples troca da espécie de lenha de *E. saligna*, por uma energeticamente mais eficiente (*E. dunnii*) resultou em maior potencial de redução das emissões, devido ao fato de, por ser mais energética, possui maior eficiência em consumo e no uso da energia, resultado em menores emissões de gases e menores fatores de emissão por kg de produto seco.

No entanto, Cassiani, Montemor e Neves (2021), destacam que além do investimento em tecnologia na queima do combustível, também se faz necessário o uso de tecnologia voltada ao aprimoramento da fonte de combustível, para que, em conjunto, seja possível aprimorar e reduzir as emissões de GEE de todo o sistema.

#### **5.4.2 Avaliação financeira**

Um dos fatores mais importantes para selecionar modelos viáveis de sistemas de produção é conhecer, previamente à implantação, seus custos e rentabilidade, permitindo comparar estes indicadores com os de outros sistemas de produção, para que se possa tomar uma decisão com relação à implantação do sistema e para que seja possível identificar oportunidades de melhorias e ajustes em sua formulação e desenho (ARCO-VERDE E AMARO, 2014).

Em relação à avaliação financeira dos investimentos, pode-se destacar que para as UCs carga contínua, há um investimento inicial e de manutenção alto em relação às demais, visto que o valor de compra da UC é de R\$ 253.000,00 (valores atualizados do ano de 2021/2022). Dessa forma, a tecnologia se torna onerosa quando utilizada na produção de tabaco, que é uma atividade ainda rudimentar e com pouca tecnologia que permita maiores produções.

Para a produção de tabaco, todo o processo de plantio e colheita se faz de forma manual, o que limita a produção e ainda, reduz a capacidade de plantio em maior escala. Verifica-se que a implantação dessa tecnologia só é economicamente viável para produtores com maior capacidade de produção (acima de 100 mil pés de tabaco) e ainda assim com uso dos créditos de carbono no investimento no horizonte de 20 anos (adquiridos apenas com uso de lenha de *E. dunnii* no processo. Ressalta-se que neste caso, mesmo sendo o investimento viável, ainda é menos atrativo financeiramente do que o cenário base, justamente pelo fato do investimento inicial ser alto.

Para a UC Ar forçado, observa-se que essa está mais condizente financeiramente com a realidade local, na faixa de R\$ 67.670,00 cada UC. No entanto, levando em consideração a produção de tabaco analisada por safra, se faz necessário a obtenção de minimamente duas UCs para suprir a demanda, e dessa forma o investimento inicial passa para R\$138.340,00 para a implantação das UCs. No entanto, mesmo com o investimento alto, ainda é metade do valor do investimento da UC carga continua, o que aumenta dessa forma os rendimentos do produtor.

Para a UC Ar forçado, verifica-se um investimento financeiro positivo em ambos os cenários, porém a utilização de biomassa na forma de lenha de *E. dunnii* foi mais rentável se comparado ao uso de *E. saligna*, com maiores retornos no investimento de 20 anos.

Ressalta-se ainda que não há créditos de carbono neste investimento e o retorno financeiro foi menor do que o cenário base, justificado pelo valor do investimento inicial.

As UC mais utilizadas e menos onerosas são as UCs convencionais. Essas possuem um sistema rudimentar de construção, de alvenaria, mas desempenham satisfatoriamente seu papel na secagem do tabaco com menor investimento. Essas UCs foram as que obtiveram melhor retorno financeiro para o produtor sem o uso de créditos de carbono. O uso de UC convencional com lenha de *E. dunnii* obteve TIR acima de 100%, VPL e VAE acima do cenário base.

Este resultado só foi possível levando em consideração que o custo de investimento do produtor é 68,38% menor do que se comparado ao uso da UC carga continua e 42,58% menor se utilizado Ar forçado (com duas unidades), mesmo fazendo uso de 4 UCs para poder suprir a demanda da safra. Ademais, o *E. dunnii* foi mais eficiente, reduzindo o consumo por kg de tabaco seco, o que também acarreta a redução das emissões em toneladas de carbono equivalente e que por sua vez também aumenta a quantidade de créditos de carbono desse cenário em relação ao cenário base.

Por fim, o uso de pellets em UC convencionais adaptadas foi financeiramente mais viável do que todos os demais cenários, com a utilização de créditos de carbono, tanto no investimento de 10 quanto no de 20 anos. O uso do crédito de carbono foi imprescindível para o sucesso do investimento neste cenário, visto que, sem o uso dos créditos, o rendimento financeiro é inferior ao cenário base. Este resultado é devido ao valor do investimento inicial, que mesmo se fazendo uso de UC convencionais, há o custo com o equipamento de adaptação e, além disso, o custo dos pellets é maior do que o custo da lenha, o que onera o investimento por consequência aumenta o custo no fluxo de caixa. Por este fato, justifica-se que a TIR deste cenário seja menor do que a TIR do cenário base, mesmo o VPL e VAE sendo maior.

Salienta-se que menores investimentos iniciais, nestes cenários, definem a viabilidade e o retorno financeiro dos projetos, visto que, quanto menor o capital investido, menor será a influência dos juros sobre o patrimônio ao longo do tempo e sendo assim, a viabilidade das UCs convencionais se torna mais atrativa do que os projetos levando em consideração as UCs mais tecnológicas e mais onerosas.

Em relação à biomassa, verifica-se que apenas a troca de biomassa, de *E. saligna* para *E. dunnii*, já se obtém um resultado financeiro melhor em todos os cenários analisados, com ênfase para investimento de 20 anos, visto que o consumo de lenha de *E. dunnii* é menor do que o *E. saligna* para a mesma quantidade de tabaco seco, reduzindo assim os custos com a compra de lenha.

Segundo Jåstad *et al.* (2020) o impacto de emissão do uso de biomassa florestal (cavaco) no Norte da Europa, variam amplamente com a suposição do preço do carbono. Para o horizonte até o ano de 2030, as emissões de carbono modeladas diminuem de 329 milhões de tCO<sub>2</sub>e a um preço de carbono de 5 €/tonelada para 69 milhões de tCO<sub>2</sub>e a um preço de carbono de 103 €/tonelada. Neste estudo, os autores assumem que a biomassa é neutra em carbono e não levam em consideração as emissões relacionadas à colheita, transporte ou outros tipos de emissão.

Pode se destacar dessa forma, que a alteração no valor do preço do carbono altera significativamente os resultados da análise financeira e de impacto ambiental, visto que, quanto maiores os valores a serem pagos por crédito de carbono, maior o retorno financeiro e mais acessível às tecnologias de baixo carbono estarão para reduzir as emissões de GEE cada vez mais.

Ainda, segundo Basso, Bertagnolli e Santos (2018), percebe-se que por meio do auxílio financeiro de países desenvolvidos, organizações ou empresas privadas, pode-se mudar as práticas existentes, reduzindo os índices de poluição, por meio da compra de créditos de carbono de países em desenvolvimento, como o Brasil, para equilibrar suas metas de emissão de GEEs e conseqüentemente fomentar uma atividade econômica de baixo carbono. Maranhão e Stori (2019) também compartilham da mesma ideia, e consideram que a implementação de sistemas destinados a uma atividade de baixo carbono sejam uma fonte de recursos com a venda de créditos.

## 5.5 CONCLUSÕES

Analisando os cenários, verificou-se que há obtenção de créditos de carbono em três cenários analisados, levando em consideração o cenário base, sendo eles: UC convencional adaptada para pellets, UC carga continua com uso de lenha de *E. dunnii* e UC convencional com uso de lenha de *E. dunnii*.

O retorno financeiro do investimento foi mais atrativo para a UC convencional adaptada para pellets, obtendo maior VPL, seguido do cenário de UC convencional com uso de lenha de *E. dunnii*. Para a UC carga continua com uso de lenha de *E. dunnii*, o retorno foi positivo, mas menos atrativo do que o cenário base. As informações são referentes ao horizonte de 20 anos. Dessa forma, aceita-se a hipótese H1, visto que a implantação de créditos de carbono é viável e pode ser aplicada para manter uma economia de baixo carbono na secagem do tabaco.

Excluindo-se da análise financeira os créditos de carbono, verifica-se que o retorno mais atrativo foi com uso de UC convencional com lenha de *E. dunnii*, seguido da UC convencional com lenha de *E. saligna*, UC Ar forçado com lenha de *E. dunnii*, UC Ar forçado com lenha de *E. saligna*, UC convencional com pellets, UC carga continua com lenha de *E. dunnii* e UC carga continua com lenha de *E. saligna*, em última posição, sendo o mesmo resultado tanto para 10 quanto para 20 anos.

## REFERÊNCIAS

- ARCO-VERDE, M. F.; AMARO, G. C. **Análise financeira de sistemas produtivos integrados**, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária- Embrapa Florestas, Colombo, PR, 2014. Disponível em: <http://tncsaf.corporate.terras.agr.br/files/Embrapa%20-%20An%C3%A1lise%20financeira%20de%20sistemas%20produtivos%20integrados%20-%20ISSN%201980-3958%20-%20Dezembro%202014.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2020.
- BASSO, Renata Lucia; BERTAGNOLLI, Daniele Dias de Oliveira; SANTOS, Lucas Almeida dos. Análise bibliométrica da produção científica em contabilidade ligada aos créditos de carbono. **Revista Capital Científico**, v. 16, n. 1, p. 46–64, 1 jan. 2018.
- BORBA, B. S. M. C. *et al.* Energy-related climate change mitigation in Brazil: Potential, abatement costs and associated policies. **Energy Policy**, v. 49, p. 460-441, 2012.
- CARDOSO, Josimara Santos; MORAES, Jorge André Ribas; SILVA, André Luiz Emmel. Otimização dos recursos energéticos por meio do acompanhamento e controle da secagem da lenha. **Navus**, v. 10, p. 01-11, 2020.

CASSIANI, Murilo; MONTEMOR, Raphael; NEVES, Guilherme. **A Competividade da Tecnologia Flex-Fuel para Redução de Emissões de CO<sub>2</sub>**. AEA – Brazilian Society of Automotive Engineering – SIMEA 2021, **São Paulo**, 7 p. 2021.

CORDEIRO, Sidney Araujo; SILVA, Márcio Lopes da. Avaliação econômica de floresta de pinus para produção de madeira e resina. **Revista Agrogeoambiental**, v. 1, n. 2, p. 26-30, 2009.

COSTA, Júlia Melo Franco Neves *et al.* Geração de créditos de carbono na queima de metano na carbonização. **Ciência da Madeira**, v. 10, n. 1, p. 48-56, 1 jan. 2018.

DE GOUELLO, C. **Estudo de baixo carbono para o Brasil**. Brasília: Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento, 2010. Disponível em: [http://www.esmap.org/sites/esmap.org/files/Relatorio\\_Principal\\_integra\\_Portugues.pdf](http://www.esmap.org/sites/esmap.org/files/Relatorio_Principal_integra_Portugues.pdf). Acesso em: 2 mar. 2022.

JÅSTAD, Eirik Ognér *et al.* The role of woody biomass for reduction of fossil GHG emissions in the future North European energy sector. **Applied Energy**, v. 274, p. 1-13, 2020.

KNOEPFEL, Ivo. Dow Jones Sustainability Group Index: A Global Benchmark for Corporate Sustainability. **Corporate Environmental Strategy**, v. 8, n. 1, p. 6-15, 2001.

LA ROVERE, E. L. *et al.* **Implicações econômicas e sociais de cenários de mitigação de gases de efeito estufa no Brasil até 2030**: Sumário Técnico/Projeto IES-Brasil, Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas – FBMC. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 2016.

MARANHÃO, Romero de Albuquerque; STORI, Norberto. Análise da viabilidade técnica e econômica para o uso de biodigestores em organização familiar criadora de equinos levando em consideração os créditos de carbono. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 10, p. 20218–20236, 2019.

MILANI, Bruno *et al.* Práticas de sustentabilidade, governança corporativa e responsabilidade social afetam o risco e o retorno dos investimentos? **Revista de Administração da UFSM**, v. 5, p. 667-682, 2012.

REID, Walter V.; ALI, Mariam K.; FIELD, Christopher B. The future of bioenergy. **Global Change Biology**, v. 26, n. 1, p. 274–286, 2019.

SLONGO, L. A.; SANTOS, L. O dos.; LIONELLO, R. L. **Produtor de Tabaco da Região Sul do Brasil: Perfil Socioeconômico**. Porto Alegre, RS . 111 p. 2016.

SOUZA, André Luiz *et al.* Financiamento de carbono no mundo e no Brasil: um estudo sobre financiadores, fundos de investimentos e índices de sustentabilidade ambiental em prol de uma economia de baixo carbono. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 2, n. 2, p. 177-207, 2013.

WELFLE, Andrew *et al.* Generating low-carbon heat from biomass: Life cycle assessment of bioenergy scenarios. **Journal of Cleaner Production**, v. 149, p. 448-460, 2017.

WELTER, Carline Andréa. **Uso da biomassa florestal como estratégia de redução dos gases de efeito estufa: um estudo de caso na fumicultura do Sul do Brasil/RS**. 69 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal De Santa Maria Santa Maria, 2017.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O aumento do nível tecnológicos das Unidades de cura do tabaco acarreta maior eficiência energética e menor consumo de lenha por kg de tabaco seco, ou seja, a UC Carga continua foi mais eficiente do que a UC Ar forçado e convencional, respectivamente. Este fato está associado à presença da injeção de ar nas fornalhas, que auxilia na disponibilização de oxigênio em excesso para o processo de combustão, otimizando o uso da biomassa.

Destaca-se que, dentre a biomassa lenha, o uso de *E. dunnii* foi mais eficiente do que a lenha de *E. saligna*. Os pellets obtiveram o melhor resultado na redução do consumo de biomassa por kg de tabaco seco em UC convencional adaptada, justamente por serem mais energéticos e possuírem menor superfície de contato entre ar e combustível. Além disso, o equipamento de adaptação possui abastecimento automático e ventoinha de injeção de ar, o que auxilia na eficiência de combustão, associado a uma biomassa adequada.

Em relação às emissões de GEE, estas não estão necessariamente vinculadas a tecnologia das UCs analisadas e sim aos parâmetros das mesmas, que não estão dimensionados. Para as emissões em concentração de gás ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) na biomassa lenha, ocorreu maiores emissões quanto maior o nível tecnológico, visto que o processo de combustão foi ineficiente, ocorrendo a injeção de ar frio e em alta velocidade que, ao mesmo tempo que auxiliava na queima, reduzindo o consumo, prejudicava as emissões devido a formação de fuligem e fumaça em excesso.

Em relação aos fatores de emissão por kg de tabaco seco, verifica-se que a menor emissão de carbono em  $\text{tCO}_2\text{e}$ , com uso de lenha, ocorreu com *E. dunnii* seguido do *E. saligna*, em todas as UCs analisadas. A UC carga continua foi a que obteve menores fatores de emissão com ambas as biomassas, devido ao fato de possuir maior eficiência em consumo, sendo que nas demais UCs não ocorreu uma tendência de comportamento para as emissões. No entanto, o uso de pellets em UC convencionais adaptadas foi o que obteve menores fatores de emissão por kg de tabaco seco.

Os resultados obtidos em relação aos cenários de emissão, levando em consideração o total de produção de tabaco seco na safra 2020/2021, evidenciam que o setor, no que tange a secagem do tabaco, pode atingir as metas de redução de GEE propostas pelo Brasil no Acordo de Paris, que objetiva uma redução de 37% das emissões até 2025 e 43% até 2030.

A meta pode ser atingida por meio da adaptação das UC convencionais para uso de pellets bem como com a implementação de UC carga contínua utilizando biomassa de lenha de *E. dunnii*. Por fim, verificou-se que há possibilidade de obtenção de créditos de carbono para a secagem do tabaco em relação ao cenário base escolhido e que esses créditos podem ser utilizados para fomentar, em partes, a implementação de tecnologias de baixo carbono na secagem do tabaco, basicamente com uso de pellets em UC convencionais adaptadas e uso de lenha de *E. dunnii* na UC carga contínua e na UC convencional. Ressalta-se que apenas a UC carga contínua é tecnologicamente distinta do cenário base e, no entanto, mesmo sendo um investimento positivo, possui um investimento inicial alto, que torna o retorno financeiro menos atrativo do que o cenário base (UC convencionais com uso de lenha de *E. saligna*).

Levando em consideração todos os resultados obtidos, pode-se sugerir a continuidade da pesquisa, sendo que:

- As características da biomassa alteram a eficiência de consumo e as emissões de GEE. Sugere-se novos testes com outras espécies de lenha e até mesmo com tamanho de toretes menores, que visem aumentar a eficiência do processo de combustão. Ainda, deve-se melhorar os aspectos de umidade da lenha, chegando a um patamar de no máximo 25%, evitando dessa forma, grandes perdas de energia pelo excesso de umidade.
- As UC mais tecnológicas são capazes de reduzir o consumo de biomassa em relação às UC convencionais, sendo eficientes neste quesito. No entanto, deve haver um reajuste dos parâmetros de queima, a fim de aumentar a eficiência do processo, reduzindo as emissões de gases poluentes.
- Sugere-se realizar ajustes na velocidade da entrada de ar pela ventoinha ou alterar o sistema construtivo da fornalha, obtendo uma segunda câmara de combustão, que seja capaz de requeimar os gases que são eliminados pela chaminé, ou seja, energia que não está sendo aproveitada. Dessa forma, as emissões de gases poluentes serão reduzidas e o consumo de biomassa será mais eficiente.
- Realizar a análise da pegada de carbono das biomassas e da produção das unidades de cura.
- Levando em consideração que há possibilidade de obtenção de créditos de carbono em relação ao cenário base atual, verifica-se a importância de estudar novas estratégias que sejam financeiramente mais viáveis ao produtor.

- A pesquisa pode ser utilizada para testes em unidades de secagem de grãos ou outras commodities agrícolas, que visem, da mesma forma, a redução das emissões de GEE, devido as características da fornalha.

## APÊNDICES

**APÊNDICE A – EFICIÊNCIA DE CONSUMO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

<b>Biomassa</b>	<b>UC</b>	<b>Análise</b>	<b>Quantidade biomassa</b>	<b>Capacidade de grampos/varas de tabaco</b>	<b>Horas de secagem</b>	<b>Tabaco verde por estufa</b>	<b>Tabaco seco por estufa (kg)</b>	<b>kg/kg<sup>1</sup></b>	<b>EE<sup>2</sup> (kcal.kg)</b>	<b>Cs<sup>3</sup> (kg/h)</b>
<i>Lenha E. Saligna</i>	Chongololo	1	4.397,17	608,00	168,00	9.660,62	1.240,32	3,55	1.500,74	57,50
		2	4.631,89	608,00	168,00	10.260,38	2.267,84	2,04	1.665,46	61,07
		3	3.806,87	608,00	168,00	10.519,51	2.452,27	1,55	1.356,13	62,62
		Média	<b>4.278,64</b>	<b>608,00</b>	<b>168,00</b>	<b>10.146,84</b>	<b>1.986,81</b>	<b>2,38</b>	<b>1.507,44</b>	<b>60,40</b>
		DP	425,09	0,00	0,00	440,56	653,02	1,04	154,77	2,62
	Ar forçado	1	2.004,98	270,00	168,00	4.670,56	394,20	5,09	1.347,40	27,80
		2	2.244,77	270,00	168,00	5.540,89	760,50	2,95	1.349,49	32,98
		3	1.532,05	270,00	168,00	6.105,56	1.161,00	1,32	890,44	36,34
		Média	<b>1.927,27</b>	<b>270,00</b>	<b>168,00</b>	<b>5.439,00</b>	<b>771,90</b>	<b>3,12</b>	<b>1.195,77</b>	<b>32,38</b>
		DP	362,66	0,00	0,00	722,91	383,53	1,89	264,43	4,30
	Convencional	1	2.508,48	500,00	168,00	4.139,63	366,67	6,84	1.910,68	24,64
		2	2.378,00	500,00	168,00	5.371,50	766,67	3,10	1.484,08	31,97
		3	2.577,16	500,00	168,00	6.105,56	1.250,00	2,06	1.525,32	36,34
		Média	<b>2.487,88</b>	<b>500,00</b>	<b>168,00</b>	<b>5.205,56</b>	<b>794,45</b>	<b>4,00</b>	<b>1.640,03</b>	<b>30,99</b>
		DP	101,17	0,00	0,00	993,41	442,32	2,51	235,30	5,91
<i>Lenha de E. dunnii</i>	Chongololo	1	4.712,00	608	168	11.430,40	1.641,60	2,87	1.392,93	68,04
		2	3.345,40	608	168	13.984,00	2.128,00	1,57	816,51	83,24
		3	3.345,40	608	168	13.984,00	2.249,60	1,49	824,97	83,24
		Média	<b>3.800,93</b>	<b>608</b>	<b>168</b>	<b>13.132,80</b>	<b>2.006,40</b>	<b>1,98</b>	1.011,47	<b>78,17</b>
		DP	789,01	0	0	1.474,32	321,72	0,78	330,38	8,78
	Ar forçado	1	1.586,68	270	168	4.803,75	742,5	2,14	1.130,53	28,59
		2	1.893,36	270	168	5.807,70	931,5	2,03	1.123,58	34,57
		3	1.904,10	270	168	6.410,70	1.097,10	1,74	1.036,94	38,16

		Média	<b>1.794,71</b>	<b>270</b>	<b>168</b>	<b>5.674,05</b>	<b>923,7</b>	<b>1,97</b>	1.097,02	<b>33,77</b>
		DP	180,24	0	0	811,77	177,43	0,21	52,14	4,83
	Convencional	1	2.232,83	500	168	4.007,44	401,67	5,56	1.791,89	23,85
		2	2.583,08	500	168	4.536,67	773,33	3,34	1.986,18	27
		3	2.807,46	500	168	6.658,33	1.116,67	2,51	1.465,98	39,63
		Média	<b>2.541,13</b>	<b>500</b>	<b>168</b>	<b>5.067,48</b>	<b>763,89</b>	<b>3,8</b>	1.748,01	<b>30,16</b>
		DP	289,6	0	0	1.402,90	357,59	1,57	262,86	8,35
Pellets	Convencional	1	879,4	500	168	4190,31	431,3	2,04	936,64	24,94
		2	1.185,00	500	168	5365,58	795,04	1,49	1.038,03	31,94
		3	900	500	168	5919,78	1150,01	0,78	755,45	35,24
		Média	<b>988,13</b>	<b>500,00</b>	<b>168,00</b>	<b>5158,56</b>	<b>792,12</b>	<b>1,44</b>	<b>910,04</b>	<b>30,71</b>
		DP	170,80	0,00	0,00	883,13	359,36	0,63	143,16	5,26

<sup>1</sup> kg de lenha por kg de tabaco seco <sup>2</sup> eficiência energética <sup>3</sup> capacidade de secagem

**APÊNDICE B – CONCENTRAÇÃO DE GASES POLUENTES EMITIDOS NAS ANÁLISES – DADOS COMPLETOS**

			O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	NO <sub>x</sub>
<b>Biomassa</b>	<b>UC</b>	<b>Análise</b>	<b>%</b>	<b>8%mg/m<sup>3</sup></b>	<b>8% mg/m<sup>3</sup></b>	<b>8 %mg/m<sup>3</sup></b>	<b>8% mg/m<sup>3</sup></b>
Lenha de <i>Eucalyptus Saligna</i>	Carga contínua	1	15,4	208.092,86	31.902,53	10.785,86	98,41
		2	16,2	207.675,00	32.328,35	9.570,55	189,77
		3	14,36	208.978,92	19.213,80	13.452,58	443,66
		Média	15,32	208.248,92	27.814,89	11.269,67	243,95
		DP	0,92	665,82	7.451,80	1.985,72	178,89
	Ar forçado	1	11,77	158.704,23	15.979,38	9.585,53	196,54
		2	16,36	207.271,55	20.877,61	3.116,85	35,13
		3	7,64	175.324,85	9.816,57	6.622,34	160,92
		Média	11,92	180.433,54	15.557,85	6.441,57	130,86
		DP	4,36	24.683,40	5.542,56	3.238,13	84,8
	Convencional	1	14,94	208.514,85	10.275,94	5.053,76	160,72
		2	13,13	209.321,47	1.803,42	4.864,32	195,28
		3	14,73	208.622,01	9.612,83	6.784,02	164,54
		Média	14,27	208.819,45	7.230,73	5.567,37	173,51
		DP	0,99	438,06	4.711,87	1.057,90	18,95
Lenha de <i>Eucalyptus dunnii</i>	Carga contínua	1	13,65	199.440,00	24.341,39	16.032,72	279,11
		2	13,8	214.020,00	14.825,36	8.376,28	301,61
		3	12,63	209.520,00	6.665,24	5.562,37	93,06
		Média	13,36	207.660,00	15.277,33	9.990,46	224,59
		DP	0,64	7.465,84	8.846,74	5.418,60	114,47
	Ar forçado	1	13,82	208.980,00	14.551,54	14.069,53	174,43
		2	13,65	208.980,00	18.523,07	15.378,32	275,06
		3	7,83	210.240,00	5.014,91	11.386,50	364,02
		Média	11,77	209.400,00	12.696,51	13.611,45	271,17
		DP	3,41	727,46	6.942,51	2.034,95	94,85
	Convencional	1	14,37	208.620,00	2.936,46	6.151,33	72,64
		2	13,65	208.620,00	5.822,70	6.085,89	93,93
		3	10,89	209.700,00	4.991,00	13.415,13	86,91
		Média	12,97	208.980,00	4.583,39	8.550,78	84,49
		DP	1,84	623,54	1.485,67	4.212,78	10,85
Pellets De Pinus	Convencional	1	17,08	207.360,00	49,9	2.159,51	294,26
		2	15,12	207.000,00	985,7	261,76	270,43
		3	17,66	206.640,00	2.105,20	458,08	333,27
		Média	16,62	207.000,00	1.046,93	959,78	299,32
		DP	1,33	360	1.029,02	1.043,62	31,72

### APÊNDICE C – FATORES DE EMISSÃO – DADOS COMPLETOS

Biomassa	UC	Análise	Vel. do gás	Vol de gás (m <sup>3</sup> ) por ciclo	Quantidade biomassa por ciclo (kg)	kg/kg	Fatores de Emissão (g de poluente/kg de biomassa consumida)				Soma	Emissão (g de poluente/kg de tabaco curado)				Soma
			m/s				CO <sub>2</sub>	CO	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	NO <sub>x</sub>		
Lenha de <i>Eucalyptus</i> <i>Saligna</i>	Carga contínua	1	9,80	423.599,75	4.397,17	3,55	2.188,12	384,3	113,7	1,95	2.688,07	7.767,81	1.364,27	403,63	6,91	9.542,62
		2	10,54	425.084,15	4.631,89	2,04	2.080,33	370,99	96,11	3,58	2.551,01	4.243,87	756,82	196,06	7,3	5.204,05
		3	11,20	432.506,17	3.806,87	1,55	2.591,54	272,96	167,24	10,35	3.042,09	4.016,88	423,09	259,22	16,04	4.715,23
		Média	<b>10,65</b>	<b>327.063,36</b>	<b>4.278,64</b>	<b>2,38</b>	<b>2.286,66</b>	<b>342,75</b>	<b>125,68</b>	<b>5,29</b>	<b>2.760,39</b>	<b>5.342,85</b>	<b>848,06</b>	<b>286,30</b>	<b>10,08</b>	<b>6.487,30</b>
		DP	0,75	4.771,69	425,09	1,04	269,47	60,80	37,04	4,45	253,40	2.103,13	477,17	106,40	5,16	2.657,24
	Ar forçado	1	7,99	237.207,52	2.004,98	5,09	2.049,45	236,4	124,09	4,77	2.414,71	10.431,71	1.203,26	631,64	24,3	12.290,91
		2	7,68	228.004,23	2.244,77	2,95	2.297,96	265,17	34,64	0,73	2.598,50	6.778,97	782,24	102,19	2,16	7.665,56
		3	8,03	238.395,05	1.532,05	1,32	2.977,82	191,01	134,44	5,14	3.308,41	3.930,72	252,13	177,47	6,79	4.367,11
		Média	<b>7,90</b>	<b>234.535,60</b>	<b>1.927,27</b>	<b>3,12</b>	<b>2.441,74</b>	<b>230,86</b>	<b>97,72</b>	<b>3,55</b>	<b>2.773,87</b>	<b>7.047,13</b>	<b>745,88</b>	<b>303,77</b>	<b>11,08</b>	<b>8.107,86</b>
		DP	0,19	5.687,41	362,66	1,89	480,59645	37,389104	54,876323	2,4463101	471,95527	3258,7807	476,60653	286,43055	11,677732	3980,3735
	Convencional	1	6,60	179.625,60	2.508,48	6,84	1.629,77	92,01	39,6	2,36	1.763,74	11.147,60	629,36	270,86	16,17	12.063,99
		2	6,98	189.967,68	2.378,00	3,10	1.825,21	18,01	4,72	3,2	1.851,14	5.658,15	55,85	14,65	9,93	5.738,58
		3	7,74	210.651,84	2.577,16	2,06	1.861,29	98,25	48,54	2,76	2.010,84	3.834,26	202,4	100	5,69	4.142,35
		Média	<b>7,11</b>	<b>193.415,04</b>	<b>2.487,88</b>	<b>4,00</b>	<b>1.772,09</b>	<b>69,42</b>	<b>30,95</b>	<b>2,77</b>	<b>1.875,24</b>	<b>6.880,00</b>	<b>295,87</b>	<b>128,50</b>	<b>10,60</b>	<b>7.314,97</b>
		DP	0,58	15.797,79	101,17	2,51	124,56596	44,634432	23,154303	0,4201587	125,30048	3806,6954	297,96126	130,46157	5,2717107	4189,4936
Lenha de <i>Eucalyptus</i> <i>dunnii</i>	Carga contínua	1	8,02	205.754,00	4.712,00	2,87	950,57	132,91	107,87	2,5	1.193,85	2.728,15	381,45	309,6	7,18	3.426,38
		2	5,77	148.029,99	3.345,40	1,57	1.033,68	82,03	40,56	2,74	1.159,01	1.622,88	128,79	63,67	4,3	1.819,64
		3	7,85	201.307,11	3.345,40	1,49	1.376,16	50,15	36,63	1,15	1.464,09	2.050,47	74,73	54,57	1,71	2.181,48
		Média	<b>7,21</b>	<b>185.030,37</b>	<b>3.800,93</b>	<b>1,98</b>	<b>1.120,14</b>	<b>88,36</b>	<b>61,69</b>	<b>2,13</b>	<b>1.272,32</b>	<b>2.133,83</b>	<b>194,99</b>	<b>142,61</b>	<b>4,40</b>	<b>2.475,83</b>
		DP	1,25	32.120,31	789,01	0,77	225,58	41,74	40,04	0,85	166,99	557,33	163,72575	144,68	2,73	842,84
	Ar forçado	1	6,48	192.378,57	1.586,68	2,14	2.765,69	220,62	186,66	4,34	3.177,31	5.918,57	472,12	399,46	9,29	6.799,44
		2	7,88	234.016,06	1.893,36	2,03	2.819,34	286,28	207,99	6,98	3.320,59	5.723,27	581,15	422,21	14,17	6.740,80

		3	6,63	196.683,34	1.904,10	1,74	2.370,41	64,77	128,7	7,72	2.571,60	4.124,52	112,71	223,94	13,44	4.474,61
		Média	<b>7,00</b>	<b>207.692,65</b>	<b>1.794,71</b>	<b>1,97</b>	<b>2.651,81</b>	<b>190,56</b>	<b>174,45</b>	<b>6,35</b>	<b>3.023,17</b>	<b>5.255,45</b>	<b>388,66</b>	<b>348,54</b>	<b>12,30</b>	<b>6.004,95</b>
		DP	0,77	22.898,12	180,24	0,21	245,17	113,77	41,03	1,77	397,57	984,27	245,11	108,50	2,63	1.325,63
	Convencional	1	7,36	200.309,76	2.232,83	5,56	2.042,83	32,94	60,39	1,34	2.137,50	11.358,16	183,15	335,74	7,44	11.884,49
		2	5,72	155.675,52	2.583,08	3,34	1.372,36	43,88	40,13	1,16	1.457,53	4.583,70	146,56	134,05	3,88	4.868,19
		3	6,04	164.384,64	2.807,46	2,51	1.340,22	36,54	85,95	1,05	1.463,76	3.363,96	91,72	215,74	2,62	3.674,04
		Média	<b>6,37</b>	<b>173.456,64</b>	<b>2.541,13</b>	<b>3,80</b>	<b>1.585,14</b>	<b>37,79</b>	<b>62,16</b>	<b>1,18</b>	<b>1.686,26</b>	<b>6.435,27</b>	<b>140,48</b>	<b>228,51</b>	<b>4,65</b>	<b>6.808,91</b>
DP	0,87	23.659,66	289,60	1,58	396,70	5,57	22,96	0,146	390,79	4306,74	46,0175	101,44	2,49	4.435,95		
Pellets De Pinus	Convencional	1	5,02	136.624,32	879,40	0,33	3.516,39	0,97	36,71	9,39	3.563,46	1.176,64	0,32	12,28	3,14	1.192,38
		2	5,40	146.966,40	1.185,00	0,23	2.802,21	15,29	3,55	6,89	2.827,94	639,5	3,49	0,81	1,57	645,37
		3	6,55	178.264,80	900,00	0,37	4.467,54	52,14	9,93	13,56	4.543,17	1.654,33	19,31	3,68	5,02	1.682,34
		Média	<b>5,66</b>	<b>153.951,84</b>	<b>988,13</b>	<b>0,31</b>	<b>3.595,38</b>	<b>22,80</b>	<b>16,73</b>	<b>9,95</b>	<b>3.644,86</b>	<b>1.156,82</b>	<b>7,71</b>	<b>5,59</b>	<b>3,24</b>	<b>1.173,36</b>
		DP	0,80	21.681,32	170,80	0,07	835,47	26,39	17,59	3,36	860,50	507,70	10,17	5,96	1,7273197	518,74

**APÊNDICE D – FATORES DE EMISSÃO EM TONELADAS DE CO<sub>2</sub>e – DADOS COMPLETOS**

Biomassa	UC	Análise	tCO <sub>2</sub> e por kg de tabaco seco				
			CO <sub>2</sub>	CO	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	NO <sub>x</sub>	Total
Lenha de <i>Eucalyptus Saligna</i>	Carga contínua	1	0,007768	0,002729	0,008476	0,002142	0,021115
		2	0,004244	0,001514	0,004117	0,002263	0,012138
		3	0,004017	0,000846	0,005444	0,004972	0,015279
		Média	0,005343	0,001696	0,006012	0,003126	0,016177
		DP	0,002103	0,000954	0,002234	0,0016	0,006892
	Ar forçado	1	0,010432	0,002407	0,013264	0,007533	0,033636
		2	0,006779	0,001564	0,002146	0,00067	0,011159
		3	0,003931	0,000504	0,003727	0,002105	0,010267
		Média	0,007047	0,001492	0,006379	0,003436	0,018354
		DP	0,003259	0,000953	0,006015	0,00362	0,013847
	Convencional	1	0,011148	0,001259	0,005688	0,005013	0,023107
		2	0,005658	0,000112	0,000308	0,003078	0,009156
		3	0,003834	0,000405	0,0021	0,001764	0,008103
		Média	0,00688	0,000592	0,002699	0,003285	0,013455
		DP	0,003807	0,000596	0,00274	0,001634	0,008777
Lenha de <i>Eucalyptus dunnii</i>	Carga contínua	1	0,002728	0,000763	0,006502	0,002226	0,012218
		2	0,001623	0,000258	0,001337	0,001333	0,004551
		3	0,00205	0,000149	0,001146	0,00053	0,003876
		Média	0,002134	0,00039	0,002995	0,001363	0,006882
		DP	0,000557	0,000327	0,003038	0,000848	0,004771
	Ar forçado	1	0,005919	0,000944	0,008389	0,00288	0,018131
		2	0,005723	0,001162	0,008866	0,004393	0,020145
		3	0,004125	0,000225	0,004703	0,004166	0,013219
		Média	0,005255	0,000777	0,007319	0,003813	0,017165
		DP	0,000984	0,00049	0,002279	0,000816	0,004569
	Convencional	1	0,011358	0,000366	0,007051	0,002306	0,021081
		2	0,004584	0,000293	0,002815	0,001203	0,008895
		3	0,003364	0,000183	0,004531	0,000812	0,00889
		Média	0,006435	0,000281	0,004799	0,00144	0,012955
		DP	0,004307	9,2E-05	0,00213	0,000775	0,007304
Pellets De Pinus	Convencional	1	0,001177	6,4E-07	0,000258	0,000973	0,002409
		2	0,00064	6,98E-06	1,7E-05	0,000487	0,00115
		3	0,001654	3,86E-05	7,73E-05	0,001556	0,003326
		Média	0,001157	1,54E-05	0,000117	0,001005	0,002295
		DP	0,000508	2,03E-05	0,000125	0,000535	0,001189

## APÊNDICE E – ANÁLISE FINANCEIRA DOS INVESTIMENTOS

<b>UC carga contínua com Uso de Lenha de <i>E. saligna</i></b>				
	<b>Sem crédito de carbono</b>	<b>Com crédito de Carbono</b>	<b>Sem crédito de carbono</b>	<b>Com crédito de Carbono</b>
	10 anos	10 anos	20 anos	20 anos
VPL	-R\$ 54.616,81	NÃO SE APLICA	R\$ 56.836,25	NÃO SE APLICA
TIR	-1,82%		7,61%	
VAE	-R\$ 6.902,41		R\$ 4.369,35	
<b>UC carga contínua com Uso de Lenha de <i>E. dunnii</i></b>				
	<b>Sem crédito de carbono</b>	<b>Com crédito de Carbono</b>	<b>Sem crédito de carbono</b>	<b>Com crédito de Carbono</b>
	10 anos	10 anos	20 anos	20 anos
VPL	-R\$ 31.576,01	R\$ 73.806,46	R\$ 94.713,65	R\$ 267.954,82
TIR	0,92%	12,42%	9,59%	18,28%
VAE	-R\$ 3.990,54	R\$ 9.327,57	R\$ 7.281,22	R\$ 20.599,33
<b>UC Ar forçado - Lenha de <i>E. saligna</i></b>				
	<b>Sem crédito de carbono</b>	<b>Com crédito de Carbono</b>	<b>Sem crédito de carbono</b>	<b>Com crédito de Carbono</b>
	10 anos	10 anos	20 anos	20 anos
VPL	R\$ 120.975,46	NÃO SE APLICA	R\$ 282.206,52	NÃO SE APLICA
TIR	0,277182919		0,31246366	
VAE	R\$ 15.288,74		R\$ 21.694,95	
<b>UC Ar forçado Lenha de <i>E. dunnii</i></b>				
	<b>Sem crédito de carbono</b>	<b>Com crédito de Carbono</b>	<b>Sem crédito de carbono</b>	<b>Com crédito de Carbono</b>
	10 anos	10 anos	20 anos	20 anos
VPL	R\$ 164.920,69	NÃO SE APLICA	R\$ 351.870,08	NÃO SE APLICA
TIR	36,53%		38,81%	
VAE	R\$ 20.842,48		R\$ 27.050,41	
<b>UC Convencional - Lenha de <i>E. saligna</i></b>				
	<b>Sem crédito de carbono</b>	<b>Com crédito de Carbono</b>	<b>Sem crédito de carbono</b>	<b>Com crédito de Carbono</b>
	10 anos	10 anos	20 anos	20 anos
VPL	R\$ 198.850,31	NÃO SE APLICA	R\$ 373.258,33	NÃO SE APLICA
TIR	83,11%		83,47%	
VAE	R\$ 25.130,47		R\$ 28.694,66	
<b>UC Convencional - Lenha de <i>E. dunnii</i></b>				
	<b>Sem crédito de carbono</b>	<b>Com crédito de Carbono</b>	<b>Sem crédito de carbono</b>	<b>Com crédito de Carbono</b>
	10 anos	10 anos	20 anos	20 anos
VPL	R\$ 227.202,07	R\$ 235.215,66	R\$ 419.866,57	R\$ 433.040,32
TIR	100,84%	106,46%	101,03%	106,62%

VAE	R\$ 28.713,53	R\$ 29.726,28	R\$ 32.277,72	R\$ 33.290,47
<b>UC Convencional - Pellets de Pinus</b>				
	<b>Sem crédito de carbono</b>	<b>Com crédito de Carbono</b>	<b>Sem crédito de carbono</b>	<b>Com crédito de Carbono</b>
	10 anos	10 anos	20 anos	20 anos
VPL	R\$ 94.103,84	R\$ 273.014,64	R\$ 219.607,83	R\$ 513.724,24
TIR	26,96%	80,93%	30,32%	81,32%
VAE	R\$ 11.892,73	R\$ 34.503,27	R\$ 16.882,60	R\$ 39.493,14