



VOLUME 51

NILTON CESAR FIEDLER
JOSÉ LUÍS PENETRA CERVEIRA LOUSADA
FLÁVIO CIPRIANO DE ASSIS DO CARMO
(orgs.)

Emissão de gases e sequestro de carbono em sistemas florestais



Esta obra foi selecionada para integrar a “Coleção Pesquisa Ufes”, a partir de Chamada Pública feita pela Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PRPPG) da Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes) aos programas de pós-graduação da universidade.

A seleção teve por base pareceres que consideraram critérios de inovação, relevância e impacto.

O financiamento da Coleção foi viabilizado por meio do Programa de Apoio à Pós-Graduação (Proap) da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e de recursos do Tesouro Nacional.



**Universidade Federal
do Espírito Santo**



Editora Universitária – Edufes

Filiada à Associação Brasileira
das Editoras Universitárias (Abeu)

Av. Fernando Ferrari, 514
Campus de Goiabeiras
Vitória – ES · Brasil
CEP 29075-910

+55 (27) 4009-7852
edufes@ufes.br
www.edufes.ufes.br

Reitor

Paulo Sergio de Paula Vargas

Vice-reitor

Roney Pignaton da Silva

Pró-reitor de Pesquisa e Pós-Graduação

Valdemar Lacerda Júnior

Chefe de Gabinete

Cláudia Patrocínio Pedroza Canal

Diretor da Edufes

Wilberth Salgueiro

Conselho Editorial

Carlos Roberto Vallim, Eneida Maria Souza
Mendonça, Fátima Maria Silva, Graziela Baptista
Vidaurre, Isabella Vilhena Freire Martins, José
André Lourenço, Marcos Vogel, Margarete Schat
Góes, Rogério Borges de Oliveira, Sandra Soares
Della Fonte, Sérgio da Fonseca Amaral

Secretaria do Conselho Editorial

Douglas Salomão

Administrativo

Josias Bravim
Washington Romão dos Santos

Seção de Edição e Revisão de Textos

Fernanda Scopel, George Vianna,
Jussara Rodrigues, Roberta
Estefânia Soares

Seção de Design

Ana Elisa Poubel, Juliana Braga,
Samira Bolonha Gomes, Willi Piske Jr.

Seção de Livraria e Comercialização

Adriani Raimondi, Dominique Piazzarollo,
Marcos de Alarcão, Maria Augusta
Postinghel, Maria de Lourdes Zampier



Este trabalho atende às determinações do Repositório Institucional do Sistema Integrado de Bibliotecas da Ufes e está licenciado sob a Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial-SemDerivações 4.0 Internacional.

Para ver uma cópia desta licença, visite <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>.



Diretor da Graúna Digital

Thiago Moulin

Supervisão

Laura Bombonato

Seção de edição e revisão de textos

Carla Mello | Natália Mendes

Seção de design

Carla Mello

Projeto gráfico

Edufes

Diagramação e capa

Carla Mello

Revisão de texto

Carla Mello

Fotografia da capa por
Alexandre Jaquetoni em
<https://unsplash.com/>.

Esta obra foi composta com
a família tipográfica Crimson Text.

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

E53 Emissão de gases e sequestro de carbono em sistemas florestais [recurso eletrônico] / Nilton Cesar Fiedler, José Luís Penetra Cerveira Lousada, Flávio Cipriano de Assis do Carmo (orgs.). - Dados eletrônicos. - Vitória, ES : Edufes, 2023. 282 p. ; il. (Coleção Pesquisa Ufes ; 51)

Inclui bibliografia.

ISBN: 978-85-7772-524-3

Modo de acesso: <https://repositorio.ufes.br/handle/10/774>

1. Reflorestamento. 2. Gases estufa. 3. Madeira. 4. Sequestro de carbono. I. Nilton Cesar Fiedler, 1967-. II. Lousada, José Luís Penetra Cerveira, 1960-. III. Carmo, Flávio Cipriano de Assis do, 1988-. IV. Título. V. Série.

CDU: 634.0

Elaborado por Sandra Mara Borges Campos – CRB-6 ES-000593/O

Emissão de gases e sequestro de carbono em sistemas florestais

**NILTON CESAR FIEDLER
JOSÉ LUÍS PENETRA CERVEIRA LOUSADA
FLÁVIO CIPRIANO DE ASSIS DO CARMO
(orgs.)**

VITÓRIA, 2023

Agradecimentos

Aos autores e revisores pela dedicação, esforço e empenho na confecção e revisão dos capítulos. À Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e à Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD) pela parceria e apoio na confecção e execução deste projeto. A todos os profissionais envolvidos por acreditarem neste livro. Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), a CAPES e CNPq pelo apoio à pesquisa.

Os Editores.

Prefácio

“Relatório do IPCC é um código vermelho para a humanidade”. Com essa frase o secretário-geral da ONU, António Guterres, demonstrou sua preocupação perante o alerta publicado no 6º Relatório do IPCC no ano de 2021, que demonstra sem precedentes, que a crise climática que o planeta passa neste século, através da observação de inúmeros dados coletados de mais de 14 mil referências bibliográficas, categoriza os piores indicadores de alteração severa no clima.

Com um arcabouço bibliográfico bem consolidado, está claro que o modelo energético atual está obsoleto para o equilíbrio da biosfera, pois é direcionado à utilização de petróleo e seus derivados, que são fontes de energia não renováveis a curto prazo, causando danos severos ao ambiente de forma direta, através da disponibilidade de gases do efeito estufa e, de forma indireta, pelas consequências desastrosas em função da magnitude do efeito estufa.

Nesse sentido, o desenvolvimento de alternativas eficazes que diminuam os impactos do volume de gases do efeito estufa na atmosfera, torna-se prioridade global. Assim, as florestas plantadas, além de desempenhar funções produtivas, prestam serviços ambientais importantíssimos, por meio da recomposição de biomassa vegetal das áreas degradadas, da manutenção de nascentes, da ciclagem e estocagem de nutrientes, em especial do carbono e seus derivados e, conseqüentemente da manutenção dos solos florestais. As florestas de produção também podem ser utilizadas como fonte de energia primária ou secundária, ambas de energia renovável, contribuindo, de certa forma, para fixação de carbono atmosférico reduzindo os gases do efeito estufa em função da sua estocagem na biomassa viva e impossibilitando que árvores nativas da biodiversidade brasileira sejam cortadas para essa finalidade.

Diante do exposto, professores e pesquisadores da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD), firmaram uma parceria para

desenvolvimento de pesquisas ligadas ao Setor Florestal. Dentre os resultados já alcançados está a organização deste livro em parceria com pesquisadores de outras instituições, abordando vários assuntos correlatos, como: a política nacional sobre mudança do clima e seus reflexos na área florestal; emissão de gases pela combustão dos motores; estimativa do balanço da emissão de gases carbônicos em máquinas e frota de veículos versus sequestro de carbono em florestas plantadas; técnicas promissoras para redução da emissão de gases em máquinas e frota de veículos florestais; efeito da exposição dos trabalhadores aos gases emitidos pelas máquinas florestais; biocombustíveis lignocelulósicos sólidos; aproveitamento energético da biomassa residual; carbono na madeira como importante propulsor de uma economia verde; sequestro de carbono em floresta e suas reflexões metodológicas em contexto de floresta tropical.

Posso dizer que este livro no formato ebook, além de tratar de temas muito relevantes e atuais nas Ciências Florestais, reitera uma parceria entre a UFES e UTAD. Uma boa articulação de intercâmbio de conhecimento para o setor florestal norteou esta obra, que visa enriquecer pesquisadores, docentes e discentes sobre a temática. Experiências como essa são fomentadas pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da UFES, que espera, por meio de sua coordenação, que ações semelhantes venham a ocorrer no futuro como forma de entrelaçar ciência e divulgação científica.

Prof. Dr. Henrique Machado Dias

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (2021-2023)

Universidade Federal do Espírito Santo

Sumário

CAPÍTULO 1

A política nacional sobre mudança do clima e seus reflexos na área florestal..... 16

José Carlos Carvalho

1. INTRODUÇÃO.....	16
2. ANTECEDENTES.....	17
3. O PLANO NACIONAL DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E A LEGISLAÇÃO DEFINIDORA DA POLÍTICA BRASILEIRA SOBRE O CLIMA.....	20
4. AS FLORESTAS NO CONTEXTO DA POLÍTICA NACIONAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA	23
5. ANÁLISE DA IMPLEMENTAÇÃO DA PNMC.....	25
6. A COP 21 E O ACORDO DE PARIS SOBRE O CLIMA GLOBAL	28
7. PRÓXIMAS ETAPAS DO ACORDO	32
CONSIDERAÇÕES FINAIS	33

CAPÍTULO 2

Emissão de gases pela combustão dos motores 35

Gheila Corrêa Ferres Baptestini

Maurício Paiva

Júlio Cezar Machado Baptestini

1. INTRODUÇÃO.....	35
2. MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA	36
2.1. Classificação dos motores de combustão interna alternativos quanto ao ciclo de operação	38
CICLO OTTO.....	38
CICLO DIESEL.....	38

2.2. Classificação dos motores de combustão interna alternativos quanto ao número de tempos do ciclo de operação.....	38
<i>MOTORES QUATRO TEMPOS (4T)</i>	38
<i>MOTORES DOIS TEMPOS (2T)</i>	39
3. COMBUSTÃO E COMBUSTÍVEIS	40
3.1. A combustão nos cilindros dos motores.....	41
3.2. Combustíveis.....	43
<i>GASOLINA</i>	44
<i>ÓLEO DIESEL</i>	46
4. EMISSÕES	48
4.1. Monóxido de carbono (CO)	48
4.2. Dióxido de carbono (CO ₂).....	49
4.3. Óxidos de nitrogênio (NO _x)	49
4.4. Hidrocarbonetos.....	50
4.5. Aldeídos	50
4.6. Compostos de enxofre (SO ₂ e H ₂ S)	50
4.7. Material particulado.....	51
REFERÊNCIAS.....	51

CAPÍTULO 3

Estimativa do balanço entre a emissão de gases carbônicos em máquinas e frota de veículos <i>versus</i> sequestro de carbono em florestas plantadas	52
--	----

Flávio Cipriano de Assis do Carmo

Nilton Cesar Fiedler

INTRODUÇÃO	53
2. Materiais e Métodos	54
2.1. Caracterização da área de estudo.....	54
2.2. Quantificação da emissão de Gases por meio do consumo de combustíveis e lubrificantes	59
2.3. Simulação da redução de emissão de carbono em virtude da substituição de combustíveis fósseis por combustíveis renováveis.....	60

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
3.1. Simulação da redução de emissão de carbono em virtude da substituição de combustíveis fósseis por combustíveis renováveis	64
3.2. Balanço de emissões de GEE pelo processo produtivo e sequestro de carbono pela floresta	68
CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
REFERÊNCIAS.....	70

CAPÍTULO 4

Técnicas promissoras para redução da emissão de gases poluentes em máquinas e frota de veículos florestais.....

Flávio Cipriano de Assis do Carmo

Luciano José Minette

Nilton José Fiedler

1. IMPORTÂNCIA E CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	73
2. MÉTODOS DE REDUÇÃO DE GASES.....	73
2.1. Substituição de Combustíveis Fósseis pelos biocombustíveis	73
2.1.1. Etanol	74
2.1.2. Biodiesel.....	74
3. OPORTUNIDADES DOS BIOCOMBUSTÍVEIS NO BRASIL	77
Experiências da utilização de biocombustíveis em máquinas agrícolas	80
3.1. Estratégias futuras para redução das emissões de gases	84
3.1.1. Veículos híbridos	84
3.1.2. Veículos elétricos	84
3.1.3. Energia eólica	86
3.1.4. Energia solar.....	87
CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
REFERÊNCIAS	90

CAPÍTULO 5

Efeito da exposição dos trabalhadores aos gases emitidos pelas máquinas florestais

92

Flávio Cipriano de Assis do Carmo

Amaury Paulo de Souza

Nilton Cesar Fiedler

IMPORTÂNCIA E CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	92
Emissão de gases em máquinas e veículos	92
Tipos de poluentes produzidos pela queima dos combustíveis.....	94
<i>Efeitos dos gases poluentes no organismo</i>	<i>96</i>
<i>Efeitos dos Hidrocarbonetos (HC) no organismo.....</i>	<i>99</i>
<i>Efeitos dos Materiais Particulados (MP) no organismo</i>	<i>99</i>
<i>Efeitos do Monóxido de Carbono (CO) no organismo.....</i>	<i>102</i>
<i>Efeitos do Dióxido de Carbono (CO₂) no organismo</i>	<i>106</i>
<i>Efeitos do óxido de Nitrogênio (NO_x) no organismo.....</i>	<i>107</i>
<i>Efeitos do Dióxido de Enxofre (SO₂) no organismo</i>	<i>109</i>
<i>Efeitos do Ozônio(O₃) no organismo.....</i>	<i>111</i>
SUGESTÕES DE MEDIDAS MITIGADORAS DO EFEITO DA EMISSÃO DE GASES NA SAÚDE DOS TRABALHADORES	113
Substituição de combustíveis fósseis.....	113
<i>Veículos híbridos.....</i>	<i>113</i>
Utilização de Biodiesel nos serviços públicos.....	114
CONSIDERAÇÕES FINAIS	116
REFERÊNCIAS	116

CAPÍTULO 6

Biocombustíveis lignocelulósicos sólidos	120
---	------------

Ailton Teixeira do Vale

Luiz Vicente Gentil

INTRODUÇÃO	120
LENHA	125
BRIQUETES	128
O processo industrial	130
O comércio de briquete.....	133

PELLETS	134
O processo industrial	136
<i>Matéria-prima</i>	136
<i>Secagem</i>	136
<i>Moagem</i>	137
<i>Peletização</i>	137
<i>Resfriamento</i>	137
<i>Armazenamento e embalagem</i>	138
<i>Controle de qualidade</i>	138
<i>Normalização</i>	139
CARVÃO VEGETAL	142
Carvão vegetal e carvão mineral.....	147
CONSIDERAÇÕES FINAIS	149
REFERÊNCIAS	152

CAPÍTULO 7

Aproveitamento energético da biomassa residual..... 160

Amadeu Duarte da Silva Borges

1. INTRODUÇÃO	160
2. Produção de pellets, estilha e briquetes	164
3. Produção de vapor em caldeira com vista à produção de eletricidade por recurso ao ciclo clássico de Rankine.....	166
3.1. Potência de cálculo.....	168
3.2. Descrição dos principais equipamentos.....	168
3.2.1. <i>Caldeira</i>	168
3.2.2. <i>Turbogruppo</i>	172
3.3. Justificação detalhada do rendimento da produção de energia elétrica dos geradores a instalar.....	173
3.4. Estabelecimento da exploração das instalações	174
4. Produção de gás pobre a partir da biomassa florestal residual recorrendo a tecnologia de gasificação da biomassa, com posterior aproveitamento energético	175

4.1. Perspetiva histórica.....	175
4.2. O processo de gasificação.....	176
4.3. Componentes de uma instalação de gasificação	179
4.3.1. Sistema de alimentação	180
4.3.2. Gaseificadores.....	180
4.3.3. Sistema de filtragem	188
5. MODELAÇÃO DA GASIFICAÇÃO DA BIOMASSA	189
5.1. Modelo matemático baseado no equilíbrio	191
5.2. Resultados.....	197
5.2.1. Variação do teor de humidade	197
5.2.2. Variação da temperatura de gasificação.....	201
5.2.3. Variação do teor de humidade e temperatura de gasificação	204
Conclusões	206
REFERÊNCIAS	206

CAPÍTULO 8

Carbono na madeira como importante propulsor de uma economia verde.....	210
--	------------

José Tarcísio da Silva Oliveira

Marina Donaria Chaves Arantes

Jordão Carbral Moulin

Brunela Pollastrelli Rodrigues

1. INTRODUÇÃO	210
2. ECONOMIA VERDE E MUDANÇAS CLIMÁTICAS	212
3. EXPERIÊNCIAS REGIONAIS RELACIONADAS AO SEQUESTRO DE CARBONO PELAS FLORESTAS	215
4. MÉTODOS DE QUANTIFICAÇÃO DO TEOR DE CARBONO EM FLORESTAS E MADEIRA.....	222
5. DADOS RELATIVOS AO TEOR DE CARBONO EM IMPORTANTES ESPÉCIES LENHOSAS	228
CONSIDERAÇÕES FINAIS	233
REFERÊNCIAS	236

CAPÍTULO 9

Sequestro de carbono em floresta: reflexões metodológicas em contexto de floresta tropical..... 244

Domingos Manuel Mendes Lopes

Teresa Raquel Duque Enes

Leónia do Carmo Santos Nunes

José Luís Penetra Cerveira Lousada

RELEVÂNCIA DOS ESTUDOS DE SEQUESTRO DE CARBONO 244

CONCEITOS TEÓRICOS ASSOCIADOS AO SEQUESTRO

DO CARBONO: O CONCEITO DE PRODUTIVIDADE

PRIMÁRIA LÍQUIDA..... 246

METODOLOGIAS PARA A QUANTIFICAÇÃO DO

SEQUESTRO DO CARBONO 251

Abordagem alométrica..... 251

A folhada e biomassa aérea do sub-bosque.....256

Metodologia utilizada para a medição da PPL.....257

Modelos ecofisiológicos..... 258

Sensoriamento remoto 263

O acoplamento dos modelos de produção ao 264

sensoriamento remoto 264

O programa MODIS 265

O conceito de design do MODIS.....266

Componentes266

Produtos de dados MODIS.....266

CONSIDERAÇÕES FINAIS 271

REFERÊNCIAS..... 271

Lista de autores..... 280

CAPÍTULO 1

A política nacional sobre mudança do clima e seus reflexos na área florestal

José Carlos Carvalho

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo objetiva descrever e avaliar a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC, levando em conta as iniciativas adotadas pelo Brasil, como desdobramento dos compromissos internacionais dos quais é signatário, em face da importância global do tema e de sua inserção no mais elevado patamar das políticas internacionais, mobilizando todas as Nações do mundo.

O escopo do trabalho inclui uma síntese dos antecedentes do tema, externa e internamente, considerando a Convenção das Nações Unidas sobre Mudança do Clima - UNFCCC, na sigla em inglês, ou CQNUMC, em português, aborda os mecanismos legais que instituíram a Política Nacional sobre Mudança do Clima e seus principais instrumento de implementação, incluindo o Fundo Clima e o Fundo Amazônia, dando destaque para as metas do Plano Nacional de Mudanças Climáticas, com foco em florestas.

Para completar a análise do tema, o texto aborda a realização da COP 21 – a Vigésima Primeira Conferência das Partes da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, o Acordo de Paris e a INDC (Intendend National Determined Contribution) apresentada pelo Brasil, assim como pelos demais países, indicando as metas válidas como compromisso para estabelecer a redução das emissões do GEE - Gases de Efeito Estufa, até 2030.

2. ANTECEDENTES

A questão das mudanças climáticas surgiu no plano internacional, diante das primeiras evidências levantadas pelos cientistas sobre o aquecimento global e o efeito do aumento médio da temperatura da Terra sobre as emissões dos gases de efeito estufa e, conseqüentemente, no clima. Os estudos relativos ao tema foram organizados no âmbito do Painel Intergovernamental de Mudanças do Clima - IPCC, na sigla em inglês, criado em 1988, através de uma iniciativa conjunta da Organização Meteorológica Mundial - OMM e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente - PNUMA, reunindo cientistas de todos os cantos do planeta, nas mais variadas áreas do conhecimento.

Em 1992, esse foi um dos assuntos centrais da agenda da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento - CNUMAD, realizada no Rio de Janeiro, sob os auspícios da ONU. Essa foi uma das mais promissoras Conferências das Nações Unidas

em matéria de decisões estratégicas globais, tendo sido aprovadas no Rio de Janeiro as Convenções sobre Mudança do Clima (UNFCCC) e a Diversidade Biológica (CDB), a Agenda 21, a Carta do Rio, além do encaminhamento da Convenção sobre Desertificação.

Os primeiros estudos (Assesment Report - AR) do IPCC, publicados em 1990 e 1995, reforçaram a importância da criação da UNFCCC e deram subsídios valiosos para o surgimento do Protocolo de Quioto, celebrado em 1997. Esse protocolo representou a primeira tentativa concreta para estabelecer metas de redução das emissões dos gases de efeito estufa - GEE, que não tinham sido previstas na Convenção de 1992.

O primeiro período de compromissos estabelecido em Kyoto foi previsto para vigorar de 2008 a 2012 e criava obrigações de redução de GEE para os países industrializados, agrupados no Anexo I do Protocolo, deixando de fora os países em desenvolvimento, tendo em vista a contribuição histórica das Nações desenvolvidas responsáveis pela quase totalidade das emissões até à época do Tratado.

Acordou-se uma redução média global de 5,2%, durante o primeiro período de vigência, findo em 2012, sendo 8% na União Europeia, 7% nos Estados Unidos e 6% no Japão. Todavia, essas metas, embora modestas, não foram alcançadas, mesmo na União Europeia, que sempre teve protagonismo no tema, o que aumentou a importância de um novo Acordo, diante da severidade do aquecimento global do clima, atestado no último relatório do IPCC e a comprovada influência das atividades humanas no seu agravamento.

O Protocolo estabeleceu, também, instrumentos de mercado para estimular a redução das emissões, através de parceria entre os países constantes do Anexo I e os demais, admitindo que as emissões das Nações industrializadas pudessem ser compensadas com projetos de fontes renováveis e limpas de energia, conservação e eficiência energética e reflorestamento.

Um desses instrumentos foi o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo - MDL, iniciativa vitoriosa proposta pela Delegação Brasileira,

em Quioto. O Brasil está entre os quatro países com maior número de projetos aprovados no âmbito do MDL, sendo o primeiro colocado na América Latina.

No que se refere ao MDL florestal, o Brasil foi pioneiro em desenvolver e validar a metodologia para uso desse mecanismo em reflorestamento, através do Projeto da empresa Plantar S/A, de Minas Gerais, em parceria com o Banco Mundial.

Ao lado do MDL Florestal, outro importante instrumento criado no âmbito do UNFCCC é o REDD+, mecanismo destinado a promover a conservação das florestas nativas a partir da valoração dos ecossistemas florestais, especialmente pela capacidade de funcionarem como sumidouros de carbonos e proverem outros tipos de serviços ambientais, como conservação do solo e água, proteção da fauna.

A partir da COP 11, em 2005, a ideia do REDD+ como instrumento de incentivo à conservação das florestas nativas, foi introduzida na agenda da Convenção. Em 2013, com a aprovação do denominado Marco de Varsóvia para REDD+, durante a COP 19, realizada na capital polonesa, essa estratégia foi oficializada como um instrumento oficial da Convenção, ampliando as expectativas sobre o seu papel como oportunidade de financiamento internacional.

O tratamento dado ao tema no plano internacional, desde a RIO/92, levou o Brasil a tomar as primeiras decisões no plano doméstico para organizar os esforços do país na esfera política e institucional, visando prepará-lo para cumprir os compromissos internacionais dos quais é signatário e internalizar essas diretrizes nas políticas públicas internas.

Nesse contexto, foi criada em 1999, a Comissão Interministerial sobre Mudanças Climáticas, primeiro passo dado para dotar o Brasil de uma Política Nacional especificamente voltada para o tema. Em 2000, foi instituído o Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas, com a finalidade de conscientizar e mobilizar a sociedade para a extensão do problema e facilitar a articulação do Governo com a sociedade, servindo como elo de conexão das entidades de classe do setor

privado e dos movimentos sociais com o Governo Federal, através da Comissão Interministerial.

3. O PLANO NACIONAL DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E A LEGISLAÇÃO DEFINIDORA DA POLÍTICA BRASILEIRA SOBRE O CLIMA

Por intermédio do Decreto 6.263/2007, o Governo Federal criou o Comitê Interministerial sobre Mudanças do Clima e o Grupo Executivo - GEx, encarregado de configurar a política nacional tratando do assunto.

Coube ao Comitê a elaboração do Plano Nacional de Mudanças Climáticas, publicado em dezembro de 2008. Esse Plano estabeleceu as diretrizes estratégicas e programáticas para orientar a atuação governamental. Os principais objetivos do Plano em relação às florestas são:

- buscar manter elevada participação de energia renovável na matriz energética;
- fomentar o aumento sustentável da participação de bioenergia na estrutura de produção dos insumos energéticos;
- buscar a redução sustentada das taxas de desmatamento, em sua média quinquenal, em todos os biomas brasileiros, até atingir o desmatamento ilegal zero;
- eliminar a perda líquida da área de cobertura florestal no Brasil, até 2015.

Em sintonia com os objetivos delineados, o Plano traçou um conjunto de metas, sendo duas delas, especificamente, na área florestal, estabelecidas para reduzir as emissões de GEE e atuar como fonte de captura de CO₂, que são:

- reduzir o índice de desmatamento anual na Amazônia, em 80% até 2020;
- dobrar a área de florestas plantadas, para 11 milhões de hectares, em 2020, sendo 2 milhões de hectares com uso de

espécies nativas, tendo por base a área reflorestada em 2007, com extensão de 5,5 milhões de hectares.

O Plano abordou, ainda, outras importantes questões relativas ao patrimônio florestal, ao cargo do Serviço Florestal Brasileiro, notadamente no item que aborda o Fortalecimento dos Sumidouros dos Gases de Efeito Estufa, dando destaque para o Cadastro de Florestas Públicas e o Plano Anual de Outorga Florestal, providências previstas na Lei de Florestas Públicas e que se destinam ao ordenamento da exploração florestal das Unidades de Conservação de Uso Sustentável e das florestas de domínio da União e dos demais entes federados.

Prevê, também, o Programa de Florestas Energéticas, estabelecido com o propósito de estimular a utilização das florestas como fonte de energia renovável. Importa lembrar que o setor florestal, embora sem nenhum tipo de apoio oficial com essa finalidade, representa, ainda hoje, 10% da oferta de energia no país, na forma de lenha e carvão.

Há que se considerar que parte dessa oferta é baseada em florestas nativas, o que acaba concorrendo para aumentar as emissões de CO₂. Essa realidade reforça a importância do Programa previsto no Plano, no sentido de assegurar que todo o consumo de energia originada da madeira tenha origem em florestas plantadas ou de manejo florestal sustentável, como já ocorre com o setor de papel e celulose e que precisa ser adotado em toda a cadeia produtiva do setor siderúrgico de carvão vegetal, de madeira processada e outros usos.

Outra importante iniciativa consignada no Plano Nacional de Mudanças do Clima é a proposta de realização do Inventário Florestal Nacional, uma das grandes lacunas da política florestal brasileira. Estava prevista a elaboração de uma primeira versão que seria realizada entre 2009 e 2013, numa perspectiva de medições quinquenais.

Como está previsto na proposta do Plano é fundamental estabelecer uma rede de parcelas amostrais em todo o território nacional, levando em conta os biomas e a diversidade fitogeográfica do país, visando conhecer a composição do patrimônio florestal e suas

diversas tipologias, o estoque de madeira, a disponibilidade de uso sustentável de produtos madeireiros e não madeireiros, o volume de carbono por tipologia, a qualidade dos solos, a relação água-floresta, além de informações complementares sobre a biodiversidade, levando em conta que a diversidade biológica terrestre brasileira está intimamente associada aos ecossistemas florestais.

A implementação do PNMC conta com dois importantes instrumentos de apoio a projetos de redução das emissões dos gases de efeito estufa, criados na perspectiva de dar suporte às iniciativas previstas na Política Nacional sobre Mudança do Clima: o Fundo Amazônia e o Fundo Clima, vinculados ao Ministério do Meio Ambiente e geridos pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social - BNDES.

O Fundo Amazônia, criado pelo Decreto 6.527/2008 visa captar investimentos não reembolsáveis para financiar ações de prevenção, monitoramento e combate ao desmatamento, bem como promover a conservação e o uso sustentável das florestas da Amazônia. Logo, é um mecanismo de apoio regional, sem alcance nacional. O Governo da Noruega é o principal doador internacional desse Fundo.

O Fundo do Clima foi criado pela Lei 12.144, de 09/12/2009 e tem por finalidade captar e prover recursos financeiros para apoiar estudos ou projetos e financiar empreendimentos destinados à mitigação das mudanças climáticas. Esse Fundo conta com um grande Programa subdividido em 10 subprogramas, sendo dois direcionados exclusivamente para o setor florestal:

- Carvão Vegetal: investimento para a melhoria da eficiência e sustentabilidade da produção desse insumo energético;
- Florestas Nativas: financiamento de projetos associados ao manejo florestal sustentável e ao plantio de florestas com espécies nativas, incluindo a cadeia de produção, o beneficiamento e o consumo de produtos florestais de origem sustentável.

Cumprindo orientação governamental, o BNDES deu prioridade nos últimos anos ao financiamento de energia solar, que pela sua dimensão levou à utilização plena dos recursos consignados no orçamento do Fundo, no montante de 560 milhões de reais. Momentaneamente, não há disponibilidade de recursos para novos financiamentos.

4. AS FLORESTAS NO CONTEXTO DA POLÍTICA NACIONAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA

Na sequência dessas iniciativas descritas acima e com base no conteúdo programático do Plano foi aprovada pelo Congresso Nacional, a Lei 12.187/2009, que instituiu a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC, objetivando constituir o arcabouço legal de sustentação das ações governamentais nas três esferas de governo, dando ao tema a necessária dimensão de uma política pública prioritária.

A grande expectativa da Conferência de Copenhague, a COP 15, realizada em dezembro de 2009, facilitou as tratativas para aprovação da Lei no Congresso, embora o encontro da Dinamarca tenha fracassado, pela dificuldade em se obter um acordo que compatibilizasse os interesses dos países desenvolvidos e dos em desenvolvimento. Na verdade, o que se esperava para Copenhague, acabou se realizando em Paris, 6 anos depois.

Parte significativa dos objetivos da PNMC estão diretamente ou indiretamente relacionados com as florestas, merecendo ser mencionados:

- a redução das emissões antrópicas de gases de efeito estufa em relação às suas diversas fontes. A substantiva queda nas taxas de desmatamento na Amazônia contribuiu decisivamente para reduzir as emissões brasileiras;
- o fortalecimento das remoções antrópicas por sumidouros de gases de efeito estufa no território nacional. Como se sabe, as florestas são eficientes fontes naturais de captura e retenção de carbono;

- a preservação, conservação e a recuperação dos recursos ambientais, com particular atenção aos grandes biomas naturais tidos como Patrimônio Nacional, nos termos da Constituição;
- a consolidação e a expansão das áreas legalmente protegidas e ao incentivo ao reflorestamento e à recomposição da cobertura vegetal em áreas degradadas;
- estímulo ao desenvolvimento do Mercado Brasileiro de Redução de Emissões - MBRE.

Como se espera de uma Lei que visa orientar o desenvolvimento nacional no sentido de estabelecer uma economia sustentável de baixo carbono, o diploma legal que institui a PNMC aborda questões cruciais como: adaptação, efeitos adversos, emissões, fontes, gases de efeito estufa, impactos nos sistemas naturais, incluindo os seres humanos, mitigação, sumidouros e vulnerabilidade.

Com a intenção de atingir os objetivos traçados na PMMC, a Lei estabeleceu um compromisso voluntário, apresentado na COP 15, realizada em Copenhague, de reduzir as emissões de GEE entre 36,1% e 38,9%, levando em conta as emissões projetadas para 2020, no montante de 3,2 GtCO₂-eq.

Essa proposta implica uma redução de 1,1 GtCO₂-eq a 1,2GtCO₂-eq. Todavia, esse compromisso foi refeito com a proposta brasileira depositada em Paris, constante da INDC (Intendend National Determined Contribution), tendo, agora, como referência o ano de 2030, conforme o Acordo aprovado na COP 21.

A regulamentação da Lei 12.187/2009 pelo Decreto 7.390/2010, ampliou e explicitou as iniciativas e ações para cumprimento da PNMC, estabelecendo planos de ação para a prevenção e controle do desmatamento nos biomas e planos setoriais de mitigação e adaptação às mudanças climáticas. Em relação ao patrimônio florestal, foram lançados os seguintes planos:

- Plano de Ação para a Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal - PPCDAm;

- Plano de Ação para a Prevenção e Controle dos Desmatamentos e das Queimadas no Cerrado - PPCerrado;
- Plano para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura. Esse plano tangencia a área florestal, na medida em que cresce de importância de novas técnicas de cultivo, incluindo a integração lavoura-pecuária-florestas;
- Plano de Reduções de Emissões na Siderurgia. Esse plano também tem grande interface com o setor florestal, em razão da importância da siderurgia a carvão vegetal, baseada em florestas plantadas.

Para cumprir o compromisso voluntário expresso no artigo 12, da Lei 12.187/2009, o Decreto de regulamentação estabeleceu metas específicas relacionadas às florestas, a seguir mencionadas:

- redução de 80% dos índices anuais de desmatamento na Amazônia Legal em relação à média verificada entre os anos de 1996 e 2005;
- redução de 40% dos índices anuais de desmatamento no Bioma Cerrado em relação à média verificada entre os anos de 1999 e 2008;
- ampliação do sistema de integração lavoura-pecuária-floresta em 4 milhões de hectares;
- expansão do plantio de florestas em 3 milhões de hectares;
- incremento da siderurgia a carvão vegetal originário de florestas plantadas e melhoria na eficiência do processo de carbonização.

5. ANÁLISE DA IMPLEMENTAÇÃO DA PNMC

Desde a elaboração do Plano Nacional de Mudanças Climáticas, passando pela Lei da PNMC e a sua regulamentação, as florestas foram tratadas com pertinência apropriada, considerando a importância e a magnitude do patrimônio florestal brasileiro, sobretudo, quando

se constata que o Brasil ainda tem mais da metade do seu território coberto por florestas e demais formas de vegetação nativa, detêm 1/3 das florestas tropicais do mundo em seu território e apresenta uma extraordinária vocação para a silvicultura, em razão da disponibilidade de terra e da experiência exitosa da indústria de base florestal, como o setor de celulose e papel e os segmentos mais avançados no ramo de madeira processada.

Todavia, ao se comparar as metas traçadas pelo Governo brasileiro e os resultados efetivamente alcançados, o desempenho da PNMC é decepcionante. Esse quadro é agravado pelas restrições fiscais e o severo processo de recessão da economia, que entra no seu terceiro ano, sem perspectivas de reversão a curto prazo.

Com exceção da acentuada queda dos índices de desmatamento na Amazônia, que superou as expectativas, fazendo com que o Brasil pudesse ostentar um grande protagonismo nessa área, graças ao empenho do Ministério do Meio Ambiente - MMA, nas demais metas relacionadas às florestas os avanços estão longe de serem alcançados, por inexistência e indefinição dos meios de implementação da PNMC.

No que concerne ao reflorestamento, as metas indicam um esforço para duplicar a área plantada, de 5,5 milhões em 2007 para 11 milhões em 2020, sendo 2 milhões com espécies nativas. Essa meta foi adicionada de 12 milhões de hectares constantes da INDC apresentada ao Secretariado da UNFCCC, como parte do Acordo de Paris.

A partir de 2010, ano de regulamentação da Lei, até 2014, o País reflorestou uma média de 155 mil hectares/ano, passando de 7.119.698 ha para 7.736.171 ha no período referido, de acordo com os dados da Ibá - Indústria Brasileira de Árvores, entidade representativa de todo os segmentos da cadeia produtiva florestal, que atua com florestas plantadas. Os dados revelam que não houve esforço incremental para ampliar, na magnitude necessária, a área reflorestada, no sentido de alcançar a meta prevista, sem mencionar os novos compromissos assumidos em Paris.

Na verdade, o aumento anual da área plantada se manteve praticamente estável e ficou atrelado às atividades já consolidadas de setores tradicionais nos ramos de celulose e papel, madeira processada e siderurgia integrada à carvão vegetal. Ou seja, não se adotou nenhuma nova iniciativa com a escala necessária para organizar um esforço incremental de reflorestamento no País.

Em relação aos 2 milhões de hectares de reflorestamento com espécies nativas, excluindo as ações pilotos e pontuais lideradas pelo terceiro setor e algumas poucas medidas adotadas na esfera pública, a meta tem sido, praticamente, ignorada, até porque o seu cumprimento exige uma rede de coleta e armazenamento de sementes e de viveiros para produção de mudas de espécies nativas, além de programas consistentes de fomento e extensão florestal, que ainda não saíram do papel.

Embora deva-se ressaltar o papel e os ingentes esforços desenvolvidos pelo Serviço Florestal Brasileiro, é forçoso reconhecer que outra meta fundamental para a gestão florestal brasileira, o Inventário Florestal Nacional, também não anda no compasso exigido pelos compromissos estabelecidos no âmbito da Política Nacional sobre Mudança do Clima.

A mesma situação pode ser descrita em relação ao manejo sustentável da floresta tropical, notadamente na Amazônia, onde a atuação do SFB é mais intensa, mas ainda assim, sem os meios necessários para cumprir o seu papel fundamental como instituição chave para o Brasil honrar os seus compromissos em relação à PNMC.

O advento da nova Lei Florestal Brasileira (12.651/12) é outro importante instrumento para apoiar a implantação da PNMC, especialmente, com os novos dispositivos que criaram a obrigatoriedade do Cadastro Ambiental Rural - CAR de todas as propriedades rurais do país e os Programas de Regularização Ambiental - PRA a serem estabelecidos para os imóveis rurais com passivos ambientais registrados nos seus respectivos cadastros, notadamente a restauração das

Reservas Legais e das Áreas de Preservação Permanente, levando em conta a relação de interdependência entre floresta-solo-água e clima.

Os dois instrumentos previstos na UNFCCC, o MDL e o REDD+, ainda não se consolidaram como instrumentos com a robustez financeira suficiente para apoiar as medidas nacionais de implantação das metas de redução de emissões e de mitigação.

No caso do MDL, o baixo valor do Carbono no mercado fez com que esse mecanismo perdesse a atratividade, levando os empreendimentos potencialmente utilizadores desse instrumento a esperar um ambiente de negócio mais promissor. Contribui, também, para fragilizar o MDL o encerramento do primeiro período de compromisso assumido no âmbito do Protocolo de Kyoto, em 2012, e a indefinição sobre um segundo período de compromissos que vigorará até 2020, quando deve entrar em vigor o Acordo de Paris. A partir de 2020, espera-se que o MDL possa continuar figurando como um dos instrumentos do Acordo, como previsto no texto aprovado pela COP 21.

Com relação ao REDD+, deve-se ressaltar que o Fundo Amazônia se constitui no arcabouço institucional para a entrada de recursos desse mecanismo no país, mas destinado exclusivamente à região Amazônica. Espera-se, agora, com a publicação do Decreto 8.576, de 26/11/2015 e a Portaria Ministerial 370, de 02/12/2015, a definição da Estratégia Nacional de implantação do REDD+ e sua extensão aos demais biomas brasileiros. A arquitetura institucional estruturada pelo Marco de Varsóvia, orienta as decisões mais recentes do governo brasileiro e servirá de referência para a configuração da estratégia nacional.

6. A COP 21 E O ACORDO DE PARIS SOBRE O CLIMA GLOBAL

Em dezembro do ano passado, realizou-se em Paris a 21ª Conferência das Partes da Convenção das Nações Unidas sobre Mudança do Clima - UNFCCC, na sigla em inglês. Depois de um longo período de intensas negociações, que exigiram a realização de 20 Conferências

das Partes da Convenção, chegou-se a um acordo duradouro, considerado histórico, inclusive pela mídia internacional, diante das dificuldades iniciais em chegar a um consenso sobre o caminho a ser adotado para reduzir as emissões e frear o aquecimento global.

Uma das razões que levaram ao êxito de Paris, foi a decisão de evitar a adoção de metas de redução de emissões de cima para baixo, como ocorreu com o Protocolo de Quioto, mas criar uma estratégia nova, através da qual cada país apresentou as suas intenções de redução, com o sentido de urgência e ousadia exigido pelos dados constantes da dura realidade aferida no 5º Relatório (Climate Change) do IPCC, eliminando as incertezas quanto à gravidade do aquecimento e o papel das atividades humanas no aumento da temperatura média do planeta.

No contexto dessa nova estratégia, cada país registrou no Secretariado da UNFCCC a sua INDC (Intendend Nationally Determined Contribution). O Brasil apresentou uma das mais ousadas INDC, ampliando os compromissos voluntários que já havia assumido em Copenhague, através das metas estipuladas no Decreto de regulamentação da PNMC.

A INDC registrada pelo Brasil toma como referência o ano-base de 2005 para projetar as emissões e o esforço de redução a ser atingido até 2025 e 2030. Tratam-se de metas absolutas, como consta do documento encaminhado pelo Governo brasileiro.

Deve ser lembrado que as INDCs das Partes foram validadas e transformadas em compromisso no âmbito do Acordo, tornando-se metas a serem cumpridas para que os Países possam honrar os compromissos assumidos.

No caso brasileiro, a proposta significa reduzir em 37% as emissões até 2025 e 43%, em 2030. Com essa meta o Brasil terá que reduzir as suas emissões de 2,1 GtCO₂-eq em 2005, para 1,3 GtCO₂-eq em 2025 e 1,2 GtCO₂-eq, em 2030.

Como a substantiva redução de emissões de GEE, no Brasil, foi praticamente obtida com a redução do desmatamento na Amazônia,

a mudança de uso da terra e florestas continua tendo papel relevante nos esforços nacionais para manter o protagonismo que o Brasil exerceu na fase preparatória e durante a COP 21.

Dessa forma, além das metas a serem alcançadas em setores como a indústria, energia, agropecuária e resíduo, a conservação e o uso sustentável das florestas desempenharão papel chave para que o país possa continuar avançando exitosamente em relação à mudança do clima.

Nesse sentido, a INDC brasileira, considerando o relatório do IPCC (Climate Change), apresenta metas ambiciosas e adicionais às já estabelecidas, cujo cumprimento é vital para a consecução do compromisso do país, como se demonstra a seguir:

- fortalecer o cumprimento do Código Floresta, em âmbito federal, estadual e municipal;
- fortalecer políticas e medidas com vistas a alcançar, na Amazônia brasileira, o desmatamento ilegal zero, até 2030 e a compensação das emissões de gases de efeito estufa proveniente da supressão legal da vegetação no mesmo período;
- restaurar e reflorestar 12 milhões de hectares de florestas até 2030, para múltiplos usos;
- ampliar a escala de sistemas de manejo sustentável de florestas nativas, por meio de sistemas de georreferenciamento e rastreabilidade aplicáveis ao manejo de florestas nativas, com vistas a desestimular práticas ilegais e insustentáveis de exploração florestal e uso das terras cobertas com florestas.

Além do arranjo político-institucional que resultou na concepção das INDC, a COP 21 foi bem sucedida em virtude de outros fatores que se combinaram positivamente para formar uma atmosfera propícia na fase preparatória e durante as tratativas que ocorreram em Paris.

Entre esses fatores, merecem menção o clima de compromisso prevalente na Conferência, estimulado, em boa parte, pelo engajamento pessoal do Papa Francisco e pela repercussão da Encíclica

Laudato Si, por ele expedida; ao contundente chamamento dos cientistas sobre a gravidade do assunto; ao impacto dos últimos relatórios do IPCC, eliminando as dúvidas sobre a influência humana na ocorrência do problema; e ao prestígio político histórico dos anfitriões, que se empenharam decididamente pelo sucesso da Conferência.

Em relação às grandes conquistas da COP 21 é importante salientar que se trata de um Acordo mandatário, ou seja, legalmente vinculante, que obriga os Países a cumpri-lo; e ao estabelecimento de uma meta de aumento médio da temperatura da terra abaixo de 2° C, com foco em 1,5° C, até o fim do século, dando um mínimo de segurança às Nações insulares, principalmente do Pacífico, onde a vulnerabilidade à elevação dos mares é aflitiva. Após exaustivas negociações, foi definido um piso de financiamento de 100 bilhões de dólares para apoiar medidas de mitigação e adaptação às mudanças do clima nos países em desenvolvimento.

Merece destaque especial a atenção dada à temática florestal. O Acordo de Paris dedica o Artigo 5, para tratar especificamente do papel e da importância das florestas para a humanidade e o elevado significado do patrimônio florestal para mitigar os efeitos da mudança do clima. Esse artigo aborda a necessidade de incentivos para atividades relacionadas à redução de emissões oriundas de desmatamento e degradação florestal; o papel da conservação, manejo sustentável e estoques de carbono florestal fixados nas florestas já existentes e pela restauração e reflorestamento de áreas degradadas.

Nesse contexto, as florestas ganharão ainda mais relevância a partir de 2020, seja no campo da conservação, seja em relação ao uso sustentável dos recursos florestais, abrindo espaço para uma abordagem ainda mais plural das políticas florestais, incluindo-as no rol das iniciativas positivas para mitigar a mudança do clima. Com isso, o ramo das ciências florestais e da madeira ganha mais espaço e amplia o seu escopo em relação aos estudos, pesquisas, geração e disseminação de conhecimento, tomando em conta o binômio floresta-clima,

um novo eixo de atividades a serem incorporadas às atribuições da engenharia florestal.

As críticas de especialistas sobre a ausência de metas mensuráveis, verificáveis e reportáveis de redução das emissões dos gases de efeito estufa pelos Países membros da ONU, fazem sentido em relação ao regime do Protocolo de Quioto, mas o registo das INDCs, como compromisso mínimo a ser revisado a cada 5 anos, sempre para aumentar as reduções, indica um rumo promissor para alcançar a meta global de aquecimento do planeta abaixo de 2° C, com o empenho das Nações direcionado para 1,5° C, até o fim desse século.

7. PRÓXIMAS ETAPAS DO ACORDO

De acordo com a liturgia das Nações Unidas, os Acordos e Tratados seguem um processo lento e demorado de articulações, consultas e discussões. Para que a iniciativa de Paris possa ser realmente considerada histórica, é fundamental que os passos seguintes do ritual sejam observados e cumpridos. Por essa razão, o Governo Francês, como anfitrião da COP 21 e fortalecido pelo sucesso da Conferência, deseja continuar exercendo um papel de “facilitador” das etapas posteriores, embora essa tarefa seja conferida os órgãos subsidiários da UNFCCC.

Levando em conta esse contexto, deve-se mencionar as fases seguintes, sem as quais o Acordo sequer entra em vigor:

- o Acordo terá que ser ratificado pelos Congressos, Parla-mentos ou Assembleias Nacionais dos signatários e encaminhado ao Secretariado da Convenção até 21 de abril de 2017;
- a plena vigência do Acordos se dará 30 dias após Países responsáveis por 55% das emissões depositarem o Termo de Ratificação;
- após o Acordo tornar-se efetivo, os Países poderão abandonar-lo em até 3 anos;

- os compromissos assumidos serão revisados a cada 5 anos, sempre de modo mais restritivo. A primeira reunião deverá ocorrer em 2023;
- em 2018 haverá uma Conferência de Avaliação da Implementação das INDCs depositadas por cada País, mas sem caráter punitivo ou restritivo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O extraordinário evento de Paris deu a largada para um novo cenário mundial em relação aos graves problemas decorrentes do aquecimento global, como informa o IPCC. Teve o grande mérito e nesse ponto, histórico mesmo, de romper a inércia de quase 40 anos, para enfrentar, na magnitude exigida, os problemas da mudança de clima.

Nota-se claramente, que o Acordo tem desdobramentos internos imediatos e amplos para os Países. No caso brasileiro, em razão do atual estágio da economia, o cumprimento da INDC enfrentará maior grau de dificuldades.

No que se refere às florestas, além do cenário econômico desfavorável, a execução das metas estabelecidas na INDC sofre as mesmas restrições descritas e analisadas no tópico que trata da implantação da PNMC, uma vez que pouca coisa foi feita para alterar a fragilidade brasileira, quando se trata de meios de implementação dos compromissos assumidos para reduzir e mitigar as emissões, como já demonstrado pelas dificuldades de cumprir as metas voluntárias da PNMC, apresentadas em Copenhague.

É difícil vislumbrar uma posição confortável do Brasil, em relação aos compromissos assumidos sobre florestas, se mantidas as atuais condições de fragilidades políticas e institucionais que configuram a organização do setor florestal público brasileiro. Não há uma política florestal consentânea com a realidade do país, principalmente com a realidade imposta pela INDC, o que exigirá medidas de curto prazo, para atualizar a política do setor e reorganizar,

ampla e profundamente, o Serviço Florestal Brasileiro, dando-lhe a necessária robustez para capitanear as providências inadiáveis que mantenha o Brasil no protagonismo que teve em Paris.

A redução das emissões de GEE por conta da redução do desmatamento na Amazônia e nos demais biomas, praticamente bateu no piso, isto é, chegou a um patamar abaixo do qual só as medidas de controle e fiscalização são insuficientes, tornando-se necessário novas políticas de uso da terra e a reorientação do crédito rural, como já vem ocorrendo em pequena escala, com a agricultura de baixo carbono, incluindo a integração lavoura-pecuária-floresta. Essa realidade explica o aumento das taxas de desmatamento na Amazônia no último ano.

Embora menor do que a demanda real de recuperação florestal imposta pela nova Lei, a meta brasileira de restaurar 12 milhões de hectares até 2030, incluindo regeneração natural, não deixa de ser ambiciosa. Mas, além de ambiciosa é inatingível com os meios de implementação de que o país dispõe. Essa meta é fundamental para contrabalançar as emissões decorrentes do desmatamento legal, permitindo zerar as perdas líquidas.

Sem medidas urgentes na esfera das políticas públicas e na gestão florestal não é exagero temer que as propostas ousadas constantes da INDC brasileira venham a se tornar uma promessa decepcionante e constrangedora.

CAPÍTULO 2

Emissão de gases pela combustão dos motores

Gheila Corrêa Ferres Baptistini

Maurício Paiva

Júlio Cezar Machado Baptistini

1. INTRODUÇÃO

A combustão é uma reação química exotérmica de oxidação e ocorre entre um combustível e um comburente, que em motores é o oxigênio do ar. O calor é o agente que dá início a esse processo químico ou a ignição.

A análise dos produtos de combustão é importante no estudo dos motores porque avalia a eficiência do processo de combustão, medindo as concentrações de particulados e de gases, como o CO, o

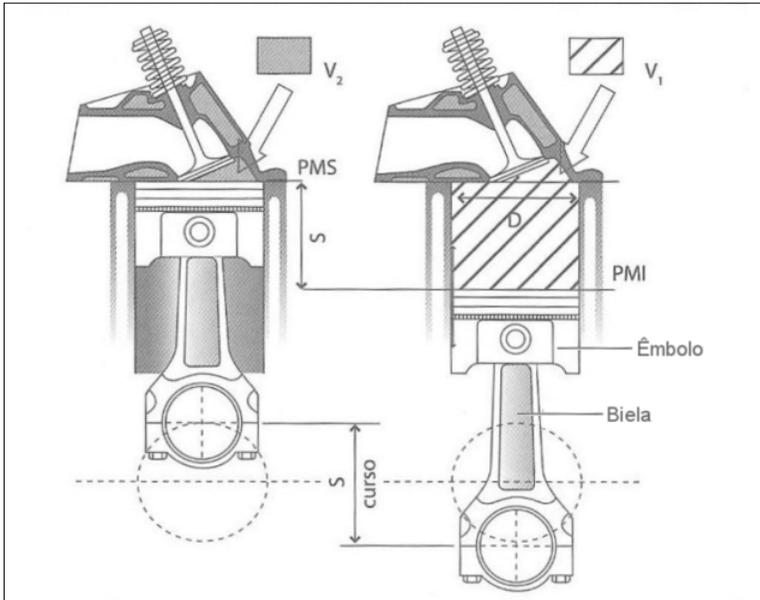
NO_x , o SO_2 e o CO_2 , confrontando os resultados com os valores estipulados pelas legislações de emissão, que, sejam de caráter global ou regional, tratam sobre o controle de emissões e respectivas fontes.

A proporção dos gases que saem dos motores depende de fatores como o tipo e condição de funcionamento do motor, do tipo de combustível utilizado e da qualidade da mistura utilizada na combustão.

2. MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Os motores de combustão interna alternativos são o tipo de motor geralmente utilizado em máquinas e veículos no sistema produtivo florestal. Neles o combustível participa diretamente da combustão, processo que ocorre dentro do conjunto motor, na câmara de combustão, e o trabalho mecânico é obtido pelo movimento de vaivém de um pistão ou êmbolo. Assim, esse tipo de motor é constituído basicamente por um cilindro fechado, contendo em seu interior um êmbolo acoplado a um mecanismo biela-manivela, conforme apresentado na figura 1. A cada meio giro da árvore de manivelas o êmbolo percorre um certo espaço entre duas posições extremas, denominadas *ponto morto inferior* (PMI) e *ponto morto superior* (PMS). O percurso linear entre essas posições é chamado *curso do êmbolo* (S), e o volume deslocado nesse percurso, *cilindrada*. O volume compreendido entre a cabeça do êmbolo e o cabeçote (tampa do cilindro), quando o êmbolo está no PMI, é chamado de *volume total* (V_1). O volume compreendido entre o êmbolo e o cabeçote, quando o êmbolo está no PMS, é chamado de *câmara de compressão* ou *câmara de combustão* (V_2).

Figura 1 - Posições fundamentais do êmbolo em motores de combustão interna



Fonte: modificado de BRUNETTI, 2012.

A cada meio giro da árvore de manivelas ocorrem determinadas condições de pressão e volume na câmara do cilindro, denominado *tempo do motor*, que corresponde ao curso do êmbolo. Não se deve confundir tempo com processo, pois, ao longo de um tempo, poderão acontecer diversos processos, como será visto adiante. Dessa forma, os motores podem ser classificados em motores de quatro tempos (4T) e dois tempos (2T), de acordo com o número de tempos para completar um ciclo de operação, que é a sequência de processos sofridos pelo combustível para obtenção de trabalho útil. Ainda de acordo com as características particulares de como se realiza cada tempo, os motores de combustão interna podem funcionar segundo dois ciclos de operação: o ciclo Otto e o ciclo Diesel.

2.1. Classificação dos motores de combustão interna alternativos quanto ao ciclo de operação

CICLO OTTO

Nos motores de ciclo Otto a mistura combustível + ar é admitida para o interior do cilindro e o início do processo de combustão se dá por uma faísca elétrica, que ocorre entre os eletrodos da vela de ignição.

Geralmente esses motores usam como combustível a gasolina, o álcool, GNV, biogás, etc.

CICLO DIESEL

Nesses motores, o pistão comprime somente o ar, até que o mesmo atinja uma temperatura superior à temperatura de ignição do combustível. Quando o pistão aproxima-se do PMS, o combustível é injetado no interior do cilindro, e o início do processo de combustão se dá por ignição espontânea.

Geralmente esses motores usam como combustível o óleo diesel e os óleos vegetais.

2.2. Classificação dos motores de combustão interna alternativos quanto ao número de tempos do ciclo de operação

MOTORES QUATRO TEMPOS (4T)

Neste caso, o êmbolo percorre quatro cursos, correspondendo a duas voltas da manivela do motor, para que seja completado um ciclo de operação.

1º tempo: *Admissão.*

O pistão desloca-se do PMS ao PMI. Nesse movimento o pistão dá origem a uma sucção que causa um fluxo de gases

através da válvula de admissão, que se encontra aberta. O cilindro é preenchido com uma mistura combustível – ar, nos motores de ciclo Otto, ou por apenas ar, nos motores de ciclo Diesel.

2º tempo: *Compressão.*

Fecha-se a válvula de admissão e o pistão se desloca do PMI ao PMS, comprimindo a mistura ou apenas ar, dependendo do tipo de ciclo.

3º tempo: *Expansão.*

No motor de ciclo Otto, nas proximidades do PMS, ocorre a faísca que provoca a ignição da mistura. Já no motor do ciclo Diesel é injetado o combustível no ar quente, dando início à combustão espontânea. A partir da combustão, a pressão no interior do cilindro aumenta expandindo os gases, o que permite empurrar o êmbolo para o PMI.

4º tempo: *Escape.*

Com a válvula de escape aberta, o pistão desloca-se do PMI ao PMS, “empurrando” os gases queimados para fora do cilindro. A partir de então o ciclo reinicia.

MOTORES DOIS TEMPOS (2T)

Nesses motores o ciclo completa-se com apenas dois cursos do êmbolo, com uma única volta do eixo de manivelas. Os mesmos processos que ocorrem nos motores 4T, são realizados da mesma maneira nos motores 2T, mas, com sobreposição de processos num mesmo curso. São mais simples que os motores 4T, porém mais poluentes, pois o óleo lubrificante é queimado juntamente com a mistura combustível + ar durante a combustão.

1º tempo: *Compressão e admissão.*

Durante o movimento ascendente do êmbolo, do PMI ao PMS, o canal de admissão e as janelas de admissão e escape permanecem fechados, devido posição dos mesmos em relação ao êmbolo. Nessa situação, origina-se um vácuo parcial na parte inferior do motor e, ao mesmo tempo, a compressão da mistura ou do ar, na câmara de compressão. Próximo ao PMS, a posição do êmbolo permite que a janela de admissão seja aberta e o vácuo formado suga a mistura ou somente o ar para a parte inferior do motor.

2º tempo: *Expansão e escape.*

Quando o êmbolo aproxima-se do PMS, ocorre uma centelha elétrica na vela, no caso do ciclo Otto, ou a pulverização do combustível, para o ciclo Diesel, dando início a ignição e consequente combustão dos gases comprimidos. A pressão dos gases resultantes da combustão “empurra” o êmbolo em direção ao PMI. Durante o curso descendente do êmbolo, o canal e a janela de admissão permanecem fechados, e a mistura combustível + ar (ciclo OTTO) ou somente o ar (ciclo DIESEL) são admitidos na parte inferior do motor e transferidos para a câmara de combustão através do canal de admissão. Próximo ao PMI, o canal de admissão e a janela de escape são abertos, permitindo que os gases da combustão sejam expelidos, ao mesmo tempo em que a nova mistura, ou somente ar, entram na câmara do cilindro.

3. COMBUSTÃO E COMBUSTÍVEIS

A combustão, como definido anteriormente, consiste na combinação química do oxigênio do ar com o carbono e o hidrogênio do combustível, havendo liberação de calor e, conseqüentemente, aumento

da pressão exercida pela mistura gasosa sobre a cabeça do êmbolo do motor, gerando o trabalho mecânico.

Os combustíveis são substâncias cuja reação de oxidação é exotérmica, ou seja, com grande liberação de calor. São formados basicamente por átomos de carbono e de hidrogênio e podem ser de *origem vegetal*, como o metanol, de *origem mineral*, como o petróleo e derivados, e de *origem bioquímica*, como o gás metano.

3.1. A combustão nos cilindros dos motores

Nos motores, a combustão ocorre na câmara de combustão, de forma muito rápida, regular e progressiva. A velocidade de propagação desse fenômeno é quase uniforme, desde a ignição da mistura combustível + ar até o término do processo de combustão de toda a mistura. Essa velocidade depende de uma série de fatores como o tipo de combustível utilizado, da relação combustível + ar, da temperatura e pressão no interior da câmara de combustão, da presença de gases residuais, etc.

Para o caso teórico de uma combustão completa, todo o carbono (C) e hidrogênio (H) dos combustíveis queimam, resultando somente em CO_2 e H_2O nos gases de escape. Os outros gases presentes no ar não são alterados pelo processo de combustão. Mas, na prática, a combustão não é completa, pois há formação de compostos como o (NO_x) óxido de nitrogênio, devido a oxidação do nitrogênio do ar, dada as altas temperaturas no interior do cilindro. Além disso, outros componentes do combustível como o enxofre, podem dar origem a gases nocivos a saúde humana e ao ambiente. Esses fatos são comuns em motores de combustão interna, mesmo em ótimas condições.

Assim, além da potência gerada, a combustão nos motores resulta na formação de gases de escape nocivos e na geração de calor ou energia não aproveitada. Como o objetivo do funcionamento de um motor a combustão interna é a produção de trabalho mecânico, o ideal é que se obtenha a máxima potência com o menor consumo de combustível e menor nível de emissões de poluentes possíveis.

Para maior aproximação da condição ideal, a combustão depende dos seguintes fatores:

- Proporções de combustível e ar, isto é, dosagem da mistura;
- Temperatura de combustão, que não deve ultrapassar determinados limites, a fim de evitar a dissociação de CO_2 e H_2O , já que ela consome calor;
- Forma de propagação da combustão. É conveniente que as mistura combustível + ar tenham alta condutibilidade térmica, para facilitar a propagação da combustão, e baixo calor específico, para que a temperatura se eleve com facilidade.

A mistura combustível + ar presente na câmara de combustão, tanto de motores do ciclo Otto quanto nos motores do ciclo Diesel, deve estar em proporções cujos valores variem em faixas definidas, para que a combustão seja otimizada. Dessa forma, o motor precisa receber a dosagem mais adequada para cada regime de operação, e assim, viabilizar o máximo rendimento com o mínimo de emissões. A relação combustível + ar representa a proporção das quantidades, em massa ou vazão em massa, de combustível e ar que constituem a mistura. Essa relação é definida como:

$$\text{RELAÇÃO AR / COMBUSTÍVEL} = \frac{\text{MASSA DE COMBUSTÍVEL ADMITIDA}}{\text{MASSA DE AR ADMITIDA}} \quad (1)$$

Uma *mistura ideal*, ou *estequiométrica*, é definida como aquela que proporcione uma combustão completa, ou seja, a mistura que possua uma quantidade de ar suficientemente capaz de queimar todo o combustível presente na mesma. Para cada combustível há uma relação estequiométrica distinta.

Uma mistura é dita *mistura pobre* quando possui mais ar, ou menos combustível, do que o correspondente à mistura ideal. Uma mistura excessivamente pobre pode provocar instabilidade no motor, o que é uma situação indesejável. Já uma mistura levemente pobre, pode contribuir para a redução da emissão de CO, e em alguns casos

de funcionamento, com a redução do consumo de combustível e um bom funcionamento do motor.

Uma mistura é dita *mistura rica* quando possui menos ar, ou mais combustível, do que o correspondente à mistura estequiométrica. Uma mistura muito rica também provoca instabilidade no motor, e se ultrapassado certo patamar, a combustão não mais é possível, e o motor para de funcionar (popularmente chamado de motor afogado). Uma mistura levemente rica, para uma dada condição de funcionamento do motor, pode produzir a máxima potência, no entanto, aumentar a probabilidade da emissão de CO.

É importante frisar que, do ponto de vista da combustão, o comportamento da mistura não depende apenas da sua composição média, mas principalmente, da homogeneização do vapor de combustível no ar. Em certas condições, pode-se ter uma mistura rica, mas com comportamento de mistura pobre, por falta de homogeneização.

3.2. Combustíveis

Os combustíveis mais utilizados nos motores do sistema florestal são misturas de hidrocarbonetos derivados do petróleo. O petróleo é um líquido oleoso, inflamável, com cor que varia do castanho ao negro e cujas propriedades físicas e composições químicas podem variar, dependendo do local de onde é extraído. Quimicamente, é uma mistura complexa de hidrocarbonetos, podendo apresentar teores entre 83 a 87% de Carbono (C), 11 a 14% de Hidrogênio (H), 0,01 a 8% de Enxofre (S), 0,11 a 1,7 de Nitrogênio (N), 0,50% de Oxigênio (O), entre outros componentes.

Em relação à composição dos combustíveis, quanto mais átomos de C e H estiverem reunidos, em uma molécula, mais pesados ela se torna. Dessa forma, distinguem-se combustíveis leves e pesados. Entre os combustíveis ditos leves, inclui-se a gasolina, o álcool e os gases liquefeitos, como o propano e o butano. Os combustíveis

pesados são denominados óleos combustíveis, entre os quais se inclui o óleo diesel.

Existem vários processos para obtenção de derivados do petróleo, em função das propriedades que se deseja para o combustível, sendo o ponto de partida de todos eles a destilação atmosférica e a vácuo. Além desses processos, há outros que visam melhorar ou adequar algumas propriedades dos combustíveis. O hidrotreatamento, por exemplo, tem por objetivo reduzir os teores de enxofre do combustível, a fim de atender as exigências ambientais. Hidrocarbonetos que contenham átomos de enxofre na sua molécula, após serem queimados geram SO_2 e SO_3 , que podem formar ácido sulfuroso e sulfúrico em presença de água. Essa reação acontece em temperaturas relativamente baixas, durante o desligamento e o aquecimento do motor. O enxofre acarreta também maior desgaste e maior sensibilidade à detonação.

Além dos derivados do petróleo, tem-se tornado comum o uso de biocombustíveis, tanto na forma pura, como adicionados aos combustíveis derivados do petróleo. Os benefícios ambientais advindos do uso dos biocombustíveis são atribuídos ao fato das plantas que os geram consumirem parte do CO_2 , produzido em suas combustões. Além disso, eles são menos poluentes. A participação desses combustíveis alternativos nas matrizes energéticas é crescente, a nível mundial. No Brasil, os dois principais biocombustíveis líquidos utilizados em motores de combustão interna são o etanol, extraído da cana-de-açúcar, e em escala crescente, o biodiesel, produzido a partir de óleos vegetais, ou de gordura animal.

GASOLINA

A gasolina comum é uma mistura de gasolinas obtidas nas diversas fases do processo de refino do petróleo, procurando-se dosar os componentes, de modo a obter um produto final que proporcione desempenho satisfatório em uma grande variedade de condições

operacionais dos motores. As especificações representam compromissos entre os requisitos de qualidade, desempenho e ambientais.

As propriedades da gasolina que mais influenciam no desempenho dos motores de ciclo Otto são a *octanagem* e a *volatilidade*. O índice de octano ou *octanagem* consiste na resistência da mistura do combustível + ar à autoignição, responsável pela detonação. Quanto mais elevada à octanagem, maior será a capacidade do combustível ser comprimido a altas temperaturas, na câmara de combustão, sem que ocorra a detonação. A *volatilidade* se refere à capacidade do combustível de se volatilizar ou evaporar se combinando com o ar. Essa característica é muito importante para partida, ignições e operações a baixas temperaturas.

No Brasil, as gasolinas são classificadas como:

- Gasolina A: isenta de álcool etílico anidro, cuja comercialização só é realizada entre refinador e distribuidor;
- Gasolina C: ou gasolina comum, recebe a adição de álcool etílico anidro e é comercializado nos pontos de abastecimento.

A gasolina C comercializada no Brasil deve conter uma proporção de 27% de etanol anidro em sua composição, a partir de março de 2015, de acordo com a Portaria nº 75 de 05 de março de 2015 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, e com a Resolução nº 01, de 4 de março de 2015, do Conselho Interministerial do Açúcar e do Álcool (Cima).

A adição de álcool na gasolina tem por objetivo aumentar a octanagem da gasolina e reduzir a emissão de CO durante a combustão. A adição de etanol a gasolina também proporciona reduções nas emissões de hidrocarbonetos, no entanto, aumentam as emissões de NO_x .

Quanto ao teor de enxofre, o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE prevê a redução gradual de poluentes por veículos automotores, e a partir de janeiro de 2015 toda gasolina comercializada no Brasil deve possuir teor máximo de enxofre de 50 mg/kg ou ppm (gasolina S-50). Essa

redução é bastante expressiva em relação à gasolina anterior, que era de até 800 mg/kg ou ppm.

ÓLEO DIESEL

Assim como a gasolina, o óleo diesel é constituído por moléculas de hidrocarbonetos, que podem ter de 10 a 30 átomos de carbono. A partir do refino do petróleo obtêm-se, pelo processo inicial de destilação fracionada, as frações denominadas de óleo diesel leve e pesado, básicas para a produção de óleo diesel, além de outras substâncias como o querosene, obtido nas diversas fases do processo de refino do petróleo.

Procura-se então, obter uma composição final balanceada de modo que as propriedades do combustível estejam dentro das especificações estipuladas, permitindo um desempenho satisfatório em uma vasta variedade de condições operacionais dos motores, sendo que, as propriedades desse combustível variam em função dos teores dos seus componentes.

As propriedades que mais influenciam no desempenho dos veículos do ciclo Diesel são o *número de cetano* e a *volatilidade*. O *número de cetano* ou *cetanagem* mede a qualidade de ignição do óleo diesel e tem influência direta na partida do motor, no funcionamento sob carga e nas emissões de gases.

Ao contrário da gasolina, que será tanto melhor quanto maior forem suas propriedades antidetonantes, no óleo diesel a autoignição é uma característica desejável.

Entrar em ignição no momento certo é um requisito para que se consiga o máximo aproveitamento da energia do óleo diesel, proporcionando uma combustão o mais completa possível.

Combustíveis com um número de cetanos adequados apresentam melhor partida a frio, menor erosão dos pistões, menor tendência a depósitos na câmara de combustão, menor tendência a pós-ignição,

menor consumo e emissões mais controladas, principalmente de CO, hidrocarbonetos, NO_x e materiais particulados.

Geralmente são adicionados ao óleo diesel substâncias aditivas melhoradoras do número de cetano. As famílias de substâncias mais utilizadas são os nitratos de alquila, nitratos de ésteres e alguns peróxidos.

No Brasil os óleos diesel são classificados como:

- Óleo diesel A: produzido nas refinarias, nas centrais de matérias-primas petroquímicas e nos formuladores, sem adição de biodiesel e destinado a veículos de uso rodoviário;
- Óleo diesel B: óleo diesel A adicionado de biodiesel no teor estabelecido pela legislação vigente.

De acordo com a Lei nº 13.033, de 24 de setembro de 2014, o óleo diesel comercializado no Brasil deve conter uma proporção de 7% de biodiesel em sua composição, a partir de novembro de 2014.

Esse percentual pode ser reduzido a 6%, por motivo justificado e de interesse público, de acordo com o Conselho Nacional de Política Energética - CNPE. Para os segmentos agrícolas, de construção e industrial somente são permitidos a comercialização dos óleos diesel B de uso rodoviário.

O incremento de biodiesel ao diesel comum tem por objetivo reduzir as emissões de poluentes, além de incentivar a produção e uso de biocombustíveis em larga escala no Brasil. Essa adição não implica em prejuízo ao funcionamento dos motores de combustão interna, nem na necessidade de modificações no motor para adaptações ao novo combustível. Por ser o biodiesel um composto oxigenado, sua adição ao diesel potencializa as reduções de CO e de materiais particulados pelo escapamento. Também são reduzidas as emissões de hidrocarbonetos. Além disso, os teores de enxofre e aromáticos são praticamente nulos no biodiesel. Todavia, assim como no caso da adição de álcool a gasolina, a adição de biodiesel ao diesel tende a aumentar as emissões de NO_x.

Em relação ao enxofre, os teores desse elemento influenciam diretamente nas emissões e na formação de depósitos e ocorrências de corrosão no motor. Dessa forma, o enxofre é um elemento indesejável nos combustíveis derivados do petróleo. No Brasil, a partir de janeiro de 2014 só podem ser comercializados dois tipos de óleo diesel: o óleo diesel S10, com teor de enxofre máximo de 10 mg/kg e o óleo diesel S500, com teor de enxofre máximo de 500 mg/kg. Os veículos a diesel fabricados a partir de 2012 devem utilizar o óleo diesel S10. Nesses veículos os motores possuem tecnologia desenvolvida para reduzir as emissões de NO_x . Somente o óleo diesel S500 é distribuído obrigatoriamente em todo o território nacional, em substituição ao óleo diesel S1800, com teor de enxofre máximo de 1800 mg/kg. Obviamente, essas medidas, ditadas pelo Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE, promovem redução nas emissões de SO_x em todos os setores onde há uso de veículos e máquinas motoras movidas a diesel.

4. EMISSÕES

4.1. Monóxido de carbono (CO)

Em motores, o CO resulta da combustão incompleta de hidrocarbonetos, o que significa uma redução na eficiência. Na primeira etapa da combustão de um hidrocarboneto, ocorre a quebra do combustível com formação do CO, que depois é oxidado a CO_2 . Assim, a formação do CO é função da relação combustível + ar e do nível de homogeneização da mistura. Também pode ocorrer dissociação do CO_2 , devido a altas temperaturas.

Todos os processos de combustão abaixo da proporção estequiométrica de combinação do combustível com o oxigênio do ar geram a formação de CO. Os motores de ciclo Otto operam geralmente com relação de mistura próxima a estequiometria em cargas parciais, e ricas a plena carga, por isso as emissões de CO nesse tipo

de motor são maiores que nos motores de ciclo Diesel, que geralmente funcionam com excesso de ar na mistura.

4.2. Dióxido de carbono (CO₂)

O CO₂ é um produto dos produtos primários, resultantes da combustão de hidrocarbonetos. Por ser um dos gases responsáveis pelo fenômeno do aquecimento global, tem-se investido em recursos tecnológicos para reduzir o consumo de combustível e aumentar a eficiência de motores.

4.3. Óxidos de nitrogênio (NO_x)

O termo NO_x se refere a soma de monóxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂). Quando na atmosfera, o NO rapidamente é convertido em NO₂, por isso as emissões de NO_x são sempre calculadas considerando o NO e o NO₂.

No motor, os NO_x são formados devido as reações do nitrogênio presente no combustível e o oxigênio do ar. Também são formados pela oxidação do nitrogênio do ar devido às altas temperaturas no interior da câmara de combustão.

As tecnologias empregadas para redução de NO_x envolvem formas de reduzir a temperatura da chama e controlar a razão de equivalência em determinados pontos da chama, como a recirculação dos gases de escape – EGR (*Exhaust Gas Recirculation*).

A tecnologia EGR, que em português significa Recirculação de Gases de Exaustão, é bastante empregada na fabricação dos caminhões mais modernos. Nela, parte dos gases de exaustão é reutilizada na mistura diesel e ar durante a combustão, para diminuição dos níveis de NO_x.

4.4. Hidrocarbonetos

Os hidrocarbonetos que são eliminados nos gases de escape são todos os hidrocarbonetos que deixam a câmara de combustão sem serem oxidados, formados pela decomposição térmica do combustível em hidrocarbonetos de menor peso.

Podem ser formados junto as paredes da câmara, onde a temperatura não é suficiente para completar a reação e, em regiões da câmara em que a mistura é excessivamente rica ou pobre.

A presença de hidrocarbonetos nos gases de escape do motor Diesel é uma das responsáveis pelo aparecimento de fumaça branca ou azul. As emissões de NO_x pelos motores do ciclo Diesel, por funcionarem com excesso de ar, são cerca de dez vezes menores que nos motores ciclo Otto.

4.5. Aldeídos

Os aldeídos são formados a baixas temperaturas de combustão, como no caso de baixas cargas no motor do ciclo Diesel.

No motor do ciclo Otto utilizando etanol, principalmente no período de aquecimento, também ocorre formação de aldeídos.

4.6. Compostos de enxofre (SO_2 e H_2S)

Os compostos de enxofre são formados pela reação do enxofre presente no combustível, e os teores emitidos, é função da percentagem de enxofre no combustível e da razão combustível + ar.

Para redução desses compostos, atualmente, por força de lei, as concentrações de enxofre são limitadas tanto na gasolina como no óleo diesel.

4.7. Material particulado

O material particulado é resultado da combustão incompleta. Os fatores que controlam a emissão desse material são a temperatura do gás, a disponibilidade de combustível não queimado e o oxigênio.

O material particulado, bem como os NO_x são as principais emissões dos motores do ciclo Diesel. Nos motores do ciclo Otto, a emissão de particulados é praticamente nula.

REFERÊNCIAS

BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna**, v. 1. São Paulo: Blucher, 2012.

BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna**, v. 2. São Paulo: Blucher, 2012.

LENZI, E.; FAVERO, L. O. **Introdução a química da atmosfera: ciência, vida e sobrevivência**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

MIALHE, L. G. **Máquinas motoras na agricultura**. São Paulo: EPU/EDUSP, 1980.

SILVA, F. M. **Motores e tratores agrícolas**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2003.

CAPÍTULO 3

*Estimativa do balanço entre a emissão de gases carbônicos em máquinas e frota de veículos **versus** sequestro de carbono em florestas plantadas*

Flávio Cipriano de Assis do Carmo

Nilton Cesar Fiedler

INTRODUÇÃO

Com as mudanças de temperatura que vem ocorrendo no clima do mundo, estudos estão sendo realizados para discutir a respeito do aquecimento do planeta. Porém, ainda existem várias teorias controversas entre os cientistas. No entanto, sabe-se que está aumentando a concentração de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera. Entre os motivos desse aumento de concentração dos gases, estão relacionados às práticas agrícolas e as mudanças do uso do solo por meio do desmatamento e suas consequências que são as principais fontes de emissão dos GEEs (DENARDIN *et al.*, 2014). Dessa forma, reuniões com diversos especialistas da área, estão sendo realizados com o objetivo de estabelecer metas de redução da emissão de GEE.

Como resultados desses encontros, foram criados os mecanismos de desenvolvimento limpo (MDL) com o objetivo de auxiliar o processo de redução de emissões de GEE ou de remoção de carbono por parte dos países industrializados, sendo permitido a esses países financiarem projetos de florestamento e reflorestamento em países em desenvolvimento (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 2009).

Em 2009, o Brasil firmou um compromisso, voluntário, de redução das emissões de GEE, entre 36,1% e 38,9% até o ano de 2020 (BRASIL, 2009; BRIANEZI *et al.*, 2014). Dessa forma, com o financiamento de projetos de MDL na categoria de florestamento e reflorestamento, as empresas florestais brasileiras estão sendo estimuladas a desenvolverem projetos com técnicas de produção que reduzam as emissões dos GEE, visando um aumento de renda por meio da comercialização de créditos de carbono e por consequência uma maior viabilidade do empreendimento florestal.

Para a empresa ter aprovação de um projeto de MDL, essa precisa comprovar a efetiva redução de emissão de GEE no seu processo de produção, ou seja propor alternativas que reduzam a emissão de GEE no seu processo produtivo. Segundo Ávila (2009), o país na qual

será implementado o projeto, por meio de uma Comissão Intermunicipal de Mudanças do Clima, pode auferir certificados que comprovem a redução. Tais certificados são denominados Certificados de Emissões Reduzidas - CER.

Para isso, é necessário que as empresas quantifiquem a concentração de carbono presente em suas florestas (raízes, caules, galhos e folhas) e façam posterior análise de emissão de carbono pela operação das atividades de silvicultura, colheita, transporte e processamento da madeira.

Após esse estudo da quantificação de sequestro e emissão de carbono no investimento florestal, a empresa deve propor um projeto de MDL com metodologias que reduzam a emissão desses gases, tornando-se assim aptas a obter o certificado de emissões reduzidas e posterior comercialização do crédito de carbono no mercado mundial.

Dessa forma, objetivou-se neste capítulo, por meio de um estudo de caso, simular o balanço de sequestro de carbono pela floresta e a emissão de gases das máquinas e frota de veículos durante o processo produtivo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Caracterização da área de estudo

Para o estudo, foi simulado uma empresa florestal, com áreas de plantios de eucalipto localizadas no sul do estado do Espírito Santo. Para esse estudo de caso, adotou-se que a empresa possui uma área total de 1430 hectares, na qual 1000 ha são destinados a plantios de eucaliptos em áreas planas, 287 ha de reserva legal e Área de Preservação Permanente (APP) para cumprimento da legislação vigente e 143 ha para infraestrutura como estradas, escritório e galpão de manutenção e almoxarifado.

O espaçamento médio de plantio adotado foi de 3x3 metros totalizando aproximadamente 1112 mudas por hectare. A espécie

plantada foi o híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. Para o estudo, estimou-se uma produtividade média de 220 m³.ha⁻¹ (valor próximo ao encontrado na região).

O ciclo de corte utilizado na empresa é de 6 anos (subdividido em seis Unidades de Corte Anual - UCA), sendo que cada UCA apresenta 167 hectares, de forma que em todos os anos, terá uma unidade cortada. Para a avaliação foi adotado que as atividades de silvicultura e colheita florestal ocorrem em 225 dias durante o ano (equivalente a 9 meses de trabalho), devido às condições adversas de clima na região. Entretanto, para a atividade de transporte florestal foi considerado que essa é realizada em todos os meses do ano (totalizando 300 dias de operação). Na tabela 1, estão descritas as operações florestais realizadas no estudo de caso.

Tabela 1 - Descrição das operações florestais

Operações Florestais	Descrição	Realização
Roçada	Processo de limpeza do terreno, no qual se retiram plantas indesejáveis da área.	Mecanizada
Capina a química pré-plantio	Procedimento em que se usam herbicidas para eliminar plantas indesejáveis. Feito de forma manual com o pulverizador costal antes do plantio.	Manual
Marcação e alinhamento	Etapas de planejamento e demarcação das covas na área. Realizado de forma manual com o uso de barbantes, trena e enxadão.	Manual
Adubação pré-plantio	Aplicação de adubo conforme análise de solo na cova de plantio. Após depósito do adubo na cova, esse deve ser misturado manualmente ao solo.	Manual
Enchimento de cova	Processo de preenchimento das covas com solo com o uso de enxada.	Manual
Combate às formigas cortadeiras	Distribuição manual e de forma sistemática de formicidas abrangendo toda a área de plantio.	Manual

Plantio e Replântio	Processo de introdução das mudas nas covas. Essa operação é realizada de forma manual com o uso de chucho. Procedimento de substituição das mudas mortas ou que não atingiram desenvolvimento esperado.	Manual
Coroamento	Eliminação de invasoras próximas da muda (círculo). Realizada de forma manual com enxada (raio médio 60 cm).	Manual
Capina química pós-plantio	Procedimento em que se usam herbicidas para eliminar plantas indesejáveis.	Mecanizado
Adubação de cobertura e de manutenção de 1 ano	Distribuição manual do adubo nas laterais da muda. O tipo e dosagem variam conforme análise de solo.	Manual
Aplicação de calcário	Distribuição a lanço de calcário, com a dosagem conforme resultado de análise de solo. Fonte de cálcio e magnésio.	Manual
Aceiro	Raspagem de uma faixa nas margens das áreas plantadas (aproximadamente 3 metros de largura) para maior proteção contra incêndios. Realizado com o uso de foice, enxada e rastelo.	Manual
Colheita	Conjunto de operações para derrubar, processar e extrair a madeira até a margem da estrada.	Corte semi-mecanizado e Extração mecanizado
Carregamento	Consiste em pegar as toras na pilha com a grua, carregar e organizar no compartimento de carga dos caminhões.	Mecanizado
Transporte	Movimentação da madeira empilhada na margem da estrada ao pátio da Empresa, via modal rodoviário.	Mecanizado

A empresa possui dois tratores agrícolas, sendo um direcionado para realizar as atividades de silvicultura (roçada, subsolagem e capina

química) e proteção florestal (construção de aceiros) e o outro (trator agrícola autocarregável) para realizar a extração da madeira do interior do talhão e posterior carregamento dos caminhões. Para o transporte da madeira até o seu local de destino (distância média de 100 km) são utilizados 2 caminhões com capacidade média de 17,25 m³ de madeira por viagem. Para a administração das atividades florestais a empresa possui uma camionete que percorre uma distância média de 3.200 km por mês. Na tabela 2 está a produtividade e o consumo médio das máquinas e frotas de veículos.

Tabela 2 - Descrição das Máquinas utilizadas no estudo

Máquina	Qt	Atividades	Realização por ano	Product.
Trator agrícola	1	Aceiro	6 vezes (1 para cada UCA)	1,47 ha.he ⁻¹
		Subsolagem	Somente na UCA de ano zero	1,15 ha.he ⁻¹
		Capina química	4 vezes (3 para a UCA de 1 ano, e 1 para a UCA de 2 anos)	1,44 ha.he ⁻¹
		Roçada	3 vezes (2 para a UCA de 1 ano, e 1 para a UCA de 2 anos)	4,97 ha.he ⁻¹
Trator agrícola auto-carregável	1	Extração da madeira	Ano inteiro	33,84 m ³ .he ⁻¹
		Carregamento	Ano inteiro	52,5 m ³ .he ⁻¹
Caminhões	2	Transporte de madeira	Ano inteiro	7,96 m ³ .he ⁻¹
Camionete	1	Administração da fazenda	Ano inteiro	128 km.dia ⁻¹
Motosserra	6	Corte Florestal	Ano inteiro	3,7 m ³ .he ⁻¹

Nota: Qt.: Quantidade; UCA: Unidade de Corte Anual; Product.: Produtividade.

Fonte: Adaptado de Plaster (2010), Campos (2013).

As horas efetivas necessárias e o consumo de combustível e óleo lubrificante das máquinas para realizarem as atividades estão descritos na tabela 3.

Tabela 3 - Produtividade, horas necessárias, consumo de combustível e lubrificantes das máquinas utilizadas

Máquina	Produtividade	Horas necessárias p/ atender estudo de caso	Cons. Combustível	Cons. Óleo Lubrificante (l.he ⁻¹)
Trator agrícola	1,47 ha.he ⁻¹	681.6	13,41 L.he ⁻¹	1,12 l.he ⁻¹
	1,15 ha.he ⁻¹	145.22		
	1,44 ha.he ⁻¹	463.88		
	4,97 ha.he ⁻¹	100.8		
Trator agrícola auto-carregável	33,84 m ³ .he ⁻¹	1085,69	9 L.he ⁻¹	0,75 l.he ⁻¹
	52,5 m ³ .he ⁻¹	699.81		
Caminhões	7,96 (m ³ .he ⁻¹)	4615,58	6.82L.he ⁻¹	0,33 l.he ⁻¹
Camionete	128 km.dia ⁻¹	-	8 km ⁻¹ .L ⁻¹	0,16 km ⁻¹ .l ⁻¹
Motosserra	3,7 m ³ .he ⁻¹	9929,73	0,85L.he ⁻¹	0,05 l.he ⁻¹

Nota: Foi adotado o consumo de óleo lubrificante para trator agrícola (12% do consumo de óleo diesel); Caminhões (20,67% do consumo de óleo diesel); camionete (0,005% do consumo de óleo diesel) e motosserra (18,07% do consumo de gasolina). | Fonte: Adaptado de Plaster (2010).

As horas necessárias foram determinadas através da produtividade, área necessária e quilometragem de transporte de madeira (distância média de 100 km).

2.2. Quantificação da emissão de Gases por meio do consumo de combustíveis e lubrificantes

Para a quantificação da emissão de gases, foram utilizados os dados de cálculo de emissão apresentados pelo relatório de emissão de GEE (referente ao ano de 2010) disponível pela BM&FBOVESPA, proveniente da metodologia proposta pelo Protocolo GHG Brasil (2011), conforme tabela 4.

Tabela 4 - Cálculo das emissões de gases

Combustível	Consumo (l)	Emissão (kgCO _{2e})		Emissão (tCO _{2e})
		CO ₂	CH ₄	
Gasolina	100	174,53	0,35	0,18
Etanol	100	36,72	0,01	0,04
Diesel	100	254,73	0,03	0,25
Biodiesel	100	12,5	-	0,01
Lubrificantes	100	271,8	-	0,27

Fonte: Adaptado de BM&FBOVESPA (2011) e Protocolo GHG Brasil (2011).

Para o computo da emissão de carbono pelas máquinas e frota de veículos foi utilizado um software desenvolvido pelo Programa Brasileiro GHG Protocol. Após a estimativa da emissão de carbono de cada máquina e veículo utilizados na empresa, os valores foram somados, quantificando assim, a emissão total de carbono.

A partir dos dados de carbono acumulados nas florestas por Netto (2008), na qual a floresta de eucalipto sequestra 31,45 ton de CO_{2e} por ha⁻¹.ano⁻¹ foi realizado o cálculo de balanceamento de carbono do total de áreas plantadas pela empresa no estudo de caso.

2.3. Simulação da redução de emissão de carbono em virtude da substituição de combustíveis fósseis por combustíveis renováveis

Para reduzir a emissão de carbono durante a operacionalização das atividades florestais, foi realizado uma simulação substituindo a utilização de combustíveis fósseis (gasolina e óleo diesel) por combustíveis renováveis (etanol e biodiesel).

Para a realização dessa simulação, foram identificados todos os veículos que possuem a característica de bi combustível (flex) e posterior substituição do consumo de gasolina por etanol (aumentando o consumo em litros em 32%, visto que o rendimento do etanol é em média 32% menor em relação ao rendimento da gasolina).

Em relação a substituição do consumo de óleo diesel para o biodiesel foram analisados três cenários de biodiesel:

- 5% de biodiesel e 95% de óleo diesel (B5)
- 10% de biodiesel e 90% de óleo diesel (B10)
- 20% de biodiesel e 80% de óleo diesel (B20)

Após essa substituição de combustíveis, foi quantificado a redução de emissão parcial (em cada atividade florestal) e total de carbono no processo produtivo da empresa.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos dados de produtividade obteve-se o consumo anual de combustíveis (óleo diesel e gasolina) e óleos lubrificantes das máquinas, conforme tabela 5.

Tabela 5 - Consumo de Combustíveis e óleos lubrificantes das máquinas

Máquina	Produtividade	Consumo anual de Combustível (litros)	Consumo anual Óleo Lubrificante (litros)	(%)
	1,47 ha.he ⁻¹			
Trator agrícola	1,15 ha.he ⁻¹	18660,96 (Óleo Diesel)	1554,96	31,16
	1,44 ha.he ⁻¹			
	4,97 ha.he ⁻¹			
Trator agrícola auto-carregável	33,84 m ³ .h ⁻¹	16069,44 (Óleo Diesel)	1338,96	26,82
	52,5 m ³ .he ⁻¹			
Caminhões	7,96 (m ³ .he ⁻¹)	31478,16 (Óleo Diesel)	1523,05	30,52
Camionete	128 km.dia ⁻¹	4800 (Óleo Diesel)	24	0,48
Motosserra	3,7 m ³ .he ⁻¹	9929,52 (Gasolina)	549,36 (óleo 2 tempos)	11,01
Total	-	80938,08	4990,33	100

Conforme descrito na tabela 6, a empresa simulada nesse estudo de caso, consome anualmente 80.938,08 litros de combustível (71.008,56 litros de óleo diesel e 9.929,52 litros de gasolina) e 4.990,33 litros de óleos lubrificantes. O trator agrícola foi o que obteve o maior consumo de combustíveis e lubrificantes (31,16%) do total consumido na empresa.

Com o consumo anual de combustíveis e óleos lubrificantes, pode-se estimar a emissão de carbono nas operações florestais (Tabela 6).

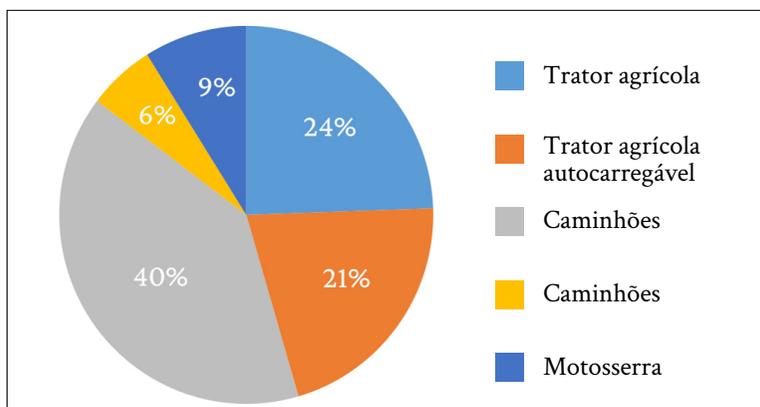
Tabela 6 - Emissão de gases pelas máquinas

Máquina	Tipo de Comb.	Consumo (Litros)	Emissões (kg)			Emissões Totais CO _{2e} (kg)	Emissões Totais CO _{2e} (ton.ha)
			CO ₂	CH ₄	N ₂ O		
Trator agrícola	Óleo diesel	18660,96	47352,1	3,73	1,87	47355,92	0,31
	Óleo lubrificante	1554,96	4250,02	-	-	4250,017	
Trator agrícola auto-carregável	Óleo diesel	15265,97	1908,25	3,05	1,53	1911,299	0,27
	Óleo lubrificante	1338,96	3659,65	-	-	3659,645	
Caminhões	Óleo diesel	29904,25	75882,0	5,98	2,99	75888,02	0,50
	Óleo lubrificante	1523,05	4162,8	-	-	4162,8	
Camionete	Óleo diesel	4800,00	12180	0,96	0,48	12180,96	0,07
	Óleo lubrificante	24,00	65,60	-	-	65,5968	
Motosserra	Gasolina	9929,52	17272,4	5,96	1,99	17278,36	0,11
	Óleo 2 tempos	549,36	1501,51	-	-	1501,51	
Total	-	-	211096	20.15	9.09	211116.4	1.26

Nota: Tipo de Comb.: Tipo de combustível.

Conforme observado na tabela 6, as emissões totais de CO_{2e} na empresa foram de 1,26 toneladas por hectare. Na figura 1, está demonstrado o percentual das emissões emitidas por máquina analisada.

Figura 1 - Percentual de gases emitidos por máquina



Fonte: Elaborada pelos autores

Como pode ser observado na figura 1, o caminhão obteve a maior emissão de gases (40%) seguido do trator agrícola (24%) e trator agrícola autocarregável (21%). A caminhonete foi o veículo que emitiu a menor quantidade de gases poluentes (6%). Na tabela 8, estão descritos a emissão de gases por tipo de combustível utilizado.

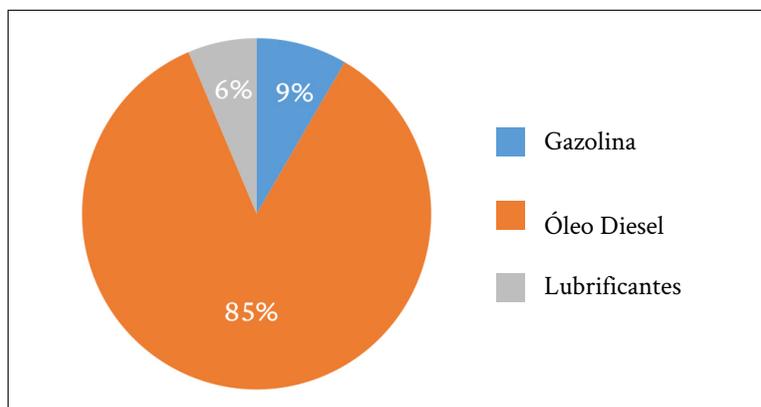
Tabela 7 - Emissão de gases por tipo de combustível

Tipo de Combustível	Consumo anual (litros)	Emissões (kg)			Emissões Totais CO _{2e} (kg)	Emissões Totais CO _{2e} (ton.ha ⁻¹)
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O		
Gasolina	9929,52	17273,06	6,13	1,96	18011,14	0,107851
Óleo Diesel	71008	180179,27	12,70	5,31	182077,62	1,090285
Lubrificantes	4990	13639,18	-	-	13639,18	0,081672
Total	-	211089,98	18,83	7,27	211116,10	1,264168

Como pode ser observado na tabela 8, o consumo de óleo diesel representou a maior emissão de CO_{2e} (cerca de 86% da emissão),

seguido da gasolina (8,5%) e do óleo lubrificantes (5,5% da emissão total). Na figura 2, está demonstrado o percentual das emissões emitidas por combustível.

Figura 2 - Percentual de gases emitidos por combustível



Fonte: Elaborada pelos autores

Como pode ser observado na tabela 8 e figura 2, o óleo diesel foi o responsável pela maior emissão de gases poluentes (182.077,62 kg de CO_{2e}), o que representa cerca de 85% da emissão total.

3.1. Simulação da redução de emissão de carbono em virtude da substituição de combustíveis fósseis por combustíveis renováveis

Para o primeiro cenário, foi simulado uma redução de emissão de gases substituindo o consumo de óleo diesel por biodiesel B5 (95% de óleo diesel e 5% de biodiesel), além da substituição de óleo diesel por etanol no consumo da camionete (Tabela 8).

Tabela 8 - Simulação do primeiro cenário de redução da emissão de gases poluentes

Máquina	Tipo de combustível	Consumo (litros)	Emissões (kg)			Emissões Totais CO _{2e} (kg)	Redução emissão relação cenário real (%)
			CO ₂	CH ₄	N ₂ O		
Trator agrícola	Óleo diesel	17727,91	44984,58	3,55	1,77	44989,9	4,36
	Biodiesel	933,05	116,63		0,09	116,72	
	Óleo lubrificante	1554,96	4250,02			4250,02	
Trator agrícola auto-carregável	Óleo diesel	15265,97	38737,39	3,05	1,53	38741,97	4,36
	Biodiesel	803,47	100,43		0,08	100,51	
	Óleo lubrificante	1338,96	3659,65			3659,65	
Caminhões	Óleo diesel	29904,25	75882,04	5,98	2,99	75891,01	4,51
	Biodiesel	1573,91	196,74		0,16	196,9	
	Óleo lubrificante	1523,05	4162,8			4162,8	
Camionete	Etanol	4800	1762,56	0,96	1,92	1765,44	85,05
	Óleo lubrificante	24	65,6			65,6	
	Gasolina	9929,52	17272,4	5,96	1,99	17280,34	
Motos-serra	Óleo 2 tempos	549,36	1501,51			1501,51	0
Total	-	-	192692,3	19,5	10,53	192722,4	9,39
Total CO_{2e} (ton.ha⁻¹)^{2e}	-	-	-	-	-	1,155	

Nota: Nessa simulação, substituí o consumo de óleo diesel por biodiesel B5 (95% de óleo diesel e 5% de biodiesel), além da substituição de gasolina para etanol no consumo da camionete.

A redução da emissão para o primeiro cenário foi de 9,39%, conforme tabela 8. Sendo que somente com a substituição de gasolina para o etanol na camionete houve uma redução de 85,05% da emissão de gases (visto que a emissão do óleo diesel é seis vezes maior do que o etanol), seguido de 4,51% para os caminhões e 4,36% para os tratores.

Para o segundo cenário, foi simulado uma redução de emissão de gases substituindo o consumo de óleo diesel por biodiesel B10 (90% de óleo diesel e 10% de biodiesel), além da substituição de gasolina por etanol no consumo da camionete (Tabela 9).

Tabela 9 - Simulação do segundo cenário de redução da emissão de gases poluentes

Máquina	Tipo de combustível	Consumo (litros)	Emissões (kg)			Emissões Totais CO _{2e} (kg)	Redução emissão relação cenário real (%)
			CO ₂	CH ₄	N ₂ O		
Trator agrícola	Óleo diesel	16794,86	42616,97	3,35	1,68	42622,01	8,72
	Biodiesel	1866,096	233,262		0,19	233,45	
	Óleo lubrificante	1554,96	4250,017			4250,02	
Trator agrícola auto-carregável	Óleo diesel	14462,5	36698,58	2,89	1,45	36702,92	8,72
	Biodiesel	1606,944	200,88		0,16	201,03	
	Óleo lubrificante	1338,96	3659,65			3659,65	
Caminhões	Óleo diesel	28330,34	71888,25	5,67	2,83	71896,75	9,03
	Biodiesel	3147,816	393,48		0,31	393,79	
	Óleo lubrificante	1523,05	4162,8			4162,8	
Camionete	Etanol	4800	1762,56	0,96	1,92	1765,44	85,05
	Óleo lubrificante	24	65,5968			65,60	
Motos-serra	Gasolina	9929,52	17272,4	5,96	1,99	17280,34	7,64
	Óleo lubrificante	549,36	1501,51			1501,51	
Total	-	-	184705,9	18,84	10,5	184735,3	13,18
Total CO_{2e} (ton.ha⁻¹)	-	-	-	-	-	1,11	

Nota: Nessa simulação, substituí o consumo de óleo diesel por biodiesel B10 (90% de óleo diesel e 10% de biodiesel), além da substituição de gasolina por etanol no consumo da camionete.

A redução total da emissão para o segundo cenário em relação ao real foi de 13,18%, o que resulta, numa emissão de 1,11 toneladas

por hectare, conforme tabela 9. Para o terceiro cenário, foi simulado uma redução de emissão de gases substituindo o consumo de óleo diesel por biodiesel B20 (80% de óleo diesel e 20% de biodiesel), além da substituição de óleo diesel para etanol no consumo da camionete (Tabela 10).

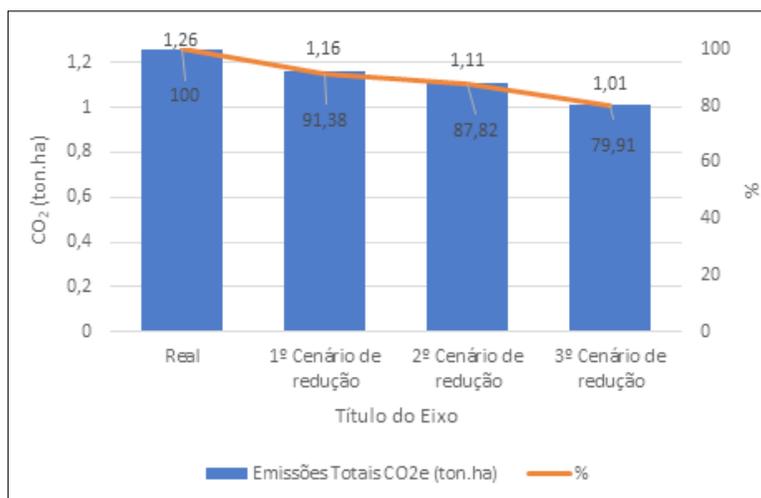
Tabela 10 - Simulação do terceiro cenário de redução da emissão de gases poluentes

Máquina	Tipo de combustível	Consumo (litros)	Emissões (kg)			Emissões Totais CO _{2e} (kg)	Redução emissão relação cenário real (%)
			CO ₂	CH ₄	N ₂ O		
Trator agrícola	Óleo diesel	14928,77	37881,75	2,99	1,49	37886,23	
	Biodiesel	3732,192	466,52		0,37	466,90	17,45
	Óleo lubrificante	1554,96	4250,017			4250,02	
Trator agrícola auto-carregável	Óleo diesel	12855,55	32620,96	2,51	1,29	32624,82	
	Biodiesel	3213,888	401,74		0,32	402,06	17,45
	Óleo lubrificante	1338,96	3659,65			3659,65	
Caminhões	Óleo diesel	25182,53	63900,66	5,04	2,52	63908,22	
	Biodiesel	6295,632	786,95		0,63	787,58	18,07
	Óleo lubrificante	1523,05	4162,8			4162,8	
Camionete	Etanol	4800	1762,56	0,96	1,92	1765,44	
	Óleo lubrificante	24	65,5968			65,60	85,05
Motos-serra	Gasolina	9929,52	17272,4	5,96	1,99	17280,34	
	Óleo lubrificante	549,36	1501,511			1501,51	7,64
Total	-	-	168733,1	17,5	10,53	168761,2	21,07
Total CO_{2e} (ton.ha⁻¹)	-	-	-	-	-	1,01	

Nota: Nessa simulação, substituí o consumo de óleo diesel por biodiesel B20 (80% de óleo diesel e 20% de biodiesel), além da substituição de gasolina por etanol no consumo da camionete.

A redução da emissão para o terceiro cenário foi de 21,01% o que resulta numa emissão de 1,01 toneladas por hectare, conforme tabela 10. Assim, a redução da emissão de gases nos caminhões foi de 18,07% e 17,45% nos tratores. Após a simulação realizada nos três cenários analisados, obteve-se o percentual de redução de emissão para cada cenário avaliado (Figura 3).

Figura 3 - Redução de emissão para cada cenário avaliado



Fonte: Elaborada pelos autores

Como pode ser observado na figura 3, para o primeiro cenário consegue-se reduzir 8,71% a emissão de gases poluentes. Para o cenário 2, a redução foi de 12,5%, enquanto no terceiro ocorreu uma redução de 20,06% da emissão de gases poluentes.

3.2. Balanço de emissões de GEE pelo processo produtivo e sequestro de carbono pela floresta

Com base nos valores de gases de efeito estufa emitidos pelo processo produtivo florestal na situação real e nos três cenários de redução

com a substituição de combustíveis e no quantitativo de carbono sequestrado pela floresta por ano (NETTO, *et al.*, 2008), se calculou o balanço entre emissões e sequestro de carbono (Tabela 12).

Tabela 11 - Balanço de carbono para o estudo de caso

	Emissões Totais CO₂e (ton.ha)	Acúmulo carbono ton.ha⁻¹-(NETTO <i>et al.</i>, 2008)	% de estoque de carbono
Real	1,264	31.45	99.960
1º cenário de redução	1,155	31.45	99.963
2º cenário de redução	1,106	31.45	99.965
3º cenário de redução	1,011	31.45	99.968

Como pode ser observado na tabela 12, nesse estudo de caso, o acúmulo de carbono na floresta é muito superior ao emitido pelas máquinas durante a execução das operações florestais, ou seja, com base nos cálculos feitos e literaturas referenciadas, o reflorestamento de eucalipto consegue sequestrar cerca de 30,19 toneladas de CO₂e por hectare plantado.

Nesse estudo de caso menos de 1% do balanço total é proveniente dos gases de efeito estufa emitidos pelas máquinas e equipamentos do processo produtivo florestal.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a problemática da consequência dos gases de efeito estufa em relação às mudanças climáticas globais que está sendo bastante discutida no cenário mundial, a quantificação das emissões de gases poluentes no processo produtivo é de grande importância para o setor florestal, visto que o mercado exige cada vez mais das empresas uma produção de bens e serviços menos poluentes.

Além dessas pressões sócio-ambientais do mercado sobre as empresas, o investimento em tecnologias limpas e mais eficientes para o setor florestal poderá auxiliar as empresas a desenvolverem projetos de mecanismos de desenvolvimento limpo na categoria de reflorestamento, florestamento e sequestro de carbono, visando aumentar o financiamento de pesquisas e as receitas das empresas e produtores rurais por meio dos financiamentos de créditos de carbono.

Como observado nas simulações realizadas nesse estudo, percebe-se que a quantidade de carbono absorvida pelas florestas é muito superior ao emitido pelas máquinas durante o processo de desenvolvimento da floresta. Isso infere que os empreendimentos florestais apresentam uma grande alternativa para a redução dos gases de efeito estufa e contribuir muito para a remoção de gases poluentes no planeta.

REFERÊNCIAS

BRASIL. **Lei nº 12.187 de 29 de dezembro de 2009**. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília: 2009.

BM & FBOVESPA. **Inventário corporativo de emissões diretas e indiretas de gases de efeito estufa - ano base 2010**. 2011. Disponível em: <http://www.bmfbovespa.com.br/Novo-Valor/pt-br/download/Inventario-de-missoes-GEE-2010.pdf> Acesso em: 20 mar. 2014.

BRIANEZI, D.; JACOVINE, L. A.; SOARES, C. P.; GONÇALVES, W.; ROCHA, S. J. S. Balanço de emissões e remoções de gases de efeito estufa no campus da Universidade Federal de Viçosa. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 1, p. 1-11. Seropédica: 2014.

CAMPOS, A. A. **Desempenho operacional e análise de custos da implantação florestal mecanizada de eucalipto**. 66 f. Dissertação

(Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES: 2013.

DENARDIN, R. B. *et al.* Estoque de carbono no solo sob diferentes formações florestais, Chapecó, SC. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 1, p. 59-69. Santa Maria: 2014.

PROGRAMA BRASILEIRO GREENHOUSE GAS PROTOCOL - GHG PROTOCOL, 2011. **Guia para a elaboração de inventários corporativos de emissões de Gases do Efeito Estufa**, 2009. Disponível em: http://ghgprotocolbrasil.com.br/arquivos/152/especificações_pb_ghgprotocol.pdf Acesso em: 20 mar. 2014.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA - MCT. **O mecanismo de desenvolvimento limpo**: guia de orientação 2009, p. 131. Rio de Janeiro: Imperial Novo Milênio, FIDES, 2009. Disponível em: http://www.mct.gov.br/upd_blob/0205/205947.pdf Acesso em: 21 mar. 2014.

NETTO, S. P.; KAUANO, E. E.; CORAIOLA, M.; WEBER, S. H.; ERDELY, I. Estimativa do potencial de neutralização de dióxido de carbono no programa ivatneutracarbo em Tijucas do Sul, Agudos do Sul e São José dos Pinhais, PR. **Revista Acadêmica Ciência Agrárias e Ambientais**, v. 6, n. 2, p. 293-306. Curitiba: abr./jun. 2008.

PLASTER, O. B. **Fatores operacionais e de custos da colheita de pinus em áreas de clivosas no sul do estado do Espírito Santo**. 78 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES: 2010.

CAPÍTULO 4

*Técnicas promissoras
para redução da emissão
de gases poluentes em
máquinas e frota de
veículos florestais*

Flávio Cipriano de Assis do Carmo

Luciano José Minette

Nilton José Fiedler

1. IMPORTÂNCIA E CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A busca por maior competitividade, melhor preço de venda e a grande demanda pelos produtos florestais nos mercados interno e externo, levou as empresas a adotarem planejamentos mais criteriosos nas diversas etapas do processo de produção, visando o aumento da capacidade produtiva, redução de custos e melhoria na qualidade das operações. Assim, para atingir tal objetivo, as empresas florestais têm investido em tecnologias de melhoramento genético das espécies, de novos procedimentos operacionais e da mecanização.

Em razão dos elevados custos de produção e da complexidade das atividades, o setor florestal tem investido bastante em mecanização das operações de silvicultura, colheita e transporte florestal, visando aumento de produtividade e melhoria da qualidade das operações. No entanto, a mecanização nas operações florestais, geralmente depende de máquinas pesadas e potentes, que ao executar seu trabalho podem causar alguns efeitos negativos (FENNER, 2014).

Os impactos negativos da mecanização podem estar relacionados à degradação ambiental, bem como à compactação do solo devido ao peso das máquinas, além de elevado teor de partículas e gases poluentes que podem acarretar em danos à saúde humana. Dessa forma deve-se planejar as operações florestais de forma que se tenha uma alta produtividade, baixo custo e baixa emissão de gases poluentes.

2. MÉTODOS DE REDUÇÃO DE GASES

2.1. Substituição de Combustíveis Fósseis pelos biocombustíveis

Segundo a Agência Nacional de Petróleo (ANP, 2012), os biocombustíveis são derivados de biomassa renovável que podem substituir, parcial ou totalmente, os combustíveis derivados de petróleo e gás natural em motores a combustão ou em outro tipo de geração de energia.

Os principais tipos de biocombustíveis usados no Brasil são o etanol extraído de cana-de-açúcar e o biodiesel, que é produzido a partir de óleos vegetais ou de gorduras animais e adicionado ao óleo diesel de petróleo em proporções variáveis. Os biocombustíveis são caracterizados por serem menos poluentes, pelo fato de emitirem menos compostos em relação aos combustíveis fósseis no processo de combustão dos motores (ANP, 2013).

A Lei nº 11.097, publicada em 13 de janeiro de 2005, introduziu o biodiesel na matriz energética brasileira e ampliou a competência administrativa da ANP, que passou desde então a denominar-se Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis e assumiu as atribuições de especificar e fiscalizar a qualidade dos biocombustíveis e garantir o abastecimento do mercado, em defesa do interesse dos consumidores. A Agência também executa as diretrizes do Conselho Nacional de Política Energética para os biocombustíveis.

2.1.1. Etanol

O etanol (nome técnico do álcool etílico combustível) pode ser produzido a partir da sacarose da cana-de-açúcar no Brasil e da sacarina da beterraba e do amido de milho nos Estados Unidos da América (UNICA, 2009). O etanol é uma fonte de energia natural, limpa, renovável, sustentável e no Brasil é produzido o etanol hidratado com 5% de água, que abastece os automóveis flex e o etanol anidro (0,5% de água), misturado na gasolina numa proporção de 20% a 25%.

2.1.2. Biodiesel

O Biodiesel foi definido pela “National Biodiesel Board” dos Estados Unidos como derivado *monoalquil éster* de ácidos graxos de cadeia longa, proveniente de fontes renováveis, como óleos vegetais ou gordura animal, cuja utilização está associada à substituição de

combustíveis fósseis em motores de ignição por compressão (COSTA NETO *et al.*, 2004).

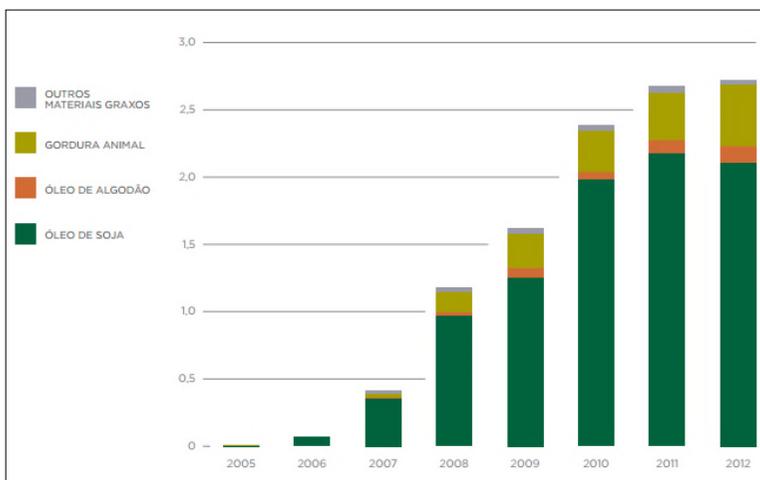
Como fonte alternativa de energia, o biodiesel é um biocombustível renovável e produzido a partir de óleo vegetal e álcool anidro na presença de catalisador. Esse processo é conhecido como transesterificação, sendo que a catálise pode ser alcalina, ácida ou enzimática. Desse processo também se extrai a glicerina, empregada para fabricação de sabonetes e diversos outros cosméticos (FERRARI *et al.*, 2005).

Segundo Câmara (2006), existem muitas matérias-primas de uso potencial para produção de biodiesel no Brasil, que podem ser divididas por classes de fontes renováveis:

- Óleos vegetais: líquidos à temperatura ambiente, como os óleos de soja, algodão, amendoim, babaçu, canola, dendê, girassol, mamona;
- Gorduras animais: pastosas ou sólidas à temperatura ambiente, como o sebo bovino, óleo de peixe, banha de porco, óleo de mocotó;
- Óleos e gorduras residuais: matérias-primas relacionadas ao meio urbano, como óleos residuais originários de cozinhas domésticas e industriais (óleo de fritura) gordura sobrenadante (escuma) de esgoto; óleos residuais de processamentos industriais.

Segundo dados da ANP (2013), a principal matéria-prima utilizada para a produção de biodiesel no Brasil (Figura 1) é o óleo de soja, que contribui com 81,36% da produção; em segundo lugar está a gordura bovina com 13,36%, em terceiro o óleo de algodão com 4,11% e o restante é composto por outros materiais graxos (0,56%): óleo de fritura usado (0,19%), gordura de porco (0,18%), óleo de palma (0,10%), gordura de frango (0,09%) e óleo de girassol (0,05%).

Figura 1 - matéria-prima para a produção de biodiesel no Brasil



Fonte: ANP, (2013).

O Biodiesel pode ser usado em motores ciclo diesel automotivo (caminhões, tratores, caminhonetes e automóveis) ou estacionários (geradores de eletricidade, calor, entre outros), na sua forma pura ou misturada com diesel de petróleo, em diversas proporções, não sendo necessária nenhuma modificação nos motores. Suas vantagens em relação ao óleo diesel estão descritos no quadro 1.

Quadro 1 - Propriedades complementares atribuídas ao biodiesel em comparação ao óleo diesel comercial

Características	Propriedades Complementares
Características químicas apropriadas	Livre de enxofre e compostos aromáticos, alto número de cetanos, ponto de combustão apropriado, excelente lubrificidade, não tóxico e biodegradável.
Ambientalmente benéfico	Nível de toxicidade compatível ao sal ordinário, com diluição tão rápida quanto a do açúcar (Departamento de Agricultura dos Estados Unidos).

Menos poluente	Reduz sensivelmente as emissões de (a) partículas de carbono (fumaça), (b) monóxido de carbono, (c) óxidos sulfúricos e (d) hidrocarbonetos policíclicos aromáticos.
Economicamente competitivo	Complementa todas as novas tecnologias do diesel com desempenho similar e sem a exigência da instalação de uma infraestrutura ou política de treinamento.
Reduz aquecimento global	O gás carbônico liberado é absorvido pelas oleaginosas durante o crescimento, o que equilibra o balanço negativo gerado pela emissão na atmosfera.
Economicamente atraente	Permite a valorização de subprodutos de atividades agroindustriais, aumento na arrecadação regional de ICMS, aumento da fixação do homem no campo e de investimentos complementares em atividades rurais.
Regionalização	Pequenas e médias plantas para produção de biodiesel, podem ser implantadas em diferentes regiões do país, aproveitando a matéria prima disponível em cada local.

Fonte: Rossi *et al.*, 2010.

3. OPORTUNIDADES DOS BIOCOMBUSTÍVEIS NO BRASIL

O Brasil por ser um país extenso apresenta um grande potencial para a produção de biocombustível, visto que apresenta regiões aptas para cultivos de matérias-primas (Quadro 2). Além disso o país necessita investir mais em tecnologias para aumentar a produtividade dessas culturas e por consequência melhorar a eficiência de ocupação e uso do solo com o aumento da produção de biocombustíveis.

Quadro 2 - Plantas oleaginosas disponíveis para produção de biodiesel no Brasil

Região	Óleos vegetais disponíveis
Norte	Dendê, babaçu e soja
Nordeste	Babaçu, soja, mamona, dendê, algodão e coco

Centro-oeste	Soja, mamona, algodão, girassol, dendê e gordura animal
Sudeste	Soja, mamona, algodão e girassol
Sul	Soja, milho, colza (canola), girassol e algodão

Fonte: Parente (2003).

Como pode ser observado no quadro 2, o Brasil tem grande potencial de produção de biodiesel a partir do óleo de soja, visto que a cultura agrícola pode ser produzida em todas as regiões do país.

Além disso, dados publicados pelo Ministério de Minas e Energia (MME, 2014), apresentados na tabela 1 e figura 2, mostram que a capacidade de produção dos biocombustíveis é bem maior do que é produzido atualmente no país. Ou seja, existe o potencial de aumento da produção. Porém, esse crescimento não ocorre principalmente pelos elevados preços desses biocombustíveis em relação aos combustíveis fósseis.

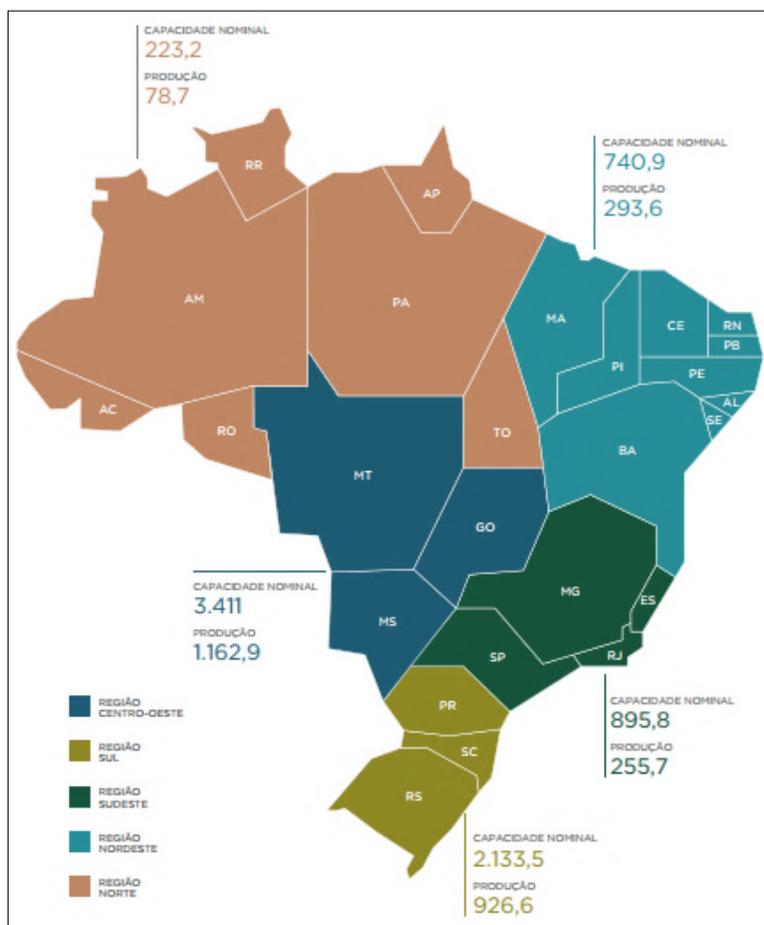
Tabela 1 - Números do setor de biocombustíveis (2012 e 2013)

	Etanol		Biodiesel	
	2012	2013	2012	2013
Produção (ano civil – milhões de m ³)	23,5	27,8	2,7	2,9
Consumo combustível (milhões de m ³)	19,0	23,9	2,7	2,9
Exportações (milhões de m ³)	3,1	2,9	–	0,04
Importações (milhões de m ³)	0,5	0,13	–	–
Preço médio no produtor – EH e B100 (R\$.L ⁻¹)	1,12	1,17	2,42	2,11
Preço médio no distribuidor – EH e B5 (R\$.L ⁻¹)	1,94	2,00	1,81	1,95
Preço médio no consumidor final – EH e B5 (R\$.L ⁻¹)	2,21	2,29	2,05	2,20
Capacidade de produção instalada nominal (milhões de m ³)	n.d.	n.d.	6,9	7,5

Fonte: BRASIL, 2014.

Na figura 2, está demonstrada a capacidade nominal das indústrias e a produção de biodiesel nas regiões do Brasil.

Figura 2 - Capacidade nominal e produção de biodiesel no Brasil



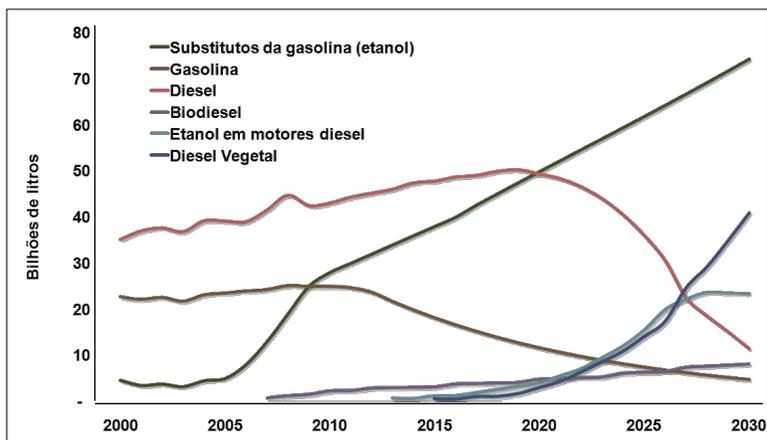
Fonte: ANP (2013).

Conforme apresentado na tabela 1 e figura 2, em 2012, a capacidade nominal para produção de biodiesel (B100) no Brasil era de

cerca de 7,5 milhões de m³ (20,6 mil m³.dia⁻¹). Entretanto, a produção nacional foi de 2,7 milhões de m³, o que correspondeu a 36,1% da capacidade total.

Um estudo realizado por Gazzoni (s.d.) sobre a tendência do consumo de combustível no Brasil, apresentou os seguintes resultados (Figura 3).

Figura 3 - Projeção de produção de combustíveis no Brasil



Fonte: <http://www.gazzoni.eng.br/pagina35.htm>

Segundo esse estudo apresentado na figura 3, existe uma tendência de aumento de 200% no consumo de etanol para substituição da gasolina nos próximos 20 anos. Além do crescimento do consumo de biodiesel e diesel vegetal (proveniente da cana-de-açúcar).

EXPERIÊNCIAS DA UTILIZAÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS EM MÁQUINAS AGRÍCOLAS

Ao avaliarem o desempenho do trator agrícola (marca Valtra, modelo BM 125i, 4x2 com tração dianteira auxiliar - TDA, potência máxima no motor de 125 cv) em função de dois tipos de biodiesel (óleo de soja

e murumuru) durante o preparo de solo, Neves *et al.* (2013) encontraram os seguintes resultados (Tabela 2).

Tabela 2 - Síntese do desdobramento da interação tipo e proporção de biodiesel para variável consumo específico (g kW⁻¹.h⁻¹)

Tipo de biodiesel	Proporção de biodiesel					
	B0	B5	B25	B50	B75	B100
Soja	292 Aa	302 Aab	323 Abc	326AcCd	332 AcCd	347 Ad
Murumuru	292 Aab	291Aa	291Ba	298Bab	313Bbc	323 Bc

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem entre si, pelo teste de *Tukey* a 5% de probabilidade.

Como pode ser observado na tabela 2, com a utilização do biodiesel na proporção de 5% (B5-5% de biodiesel e 95% de óleo diesel), não houve diferença significativa no consumo de combustível em relação ao óleo diesel (ambos os tipos de biodiesel). Para o biodiesel a base de Murumuru, somente a partir da proporção B75, que houve um aumento significativo de consumo de combustível, enquanto para o de soja esse aumento foi verificado a partir da proporção B25.

Barbosa (2007), analisando o biodiesel de mamona em trator agrícola (Figura 4) na operação de preparo do solo, verificou que o consumo específico teve aumento médio de 19% quando se adicionou 75% de biodiesel de mamona em relação ao diesel. Além disso, verificou-se também que a opacidade da fumaça foi reduzida à medida que se adicionou biodiesel de mamona ao diesel, com redução de 35% comparando B0 a B75.

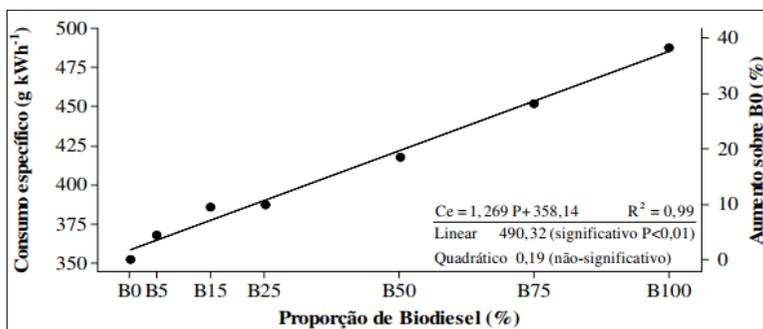
Figura 4 - Trator agrícola com combustível a base de biodiesel



Fonte: Barbosa (2007).

Tabile *et al.* (2009), avaliando o desempenho do biodiesel de mamona em trator agrícola, obtiveram os seguintes resultados para o consumo específico de combustível (Figura 5).

Figura 5 - Consumo específico em função da proporção de Biodiesel de mamona

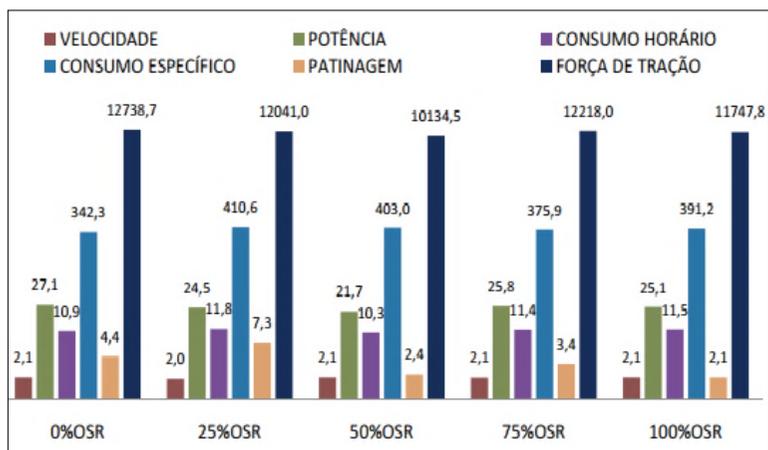


Fonte: Tabile *et al.* (2009).

Nesse estudo, os autores perceberam que à medida que aumenta a proporção de biodiesel no combustível, aumenta o consumo específico da máquina (para o combustível 100% a base de biodiesel de mamona o consumo aumenta cerca de 40%).

Siqueira (2010), analisando a mistura de óleo diesel e óleo de soja reutilizado em um trator agrícola de pneus, verificou que as misturas com teores de óleo de soja reutilizável apresentam maior consumo de combustível e uma redução de potência e força de tração em relação ao óleo diesel (Figura 6).

Figura 6 - Força de tração (N), velocidade (m.s⁻¹), potência (kW), consumo horário (L.h⁻¹), consumo específico (g.kW⁻¹.h⁻¹) e patinagem (%), com o trator trabalhando com a primeira marcha



Fonte: Siqueira (2010).

Com esses resultados obtidos, percebe-se que tecnicamente, os biocombustíveis podem ser utilizados nos setores agrícola e florestal. Porém, para que isso possa ser de fato realidade, é preciso que existam incentivos fiscais de modo que essa alternativa de combustíveis renováveis se torne viável economicamente para as empresas e produtores rurais.

3.1. Estratégias futuras para redução das emissões de gases

3.1.1. Veículos híbridos

Outra medida mitigadora dos efeitos dos gases poluentes à saúde dos trabalhadores é a substituição de combustíveis fósseis (óleo diesel e gasolina) por fontes renováveis menos poluentes (elétrico, etanol e biodiesel). Na Conferência Rio+20 realizado no ano de 2012, a cidade de Curitiba apresentou dois modelos de ônibus híbridos que são movidos à eletricidade e biodiesel (Figura 7).

Figura 7 - Ônibus híbridos utilizados para o transporte público na cidade de Curitiba, Paraná



Fonte: <http://www.urbs.curitiba.pr.gov.br/transporte/sustentabilidade>

Com o uso desses veículos reduziu-se em cerca de 90% a emissão de material particulado, 80% o óxido de nitrogênio (NO_x) e 35% o CO_2 , além da redução de consumo de até 35% de combustível (CURITIBA, 2014).

3.1.2. Veículos elétricos

Segundo a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA), os veículos elétricos são uma opção de transporte que não polui, de acordo com dados da Associação, de janeiro

à agosto de 2014 foram licenciados 558 veículos elétricos no Brasil. O número vem crescendo, visto que no ano de 2012 existiam apenas 100 veículos elétricos no país, mas ainda é inexpressivo se comparado com o total da frota tradicional, que em 2013 recebeu 3,7 milhões de veículos novos.

De acordo com Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE), no ano de 2014, existia cerca de 7 milhões de veículos elétricos (leves e pesados) que circulavam no mundo. Sendo que o maior mercado está no Japão, onde 11% da frota é movida a eletricidade. Nos Estados Unidos, essa parcela é de 4%. No Brasil, atualmente, 3 mil carros elétricos estão em circulação, ou cerca de 0,04% da frota.

Nas figuras 8 e 9 estão demonstrando dois modelos de veículos elétricos utilizados.

Figura 8 - Carro elétrico utilizados no mercado automotivo



Fonte: <http://www.redeinteligente.com/2010/05/23/brasil-se-prepara-para-chegada-de-carro-eletrico/>

Como pode ser observado na figura 8, as empresas florestais podem adotar veículos elétricos para realizarem as atividades de rondas de prevenção de incêndios, transporte de funcionários, peças e matérias necessários para operação e manutenção das máquinas florestais e agrícolas.

Figura 9 - caminhão elétrico utilizado no mercado automotivo



Fonte: <http://www.savvy.com.au/the-state-of-eletric-trucks-in-australia/>

Na figura 9, podemos observar que existe no mercado veículos pesados movidos a partir de energia elétrica, ou seja, existe a possibilidade das empresas florestais investirem nessa tecnologia, de modo que o transporte de madeira e tratores possa ser realizado sem emissões de gases poluentes.

3.1.3. Energia eólica

Na figura 10, está demonstrado a possibilidade de instalação de geradores de energia eólica nos povoamentos florestais.

Figura 10 - Instalação de geradores de energia eólica em propriedades florestais



Fonte: <http://renews.biz/70573/dokie-1-shut-as-forest-fire-nears/>

Como pode ser observado na figura 10, ao implantar um sistema de capacitação de energia eólica dentro dos povoamentos florestais, pode-se utilizar essa energia para o funcionamento de motores de fontes estacionários, bem como, na utilização de máquinas de descascamento e desganhamento da madeira, além dos picadores utilizados para transformar a madeira em cavacos.

3.1.4. Energia solar

Outra estratégia que possa ser adotada como futuros desafios para o setor florestal, é a utilização da energia solar para o funcionamento das máquinas. Para isso deve-se desenvolver tecnologias, de forma com que se consiga adaptar painéis solares nas estruturas das máquinas (fontes estacionários e móveis) permitindo a conversão da energia solar para o funcionamento do motor.

As figuras 11 e 12 demonstram os possíveis potenciais da utilização da energia solar no funcionamento dos motores das máquinas agrícolas e florestais.

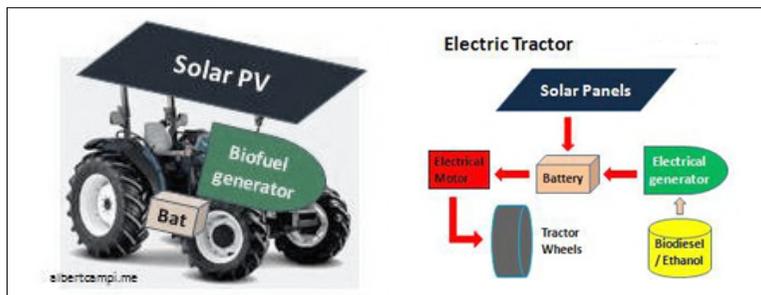
Figura 11 - Utilização de energia solar em motores agrícolas



Fonte: <http://www.notechmagazine.com/category/farming>

Como pode ser observado na figura 11, existe a possibilidade da instalação de painéis solares fixos no interior dos povoamentos florestais, de modo que a energia gerada possa ser transferida para motores de fontes estacionárias necessárias no setor florestal.

Figura 12 - Potencialidade da utilização de energia solar em tratores



Fonte: <https://albertcampi.wordpress.com/2012/05/23/electric-tractor-with-biofuel-generator/>

Outro desafio para o setor florestal, é a adaptação de painéis solares nas estruturas das fontes móveis (como por exemplos os tratores, motosserras, motopoda e roçadeiras semimecanizadas), fazendo com que a própria máquina possa produzir a energia necessária para realizar sua operação (Figura 12).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido a sua grande extensão territorial, o Brasil apresenta uma grande diversidade de matérias-primas de origem vegetal que podem ser utilizadas para a produção de biocombustíveis. Aliado a isso, está o potencial do país em investimento visando aumentar a produtividade das culturas sem precisar alterar o uso e ocupação do solo.

A oportunidade de utilização de biocombustíveis em máquinas florestais, é tecnicamente viável, porém, ainda é pouco utilizado no setor florestal, devido às tecnologias ainda estarem em fase incipiente e pelo custo elevado de aquisição desses em relação aos combustíveis fósseis, o que torna economicamente inviável para empresas e produtores rurais.

Dessa forma, os desafios necessários para tornar essa alternativa de fato viável para o setor florestal, seria de investimento em pesquisas e tecnologias visando aumento de produtividade e redução dos custos de produção da matéria-prima dos biocombustíveis. Além disso, seria necessário adoções de medidas de incentivos fiscais dos governos para incentivar a produção desses combustíveis, de modo que seja mais vantajoso economicamente para o consumidor a utilização dessas fontes renováveis em relação aos combustíveis fósseis.

Além disso, existe como desafio para as empresas e universidades, o desenvolvimento de tecnologias voltadas para a utilização de energia limpas (eólica e solar) em suas máquinas de produção, visando a redução da emissão de gases poluentes no processo produtivo de bens madeireiros.

REFERÊNCIAS

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis**, p. 246. 2012

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis**, p. 232. 2013.

ABVE - Associação Brasileira do Veículo Elétrico. **Só falta a tomada**. Disponível em: <http://www.abve.org.br/destaques/2015/destaque15001.asp> Acesso em: 21 mar. 2015.

BARBOSA, A. L. **Biodiesel de mamona em trator agrícola em operação de preparo do solo**. Dissertação (Mestrado em Agronomia (Ciência do Solo)) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Jaboticabal: 2007.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Petróleo, Gás Natural e Combustíveis Renováveis. **Boletim mensal dos combustíveis renováveis**, 75. ed., abr. 2014. Brasília: Departamento de Combustíveis Renováveis, 2014.

CÂMARA, G. M. **Biodiesel Brasil**: estado atual da arte, p. 26. 2006.

COSTA NETO, P. R.; ROSSI, L. F.; ZAGONEL, G. F.; RAMOS, L. P. Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras. **Revista Química Nova**, v. 23, n. 4. São Paulo: 2000.

FENNER, P. T. Compactação do solo. In: MACHADO, C. C. **Colheita Florestal**, 3. ed., p. 388-409. Viçosa: 2014.

FERRARI, R. A.; OLIVEIRA, V. S.; SCABIO, A. Biodiesel de soja: taxa de conversão em ésteres etílicos, caracterização físico-química e consumo em gerador de energia. **Revista Química Nova**, v. 28, n. 1. São Paulo: 2005.

NEVES, M. C.; LOPES, A.; LIMA, L. P.; OLIVEIRA, M. C.; KOIKE, G. H. Desempenho do trator agrícola em função do tipo de biodiesel (soja x murumuru). **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 21, p. 351-360, 2013.

PARENTE, E. J. **Biodiesel**: uma aventura tecnológica num país engraçado. Fortaleza: Unigráfica, 2003.

ROSSI, L. F. *et al.* **Transesterificação de óleo comestível usado para a produção de biodiesel e uso em transportes**. 2010.

SALLET, C. L.; ALVIM, A. M. Biocombustíveis: uma análise da evolução do biodiesel no Brasil. **Revista Economia & Tecnologia**, v. 25, 2011.

SIQUEIRA, V. C. Utilização de misturas de óleo diesel e óleo de soja reutilizado em um trator agrícola de pneus. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa: 2010.

TABILE, R. A.; TOLEDO, A.; GROTTA, D. C.; FURLANI, C. E.; SILVA, R. P.; LOPES, A. Influência do manejo de plantas de cobertura no desenvolvimento da cultura do milho (*Zea Mays L.*). **Revista Nucleus**, v. 4, p. 9-16, 2007.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR-ÚNICA. Disponível em: <http://www.unicadata.com.br/historico-de-consumoe-combustiveis> Acesso em :1 jun. 2014.

CAPÍTULO 5

*Efeito da exposição
dos trabalhadores aos
gases emitidos pelas
máquinas florestais*

Flávio Cipriano de Assis do Carmo

Amaury Paulo de Souza

Nilton Cesar Fiedler

IMPORTÂNCIA E CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Emissão de gases em máquinas e veículos

Durante o período da revolução industrial, a emissão de gases poluentes no Brasil tinha como principal fonte as atividades industriais (classificadas como fontes estacionárias). No entanto, com o surgimento dos motores de combustão interna, como no caso dos automóveis, fez com que a maior fonte geradora de emissão de poluentes atmosféricos nas cidades fosse as fontes móveis. Segundo estudos realizados por Esteves *et al.* (2007), na cidade de São Paulo, 90% da emissão de poluentes é proveniente de fontes móveis oriundos de veículos leves de passageiros, leves comerciais e veículos pesados.

De acordo com a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CTESB (2004), as emissões de poluentes originadas pelos veículos e máquinas podem ser divididas nas seguintes categorias:

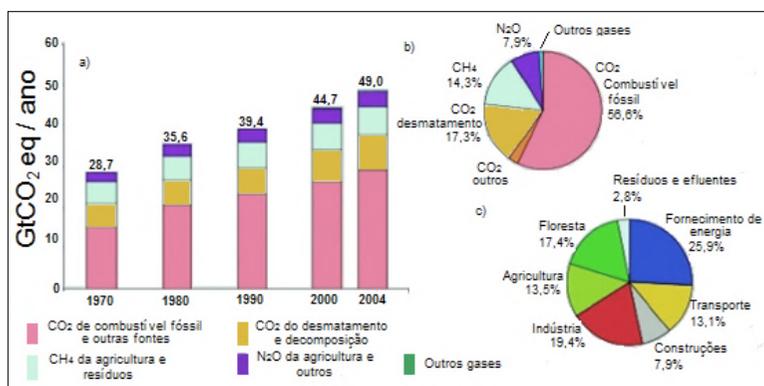
- Emissões de gases e partículas para a atmosfera pelo escape dos veículos;
- Emissões de gases do cárter do motor;
- Emissões de partículas provenientes do desgaste de pneus, freios e embreagem; e
- Emissões evaporativas de combustíveis, associada ao armazenamento e abastecimento de combustíveis.

Os gases emitidos pelo tubo de escape das máquinas e veículos são constituídos pelos produtos gerados durante reação de combustão incompleta que ocorre no motor. Na queima do combustível, os gases de exaustão são constituídos basicamente por monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x) e hidrocarbonetos (HC) que são considerados gases poluentes.

Segundo Teixeira *et al.* (2008), os veículos pesados movidos a diesel (ônibus e caminhões) são responsáveis pela maior fração das emissões de óxidos de nitrogênio e de enxofre, enquanto que os veículos leves (automotores de passeio e de uso misto), movidos a gasolina e a álcool, são os principais emissores de monóxido de carbono e hidrocarbonetos.

Na figura 1 é demonstrado o resultado obtido por um estudo realizado pelo Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) sobre a evolução da emissão de gases poluentes no mundo entre os anos de 1970 à 2004.

Figura 1 - Evolução da emissão de gases poluentes no mundo



Fonte: IPCC, 2007.

A emissão anual de gases de efeito estufa no mundo conforme demonstrado na figura 1, teve um aumento de 70% no período de 1970 à 2004. Também pode ser observado nesse estudo, que 17,4 % da emissão dos gases poluentes é proveniente do desmatamento e decomposição de resíduos florestais e 13,1% do transporte em geral.

Além disso, de acordo com esse estudo, a emissão de CO₂ representa 76,7% do total de gases emitidos para a atmosfera (sendo que 56,6% está relacionado ao consumo de combustíveis fósseis), seguido do gás metano (14,3%) e do gás oxido nitroso (7,9%).

Tipos de poluentes produzidos pela queima dos combustíveis

Na tabela 1 estão descritos os principais poluentes emitidos pelas máquinas e frota de veículos florestais.

Tabela 1 - Fontes e características dos principais poluentes na atmosfera

Poluente	Características	Fontes Principais	Danos
Material Particulado	Partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem.	Processos de combustão (industrial, veículos automotores), aerossol secundário (formado na atmosfera).	Doenças pulmonares, asma, bronquite e câncer.
Dióxido de Enxofre (SO ₂)	Gás incolor, com forte odor. Pode ser transformado a SO ₃ , que na presença de vapor de água, passa rapidamente a H ₂ SO ₄ . É um importante precursor dos sulfatos, um dos principais componentes das partículas inaláveis.	Processos que utilizam queima de óleo combustível (refinaria de petróleo, veículos a diesel, produção de polpa e papel, fertilizantes).	Irritação nos olhos, nariz e garganta, tosse, doenças respiratórias e cardiovasculares.
Hidrocarbonetos (HC)	Normalmente encontrados em concentrações baixas suspensas na atmosfera (gás ou fase líquida) e são muitas vezes emitidos pela combustão incompleta	Combustão incompleta de combustíveis fósseis. Esses gases podem ser formados por incêndios, reações químicas na atmosfera e decomposição bacteriana de matéria orgânica na ausência de oxigênio.	Distúrbios no sistema respiratório
Óxido de Nitrogênio (NOx)	Gás marrom avermelhado, com odor forte. Pode levar à formação de ácido nítrico, nitratos e compostos orgânicos tóxicos.	Processos de combustão envolvendo veículos automotores, processos industriais, usinas térmicas que utilizam óleo ou gás, incinerações.	Edema pulmonar, bronquites hemorragias e enfisema pulmonar.

Monóxido de Carbono (CO)	Gás incolor, inodoro e insípido.	Combustão incompleta em veículos automotores.	Náuseas, distúrbios visuais, vertigens e hemorragias
Dióxido de Carbono (CO ₂)	Gás incolor, inodoro	Combustão incompleta de combustíveis fósseis, incêndios, desmatamento e pela decomposição bacteriana de matéria orgânica.	Distorções visuais, dor de cabeça, falta de ar e aumento da frequência cardíaca.
Ozônio (O ₃)	Gás incolor, inodoro nas concentrações ambientais. Principal componente da névoa fotoquímica.	Não é emitido diretamente para a atmosfera. É produzido fotoquimicamente pela radiação solar sobre os óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis.	Tosse, irritação nos olhos, nariz e garganta, asma e doenças pulmonares.

Fonte: Santos (2001); Yip (2002); Moraes (2005); Friedman (2009); CETESB (2013).

Desses gases poluentes demonstrados na tabela 1, somente o Ozônio não é emitido diretamente pelas máquinas e frotas de veículos. Esse é formado por meio de reações atmosféricas de hidrocarbonetos (emitidas a partir do motor de combustão interna) e óxidos de nitrogênio (NO_x), sob a influência da luz ultravioleta emitida, irradiada do sol.

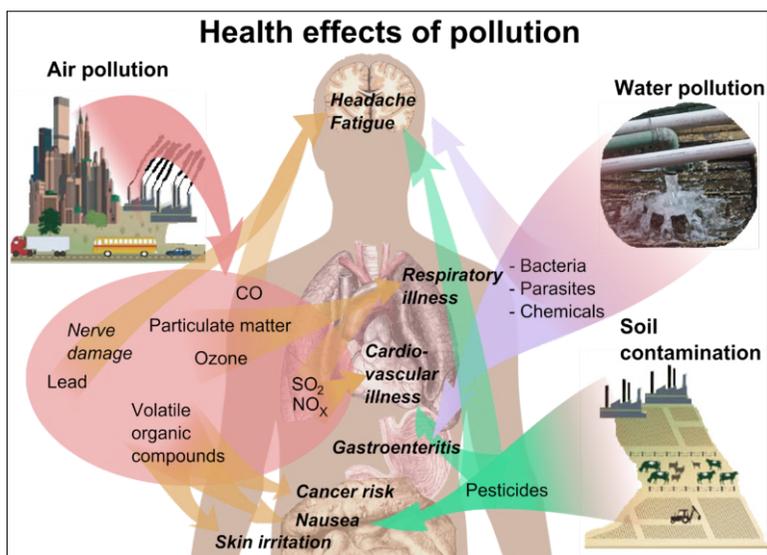
Efeitos dos gases poluentes no organismo

A poluição atmosférica, causada principalmente pelas indústrias, desmatamento, atividades agrícolas e pelo transporte gera uma enorme degradação da qualidade de vida da população, provocando uma série de doenças respiratórias, cardiovasculares e neoplasias (BARBOSA, 1990). Além disso, ainda acarretam um decréscimo no sistema imunológico do indivíduo, tornando-o mais suscetível às infecções agudas (como irritação na pele, náusea e tosses).

Segundo a Organização Mundial de Saúde (WHO, 2005), as doenças respiratórias agudas e crônicas estão relacionadas às exposições ambientais, sendo que 60% dessas estão associados à contaminação ambiental. Estima-se que 3 milhões de pessoas morrem anualmente em decorrência dos efeitos da poluição atmosférica.

Os efeitos dos gases poluentes na saúde dos seres humanos estão demonstrados na figura 2.

Figura 2 - Efeitos da poluição atmosférica na saúde humana

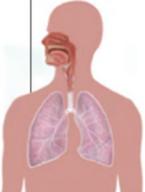


Fonte: Griffin, 2011.

Conforme ilustrado na figura 2, os gases atmosféricos poluentes são gerados principalmente pelas atividades industriais e pela combustão interna de combustíveis automotivos. Seus efeitos na saúde humana estão relacionados principalmente à sintomas como dores de cabeça, náuseas, irritações na pele e risco de câncer, além das doenças respiratórias e cardiovasculares.

Pesquisa realizada por Ritz e Wilhelm (2008), verificou os efeitos da poluição atmosférica na saúde ao avaliarem uma faixa etária de recém-nascidos a adolescentes de 18 anos de idade. Os resultados são ilustrados na figura 3.

Figura 3 - Efeitos da Poluição do ar na saúde de recém-nascidos até aos 18 nos de idade

Estágio: Idade:	Recém-nascido 0-2 meses	Infantil/criança 2 meses-2 anos	Criança 2 - 6 anos	Idade escolar 6 - 12 anos	Adolescente 12 - 18 anos
Desenvolvimento pulmonar					
	Desenvolvimento alveolar			Aumento do volume pulmonar	
Riscos da poluição do ar	Morte por problemas respiratórios		Tosse crônica e bronquite		
			Redução da função pulmonar		
			Respiração ofegante e asma		
	Doenças respiratórias		Falta escolar por problema respiratório		

Fonte: Adaptado de Ritz e Wilhelm (2008).

Como pode ser observado nesse estudo (Figura 3), constatou-se que nos recém-nascidos, os riscos da poluição atmosférica estão relacionados principalmente às doenças respiratórias. Entretanto, nas crianças e adolescentes, a poluição pode acarretar tosse crônicas, bronquites, redução das funções dos pulmões e ataques asmáticos que causam falta de ar e tosse.

Efeitos dos Hidrocarbonetos (HC) no organismo

Os gases hidrocarbonetos são normalmente encontrados em concentrações baixas, suspensos na atmosfera (gás ou fase líquida) em qualquer área urbana e são muitas vezes emitidos quando a combustão é incompleta.

Segundo a pesquisa realizada por Yip e Madl (2002) sobre a influência da poluição atmosférica na Cidade do México, os principais efeitos dos hidrocarbonetos na saúde humana estão relacionados a distúrbios no sistema respiratório. A alguns hidrocarbonetos, por serem mutagênicos podem causar câncer. Nesse estudo também relata que outro agravante relacionado aos hidrocarbonetos é o fato desse composto ser um precursor do Ozônio (gás poluente).

Efeitos dos Materiais Particulados (MP) no organismo

Os efeitos do material particulado na saúde humana variam em função da natureza química e do tamanho (BAIRD, 2002). O tamanho da partícula interfere no local e na distribuição nas vias aéreas. As partículas grossas se depositam na porção superior das vias aéreas enquanto as menores são depositadas no trato respiratório inferior, podendo atingir alvéolos pulmonares (CANÇADO, 2006).

Quanto menor o tamanho das partículas, maior será o efeito sobre a saúde, causando complicações em pessoas com doença pulmonar, asma e bronquite, aumento de atendimento hospitalar e mortes prematuras (RIBEIRO; ASSUNÇÃO, 2002).

O local de deposição das partículas no sistema respiratório humano (Quadro 2 e Figura 4) depende diretamente do tamanho das partículas (SANTOS, 2001):

- As inaláveis - partículas menores que $100\mu\text{m}$, são capazes de penetrar pelo nariz e pela boca;
- As torácicas - partículas menores que $25\mu\text{m}$, são capazes de penetrar além da laringe;

- As respiráveis - partículas menores que $10^0\mu\text{m}$, são capazes de penetrar na região alveolar.

Na tabela 2 está demonstrada a divisão do trato respiratório em bases anatômicas de referência segundo o mecanismo de deposição das partículas.

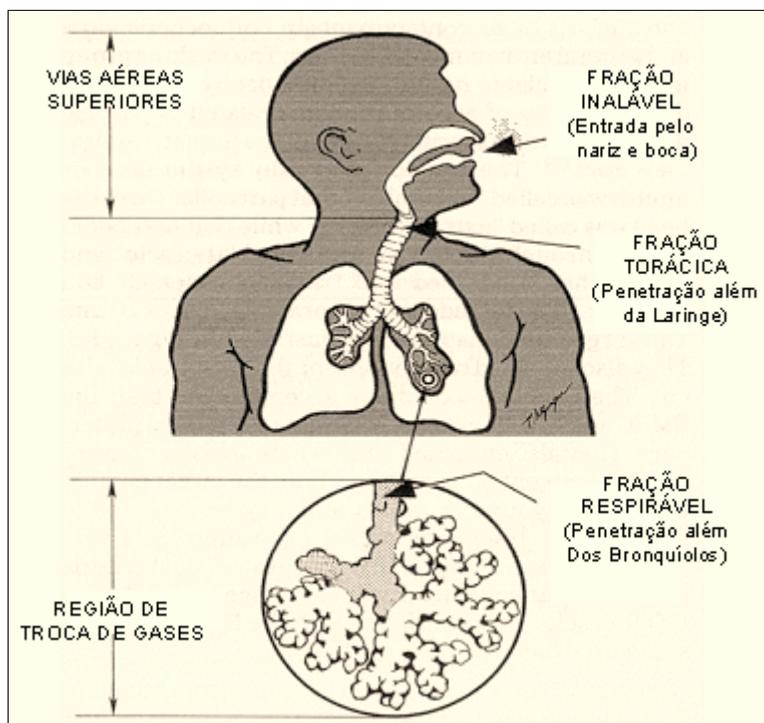
Tabela 2 - Divisão do trato respiratório em bases anatômicas de referência segundo o mecanismo de deposição das partículas

Região	Estrutura Anatômicas	Localização	Doenças relacionadas
1 - Vias Aéreas Superiores	Nariz	Extratorácica	Irritação de septo nasal, faringe e laringe, Câncer de faringe e laringe
	Boca		
	Nasofaringe		
	Orofaringe		
	Laringofaringe		
	Laringe		
2 - Região Traqueobronquial	Traqueia	Torácica (pulmonar)	Broncoconstrição, bronquite crônica e Câncer Bronquial
	Brônquios		
	Bronquíolos		
3 - Região Traqueobronquial	Bronquíolos respiratórios	Alveolar	Pneumoconioses, Enfisema, Alveolite e Câncer pulmonar
	Dutos alveolares		
	Sacos alveolares		
	Alvéolos		

Fonte: Santos (2001).

Essas três regiões do trato respiratório descrito no quadro 2, estão ilustrados na figura 4.

Figura 4 - Representação esquemática das principais regiões do trato respiratório



Fonte: Santos (2001).

Segundo a CETESB (2013) o material particulado está vinculado ao risco de ocorrência de bronquite, tosse seca, asma, câncer pulmonar, pneumonia, doenças respiratórias e cardiovasculares e a diminuição da função respiratória, conforme apresentado na tabela 3.

Tabela 3 - Risco de saúde proveniente do material particulado

Qualidade do ar	Concentração de MP ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)
BOA	0 - 50

	>50 – 100
MODERADA	Pessoas com doenças respiratórias podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço.
	>100 – 150
RUIM	Pessoas com doenças respiratórias ou cardíacas, idosos e crianças têm os sintomas agravados. População em geral pode apresentar sintomas como ardor nos olhos, nariz e garganta, tosse seca e cansaço.
	>150 – 250
MUITO RUIM	Aumento dos sintomas em crianças e pessoas com doenças pulmonares e cardiovasculares. Aumento de sintomas respiratórios na população em geral.
	>250
PÉSSIMA	Agravamento dos sintomas respiratórios. Agravamento de doenças pulmonares, como asma, e cardiovasculares, como infarto do miocárdio.

Fonte: CETESB (2013).

Como pode ser observado na tabela 1, a concentração de material particulado na atmosfera a partir de $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ de ar, pode ser considerada como poluente para a saúde humana.

Efeitos do Monóxido de Carbono (CO) no organismo

O monóxido de carbono (CO) é um gás tóxico, sem cor e sem odor, que resulta da combustão incompleta do carbono em combustíveis, em incêndios, ou em queima de lenha em fogões ou lareiras. A principal via de exposição ao monóxido de carbono no organismo humano é a respiratória. Segundo Moraes (2005) uma vez inalado, o gás é rapidamente absorvido nos pulmões e em circulação liga-se de maneira estável com a hemoglobina, impedindo o transporte do oxigênio e causando hipóxia tecidual (insuficiência respiratória).

Por isso, a exposição ao composto está também associada a alguns prejuízos na saúde humana. Segundo Moraes (2005), o quadro clínico da intoxicação por esse gás, pode ser classificado em leve, moderado e grave:

- **Intoxicações agudas leves:** sensação de mal-estar, cefaleia, fadiga, dispneia leve, náusea, vômitos, fraqueza, distúrbios visuais e irritabilidade. Sinais agudos que podem ser encontrados: taquipneia, taquicardia, hipotensão.
- **Intoxicações moderadas:** podem apresentar, além dos sinais e sintomas anteriores, cefaleia intensa, vertigens, astenia, dificuldade de concentração, diminuição da tolerância ao exercício físico.
- **Intoxicações graves:** podem causar convulsões, rigidez muscular generalizada, coma e morte por choque e insuficiência respiratória. Podem também ocasionar hemorragias na retina e edema pulmonar.

Os níveis ambientais de monóxido de carbono estão diretamente relacionados à concentração de carboxihemoglobina (COHb) e seus efeitos clínicos estão descrito na tabela 4.

Tabela 4 - Relação entre concentração de monóxido de carbono, níveis de carboxihemoglobina e efeitos clínicos

Concentração em CO (PPM)	% COHb	Efeitos clínicos
< 20	0,3 - 0,7	Valores normais, nenhum efeito aparente.
20	2 - 3	Aumento do fluxo sanguíneo para os órgãos vitais buscando compensar a redução no transporte de oxigênio.
50	5 - 9	Alterações neurológicas, tais como diminuição da percepção visual e temporal.
100	16 - 20	Alterações cardíacas e funcionais, cefaleia.

250 - 500	20 - 40	Cefaleia, náuseas, vômitos, diminuição na destreza manual.
1000	50 - 70	Síncope, convulsões, coma e morte.

Fonte: Moraes (2005).

Segundo a CETESB (2013) o monóxido de carbono está vinculado ao risco de cansaço, dor no peito e doenças cardiovasculares, conforme apresentado na tabela 5.

Tabela 5 - Risco de saúde proveniente do monóxido de carbono

Qualidade do ar	Concentração de CO (ppm)
ACEITÁVEL	0 - 9
MODERADA	9,1 - 11 Pessoas com doenças cardíacas podem apresentar sintomas como cansaço e dor no peito.
RUIM	11,1 - 13 População em geral pode apresentar sintomas como cansaço. Pessoas com doenças cardíacas têm sintomas como cansaço e dor no peito agravados.
MUITO RUIM	13,1 - 15 Aumento de sintomas em pessoas cardíacas. Aumento de sintomas cardiovasculares na população em geral.
PÉSSIMA	>15 Agravamento das doenças cardiovasculares, como infarto do miocárdio e insuficiência cardíaca congestiva.

Fonte: CETESB (2013).

Na tabela 6 está descrito os efeitos e sintomas do monóxido de carbono em pessoas de acordo com a concentração e o tempo de exposição (CARVALHO, 2001; DIP, 2004).

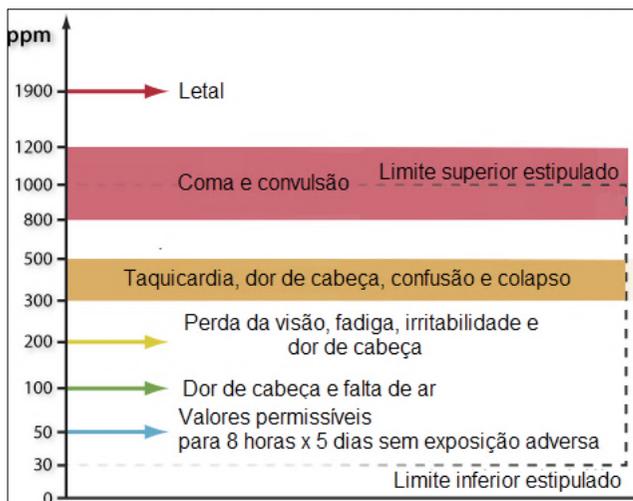
Tabela 6 - O efeito e sintomas do monóxido de carbono na saúde dos seres humanos

Limites de ppm	Efeitos e Sintomas nas pessoas	Tempo
≤35	Nível permissível de exposição	8 horas
≤200	Dor de cabeça leve, desconforto	3 horas
≤400	Dor de cabeça, desconforto	2 horas
≤600	Dor de cabeça, desconforto	1 horas
1000-2000	Confusão, dor de cabeça, náusea	2 horas
1000-2000	Tendência a cambalear	1,5 horas
1000-2000	Palpitação no coração	30 minutos
2000-2500	Perda de consciência	30 minutos
≥4000	Fatal	menos de 30 minutos

Fonte: Carvalho (2001); Dip (2004).

A figura 5 se refere aos resultados da pesquisa de Asín (2010), sobre os efeitos do gás monóxido de carbono na saúde da população dos Estados Unidos da América.

Figura 5 - Efeitos do monóxido de carbono na saúde humana



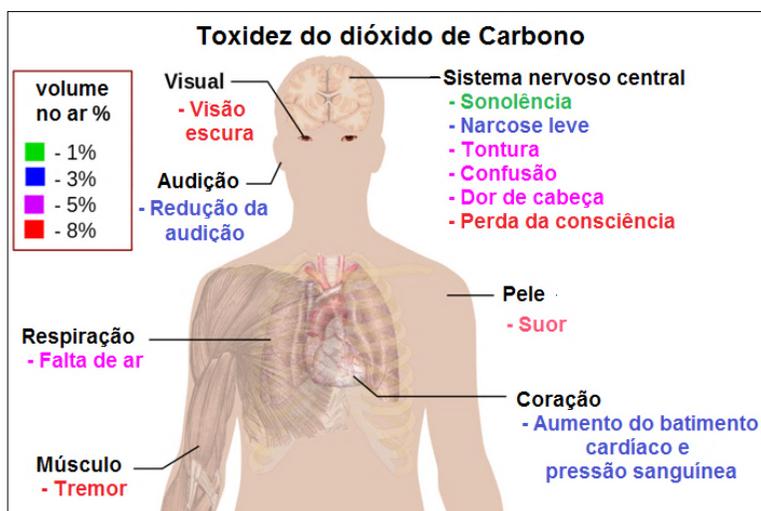
Fonte: Asín, 2010.

Como pode ser observado na figura 5, a concentração de monóxido de carbono a partir de 100 ppm, já pode causar dano a saúde das pessoas, como dor de cabeça, perda de visão, fadiga taquicardia podendo ser fatal em concentrações elevadas (1.900 ppm).

Efeitos do Dióxido de Carbono (CO₂) no organismo

A concentração de dióxido de carbono na atmosfera pode causar diversos efeitos no organismo humano, conforme figura 6.

Figura 6 - Efeitos da toxicidade do dióxido de carbono no organismo humano



Fonte: Friedman (2009).

Conforme ilustrado na figura 6, a concentração de dióxido de carbono na atmosfera pode causar distorções de visões, perda auditiva, sonolência, tontura, dor de cabeça, aumento da transpiração, falta de ar, aumento da frequência cardíaca e da pressão arterial. Segundo Lambertsen (1971), os efeitos do dióxido de carbono no

organismo humano vão depender da concentração e pelo tempo de exposição ao gás poluente (Tabela 7).

Tabela 7 - Efeito do dióxido de carbono em relação à concentração e tempo de exposição

% de CO ₂ no ar inspirado	Tolerância esperada para atividade útil na exposição continuada a elevada de CO ₂	
	Duração	Efeitos
<1,5	contínua	Nível permissível de exposição
1,5-2,5	>1 mês	Deficiência respiratória leve
2,5-3,5	>1 mês	Deficiência respiratória moderada
3,6-4	>1 semana	
4.1-4,5	>1 semana	Deficiência respiratória moderada
4,6-5	>8 horas	
5,1-5,5	>4 horas	Deficiência respiratória grave
5,6-6	>1 hora	
6,1-6,5	>0,5 hora	Deficiência respiratória grave, início de confusão mental
6,6-7	>0,25 hora	
≥7	>0,1hora	Confusão mental

Fonte: Lambertsen (1971).

Conforme apresentado na tabela 7, até uma concentração de 1.5% de gás carbônico no ar é permissível a exposição das pessoas com o gás poluente. A partir dessa concentração, esse gás pode-se tornar nocivo à saúde humana.

Efeitos do óxido de Nitrogênio (NO_x) no organismo

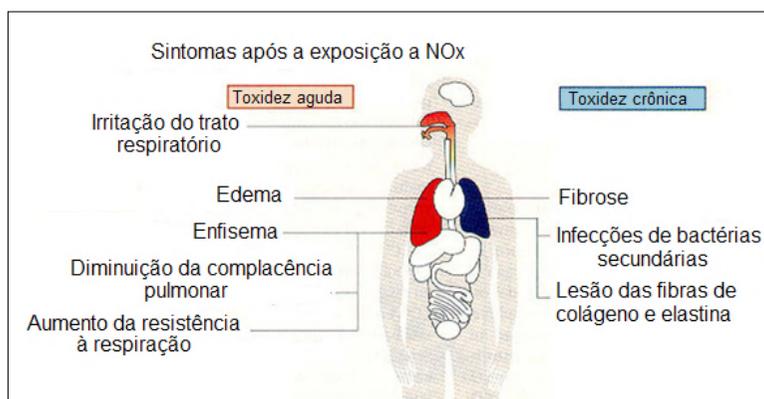
A exposição do ser humano ao NO_x faz aumentar a sensibilidade à asma e à bronquite, abaixar a resistência às infecções respiratórias e ao penetrar no organismo pode levar a processos carcinogênicos (FEAM, 2001). Além de provocar lesões celulares e, em intoxicações mais graves, pode ocorrer edema pulmonar, hemorragias alveolares e

insuficiência respiratória. Além disso, a contaminação por NO_x pode causar traqueítes, bronquites crônicas, enfisema pulmonar e broncopneumonias químicas ou infecciosas (BÖHM, 1996; ROSEIRO, 2002).

Segundo Dickey (2000), altas concentrações de NO_2 são perigosas e causam lesões pulmonares, edema pulmonar fatal e broncopneumonia. Já em baixas concentrações esse gás pode afetar a limpeza mucociliar, o transporte de partículas, a função dos macrófagos e a imunidade local, e produzir tosse e entupimento nasal.

Segundo a pesquisa realizada por Yip e Madl (2002) sobre a influência da poluição atmosférica na Cidade do México, a exposição do óxido de nitrogênio pode acarretar em riscos à saúde humana (Figura 7).

Figura 7 - Sintomas da exposição do óxido de nitrogênio nos seres humanos



Fonte: Yip e Madl (2002).

Conforme ilustrado na figura 7, a exposição ao óxido de nitrogênio pode acarretar irritação do trato respiratório, enfisema (que é uma doença pulmonar que causa a perda de capacidade respiratória e insuficiência de oxigenação) e aumento da dificuldade de respiração. Segundo a CETESB (2013) o óxido de nitrogênio está vinculado

ao risco de cansaço, tosse seca, doenças respiratórias e pulmonares, conforme apresentado na tabela 8.

Tabela 8 - Risco de saúde proveniente do óxido de nitrogênio

Qualidade do ar	Concentração de NO₂ (µg/m³)
ACEITÁVEL	≤200
MODERADA	201 - 240 Pessoas com doenças respiratórias podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço.
	241 - 320 População em geral pode apresentar sintomas como ardor nos olhos, nariz e garganta, tosse seca e cansaço. Pessoas com doenças respiratórias e crianças têm os sintomas agravados.
MUITO RUIM	321 - 1130 Aumento dos sintomas respiratórios em crianças e pessoas com doenças pulmonares, como asma. Aumento de sintomas respiratórios na população em geral.
	>1130 Agravamento de sintomas respiratórios. Agravamento de doenças pulmonares como asma e doença pulmonar obstrutiva crônica.

Fonte: CETESB (2013).

Como pode ser observado na tabela 8, a concentração de óxido de nitrogênio na atmosfera a partir de 200 µg.m⁻³ de ar pode ser considerada como poluente para a saúde humana.

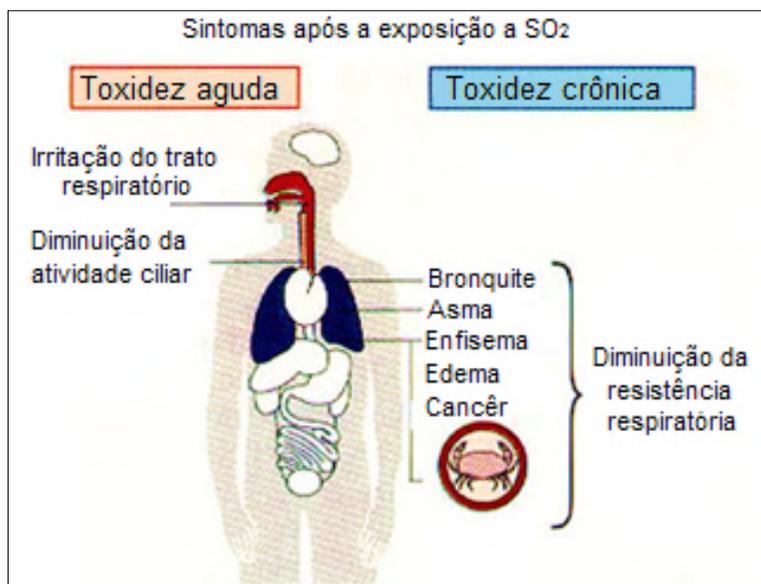
Efeitos do Dióxido de Enxofre (SO₂) no organismo

Os danos causados à saúde humana pelo SO₂ estão associados à sua solubilidade nas paredes do trato respiratório. Esse gás se dissolve na secreção úmida, chegando às vias inferiores, provocando espasmos dos bronquíolos, mesmo em pequenas concentrações. Em

quantidades maiores há irritação em todo o sistema respiratório, trazendo danos aos tecidos do pulmão (FEAM, 2001). Dessa forma, a exposição às altas concentrações de SO_2 pode causar irritação nos olhos, nariz e garganta, além de doenças respiratórias, alterações na defesa pulmonar e agravamento de doença cardiovascular já existente (ROSEIRO, 2002).

Segundo a pesquisa realizada por Yip e Madl (2002), a exposição do dióxido de enxofre pode acarretar alguns riscos à saúde humana (Figura 8).

Figura 8 - Sintomas da exposição do dióxido de enxofre nos seres humanos



Fonte: Yip e Madl (2002).

Conforme ilustrado na figura 8, a exposição ao dióxido de enxofre pode acarretar irritação do trato respiratório, redução da atividade ciliar, bronquites, asma, enfisema, câncer e o aumento da dificuldade de respiração. Os efeitos do dióxido de enxofre na saúde humana também estão descritos na tabela 9.

Tabela 9 - Risco de saúde proveniente do dióxido de enxofre

Qualidade do ar	Concentração de SO₂ (µg/m³)
ACEITÁVEL	0 - 20
MODERADA	21 - 40 Pessoas com doenças respiratórias podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço.
RUIM	41 - 365 População em geral pode apresentar sintomas como ardor nos olhos, nariz e garganta, tosse seca e cansaço. Pessoas com doenças respiratórias ou cardíacas, idosos e crianças têm os sintomas agravados.
MUITO RUIM	366 - 800 Aumento dos sintomas em crianças e pessoas com doenças pulmonares e cardiovasculares. Aumento de sintomas respiratórios na população em geral.
PÉSSIMA	>800 Agravamento dos sintomas respiratórios. Agravamento de doenças pulmonares, como asma, e cardiovasculares, como infarto do miocárdio.

Fonte: CETESB (2013).

Como pode ser observado na tabela 9, a concentração de dióxido de enxofre na atmosfera a partir de 20 µg.m⁻³ de ar, pode ser considerada como poluente para a saúde humana.

Efeitos do Ozônio(O₃) no organismo

O ozônio pode causar doenças como conjuntivites, irritação das vias aéreas superiores, tosse, falta de ar, diminuição do volume respiratório, náusea, mal estar e dor de cabeça (ROSEIRO, 2002). Além disso, sintomas como cansaço, ardor nos olhos, nariz e doenças pulmonares como a asma são comuns (Tabela 10).

Tabela 10 - Risco de saúde proveniente do ozônio

Qualidade do ar	Concentração de O₃ (µg/m³)
BOA	0 - 100
MODERADA	101 - 130 Pessoas com doenças respiratórias podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço.
	131 - 160 Pessoas com doenças respiratórias, como asma, e crianças têm os sintomas agravados. População em geral pode apresentar sintomas como ardor nos olhos, nariz e garganta, tosse seca e cansaço.
MUITO RUIM	161 - 200 Aumento dos sintomas respiratórios em crianças e pessoas com doenças pulmonares, como asma. Aumento de sintomas respiratórios na população em geral.
PÉSSIMA	>200 Agravamento de sintomas respiratórios. Agravamento de doenças pulmonares, como asma, e doença pulmonar obstrutiva crônica.

Fonte: CETESB (2013).

Em um estudo realizado por Asín (2010), constatou-se os efeitos do ozônio na saúde da população, conforme apresentado na figura 9.

Figura 9 - Efeitos do Ozônio na saúde humana



Fonte: Asín (2010).

Como pode ser observado na figura 9, a concentração de ozônio a partir de 0.075 ppm, já pode causar dano à saúde das pessoas, como tosse e dor no peito e redução das funções dos pulmões.

SUGESTÕES DE MEDIDAS MITIGADORAS DO EFEITO DA EMISSÃO DE GASES NA SAÚDE DOS TRABALHADORES

Substituição de combustíveis fósseis

Veículos híbridos

Outra medida mitigadora dos efeitos dos gases poluentes à saúde dos trabalhadores é a substituição de combustíveis fósseis (óleo diesel e gasolina) por fontes renováveis menos poluentes (elétrico, etanol e biodiesel). Na Conferência Rio+20 realizada no ano de 2012, a

cidade de Curitiba apresentou dois modelos de ônibus híbridos que são movido à eletricidade e biodiesel (Figura 10).

Figura 10 - Ônibus híbridos utilizados para o transporte publico na cidade de Curitiba, Paraná



Fonte: <http://www.urbs.curitiba.pr.gov.br/transporte/sustentabilidade>

Com o uso desses veículos reduziu-se em cerca de 90% a emissão de material particulado, 80% de óxido de nitrogênio (NO_x) e 35% de CO_2 , além da redução de consumo de até 35% de combustível (CURITIBA, 2014).

Utilização de Biodiesel nos serviços públicos

Em 2013 o município de Curitiba passou a utilizar 34 ônibus que opera somente com biodiesel (B100), conforme ilustrado na figura 11. Segundo dados fornecidos pela prefeitura, os índices de opacidade (fumaça) nesses veículos reduzem 67,74% em relação aos veículos utilizados somente com óleo diesel.

Figura 11 - Veículo de transporte que utiliza somente biodiesel como combustível



Fonte: <http://www.urbs.curitiba.pr.gov.br/transporte/sustentabilidade>

Na figura 12 está demonstrado a coleta de resíduos de serviço de saúde na cidade do Rio de Janeiro, na qual, os veículos responsáveis por essa atividade utilizam o combustível B5 (95% óleo diesel e 5% de biodiesel).

Figura 12- Veículos de coleta de resíduos de serviço de saúde que utilizam 5% de biodiesel no seu combustível



Fonte: <http://www.coppenario20.coppe.ufrj.br/?cat=44>

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o crescimento do setor florestal no cenário nacional, as empresas passaram a investir mais em máquinas e frotas de veículos com maiores potências, visando sempre obter melhores resultados de rendimentos e menores custos de produção, de modo que se torne mais competitiva no mercado.

Entretanto, esse aumento da mecanização no processo produtivo florestal, pode-se fazer com que aconteça um acréscimo das concentrações de gases poluentes emitidos por essas máquinas. Sendo assim, esse aumento das concentrações de gases poluentes na atmosfera podem acarretar inúmeros riscos à saúde humana. Porém, com o avanço tecnológico as máquinas passaram a emitirem menos gases poluentes para a atmosfera.

Dessa forma, as empresas devem desenvolver medidas mitigadoras, bem como a substituição de combustíveis fósseis por renováveis e isolamento da cabine de operação das máquinas, de modo que seus funcionários estejam menos expostos a esses gases poluentes. Por consequência dessa redução de emissão de gases poluentes, a empresa poderá reduzir seus custos com a saúde do trabalhador e reduzir o absenteísmo, ou seja, em falta do trabalho por motivos de saúde.

REFERÊNCIAS

ASÍN, A. **Monitoring indoor air quality with Wasp-mote to prevent accidents and improve production processes**. 2010. Acesso: http://www.libelium.com/industrial_processes_wsn_air_quality_monitoring/

BAIRD, C. **Química ambiental**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.

BARBOSA, S. R. **Industrialização, ambiente e condições de vida em Paulínia, SP**: as representações de qualidade ambiental e de saúde

para médicos e pacientes. 229 f. Dissertação (Mestrado em Filosofia e Ciências Humanas) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. 1990.

BÖHM, G. M. **Como os principais poluentes provocam doenças**. 1996. Disponível em: <http://www.saudetotal.com/saude/doen-pol/doenpol.htm> Acesso em: 1 abr. 2000.

CANÇADO, J. E.; BRAGA, A.; PEREIRA, L. A.; ARBEX, M. A.; SALDIVA, P. H. N.; SANTOS, U. P. Repercussões clínicas da exposição à poluição atmosférica. **Revista Brasileira de Pneumologia**, v. 32, n. 1, p. 5-11. São Paulo: 2006.

CARVALHO, J. A. Combustível industrial. **Apostila do Curso Combustão Industrial**. São Paulo: ABM, 2001.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). **Relatório de qualidade ambiental**, p. 142. São Paulo: CETESB, 2004.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). **Relatório de qualidade ambiental**, p. 113. São Paulo: CETESB, 2013.

CURITIBA. **Transporte sustentável**. 2014. Disponível em: <http://www.urbs.curitiba.pr.gov.br/transporte/sustentabilidade> Acesso em: 2 jun. 2014.

DICKEY, J. H. Air pollution: overview of sources and health effects. **Dis. Mon.**, v. 46, n. 9, p. 566-589. Chicago: 2000.

DIP, T. M. **Otimização de condições operacionais de processo visando a minimização da emissão de material particulado na**

incineração industrial de resíduos perigosos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). São Carlos: USP, 2004.

ESTEVES, G. R.; BARBOSA, S. R.; SILVA, E. P.; ARAÚJO, P. D. Estimativa dos efeitos da poluição atmosférica sobre a saúde humana: algumas possibilidades metodológicas e teóricas para a cidade de São Paulo. **Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente**, v. 1, n. 3, p. 1-20, 2007.

GRIFFIN, J. **Effects of pesticides on the environment & human health.** 2011. Acesso em: <http://www.brighthub.com/environment/science-environmental/articles/121797.aspx>

FRIEDMAN, D. **Toxicity of carbon dioxide gas exposure, CO₂ poisoning symptoms, carbon dioxide exposure limits, and links to toxic gas testing procedures.** 2009. Acesso em: <http://inspectapedia.com/hazmat/CO2gashaz.htm>

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE - FEAM. Plano de controle da poluição por veículos em uso em Minas Gerais - PCPV/MG. **Relatório Técnico.** 2001.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. Summary for policymakers of the Synthesis Report of the IPCC Fourth Assessment Report. **Intergovernmental Panel on Climate Change.** 2007.

LAMBERTSEN C. J. Carbon dioxide and respiration in acid-base homostasis. **Anesthesiology**, p: 642-547, 1971.

MORAES, A. C. Toxicologia ocupacional. *In*: Eduardo Macedo Barbosa (org.). **A Saúde na Gestão Ambiental**, 1. ed., v. 1, p. 198-253.

Rio de Janeiro: Gerência de Saúde da Gerência Executiva de Segurança, Meio Ambiente e Saúde da Petrobras, 2005.

RIBEIRO, H.; ASSUNÇÃO, J. V. Efeitos das queimadas na saúde humana. **Estudos Avançados**, n. 16, p. 125-148, 2002.

RITZ, B.; WILHELM, M. **Air pollution impacts on infants and children**. 2008. Acesso em: <http://www.environment.ucla.edu/reportcard/article1700.html>

ROSEIRO, M. N. **Morbilidade por problemas respiratórios em Ribeirão Preto-SP (1995-2001)**: segundo indicadores ambientais, sociais e econômicos. 229 f. Dissertação (Mestrado em Enfermagem em Saúde Pública) – Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, SP: 2002.

SANTOS, A. M. **Norma de higiene ocupacional NHO-03**: análise gravimétrica de aerodispersóides coletados sobre filtros de membrana. São Paulo: Fundacentro, 2001.

TEIXEIRA, E. C.; FELTES, S.; SANTANA, E. R. Estudo das emissões de fontes móveis na região metropolitana de Porto Alegre. **Revista Química Nova**, v. 31, n. 2, p. 244-248. Rio Grande do Sul: 2008. Disponível em: <http://quimicanova.sbq.org.br/qn/No%20Prelo/Artigos/AR06532.pdf> Acesso em: 20 mar. 2014.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. Air quality guidelines. **Europe Global Update**, 2005.

YIP, M.; MADL, P. **Air pollution in Mexico City**. 2002. Acesso em: <http://www.sbg.ac.at/ipk/avstudio/pierofun/mexico/air.htm#crudeoil>

CAPÍTULO 6

Biocombustíveis lignocelulósicos sólidos

Ailton Teixeira do Vale

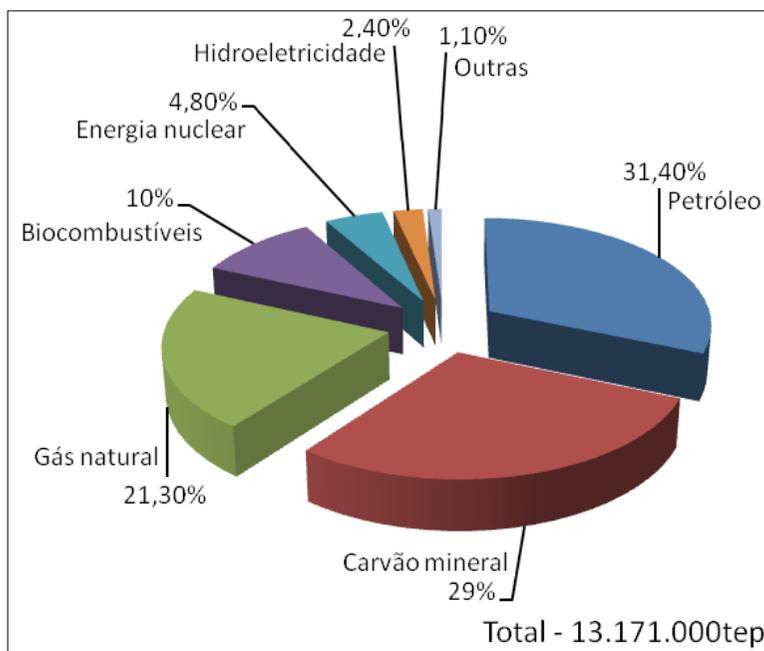
Luiz Vicente Gentil

INTRODUÇÃO

A partir da revolução industrial a humanidade, movida até então pela energia humana e animal, passa a ter uma nova aliada, a força motriz proveniente da combustão da lenha e do carvão mineral. Com o advento do petróleo e posteriormente da hidroeletricidade a humanidade experimenta ao longo dos séculos um extraordinário avanço tecnológico que aliado ao aumento do poder aquisitivo chega a um total de energia primária em 2012, segundo o IEA (2014), de $13.371 \times 10^6 \text{tep}$ (13.371 Mtoe), com predomínio de combustíveis fósseis, conforme é

apresentado na figura 1. A matriz energética mundial continuará com o domínio desses combustíveis fósseis até 2030, segundo DOE (2006), que estima um total de energia primária em 2015 de $14.217 \times 10^6 \text{tep}$ crescendo em 28% até 2030, quando atinge $18.232 \times 10^6 \text{tep}$.

Figura 1 - oferta total de energia primária no mundo em 2012



Fonte: IEA (2014).

Esse predomínio de uma matriz mundial baseada em combustíveis fósseis tem sido apontado como o responsável pelo aquecimento global que, segundo Gore (2006), é causado pelo efeito estufa e produzido pelo excesso de carbono na atmosfera devido à queima dos combustíveis fósseis. Devido a isso há uma preocupação mundial generalizada com o futuro do planeta principalmente no que tange a sustentabilidade do meio ambiente implicando na necessidade de alternativas energéticas que atendam a demanda humana sem causar

a poluição e as mudanças climáticas planetárias como as que estão ocorrendo. O Relatório da Organização das Nações Unidas produzido pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2007) apresenta um quadro preocupante do aumento da temperatura e efeito estufa provocado pelo excesso de carbono. Mas há um consenso quanto à crescente poluição do meio ambiente e o surgimento de uma consciência global da necessidade de redução da poluição, a diminuição do consumo dos combustíveis fósseis e o uso mais intenso da bioenergia, (IPCC, 2007).

Os países já se organizam na busca de matrizes energéticas sustentáveis, como a Suécia, segundo Persson (2006) ao decretar o fim do uso do petróleo para o ano de 2020. O Brasil, que tem uma vocação de sustentabilidade no uso de combustível renovável, apresentou em 2013 produção de energia primária da ordem de 258,2 Mtep composta de 53,6% de energéticos não renováveis e 46,4% de energéticos renováveis, esses distribuídos em energia hidráulica (13%), lenha (9,5%), produtos da cana-de-açúcar (19,1%) e outras renováveis (4,8%), BRASIL (2014).

Nesse cenário, a biomassa tem sido cogitada como uma das alternativas aos combustíveis fósseis pelas suas características ambientais, renovável a cada plantio, de baixo preço, farta e com um potencial de produção no limite das terras cultiváveis que o planeta oferece (ROSSILO-CALLE, 2004; TABARÉS, 2000; GOLDEMBERG, 1998). Biomassa energética é todo recurso renovável constituído principalmente de substâncias de origem orgânica (vegetal ou animal) que pode ser utilizada na produção de energia (ANEEL, 2005).

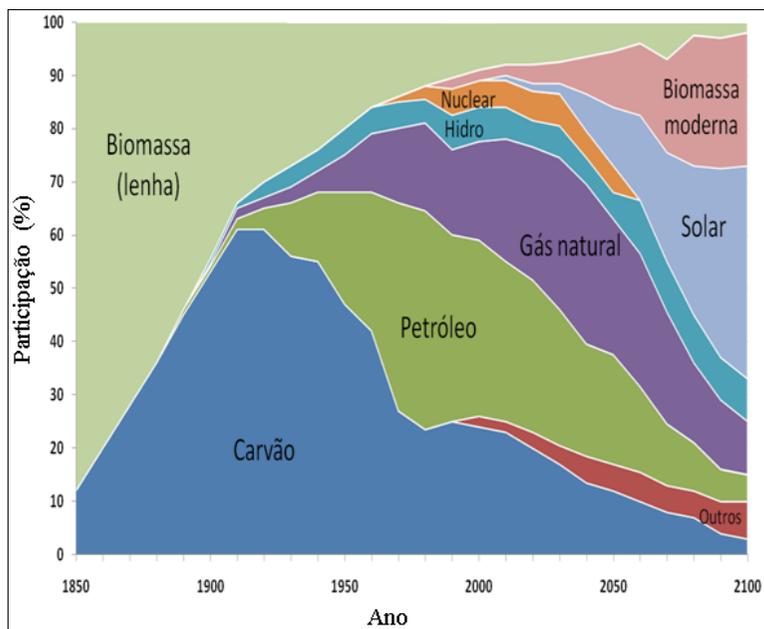
Na figura 2 é apresentada uma estimativa da evolução no consumo de energia pela humanidade em 250 anos, segundo Nakicenovic; Grubler; Mc Donald (1998), onde se observa em 1850 dois tipos de energia o carvão mineral, com 12% de participação e a lenha com 88% chegando em 2100 com oito tipos de energia incluindo o carvão com 2% e lenha com 2%. A análise do gráfico mostra um domínio total da biomassa no início (1850) passando por um estrangulamento

na década de 1980 e voltando a crescer com estimativa de participação em torno de 30% em 2100. O gráfico mostra também as modificações na biomassa em termos de qualidade, onde antes havia apenas lenha, agora aparece a biomassa moderna, onde podem ser incluídos os adensados lignocelulósicos obtidos a partir da transformação termo mecânica da lenha.

Pela análise do gráfico a energia solar e a biomassa moderna dominarão o cenário energético mundial com uma participação em torno de 70%. É curioso o desempenho da madeira nesse cenário, pois, se antes na forma de lenha o domínio do fornecimento de energia era dela, agora as previsões apontam para uma significativa participação dela dentro da biomassa moderna. Como biomassa moderna ela está presente modificada como combustível sólido, por processos mecânicos em cavacos e por processos termo mecânicos em adensados do tipo briquete ou pellet; transformada em combustível líquido como álcool metílico ou etílico e ainda transformada em combustível gasoso. Com as tecnologias atuais e do ponto de vista industrial e comercial observa-se que o uso mais comum da madeira para fins energéticos ocorre como combustível sólido: lenha, cavaco, briquete, pellet e carvão vegetal.

É possível que essas previsões modifiquem a favor dos combustíveis renováveis mesmo antes de 2100, pois as tecnologias para utilização da biomassa têm desenvolvido, também porque há um sentimento de responsabilidade em relação ao meio ambiente que vem crescendo a cada dia, principalmente após os resultados do IPCC. Desta forma estaríamos diante de uma nova onda de decisões, ou seja, mudar a fonte de energia primária não em função do esgotamento das reservas de combustíveis fósseis e sim devido ao que esses combustíveis causam ao meio ambiente.

Figura 2 - Comportamento dos combustíveis fósseis e renováveis ao longo de 250 anos



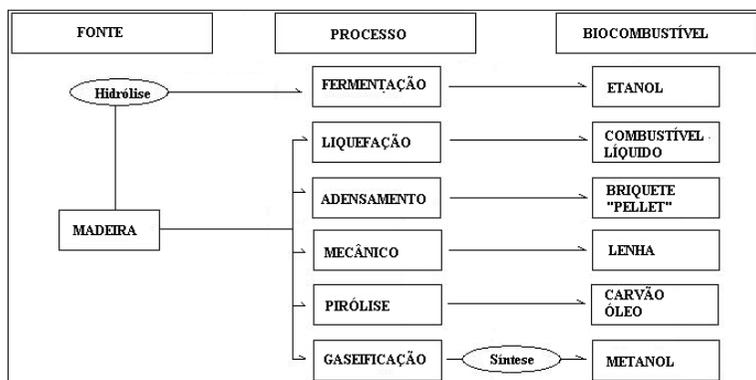
Fonte: Nakicenovic; Grubler; Mc Donald, 1998.

Aproximadamente 31% da superfície terrestre são ocupadas por florestas, sendo 7% desse total compostos por florestas plantadas, o que equivale a 264 milhões de ha (FAO, 2010). A madeira é a principal biomassa terrestre utilizada para a produção de energia seja na forma de toras (lenha) ou partir dos resíduos do processamento em serrarias.

As rotas de produção de energia a partir da madeira são apresentadas na figura 2 (Adaptado de BRASIL, 1982). A escolha da melhor rota a ser utilizada para geração de biocombustível dependerá, em princípio, da matéria prima disponível e do combustível que se quer produzir. Como se observa na figura 2 as rotas possíveis para disponibilizar ou transformar a madeira em combustível passam pelos processos de fermentação, de liquefação, de adensamento, de gaseificação,

de pirólise e o mecânico. A partir da pirólise lenta tem-se carvão vegetal, mas, com aumento da taxa de aquecimento ela torna-se rápida com aumento do rendimento em óleos.

Figura 3 - Rotas para produção de biocombustíveis a partir da madeira (Adaptação de BRASIL, 1982)



Neste capítulo será abordada a madeira considerando a rota mecânica para a produção de lenha e cavaco, a rota de adensamento na produção de pellet e briquetes e a pirolítica com a produção de carvão vegetal.

LENHA

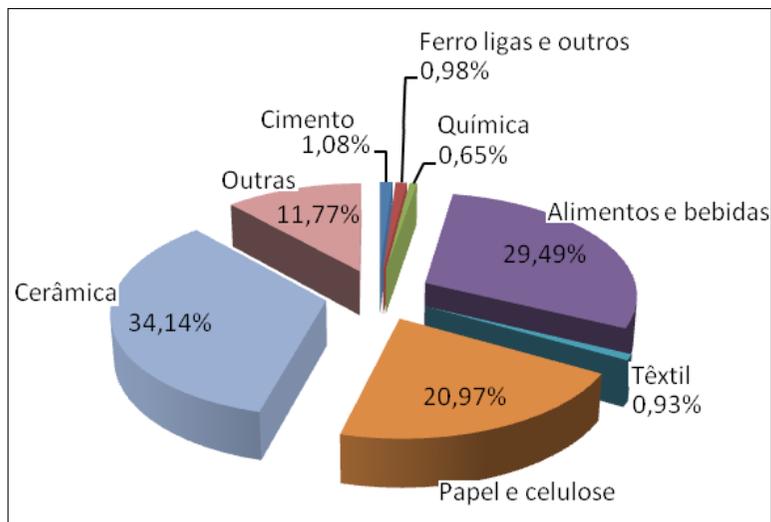
A lenha é o nome dado à madeira para uso energético e, portanto, é um produto lignocelulósico cuja base elementar é carbono, hidrogênio e oxigênio, arrançados na forma de lignina, celulose, hemicelulose e extrativos. O carbono e o hidrogênio são dois átomos combustíveis que ao sofrer combustão no processo de oxidação, geram chama, brasa e calor. As plantas, basicamente árvores, produzem esses energéticos lignocelulósicos pela fotossíntese. Assim as lenhas chamadas antigas são aquelas que queimam a lignina, holoceluloses e extrativos em sua forma natural e as lenhas chamadas modernas são aquelas que,

antes de entrarem em combustão, sofrem um processo de transformação, produzindo combustíveis sólidos de qualidade superior como cavaco, briquete e pellet o, agregando tecnologia, economia e energia.

As lenhas modernas atendem a condição H&P (*Heat & Power*) de empresas, indústrias e domicílios. Elas podem reunir várias características favoráveis ao uso energéticos, como maior densidade energética, padronização, baixa umidade, baixo nível de emissão de particulado, baixo preço, fácil movimentação, transporte e armazenamento e permitem automação nas agroindústrias.

A produção brasileira de lenha em 2012 (BRASIL, 2014) foi de 79,3 milhões de ton. com 27,1 milhões utilizadas na produção de carvão vegetal e energia elétrica; 18,5 milhões queimadas em residências para cocção de alimentos; 8,5 milhões de ton. na agropecuária, como secagem de grãos e 24,8 milhões no setor industrial. No setor industrial a distribuição nos vários seguimentos é mostrada na figura 4.

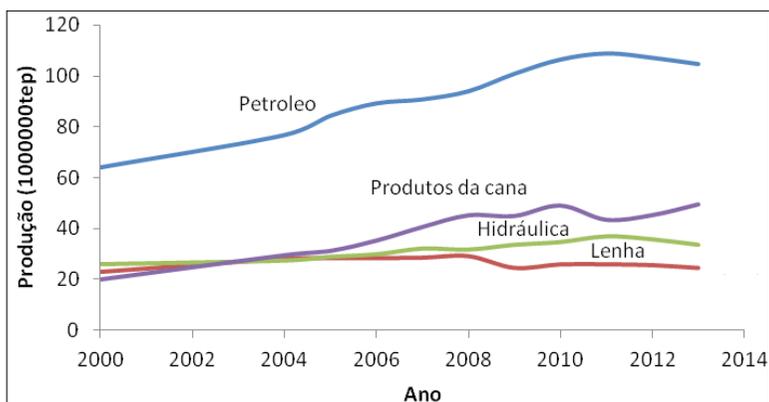
Figura 4 - Distribuição do consumo da lenha no setor industrial no Brasil em 2012



Fonte: BRASIL (2014).

No início da década de 1970 a produção de lenha no país era da ordem de 31,8 Mtep chegando em 2013 com uma produção e 24,5 Mtep, portanto uma queda de 23%, mas mantendo uma faixa histórica de participação no cenário energético brasileiro em relação a outros energéticos primários, conforme pode ser observado nos últimos 13 anos (Figura 5) período em a produção oscilou entre 23 e 28 milhões de tep.

Figura 5 - Produção de lenha no Brasil em relação a outros energéticos primários



Fonte: BRASIL (2014).

Segundo IMAZOM (2013a) 2.226 empresas madeireiras em funcionamento na Amazônia Legal em 2009 extraíram cerca de 14,2 milhões de metros cúbicos de madeira em tora nativa. Com base em um estudo realizado pelo IMAZOM (2013b) com 10 serrarias no Estado do Pará, os rendimentos volumétricos variaram entre 27 e 55%, com média 35%. Trabalhando com espécies nativas de Jaru, Rondônia, Oliveira *et al.* (2003) encontraram rendimento médio de 46,3% no processamento de toras em serraria. Assim considerando um rendimento médio para a região amazônica de 40,6%, a estimativa de produção de resíduos do processamento de toras de madeira em serraria é da ordem de 8,42 milhões de metros cúbicos sólidos,

que poderiam ser utilizados para a geração de energia, de forma direta ou transformados em outro produto.

A redução granulométrica da lenha ou resíduos transformados em cavacos é uma alternativa para a produção de energia que, segundo Nogueira (2000), aumenta a superfície específica e a reatividade em comparação à lenha na forma de toras, aumentando a eficiência de diferentes sistemas de utilização de biomassa como os leitos em movimento, em suspensão, fluidizados borbulhante e fluidizados circulante. Nascimento e Biaggioni (2010) trabalhando com a avaliação da lenha na forma de toras e na forma de cavacos afirmam que o consumo de energia nas operações da rota da lenha foi maior em 26,8% do que na rota da lenha transformada em cavacos, mostrando a vantagem da utilização desse.

Cavacos são pedaços de madeira com dimensões entre 5 e 50mm, que pode ser feito de madeira sólida, restos florestais, resíduos de serrarias ou da indústria moveleira. Ele é mais uniforme, limpo e seco devido ao pequeno tamanho, pois tem maior superfície de secagem. A vantagem desse combustível é a automação industrial; que possibilita o armazenamento em silos a granel, o baixo custo do transporte e a redução de mão de obra. No Brasil é um combustível emergente pelo alto preço da cavaqueira, custo de adaptação industrial e inércia cultural para novos sistemas de H&P (*heat & power*).

BRIQUETES

Na produção de energia o uso da lenha apresenta algumas desvantagens como a desuniformidade, baixa densidade energética e o elevado custo de transporte. O adensamento, principalmente dos resíduos da biomassa é uma alternativa, pois melhora essas características indesejáveis da lenha. Segundo Gentil (2008) a briquetadeira é a máquina mais importante do processo industrial, pois ela transforma a serragem em briquete pela ação de elevada pressão, gerando aquecimento e plastificação da lignina, tornando a massa solta da serragem numa

peça sólida cilíndrica com dimensão aproximada de 10 mm de diâmetro por 300 mm de comprimento.

São produzidos e industrializados dois tipos de madeira adensada: o briquete e o pellet. O briquete, segundo Bezzon (1994), é cilíndrico com diâmetro de 4 cm a 10 cm e comprimento de 10 cm a 40 cm, enquanto o pellet teria diâmetro de 0,5 cm a 1,8 cm, comprimento até 4 cm e densidade entre 1000 kg/m^3 a 1300 kg/m^3 . Em geral, o processo de produção do pellet é por extrusão contínua numa matriz de furos e o briquete com pistão mecânico de pulso (PEREIRA, 2006; ZAKRISSON, 2002).

A patente de briquetagem foi concedida a William Easby em 1848 cujo processo possibilitava, a partir da prensagem de moinha de carvão, a formação de um produto aglomerado sólido. No final do século XIX a concepção desenvolvida por Easby transformou-se em prática industrial nos Estados Unidos onde finos de carvão secos e peneirados eram misturados a asfalto fundido e prensado (CARVALHO e BRINCK, 2004).

O briquete de madeira é uma peça cilíndrica de serragem ou maravalha comprimida com uma carga média de 6 tf a 8 tf, tensão de 90 kg/cm^2 a 145 kg/cm^2 , gerando uma temperatura de 170°C a 270°C na câmara de briquetagem para a decomposição parcial da lignina (efeito termoplástico) (ROWELL, 1987), teor de umidade base úmida de 5% a 15% sendo o ótimo 8%, com ou sem aglutinante, com uma densidade entre $1,0 \text{ t/m}^3$ a $1,5 \text{ t/m}^3$, apresentado em peças cilíndricas ou hexagonais de cerca de 70 mm a 100 mm de diâmetro e comprimento de 10 cm a 40 cm (GENTIL, 2008).

O briquete é um combustível de alta densidade energética, homogêneo, de fácil transporte, limpo, de rápida resposta de temperatura e proporciona uma combustão homogênea em comparação à lenha e por isso tem sido muito procurado por padarias e pizzarias para a cocção; domicílios para o aquecimento; cerâmicas e olarias para a cura de seus produtos e indústrias para a queima em fornalhas, fornos e caldeiras tanto para geração de calor como potência.

O processo industrial

Conforme Gentil (2008) o processo ponta a ponta é caracterizado pela entrada da serragem e saída do briquete, esfriado, embalado e pronto para entrega ao cliente. O autor descreve as etapas de produção de uma usina de briquetagem na produção de briquetes de serragem de madeira (95%) e casca de algodão (5%), com diâmetros médio de 90mm, teor de umidade média de 12%, comprimento médio de 30 cm, densidade a granel de 691 kg/m³, densidade aparente de 1060 kg/m³ e entregue ao cliente em embalagens de 15 kg (forma desorganizada) ou 35 kg (forma organizada). A produção era de 7800 t/ano destinada ao comércio interno em um raio máximo de entrega de 150 km. Nessas condições a capacidade instalada dos motores elétricos de uso direto era de 218,81 kW, conforme pode ser observado pela tabela 1.

Tabela 1 - Relação da potência instalada dos motores elétricos

Etapa	Motor	Localização	Potência Instalada	
			CV	KW
Cominuição	1	central	75	55,16
	2	tração superior	3	2,21
	3	tração inferior	3	2,21
	4	afiador	1	0,74
	5	rosca serra	5	3,68
	Soma		87	63,99
Peneira	8	esteira superior	3	2,21
	9	secador	3	2,21
	10	rosca inferior	5	3,68
	soma		11	8,09

Secagem	6	insuflador	0,5	0,37
	7	alimentador	1	0,74
	11	elevador secador	3	2,21
	12	acionador secador	5	3,68
	soma		9,5	6,99
Ciclonagem	13	puxador serragem	3	2,21
	14	rosca alimentação	3	2,21
	15	exaustor	30	22,06
	soma		36	26,48
Briquete 1	16	central	60	44,13
	17	óleo lubrificante	1	0,74
	18	puxador serrag	5	3,68
	19	Alimentador serrag	3	2,21
	soma		69	50,75
Briquete 2	20	central	75	55,16
	21	óleo lubrificante	1	0,74
	22	puxador serrag	5	3,68
	23	Alimentador serrag	3	2,21
	24	óleo hidráulico	1	0,74
	soma		85	62,52
Total			297,5(*)	218,81

Nota: (*) esse valor inclui os motores da cominuição, em desuso durante os ensaios na indústria piloto.

A serragem proveniente da serraria é transportada até a empresa, passando pelo peneiramento, para ter a granulometria desejada, descartando tocos e pedaços maiores que são queimados na caldeira. Outros como retalhos de árvores, pallets, caixaria e descartes moveleiros são também matéria prima que chegam na empresa e, neste caso, passam por um processo de cominuição para produzir briquetes

ou são queimados na fornalha, para fornecimento de calor no processo de secagem.

A secagem é feita em um sistema de composto por uma fornalha do tipo câmara de combustão de alvenaria de tijolo refratário com armação interna de fitas de aço e grelha de ferro fundido, com 35 m² de área, uma janela de abastecimento para a lenha e outra para limpeza de cinzas. A temperatura do ar do secador atinge entre 323° C a 563° C ao queimar restos madeireiros, briquetes não aproveitados e refugos do peneiramento. Um insuflador é utilizado para manter a combustão com excesso de ar e enriquecendo a combustão com oxigênio. O ar produzido na fornalha é injetado dentro de um secador cilíndrico com 1,8 m de diâmetro, 12 m de comprimento e volume de 31 m³ aquecendo assim o ar interno e reduzindo a umidade da serragem.

O passo seguinte é a exaustão feita por um ciclone, que além de aspirar o ar aquecido da fornalha até a chaminé, reduz a alta temperatura da serragem que vem do secador eliminando as partículas mais finas que prejudicam o adensamento do briquete. A serragem então é colocada em um depósito de 32,24 m³ e capacidade para 6,6 ton., mantendo a temperatura da serragem numa faixa média de 43,02° C.

A briquetagem é feita por duas máquinas a pistão de pressão a pulso, com capacidades nominais de 1200 kg/h e 800 kg/h, acionadas por motores elétricos de 60 CV e 75 CV. O adensamento é feito com serragem limpa com 11% de umidade proveniente do depósito, à temperatura de até 250° C, plastificando a lignina e dando coesão ao briquete. A serragem comprimida e quente é forçada a passar numa guia horizontal de seis metros de comprimento, esfriando até 60° C, quando é embalado em sacos. O briquete ensacado é armazenado de onde são retirados para carregamento dos caminhões para a expedição final.

O comércio de briquete

Os países nórdicos principalmente Suécia e Finlândia possuem alto *know how* de produção e comércio em pellets e briquetes tanto de madeira como de carvão entre outros biocombustíveis sólidos como turfa. Nesses países em função do frio intenso, com menor radiação solar e baixa produtividade florestal, existem em funcionamento plantas de cogeração elétrica movidas a combustíveis sólidos biomássicos como briquete e pellet (BRIDGWATER, 2007; HIRSMARK, 2002; EUROPEAN PELLETT CENTRE, 2007; VAPO, 2006).

O briquete é cotado mundialmente com preços variáveis em função da qualidade do produto, taxa de câmbio, competitividade, distância vendedor-cliente, distância da matéria-prima, barreiras alfandegárias e escala (BRIQUETES NO BRASIL, 2005; BIOMASSA E BRIQUETES, 2007; EUROPEAN PELLETT CENTRE, 2007). Egger (2005) apresenta um levantamento dos preços de mercado na Europa, sendo que os mais baixos são da República Tcheca e Polônia no valor de € 110/t a € 117/t e os mais altos são da Dinamarca e Suécia de € 190/t a € 210/t, entregue no cliente por caminhão em lotes mínimos de 3 t a 5 t. Já na Espanha, os preços FOB (Free on board) são de € 54/t a € 84/t e os preços CIF (Cost, Insurance and Freight) de € 180/t a € 300/t (TABARÉS, 2000).

O fato do briquete ser considerado um produto ambiental, associado à existência de uma preocupação mundial com o efeito estufa e suas consequências no clima, propicia uma ascensão de energias limpas em relação às energias fósseis. A normalização para briquetes ainda é incipiente, por isso, cada país usa as próprias como Suécia (Swedish Pellet Standard SS 18 71 20 e Swedish Briquette Standard SS 18 71 21), Finlândia, Áustria (ONORM M 1735) e Alemanha (DIN 51731/DIN plus) (ALAKANGAS, 2002, 2006).

No Brasil, a comercialização do briquete segundo Couto *et al.* (2004) a partir de um estudo feito no Espírito Santo, tem desafios a vencer como o alto preço do frete da matéria-prima, matéria-prima

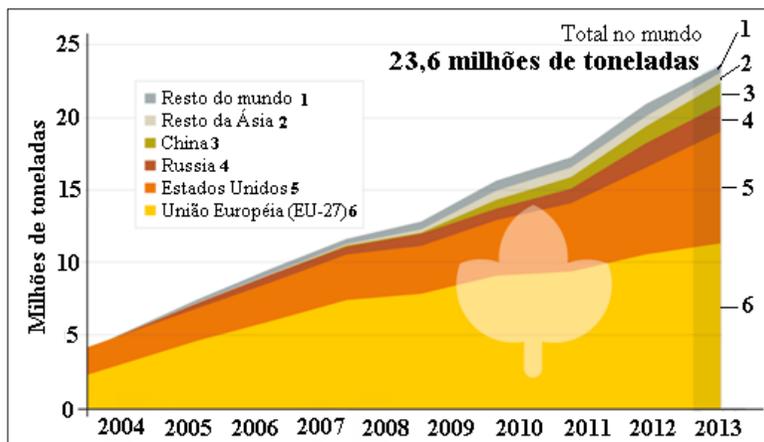
heterogênea, a concorrência com a lenha e o carvão, elevados impostos, ausência de promoção do produto e necessidade de capital de giro. Em relação ao mercado externo, os desafios são: grandes pedidos comerciais feitos às pequenas usinas de briquetagem, a burocracia do governo e ao elevado custo para o capital de giro.

Pereira (2006) informa que a lenha plantada ou a lenha catada são os maiores concorrentes do briquete nas fornalhas de indústrias ou agroindústrias, onde o vapor se torna mais necessário. Outros concorrentes menos importantes são o GLP (gás liquefeito de petróleo), energia elétrica, carvão e óleo combustível, dependendo do preço, das distâncias e das leis ambientais.

PELLETS

A produção mundial de pellets cresceu 13% a partir de 2012, atingindo 23,6 milhões de ton. em 2013, com quase a metade dessa produção concentrada na Europa (EU-27) seguida dos Estados Unidos com 33%, conforme a figura 6. Empresas canadenses e norte americanas estão trabalhando no sentido de aumentar a produção construindo novas fábricas e assim aumentar a participação nesse mercado. Em função deste previsível crescimento na produção de pellets, os portos estão se modernizando, como o porto de Amsterdã que investiu US\$138 milhões para melhorar o setor de manuseio e armazenamento de biomassa para 2014, uma vez que em 2013 o movimento de pellet e cavaco foi da ordem de 100.000 ton. (REN21, 2014).

Figura 6 - Produção mundial percentual de pellet de madeira (Adaptado de REN21, 2014)



Os pellets de madeira são biocombustíveis de serragem adensada e granulometria específica, fabricados com uma pasta extrudada a grandes pressões em forma de cilindros com diâmetro entre 6 a 10 mm, semelhante à ração animal, diferindo do briquete por suas menores dimensões e processo industrial. Todo material lignocelulósico pode ser pelletizado, sendo que as coníferas produzem pellets de melhor qualidade por ter maior teor de lignina, resina e menor densidade. Devido a forma e tamanho permite movimentação manual ou automática podendo ser queimado tanto para aquecimento residencial ou em termelétricas (IEA, 2006; COUTO *et al.*, 2004).

A crise do petróleo na década de 1970 levou a uma procura por combustíveis alternativos para uso industrial e comercial e o pellet foi uma consequência desse esforço nos Estados Unidos. Com a invenção do sistema de abastecimento automático dos fogões em 1988, expande-se pelo mundo o uso de pellet no aquecimento residencial (DOLZAN *et al.*, 2006 e OPALCO, 2014).

Na Europa a produção de pellets iniciou em 1982 com a primeira usina construída na Suécia. Com o alto custo de produção e

uso de eletricidade de usinas nucleares, essas indústrias entraram em declínio (LJUNGBLOM, 2005). Com a taxaço elevada sobre os combustíveis de origem fóssil iniciada em 1992 pelo governo sueco, a indústria de pellets reapareceu saltando de 185.000 ton. em 1995 para 1,8 milhões de ton. em 2009 (BIOENERGY INTERNATIONAL, 2006; NYSTROM, 2010). Segundo Garcia (2010), de 2004 a 2010 o número de plantas de pellets na Europa passou de 195 para 594 em função do aquecimento do mercado.

O processo industrial

Matéria-prima

A matéria-prima para a produção de pellets tem origem em duas fontes principais. A produção própria de maciços florestais ou aquisição de resíduos processados da madeira como resíduos de serrarias, móveis, construção civil, maravalha, serragem e pallets usados. Ou ainda resíduos agrícolas de algodão, milho e arroz. A matéria-prima na forma de pedaços precisa ser reduzida em granulometria específica para que a massa a ser extrudada na peletizadora flua com a viscosidade certa. Segundo ABIB, 2015 ela precisa ser adquirida em um raio de até 100 km da usina. A matéria-prima é armazenada em um pátio para secagem natural seguindo então para o silo de onde sai por transporte pneumático, passando por um detector de metais do sistema de alimentação, para a secagem em secador rotativo (ABIB, 2015).

Secagem

A secagem é o processo de maior consumo de energia térmica na briquetagem (GENTIL, 2008) e na peletização não é diferente sendo também a etapa de maior consumo de energia. O calor é gerado em uma fornalha pirolítica e conduzido para um secador industrial de tambor rotativo. A matéria-prima é forçada a movimentar-se dentro

do secador no sentido da fornalha para o sistema de peletização, atingindo 14% de umidade e sendo transportada para o silo de armazenamento de matéria-prima seca para posterior moagem (ABIB, 2015).

Moagem

Do silo de armazenamento a matéria-prima seca é transferida até a unidade de moagem industrial, que utiliza moinho de martelos para obter granulometria de 3 a 4 mm, quando então é transportada para o silo.

Peletização

A matéria-prima seca e triturada é transferida do silo de armazenamento para o processo de peletização industrial, passando antes por um peneiramento visando uma redução do teor de sílica e um condicionamento para o processo. O condicionamento é feito mediante o uso de vapor, que contribui para a umidificação superficial, atuando como lubrificante no processo de peletização, que juntamente com o aquecimento à temperatura de 120°C-130°C melhora as condições de plastificação da lignina e de agregação das partículas (ABIB, 2015). O adensamento da matéria-prima é feita por extrusão através de uma matriz de aço perfurada com orifícios de 3 a 13 mm de diâmetro. A matéria-prima é forçada a passar por esses orifícios de dentro para fora devido a pressão de 300 MPa, exercida pelos cilindros (NIELSEN *et al.*, *Apud* GARCIA, 2010).

Resfriamento

O processo de resfriamento é importante para a resistência e durabilidade dos pellets porque eles saem do processo de produção com temperaturas de 95°C e elevada maciez (GARCIA, 2010). Durante o resfriamento os pellets caem em fluxo contracorrente em uma

câmara vertical onde estão instalados ventiladores mecânicos, durante 30 minutos, diminuindo a temperatura. O resfriamento do pellet é importante, pois contribui para que a lignina alcance o seu maior potencial aglutinante, fator fundamental para que os pellets mantenham a sua nova forma. Durante o resfriamento, os pellets tornam-se rígidos e perdem umidade podendo chegar a 6,0% à 7,0% (ABIB, 2015).

Armazenamento e embalagem

Após fabricação e resfriamento os pellets passam por um sistema de separação de finos e são armazenados a granel em um silo para carregamento em containers ou big bags ou ao sistema de pesagem e embalagem automática em sacos de 5 kg, 10 kg, 20 kg, 50 kg; fardo de 500 kg e 1000 kg ou em caminhões tanques. Os pellets devem ser depositados em local seco, de modo a não favorecer o desenvolvimento de bactérias ou fungos, embora possuam uma baixa percentagem de umidade (ABIB, 2015; GARCIA, 2010).

Controle de qualidade

Dois grupos de características devem ser observados na qualificação dos pellets, um de natureza química e outro de natureza física. Exemplos de características de natureza química que devem ser informadas são os teores de cloro, enxofre e nitrogênio que, com a queima dos pellets, podem formar compostos nocivos ao meio ambiente; teores de sódio e potássio que podem causar corrosão nos queimadores; teores de magnésio, cálcio e fósforo que em altas quantidades elevam a produção de cinzas; além dos teores de voláteis envolvidos na decomposição térmica do pellet e o poder calorífico importante no balanço de massa das grandes empresas. Exemplos de características de natureza física são as densidades do granel e sólida, importante no balanço de massa e na determinação da densidade energética

do pellet. A umidade interfere no poder calorífico inferior, a quantidade de finos indica a resistência a abrasão do pellet sendo importante informação para o transporte. Para atender essas exigências estão sendo criadas as normas.

Normalização

A normalização é um meio de garantir qualidade ao produto que se quer comercializar, podendo ser mais flexível em alguns países ou mais rigorosa em outros; podendo ser exclusivamente para madeira ou também atendendo a resíduos agrícolas. Alguns países europeus como Alemanha, Suécia e Áustria já tem suas próprias normas para qualificação da produção de pellets, principalmente de madeira de coníferas. A França e a Itália por ter tradição agrícola criaram classes específicas de normalização para madeira e para resíduos agrícolas e frutíferos, além da possibilidade de inclusão de madeiras de folhosas na produção do pellet (DIAS *et al.*, 2012; FILBAKK, 2011).

Na Alemanha o Instituto Alemão de Normas (Deutsches Institut für Normung - DIN) trabalha com as seguintes normas: DIN 51731 que dispõe sobre teste e exigências para combustíveis sólidos, madeira compactada sem tratamento; DIN EN 15270 que dispõe sobre definições, exigências, testes e características de queimadores de pellets em pequenos aquecedores e a DIN 66165 que dispõe sobre procedimento para análise de tamanho de partículas. A norma DIN Plus baseia-se na DIN EN 15270 e estabelece padrões para pellets de alta qualidade. O Instituto Normativo Austríaco (ÖNORM) tem a norma padrão ÖNORM M7135 que estabelece as diretrizes para a compactação de madeira e casca “in natura” e as normas M7136 e M7137 que trata da logística e armazenamento, respectivamente. A Suécia tem a norma SS187120 (Swedish Standard-SS) que estabelece a qualidade dos pellets no país. A Itália trabalha com a norma CTI-R04/05 que estabelece a qualidade de pellets produzidos de biomassa (Comitato Termotecnico Italiano-CTI) (Tabela 7) (DIAS *et al.*, 2012).

Tabela 2 - Especificações de normas europeias para a qualificação de pellets

Especificações	Suécia - SS187120			Áustria Önorm M7135	Alemanha DIN51735/ DIN Plus
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3		
Diâmetro (mm)	máx. 4	máx. 5	máx. 6	4 a 20	HP1-Ø > 100
Comprimento (mm)	*	*	*	≤100	HP1 - > 300
Dens. aparente (kg/m ³)	≥ 600	≥ 500	*	*	*
Finos < 3 mm (%)	≤ 0,8	≤ 1,5	*	*	máx. 1,0
Dens. da unidade (g/m ³)	*	*	*	≥ 1,0	1,0 - 1,4
Teor umidade (%)	≤ 10	*	≤ 12	≤ 12	<12,0
Teor de cinzas (%)	≤ 7,0	≤ 1,5	> 1,5	< 0,5	< 1,5
Poder calorífico (Mj/kg)	≥ 16,9	*	*	≥ 18,0	17,5 - 19,5
Enxofre (%)	≤ 0,08	*	*	≤ 0,04	≤ 0,08
Nitrogênio (%)	*	*	*	≤ 0,3	< 0,3
Cloro (ppm)	≤ 0,03	*	*	≤ 0,02	< 0,03
Sódio (ppm)					
Arsênico (ppm)	*	*	*	*	< 0,8
Cádmio (ppm)	*	*	*	*	< 0,5
Cromo (ppm)	*	*	*	*	< 8
Cobre (ppm)	*	*	*	*	< 5
Merúrio (ppm)	*	*	*	*	< 0,05
Chumbo (ppm)	*	*	*	*	< 10
Zinco (ppm)	*	*	*	*	< 100
EOX halogênicos	*	*	*	*	< 3
Orgânicos extraíveis(ppm)	*	*	*	*	*
Aditivos (%)	A ser acordado			*	Banidos
Ponto de fusão cinzas	A ser indicado			*	*
Durabilidade (%)	*	*	*	< 2,3	*

Tabela 3 - Normalização recomendada pelo “Pellet Fuels Institute” dos Estados Unidos e em análise pela Agencia de proteção ambiental dos EUA (EPA) (Adaptado de PFI, 2015)

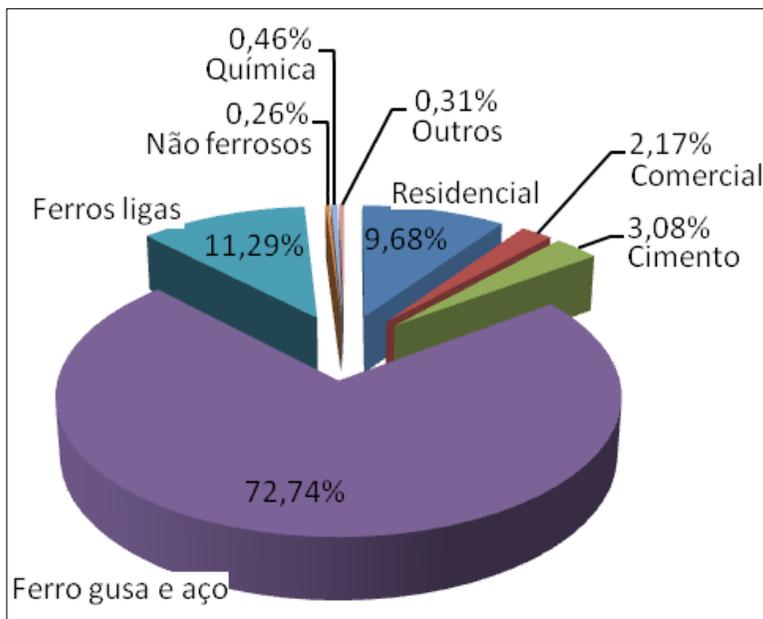
Propriedades	Premium	Standard	Utilitário
Densidade (kg/m ³)	640 - 736	608 - 736	608 - 736
Diâmetro (mm)	5,84 - 7,25	5,84 - 7,25	5,84 - 7,25
Índice de durabilidade	≥96,5	≥95,0	≥95,0
Finos (%)*	≤0,5	≤1,0	≤1,0
Cinzas (%)	≤1,0	≤2,0	≤6,0
Comprimento (%)**	≤1,0	≤1,0	≤1,0
Umidade (%)	≤8,0	≤10,0	≤10,0
Cloro (PPM)	≤300	≤300	≤300

Nota:* na porta da fábrica; ** % de comprimento maior que 3,81 cm (1,5 polegadas).

CARVÃO VEGETAL

O Brasil é o maior produtor e consumidor de carvão vegetal no mundo e em 2012, das 27,09 milhões de ton. utilizadas na transformação em carvão vegetal e eletricidade, 26 milhões de ton. foram utilizadas para produzir 6,6 milhões ton. de carvão vegetal, sendo mais de 70% desse valor utilizado na siderurgia, conforme mostra a figura 7.

Figura 7 - Distribuição do consumo e carvão vegetal nos setores residencial, comercial e industrial no Brasil no ano de 2012 (Fonte: BRASIL, 2014)



Nas figuras 8 e 9 estão representadas o comportamento da demanda de carvão vegetal ao longo dos últimos 10 anos. A participação do carvão vegetal no balanço energético nacional caiu 34,4% de 2004 para 2013, principalmente devido a diminuição de 36,6% do consumo no setor industrial; puxado pela diminuição no consumo do carvão vegetal na siderurgia no mesmo período, de 38,36%. O setor residencial apresentou uma diminuição no consumo de carvão vegetal da ordem de 20,2%. Em 2013, do total de 6,4 milhões de ton. de carvão vegetal, 5,6 milhões de ton. foram consumidos na indústria. E desse total 5,4 milhões de ton. foram utilizados nos setores de ferro gusa, ferro ligas e não ferrosos. Portanto, se a siderurgia vai mal, o mercado de carvão vegetal acompanha.

Figura 8 - Consumo de carvão vegetal no Brasil no setor industrial

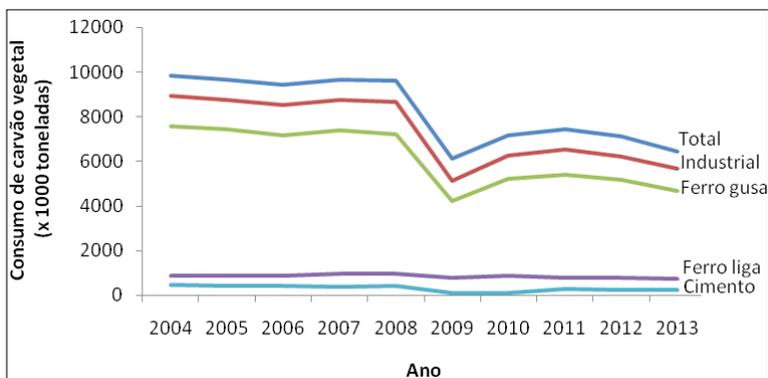
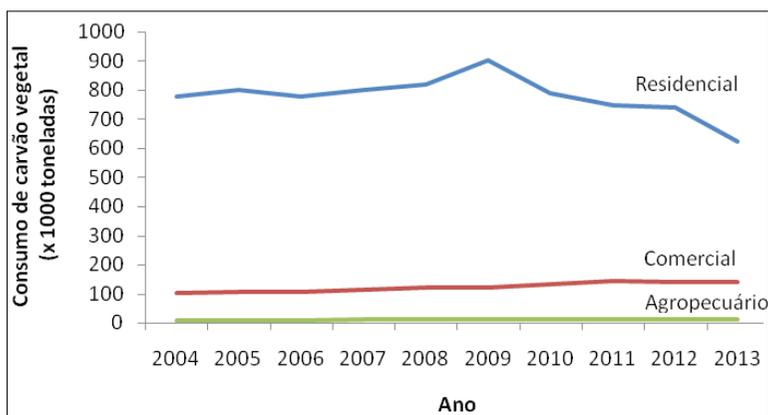


Figura 9 - Consumo de carvão vegetal no Brasil nos setores residencial, comercial e agropecuário

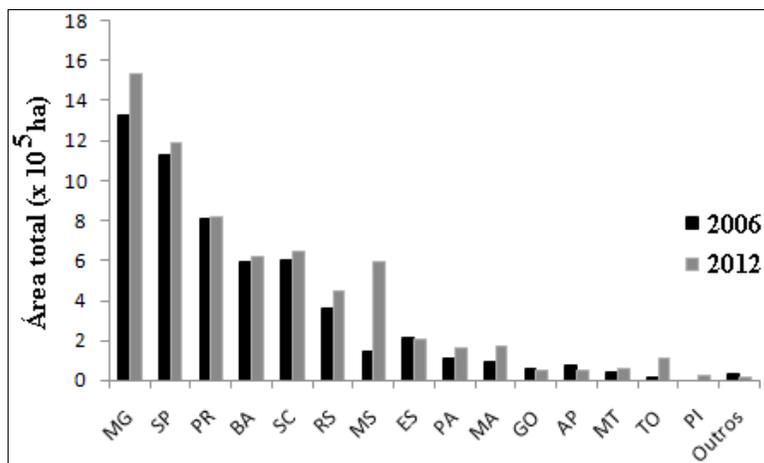


Minas Gerais é o maior produtor e consumidor de carvão vegetal no Brasil. Houve modificação na legislação florestal (Lei nº 14.309, de 19 de junho de 2002) sancionando-se em 2/9/2009 a Lei Florestal – A Lei 18.365/2009 e regulamentada pelo Decreto nº 45.166, de 4 de setembro de 2009. A Lei Florestal fixou redução progressiva do consumo legal de produtos como o carvão vegetal ou subprodutos originados da vegetação nativa, estabelecendo que a partir de 2018 ele não poderá ser maior do que 5% (SIAM, 2015). Por outro lado

no Brasil a siderurgia nacional usa, além do carvão vegetal, o coque mineral como termo redutor, e esse, participou ao longo dos últimos 10 anos com 39,5% na estrutura de consumo do setor de ferro gusa e aço, setor de maior consumo de carvão, contra 22,1% do carvão vegetal (BRASIL, 2014). Fatores como esses podem explicar em parte a queda no consumo de carvão nos últimos anos. Mas não se pode deixar de observar as questões econômicas mundiais como a queda no preço do barril do petróleo atingindo em janeiro de 2015 valor abaixo de US\$ 50 e com previsão de manter-se abaixo dos US\$ 100.

Para atender a demanda e a legislação há a necessidade de plantios de novas áreas. O reflorestamento no Brasil com base nos dados da Associação Mineira de Silvicultura AMS (2013), apresentado na figura 10, cresceu 19% de 2006 a 2012, passando de 5,6 milhões de ha para 6,7 milhões. O Estado de Minas Gerais que mais reflorestou no país no mesmo período, passou de 1,3 milhões de ha para 1,5; mais 16%. Mas em 2013 em torno de 30% do carvão consumido no Brasil foi produzido com lenha nativa, ou seja, 1,9 milhões de ton. Portanto há um caminho a ser percorrido ainda até que se tenha uma solução de autossuficiência das empresas na produção de carvão vegetal utilizando lenha de floresta plantada.

Figura 10 - Área total de floresta plantada no Brasil em 2006 e 2012
(Fonte: AMS, 2014)



O aumento da capacidade de produção aliada à melhoria na qualidade do carvão vegetal deve ser o objetivo a ser alcançado. Quanto à silvicultura, características como troncos mais retos e menos cônicos, maior desrama natural e maior produtividade precisa ser almejada, tanto quanto as características da madeira como maior densidade, maior teor de lignina (relação guaiacil/siringil), ou melhor relação cerne/alburno. O processo de carbonização, o tipo de forno e o manejo dos fornos também são importantes nessa questão, tanto que, segundo Almado (2014), hoje trabalhando com fornos retangulares em substituição aos circulares, com temperaturas máximas em torno entre 350 e 400° C, as empresas têm conseguido maiores rendimentos gravimétricos, melhor resistência mecânica e menor reatividade com menor custo de manutenção do equipamento.

O uso do carvão vegetal como recurso energético ocorre em vários setores industriais do país, mas na indústria siderúrgica nacional, em que é usado como termo redutor do minério de ferro para produção de ferro gusa, a participação é maior (BRITO, 1990). O carvão mineral também é utilizado, mas o nacional tendo alto teor

de cinzas é considerado de qualidade inferior. Como no Brasil há pouca produção dele importa-se o coque (PAULA, 1992; SOARES *et al.*, 2004; BACHA, BARROS, 2004).

CARVÃO VEGETAL E CARVÃO MINERAL

O fornecimento de carbono para o processo de redução do ferro presente no minério de ferro é feito pelo carvão vegetal ou mineral, portanto ambos têm funções semelhantes na siderurgia. Mas o carvão vegetal é proveniente de fonte renovável com baixíssima emissão de enxofre, balanço equilibrado entre emissão e absorção de CO_2 e a produção atende a demanda ao contrário do carvão mineral brasileiro que é de baixa qualidade e produção pequena, necessitando de importação. Portanto siderúrgicas que usam o carvão vegetal no processo de redução do minério de ferro tem algumas vantagens sobre aquelas que utilizam o coque de mineral. Na tabela 4 são apresentadas diferenças entre o carvão vegetal e o coque mineral. A grande vantagem do uso do carvão vegetal reside no fato de ele ser originário de uma fonte renovável, aliado ao baixo teor de enxofre quando comparado com o coque mineral, apesar de apresentar uma faixa granulométrica maior e uma resistência mecânica à compressão menor.

SANTOS JR. (2011) afirma que na emissão de CO_2 e captura de O_2 por ton. de ferro-gusa produzido, há um ganho ambiental quando se considera a rota do carvão vegetal. Citando CGEE (2010) ele informa que na rota que utiliza o coque como redutor, há emissão de 1.883 kg de CO_2 e uma remoção de 1.274 kg de O_2 por ton. de ferro-gusa em todas as fases da cadeia. E na rota que utiliza o carvão vegetal, há captura de 3.697kg de CO_2 e emissão de 1.789kg de O_2 , na fase da floresta plantada, para cada ton. de ferro-gusa produzido e no restante da cadeia, assim como ocorre na rota do coque de carvão mineral, há emissões de CO_2 e remoção de O_2 . No entanto, neste caso, totaliza-se uma remoção líquida de 1.111 kg de CO_2 e a

emissão de 164 kg de O₂ por ton. de ferro-gusa considerando toda a cadeia que utiliza o carvão vegetal como redutor.

Tabela 4 - Características do carvão vegetal e do coque mineral

Qualidade	Item	Unidade	Carvão vegetal	Coque	
Química	Carbono fixo	%	70-75	86-89	
	Matérias voláteis	%	20-25	1-3	
	Cinzas	%	2-3	10-12	
	Enxofre	%	0,03-0,10	0,45-0,70	
	Composição das cinzas				
	SiO ₂	%	5-10	50-55	
	CaO	%	37-56	4-5	
	MgO	%	5-7	4-5	
	Al ₂ O ₃	%	2-12	25-30	
	Fe ₂ O ₃	%	6-13	5-7	
	P ₂ O ₅	%	8-12	0,40-0,80	
Física	Resistência à compressão	kg/cm ²	10-80	130-160	
	Faixa granulométrica	mm	9-101,6	25-75	
	Densidade	t/m ³	0,25	0,55	

Fonte: Adaptado de Pinheiro, 2004, *apud* SANTOS JR, 2011.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Brasil tem território continental de longas distâncias entre a fabricação e a demanda nas regiões metropolitanas. Para as lenhas em geral e devido ao baixo preço, grandes volumes e distâncias a percorrer, não é viável a exportação sem valor agregado, pois isso gera fretes caros limitando a expansão desses mercados. Produtos como restos florestais, de material de construção, poda urbana, agrícolas ou das serrarias como serragem, galhos e costaneiras, só tem mercado local e, na maioria das vezes, apenas depois de semi processado. Briquetes de média qualidade podem ter o lucro diluído em custos de frete acima de 100 km da entrega. Gentil (2008) mostra que 30% do custo industrial do briquete é transporte da matéria prima e entrega do produto acabado ao consumidor final.

Quando o sistema é de baixa tecnologia, a lenha é competitiva, e à medida que agrega valor como a transformação em briquete, tem mais energia e preço também. Essa é a razão dos compradores decidirem pela melhor condição. Uma indústria de óleo vegetal do Estado de Goiás usa três combustíveis por ordem de importância: palha seca de milho, resíduos da construção civil e lenha do eucalipto, obtendo o menor custo da ton. de vapor gerado na fábrica.

Segundo Gentil e Faggion (2014), o preço de uma tonelada de madeira de eucalipto em pé é de US\$ 7,50 e essa madeira cortada e entregue a 50 Km da lavoura é US\$ 20/ton. As indústrias de papel e celulose não transportam a madeira mais longe de 50 km para não onerar o produto. Da mesma forma, a lenha para queima não é transportada mais de 100 km, pelo alto preço que atinge. É fundamental a logística para combustíveis lignocelulósicos; ou seja, quanto maior a distância Origem-Destino, menos interesse tem. Essa é a razão das indústrias terem plantação própria e próxima das caldeiras. Existe também a questão da escala. Como o custo da quilometragem dos caminhões é de até US\$ 2/km, as cargas são as maiores possíveis para diluir custos fixos dos investimentos.

Fatores como marco legal, normas e burocracia brasileiras, infraestruturas e alto custo da produção dificultam e/ou impedem exportações desses energéticos. Isso ocorre por serem mercados emergentes sem rotinas organizadas que permitam fluir as negociações, portanto são exportações de alto risco. As rotinas fluem melhor quando o agente exportador é uma *Corporate* com identidade do importador. Outro desafio são as barreiras alfandegárias impostas pelo Mercado Comum Europeu (*EU-European Union*) contra produtos produzidos lá, entre pellets e briquetes. As elevadas taxas inviabilizam as vendas brasileiras. Os governos e entidades classistas precisam ainda organizar esse mercado incluindo certificação e infraestruturas de portos, transporte e armazenamento.

Em uma comparação energética entre oferta e demanda, as preferidas são aquelas de menor preço, melhor qualidade e de fácil uso ou acesso. No entanto, a humanidade sobrevive basicamente de alimento e energia, e elas devem ser obtidas de qualquer forma. É sintomático que 80% da demanda mundial de energia seja fóssil (petróleo-34%; carvão mineral-25%; gás natural 21%). Em geral, as pessoas ou empresas compram a energia que oferece mais vantagem; não a de menor emissão de CO₂. As energias ditas renováveis e as energias ditas ambientais devem ser preferidas desde que tenham menos preço, maior energia e qualidade superior; esse é padrão da humanidade.

O petróleo em 2014 custava U\$ 140/barril tendo baixado para U\$ 40/barril em um momento de 2015. Esse muito significativo cenário desloca todos os energéticos do mundo, inclusive os lignocelulósicos que se tornam mais caros e deixam de ser comprados. Nos países de economia livre, os preços variam. Nos países de economia centralizada para energias, a variação de preço do mercado mundial não afeta os preços internos dos países, já que o Estado é que decide os preços das energias, e não o livre balanço entre a oferta e a demanda.

Existe um novo comportamento empresarial incluindo o que se chama de responsabilidade social, onde os energéticos ambientais devem ser preferidos aos poluentes. Mesmo sendo levemente mais

caros, eles ainda são competitivos, pois as pessoas ditas mais conscientes preferem comprar produtos que tenham um histórico fabril e comercial de apelo social e ambiental. É de conhecimento geral que algumas empresas sabidamente grandes poluidoras tenham desenvolvido uma estratégia de marketing ambiental para minimizar qualquer desencontro na área da imagem pública.

Os Estados Unidos, grande responsável pela poluição mundial, tem dificuldade em assinar acordos para redução dos GEE - Gases do Efeito Estufa, pois a referência é o lucro. Os chineses com elevada taxa de crescimento tem a matriz baseada em carvão mineral, considerado o mais poluente. Os europeus mais sensíveis e de cultura duplamente milenar, vêm eliminando os fósseis em favor das energias verdes.

Na essência da disputa fóssil-renovável, existem questões mal resolvidas. Enquanto a disputa continua, o Brasil deve avançar no mercado das energias verdes para expandir a renda, gerar emprego e desenvolvimento socioeconômico.

Os combustíveis lignocelulósicos são múltiplos e cada um com dinâmica própria. Da mesma forma cada pessoa física ou jurídica ao tratar de combustíveis lignocelulósicos tem diferentes conhecimentos, compreensões ou capacitação para bem usá-los. Assim, em cada região, o desenvolvimento de cada um deles depende de variáveis, sendo uma delas o amadurecimento do mercado para o uso e cada um deles. O cavaco usado em uma geradora elétrica é diferente da lenha da pizzaria ou da palha de milho queimando em fornalhas de agroindústria ou a lignina da lixívia em fornalha da fábrica de papel. Cada ativo empresarial, cada nível de investimento ou região tem suas características com vantagens e desvantagens. Assim os dirigentes podem ter sistemas avançados de gestão, como as corporações agroindustriais que dispõem de equipes multidisciplinares de alto nível. Como prova disso, alguns países como os escandinavos tem profissionais, tecnologias e sistemas já consagrados e avançados. Enquanto

em outros países, entre eles o Brasil, ainda carece de maiores avanços culturais nesta área de biocombustíveis madeireiros.

REFERÊNCIAS

ABIB - Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energias Renováveis. **Desenvolvimento de uma unidade industrial de produção de wood pellets com segurança e planejamento**. 11 p. Disponível em: http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:gNCwgEFuAJ:file.aviculturaindustrial.com.br/Material/Tecnico/2014/abib_bber_desenvolvendo_unidade_industrial_de_pellets.docx+&cd=7&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br

ALAKANGAS, E. **Wood pellets in Finland**: technology, economy and market. OPET 5. VTT - Technical Research Centre of Finland. Jyvaskyla: 2002.

ALMADO, R. **Carvão Vegetal**: o diferencial da siderurgia brasileira [palestra]. 40 slides. Madeira, 2014. Disponível em: <file:///C:/Users/INFORSAN%20-%208431-9998/Downloads/PALESTRA%20SOBRE%20CARV%C3%83O%20ROOSEVELT.pdf> Acesso em: abr. 2015.

AMS - Associação Mineira de Silvicultura. Área total de florestas plantadas, p. 35. [apresentação 2013]. Belo Horizonte-MG: 2013. Disponível em: www.silviminas.com.br Acesso em: abr. 2015.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Biomassa. **Atlas de Energia Elétrica**. 2. ed., p. 77-92. Brasília: ANEEL, 2005.

BACHA, C. J.; BARROS, A. L. Reflorestamento no Brasil: evolução recente e perspectivas para o futuro. **Scientia Forestalis**, n. 66, p. 191-203, 2004.

BEZZON, G. **Síntese de novos combustíveis sólidos a partir de resíduos agroflorestais e possíveis contribuições no cenário energético brasileiro**. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP. Campinas/SP: 1994.

BIOENERGY INTERNATIONAL. **The pellets map**, n. 29, p. 48. Stockholm: Lennart Ljungblom, 2007.

BIOMASSA E BRIQUETES. Disponível em: <http://www.lippel.com.br> Acesso em: 2007.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética - EPE. **Balanco Energético Nacional** [ano base 2013], p. 288. Brasília/DF: 2014.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional**, [s.n.], p. 108. Brasília: 1982.

BRIDGWATER, A. V. Biomass fast pyrolysis. **Bioenergy Research Group**. Birmingham, United Kingdom: Aston University, 2007.

BRIQUETES NO BRASIL. Disponível em: http://www.infoeener.iee.usp/br/scripts/biomassa/texto/br_briquete.ssp Acesso em: 3 out. 2005.

BRITO, J. O. Princípios de produção e utilização de carvão vegetal de madeira. **Documentos Florestais**, v. 9, n. 1-19, p. 14. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Departamento de Ciências Florestais, Piracicaba: 1990.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. Usos diretos e propriedades da madeira para geração de energia. **Circular Técnica**, n. 52, p. 13. Piracicaba/SP: IPEF, ESALQ, 1979.

BROWNE, F. L. Theories on the combustion of wood and its control. **Forest Prod. Lab. Rep.**, n. 2136, p. 59. Madison, Wis, US: 1958.

CARVALHO, E. A.; BRINCK, V. Briquetagem. *In*: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. (orgs.) **Tratamentos de Minérios**, 4. ed., n. 15, p. 613-636. CETEM/MCT, 2004.

CARVALHO JR, J. A.; MCQUAY, M. Q. **Princípios de combustão aplicada**. 176 p. Florianópolis: Editora da UFSC, 2007.

COUTO, L.; MILLER, M. D.; SILVA JR., A. G.; CONDE, L. J. Produção de pellets de madeira: o caso de Bio Energy no Espírito Santo. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 1, p. 45-52, 2004.

CUNHA, M. P.; PONTES, C. L.; CRUZ, I. A.; CABRAL, M. T.; NETO, Z. B.; BARBOSA, A. P. Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras. **Anais do III Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira**, v. 2, p. 93-120. São Carlos: UAP, 1989.

DIAS, J. M. *et al.* **Produção de briquetes e pellets a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. Documento 13, p. 130. Brasília/DF: Embrapa Agroenergia, 2012.

DOE - **Departamento de Energia dos Estados Unidos**. 2006. Disponível em: <http://www.eere.energy.gov>. Consultado em: mar. 2015.

DOLZAN, P.; BLANCHARD, M. P.; GRASSI, A.; HEINIMO, J.; JUNBINBER, M.; RANTA, T. Global wood pellets markets and industry: policy frives, market status and eaw material potential. **IEA Bioenergy**. IEA - International Energy Agency (org.), task 40, p. 112. Paris: 2006.

EGGER, C. **Pellets markets in Europe**. OÖ Energiesparverband. Linz, Áustria: 2005.

EUROPEAN PELLET CENTRE. Disponível em: <http://www.pelletcentre.info/cms/site.aspx?p=878> Acesso em: 21 jun. 2007.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Global forest resources assessment. **Forestry Paper**, n. 163, p. 378, 2010.

FARINHAQUE, R. Influência da umidade no poder calórico da madeira de bracatinga (*Mimosa scabrella*, Benth) e aspectos gerais de combustão. **Série Técnica**. Curitiba/Pr: FUPEF, 1981.

FILBAKK, T; JIRJIS, R; NURMI, J; HOIBO, O. The effect of bark content on quality parameters of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) pellets. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, p. 3342-3349, 2011.

FPL - Forest Products Laboratory. Wood handbook: wood as an engineering material. **Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113**, p. 463. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. 1999.

GARCIA, D. P. **Caracterização química, física e térmica de pellets de madeira produzidos no Brasil**. Dissertação. Universidade Estadual Paulista - UNESP. 101 p. Guaratinguetá/SP: 2010.

GENTIL, L. V. **Tecnologia e economia do briquete de madeira**. Doutor, Tese de doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Florestal (EFL/FT/UnB). 195 p. 2008.

GENTIL, L. V. **202 Perguntas e respostas sobre biocombustíveis**. Brasília: Editora Senac, 2011.

GENTIL, L. V.; FAGGION, F. **Bioenergia, desafios da produção no Brasil. Agroanalysis (FGV)**, v. 34. p. 30-31, 2014.

GOLDEMBERG, J. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento**. 234 p. São Paulo: Editora Edusp, 1998.

GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. Teoria da carbonização da madeira. *In: **Uso da Madeira para Fins Energéticos***, p. 27-41. CETEC - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. Séries de publicações Técnicas. Belo Horizonte/MG: 1980.

GORE, A. **An Inconvenient Truth**. Documentary film. Directed by Davis Guggenheim. New York: 2006.

HIRSMARK, J. Densified biomass fuels in Sweden. Swedish University of Agricultural Sciences. **Master of Science Thesis**. Examensarbeten, nr 38. Uppsala: 2002.

IEA - International Energy Agency. Global wood pellet market and industry. **Bioenergy Task 32**, p. 87. Paris, 2006. Acesso em: 2 abr. 2015.

IEA - International Energy Agency. **Key word energy statistics**, p. 80. Paris: 2014. Disponível em: <http://www.iea.org/statistics/> Acesso em: 23 mar. 2015.

IMAZON(a) - Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia. **A atividade madeireira na Amazônia brasileira**: produção, receita e mercados. Belém/PA: 2013. Disponível em: <http://imazon.org.br/a-atividade-madeireira-na-amazonia-brasileira-producao-receita-e-mercados/> Acesso em: 23 mar. 2015.

IMAZON(b) - Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia. **O rendimento no processamento de madeira no Estado do Pará**, n. 18. Belém/PA: 2013. Disponível em: <http://amazon.org.br/a-atividade-madeireira-na-amazonia-brasileira-producao-receita-e-mercados/> Acesso em: 23 mar. 2015.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change 2007: the physical science basis-summary for policymakers**. Geneve, Switzerland: 2007.

JENKINS, B; BAXTER, L. L.; MILES JR, T. R.; MILES, T. R. Combustion properties of biomass., **Fuel Precessing Technlogy**, v. 54, n. 9, p. 17-46. Utah: Ed. Engineering Foundation Conferenes Utah, 1996.

KANYRY, A. M. Combustion characteristics of biomass fuels. **Combustion Science and Technology**, v. 97, n. 6, p. 469-491. New York: 1994.

KOLLLMANN, F.; CÔTÉ JR., W. A. Principles of wood science and technology. I - solid wood. **Springer Verlag**, p. 592. New York, NY: 1968.

LaQA - Laboratório de Química Ambiental. **Combustão e Energia**. 2006. Disponível em: http://www.usp.br/qambiental/combustao_energia.html Acesso em: abr. 2015.

LJUNGBLOM, L. **Bionergy international: pellets are so hot**. 17. ed., n. 6, p. 28. Stockholm: 2005.

NAKICENOVIC, N.; GRUBLER, A.; Mc DONALD, A. **Global energy perspectives**. International Institute for Applied Systems Analysis. Luxenburg, Austria: Ed. Cambridge, University Press, 1998.

NASCIMENTO, M. D.; BIAGGIONI, M. A. Avaliação energética do uso de lenha e cavaco de madeira para produção de energia em agroindústria Seropédica. **Revista Energia na Agricultura**, v. 25, n. 3, p. 104-117. Botucatu: 2010.

NOGUEIRA, L. A.; LORA, E. E.; TROSSERO, M. A.; FRISK, T. **Dendroenergia**: fundamentos e aplicações. p. 144. Brasília, DF: 2000.

NYSTROM, K. **Bioenergy in Sweden and globally**. Disponível em: <http://www.svebio.se/?p=726>

OPALCO - Orcas Power & Light CO-OP. Disponível em: http://www.opalco.com/news_article_category/membership/

PAULA, G. M. **Avaliação tecnológica da siderurgia brasileira**. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: IEI-UFRJ, 1992.

PEREIRA, M. **Prevenção e manutenção de máquinas na Eco Industrial**. Trabalho de Graduação. Faculdade do Instituto Brasil. Anápolis: 2006.

PERSSON, G. Speech at World Bioenergy 2006. **Proceedings: 2nd World Conference on Pellets**. Jonkoping: Editora Svebio, 2006.

PFI - Pellet Fuels Institute. **PFI Standard Program**. Arlington, VA. Disponível em: www.pelletheat.org/pfi-standards-program Acesso em: 3 abr. 2015.

REN21. Renewables 2014. **Global Status Report**. Paris: REN21 Secretariat, 2014. ISBN: 978-3-9815934-2-6.

ROSSILO-CALLE, F. Uma breve análise do potencial da biomassa no Brasil. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 3, p. 225-236. 2004.

ROWELL, R. M. USDA - Forest Product Laboratory. Forest Service. **Wood Handbook**, chapter 19 - Specialty Treatments. Wisconsin: 1987.

SANTOS JR, A. **Possibilidades e impactos da ampliação da siderurgia a carvão vegetal oriundo de florestas plantadas no Brasil**. p. 178. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (Dissertação). Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2011.

SIAM. Lei 18.365 de 1/2/2009. **Políticas florestais de proteção à biodiversidade do estado de Minas Gerais**. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=10490> Acesso em: 6 abr. 2015.

TABARÉS, J. L. *et al.* Feasibility study of energy use for densified lignocellulosic materials (briquettes). **Ed. Elsevier Science Ltd. Fuel**, v. 79, n. 10, p. 1229-1237. jun. 2000.

VAPO. Disponível em: http://www.vapo.fi/eng/main_page/?id=563 Acesso em: 24 out. 2006.

ZAKRISSON, M. **A comparison of international pellet production costs**. Swedish University of Agricultural Sciences. Examenarbeten, nr 39. Uppsala: 2002.

CAPÍTULO 7

Aproveitamento energético da biomassa residual

Amadeu Duarte da Silva Borges

1. INTRODUÇÃO

As necessidades energéticas aumentaram exponencialmente no século passado e continuam a crescer a um ritmo acelerado. As fontes de energia continuam atualmente muito dependentes dos combustíveis fósseis, motivo pelo qual as concentrações de CO₂ na atmosfera continuam a aumentar. Como forma de contrariar, diferentes medidas deverão ser aplicadas, tais como reduzir fortemente o consumo energético através do aumento da eficiência dos sistemas e por um uso crescente das fontes de energia renováveis em detrimento dos combustíveis fósseis.

O esforço dos últimos anos permitiu que as fontes de energia renovável se tornassem mais competitivas comparativamente com os combustíveis fósseis e com a energia nuclear. A biomassa é um exemplo de uma fonte de energia renovável cujo potencial é enorme e existem várias razões para ser considerada uma fonte interessante de energia, nomeadamente porque:

- é um recurso renovável;
- a sua utilização sustentável permite uma emissão líquida de CO_2 para a atmosfera nula, devido ao processo da fotossíntese (BHATTACHARYA, 2001). O CO_2 assimilado pela biomassa durante o processo de crescimento corresponde ao carbono acumulado na sua composição da biomassa, cerca de 48% em massa. De modo que por cada quilograma de carbono presente na biomassa cerca de 3,67 kg de CO_2 terão sido subtraídos à atmosfera (CAPINTIERI *et al.*, 2005).
- é um subproduto de baixo custo na agricultura ou silvicultura;
- tem um enorme potencial especialmente no hemisfério norte.

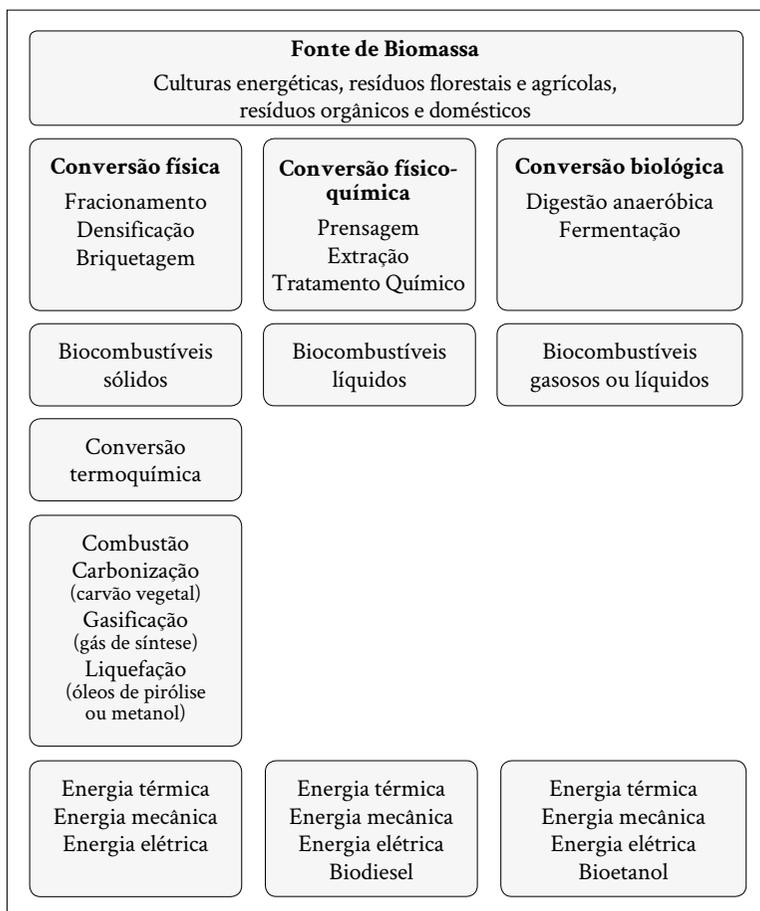
Os cenários desenvolvidos por diversas organizações internacionais no que respeita à produção sustentável de energia à escala global apontam para que a biomassa seja responsável por uma grande parte do consumo energético. O IPCC avança que a biomassa deverá representar aproximadamente 32% do uso global da energia no ano 2050. A sua conversão termoquímica contribui para melhorar o balanço de CO_2 , de óxidos de azoto e de enxofre na atmosfera, o que constitui uma das principais razões que tornam crescente a tendência para a utilização da biomassa.

Como biomassa designa-se, em geral, a massa total de matéria orgânica que se acumula num espaço vital. Dessa forma, pertencem à biomassa todas as plantas e todos os animais, incluindo os seus resíduos bem como, num sentido mais amplo, as matérias orgânicas transformadas como resíduos de indústria transformadora da madeira e indústria alimentar. Esses elementos primários de biomassa podem ser transformados pelas diferentes tecnologias de

conversão em biocombustíveis sólidos, líquidos ou gasosos e, finalmente, nos produtos finais energia térmica, mecânica e elétrica, tal como se apresenta na figura 1.

O espectro de aproveitamento energético de biomassa é muito vasto e estende-se desde biocombustíveis sólidos para a combustão direta ou gasificação e combustíveis líquidos como óleo vegetal, bioetanol, metanol até aos combustíveis gasosos como biogás ou gás de síntese. Um aspecto importante é a utilização da biomassa como combustível sólido no qual a combustão direta tem a maior importância prática para a geração de energia térmica e elétrica. Para além de combustão, os biocombustíveis sólidos podem ser gasificados, carbonizados ou liquefeitos. As desvantagens significativas dos biocombustíveis sólidos são a baixa densidade energética, o manuseio mais complicado e as características energéticas heterogéneas. Em geral, a biomassa é extraída em áreas de produção extensas para depois ser concentrada nos locais de combustão, o que exige um grande esforço logístico em relação à colheita, transporte e armazenamento. Mas é possível minimizar esses problemas através de uma preparação própria dos biocombustíveis. A estrutura física da madeira e palha é importante para o comportamento na combustão e depende das formas de preparação prévia, tais como moagem, fracionamento e densificação. Uma densificação e briquetagem de serradura e palha facilita o transporte, o armazenamento e a dosagem do combustível. Tanto peletes/briquetes como estilhas de madeira e palha fracionada podem ser queimadas em fornalhas automáticas.

Figura 1 - Métodos de conversão de biomassa em energia



A liquefação de biocombustíveis sólidos tem tido até agora uma importância menor.

Os processos de liquefação de biomassa são a pirólise ou a síntese de metanol. A pirólise gera, além do produto principal, o carvão vegetal, também os produtos óleo de pirólise e gases combustíveis. O óleo de pirólise consiste em alcatrão de madeira e metanol. O espectro de possibilidades de produção de combustível a partir de pirólise varia bastante de acordo com a técnica implementada. A produção de

carvão vegetal poderá atingir 35% se a técnica de carbonização (pirólise lenta) for usada; a produção de óleo de pirólise poderá atingir 80% se a técnica de pirólise rápida a baixa temperatura for utilizada. Problemas com o processo de conversão e posterior utilização do óleo de pirólise, tal como: instabilidade térmica e características corrosivas necessitam ainda de solução (MCKENDRY, 2002a).

Na síntese do metanol, ele é obtido a partir de hidrogénio e de monóxido ou dióxido de carbono existentes no gás de síntese. De 3,3 toneladas de madeira com um teor em água de 30% pode ser extraído uma tonelada de metanol puro.

A gasificação é considerada como um dos caminhos mais promissores para a produção de energia (KNOEF, 2003). A atração principal dessa tecnologia reside no facto de se produzir um gás combustível sintético, que pode ser usado para abastecer motores de combustão interna ou turbinas. O gás sintético possui um baixo poder calorífico o que constitui uma desvantagem. No entanto, as vantagens ambientais dessa tecnologia superam sobremaneira a combustão convencional, nomeadamente nos seguintes aspetos:

- maior eficiência de conversão, o que permite consumos inferiores de energia primária por unidade de energia gerada;
- emissões reduzidas, nomeadamente de óxidos nitrosos (NO_x) e de partículas;
- os poluentes tais como o vapor de água gerado pelo processo podem ser reformados em hidrogénio (DEMIRBAS, ÇAĞLAR, 1998).

2. PRODUÇÃO DE PELLETS, ESTILHA E BRIQUETES

Os processos de transformação física da fitomassa residual em geral, especialmente o processo de compactação supõem um desafio tanto técnico como económico para o aproveitamento energético desses materiais de natureza heterogénea e formas e tamanhos diversos já que os elevados custos de manutenção e utilização das tecnologias

mas adequadas em cada caso dificultam, encarecem e condicionam os projetos que seriam potencialmente realizáveis no sector das Energias Renováveis.

Em função da própria natureza dos produtos residuais usados como matéria-prima e da sua apresentação e características intrínsecas específicas, será preciso realizar uma ou várias etapas de transformação física e acondicionamento prévio, sempre que o maior valor acrescentado dos produtos que se obtiverem permita a introdução desses no mercado onde o preço dos combustíveis renováveis compense os custos ocasionados pela manutenção a que são submetidos.

Em determinadas circunstâncias é imprescindível, e também rentável, desidratar a biomassa e submetê-la a uma ou mais fases de redução granulométrica e acondicionamento estrutural; inclusivamente possível compactar a biomassa lenho celulósica residual para obter produtos combustíveis de densidade alta (600 a 1300 kg/m³) que se utilizam como substitutos do carvão e da lenha.

O custo final do produto obtido depende dos incrementos de valor que se obtém ao submeter a matéria-prima aos diferentes processos de transformação física e acondicionamento.

Assim, em produtos de valor acrescentado muito alto como os briquetes e pellets o custo é superior ao do resto dos resíduos transformados em combustíveis submetidos menos processos de transformação como a estilha, serrim, etc. Não obstante, o preço de venda potencialmente alcançável para esses combustíveis mais elaborados, justifica em muitos casos os investimentos e custos adicionais necessários para os obter.

Porém, relativamente ao uso de biomassa florestal em caldeiras para aquecimento de edifícios, é importante referir que a biomassa sob a forma de briquetes não se adequa à alimentação de caldeiras automáticas ou semiautomáticas, ficando o seu uso pelos sistemas convencionais de aquecimento central que usam lenha ou carvão, e portanto, sem qualquer grau de automatismo.

O combustível sob as formas de estilha e de pellets são de fato utilizados em sistemas de aquecimento constituídos por caldeiras mais ou menos automáticas. Embora, se consigam custos de energia ligeiramente mais baixos com o uso da estilha, essa é sobretudo usada em instalações de maior envergadura (edifícios de serviços, condomínios fechados, piscinas, etc.), ficando o seu uso comprometido em edifícios residenciais devido ao volume de armazenamento que exige.

Na verdade, as pellets são a forma de combustível mais usado em aquecimento de edifícios recorrendo a caldeiras automáticas por se apresentar mais uniforme, com alta confiança de operação, além de requerer menor espaço para o armazenamento que as outras formas de biomassa.

3. PRODUÇÃO DE VAPOR EM CALDEIRA COM VISTA À PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE POR RECURSO AO CICLO CLÁSSICO DE RANKINE

Uma Central Termoelétrica a Biomassa Florestal, funcionando segundo um ciclo de Rankine regenerativo com aproveitamento de parte da potência térmica transferida com a fonte fria, visa em última análise a produção eficiente de energia elétrica por recurso a biomassa florestal contribuindo efetivamente para:

- diminuição da dependência energética externa;
- diminuição da dependência de combustíveis fósseis;
- diminuição das emissões de gases de efeito de estufa do país;
- incremento da produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis;
- redução do risco estrutural de incêndio;
- criação de emprego local na recolha de Biomassa das florestas;
- criação de dinâmicas de inovação na gestão e exploração florestal.

Assim o combustível da central será a biomassa florestal indiferenciada (destroçada ou não) e eventualmente resíduos das ITMs.

Tendo em vista o manuseamento e alimentação da central com biomassa florestal de diferentes características e dimensões serão necessários equipamentos adicionais, como por exemplo: (1) Gruas “Robot” de manuseamento e alimentação operando sob um sistema de coordenadas num silo, necessariamente, na área frontal à caldeira; (2) Tegão de serviço; (3) Sistemas de carga da grelha.

O silo de armazenagem comporta uma zona comum e uma zona com várias divisões com o intuito de se separar previamente o combustível segundo a sua natureza, granulometria e humidade. As gruas Robot alimentarão o tegão de serviço apenas algumas vezes por hora, pelo que durante os pontos mortos, esses equipamentos procederão a tarefa de mistura e homogeneização do combustível favorecendo, à posteriori, o controlo dos parâmetros de combustão da caldeira.

O silo de armazenagem está equipado com ventiloconvetores alimentados a água quente aproveitando-se parte do calor residual trocado com a fonte fria para a secagem do combustível com o consequente incremento do rendimento elétrico global da instalação.

Tendo em conta que os custos de destroçamento de combustível correspondem a cerca de 30% do custo global do combustível florestal, terá de ser utilizada uma caldeira (por exemplo, uma caldeira aquotubular, de grelha móvel inclinada), com capacidade para queimar peças com dimensões até 50 cm.

O vapor sobreaquecido é expandido num turbogruppo obtendo-se da consequente queda entálpica, energia elétrica para injeção na Rede Elétrica Nacional e para os consumos internos. A turbina pode apresentar uma extração para aquecimento da água de alimentação e do ar de combustão, incrementado o grau regenerativo do ciclo e consequentemente o seu rendimento.

O vapor à saída da turbina possuindo ainda elevada entalpia, mas com um baixo potencial térmico, pode ser usado para aquecer água num permutador de calor compacto. A água quente produzida poderá alimentar os ventiloconvetores do silo de armazenagem para secagem do combustível e para fins de climatização. À saída desse

permutador o vapor de água já se encontra parcialmente condensado. A conclusão da mudança de fase do fluido ocorre num aerocondensador. Seguidamente o fluido na fase líquida é bombeado fechando-se assim o ciclo.

O sistema de tratamento de águas deverá ser dimensionado para a qualidade típica da água local. O correto dimensionamento desses equipamentos assume elevada importância na preservação dos equipamentos, nomeadamente (caldeira e turbina).

O sistema de tratamento de gases de escape deverá utilizar uma tecnologia capaz de reduzir o risco de incêndio e reduzir o valor da perda de carga.

3.1. Potência de cálculo

Considerando a potência aparente e considerando um fator de potência típico da ordem de 0,9, a potência nos bornes do alternador será de . Contudo a própria central apresenta diversos equipamentos consumidores de energia elétrica (bombas, ventiladores, electroválvulas, compressor de ar comprimido para a sopragem, equipamentos de instrumentação e controlo, iluminação, equipamentos de ar condicionado e outros consumidores). Como a energia elétrica produzida pela central tem um custo de produção inferior ao valor de venda pelo comercializador, faz todo o sentido alimentar-se esses equipamentos com eletricidade produzida na própria central.

3.2. Descrição dos principais equipamentos

3.2.1. Caldeira

O sistema de alimentação da biomassa começa no manuseamento dos combustíveis sólidos disponíveis na área de armazenamento temporário e seu transporte até ao sistema de alimentação propriamente dito.

Esse manuseamento é efetuado por guias robot equipadas com garras capazes de manipular materiais de diferentes dimensões, sendo o sistema projetado para manter cheio um tegão de alimentação da caldeira.

O sistema de alimentação consiste em transportadores extratores que conduzem o combustível do tegão de serviço para um dispositivo combinado de comportas, alimentando a grelha com a quantidade de biomassa requerida.

O sistema deverá ser projetado para assegurar a correta alimentação de combustível, mesmo de diferentes densidades e tamanho, já que o caudal é medido em massa (t) e não em volume ou outros meios.

A combustão da biomassa ocorre sobre uma grelha mecânica refrigerada por ar distribuído pelas diversas zonas, sendo cada uma dessas ajustada ao movimento da biomassa e ao fornecimento do ar primário.

A seleção da caldeira, concebida especificamente para biomassa, deve ser efetuada tendo em especial consideração os seguintes aspetos:

- Elevado tempo de residência dos gases na fornalha, para uma mais completa combustão e redução de CO;
- Gases arrefecidos até cerca dos 650°C à entrada do sobreaquecedor;
- Reduzidas velocidades nos gases, nomeadamente nos sobreaquecedores, para reduzir o ensujamento;
- Feixes de transferência em cocorrente nas zonas de menor temperatura, para prevenir problemas de condensação e corrosão;
- Sistema de sopragem do sobreaquecedor e do economizador a ar comprimido, para melhorar a limpeza, reduzir o desgaste e corrosão dos materiais, e manter, neste caso, estabilidade no fornecimento de vapor à turbina.

O sistema de controlo do ar de combustão (primário e secundário) utiliza um ventilador com motor de frequência variável e

instrumentação de medida de caudal para assegurar o correto fornecimento do ar em função da percentagem de O_2 nos produtos da combustão.

A extração e transporte das escórias e cinzas geradas pela combustão da biomassa são efetuados utilizando um sistema húmido e seco combinados.

A parte desses materiais recolhida na grelha cai num transportador inclinado e parcialmente cheio de água, sendo conduzida desde a zona molhada e através da zona seca até um contentor.

As cinzas volantes que resultam da limpeza do sobreaquecedor, do economizador e do sistema de tratamento de gases são descarregadas já na zona seca do parafuso extrator da grelha, de forma que, misturadas na parte final do transporte, as cinzas húmidas absorvem as volantes, permitindo que o material resultante possa ser contentorizado e movimentado sem grande libertação de poeiras.

Finalmente, para manter a fornalha em depressão e efetuar a exaustão dos gases de combustão, a caldeira é equipada com um ventilador de tiragem aspirada, também equipado com controlo por variação de frequência, colocado entre o sistema de tratamento de gases e a chaminé.

Sobreaquecedores

Os sobreaquecedores primário e secundário são feixes de convecção constituídos por serpentinas de tubos ligados a coletores, dispondo de nipples de inspeção, tubuladuras de ventilação e drenagem e berços de suporte.

O sistema de suporte e guiamento internos é constituído por materiais resistentes a alta temperatura.

O controlo da temperatura do vapor é efetuado através de um sistema de atemperação, mediante a injeção controlada de água de alimentação entre os dois feixes de sobreaquecimento.

Economizador

O economizador é constituído por feixes de convecção ligados a coletores de entrada e saída, dispondo de *nipples* de inspeção e tubuladuras de ventilação, drenagem, etc.

Esses feixes de transferência de calor são montados numa estrutura de suporte e envolvidos por uma caixa estanque.

Queimador de arranque

O sistema de arranque é constituído por um queimador a Gasóleo ou Gás Natural, localizado na parede membrana frontal.

Bombas de água de alimentação

Grupos eletrobomba multicelulares

Sistema de ar de gases de combustão

O sistema de ar de combustão (ar primário e ar secundário) deverá ser projetado para permitir o controlo individual do fluxo para cada zona, sendo o caudal total regulado em função da potência requerida e do teor de O_2 nos produtos da combustão em cada momento.

Sistema de remoção de cinzas

Esse sistema deverá ser projetado para extrair e transportar escórias e cinzas das diferentes fontes:

- Grelha;
- Segunda passagem da caldeira;
- Economizador;
- Multiciclone;
- Filtro eletrostático.

A extração poderá ser efetuada através de um transportador de correntes acionado hidráulicamente, que trabalha dentro de uma bacia em “selo de água”, dispendo de chapas de desgaste substituíveis.

As cinzas serão transportadas para contentores transportáveis localizados junto ao edifício da caldeira ou, alternativamente, poderão ser estudados dois silos dispostos por forma a permitir o carregamento direto para camião.

3.2.2. Turbogrupos

Turbina

Atendendo às condições de serviço deverá considerar-se a instalação de uma turbina a vapor de condensação multiestágio. Esse sistema, bastante experimentado tem as vantagens próprias das turbinas de vapor multiestágio, que, no essencial, são as seguintes:

- Elevado rendimento isentrópico;
- Facilidade de operação.

Deverá ainda existir uma extração de vapor no sentido de aumentar o grau regenerativo do ciclo.

Acondicionamento do vapor

Para a eliminação de partículas que possam estar presentes no vapor vivo, deverá ser considerada a instalação nas tubagens de vapor de um filtro tamis cónico, a instalar antes da flange de entrada na turbina.

Gerador elétrico

O natural será a instalação de um alternador síncrono, autoexcitado, sem escovas, com regulação de tensão e $\cos\phi$ eletrónica e apto para o funcionamento em paralelo e em ilha.

3.3. Justificação detalhada do rendimento da produção de energia elétrica dos geradores a instalar

Uma central termoelétrica a biomassa florestal baseia-se em última análise no ciclo termodinâmico de Rankine. O rendimento termodinâmico de um ciclo de potência desse gênero é expresso pela fórmula:

$$\eta_t = \frac{|W_t - W_b|}{Q_H}$$

onde W_t representa o trabalho da turbina; W_b o trabalho da bomba e Q_H o calor fornecido na caldeira pelo combustível. Em termos físicos o rendimento termodinâmico representa a percentagem do calor fornecido pelo combustível na caldeira realmente transformado em trabalho útil.

Para uma instalação complexa, como é o caso o rendimento da instalação pode ser definido por:

$$\eta_i = \frac{\text{Energia eléctrica produzida (kWh)}}{\sum_i (\text{massa de combustível consumida})_i \times PCI_i (\text{kWh})}$$

Os fornecedores tecnológicos garantem uma potência máxima nos bornes da turbina, funcionando a 100% com um combustível oriundo da biomassa florestal com uma humidade média de 37,5% ($PCI = 2,91 \text{ kWh} / \text{kg}$).

Há, no entanto a considerar ainda o rendimento do próprio gerador ($\approx 98\%$), pelo que o valor do rendimento elétrico da instalação.

Os ventiloconvetores previstos para o silo de armazenagem receberão um caudal de água quente proveniente do permutador à saída da turbina. A potência térmica global envolvida nesses equipamentos é de:

$$\dot{Q} = \dot{m} \times c_p \times \Delta T$$

Esses equipamentos permitirão a evaporação de água do combustível armazenado no silo, devidamente ventilado. Recorde-se que em situações normais, parte da energia libertada pela combustão da

biomassa florestal na grelha da caldeira serve unicamente para evaporar a água existente no próprio combustível. Secando-se o combustível previamente, sem qualquer incremento da quantidade de combustível queimada na caldeira, essa parcela de perdas vem diminuída consideravelmente, aumentando-se assim o rendimento. Deve ser referido que a logística de aprovisionamento de biomassa florestal prevê um tempo de estadia do combustível no silo suficiente para a secagem considerada.

Em termos práticos esta potência térmica envolvida na secagem do combustível antes da entrada na caldeira deverá ser tida na quantificação do rendimento elétrico da instalação.

3.4. Estabelecimento da exploração das instalações

Uma central desse tipo vê a sua rentabilidade econômica incrementada majorando-se as horas de funcionamento da central. Contudo a central não poderá funcionar as 8760 horas do ano, pois no mínimo devem ser previstos cerca de 15 dias para inspeção e manutenção ordinária da caldeira e de outros equipamentos (360 horas). Da experiência existente no mundo uma central desse tipo só poderá funcionar próximo das 8.000 horas anuais caso sejam previstas uma série de medidas concretas e condições de funcionamento:

- A adicionar ao investimento inicial deverá estar prevista uma verba para a aquisição de peças sobressalentes fulcrais para a instalação, cujas avarias normalmente acarretam elevados períodos de paragem devido a tempos de fornecimento geralmente elevados. Assim será necessária a aquisição de bombas de reserva, uma grua robotizada, diversas peças da grelha da caldeira, refratários e válvulas diversas.
- Deverá estar previsto um contrato de manutenção com uma empresa com larga experiência neste tipo de serviços em instalações térmicas.

- Deverá ser elaborado um plano de aprovisionamento de biomassa florestal de acordo com o estudo de sustentabilidade do recurso florestal e com os contratos firmados com os fornecedores de combustível robusto garantindo um abastecimento contínuo da central não permitindo quaisquer tipos de paragens por falta de combustível.
- O sistema de queima da caldeira é concebido para queimar não só combustível triturado como peças de dimensões consideráveis (até 50 cm). Esse sistema bastante versátil para além de diminuir as horas de paragem da caldeira, permite ainda a diminuição dos custos relacionados da aquisição de combustível, pois os custos de destroçamento do combustível (que se aproximam dos 25% do valor final da aquisição) serão praticamente eliminados. O valor de aquisição médio de combustível irá rondar os 25€/ton, considerando uma humidade de 37,5%.

4. PRODUÇÃO DE GÁS POBRE A PARTIR DA BIOMASSA FLORESTAL RESIDUAL RECORRENDO A TECNOLOGIA DE GASIFICAÇÃO DA BIOMASSA, COM POSTERIOR APROVEITAMENTO ENERGÉTICO

4.1. Perspetiva histórica

A história da gasificação data do século dezoito. Desde a conceção da ideia, a gasificação tem passado por diversas fases de desenvolvimento. Será de realçar o registo da primeira patente relacionada com a gasificação em 1788 por Robert Gardner.

Em 1930, a Alemanha Nazi acelera o seu esforço para converter os veículos existentes para a utilização do gás sintético como parte de um plano de segurança nacional e independência da importação de petróleo. Início do desenvolvimento de gaseificadores portáteis para automóveis. Os governos Britânico e Francês sentiram que o gás de

carvão vegetal era mais adequado para os veículos existentes nas suas colônias onde o fornecimento de gasolina era escasso e a madeira que poderia ser convertida para carvão vegetal era abundante;

Em 1939, cerca de 250.000 veículos foram registrados na Suécia. Cerca de 90% deles foram convertidos para utilizarem gás sintético. Cerca de 20.000 tratores eram operados com gás de gasificação. 40% da energia primária utilizada era composta por madeira e carvão vegetal;

De 1940 a 1945, mais de 1 milhão de veículos rodaram na Europa durante a II Guerra Mundial com gás sintético devido à escassez de gasolina (REED, DAS, 1988). Contudo, o baixo valor dos combustíveis fósseis logo após a guerra causou a interrupção e desinteresse pela gasificação ao ponto de hoje ser difícil de reproduzir em laboratório o que era rotina na década de 40.

Após 1945, com o fim da Segunda Guerra Mundial, a gasolina e gasóleo estavam disponíveis abundantemente e a baixo custo, a tecnologia da gasificação perde importância;

Na década de 70 com a crise petrolífera foi renovado o interesse na tecnologia de gasificação, principalmente para a geração de energia em pequena escala. Desde então o trabalho de investigação e desenvolvimento tem-se concentrado na utilização de outros tipos de biomassa para além da madeira e do carvão vegetal, nomeadamente: resíduos florestais e agrícolas. Atualmente, devido à escada dos preços dos produtos petrolíferos e o seu fim anunciado, é imperioso a busca de alternativas e a gasificação – tal como no passado – é uma das tecnologia que surge em primeiro lugar nas nossas mentes.

4.2. O processo de gasificação

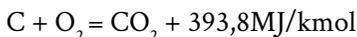
A gasificação é um processo de conversão termoquímica da biomassa a altas temperaturas, envolvendo oxidação parcial dos elementos combustíveis (BRIDGWATER, 2002; REED, 2002). O resultado do processo de gasificação é um gás sintético composto essencialmente

por monóxido de carbono, hidrogénio, dióxido de carbono, vapor de água, metano e alguns contaminantes, tais como: partículas de carbono, alcatrão e cinza.

A gasificação de um combustível sólido é realizada num reator designado por gaseificador na presença de um agente oxidante, que poderá ser o oxigénio puro, vapor de água ou simplesmente o ar atmosférico.

No interior do gaseificador, independentemente da sua natureza, quatro processos ocorrem em simultâneo: secagem, pirólise, oxidação e redução (REED, 2002; DEMIRBAŞ, 2002).

- **Secagem** – remoção de humidade por elevação da temperatura;
- **Pirólise** – decomposição térmica da biomassa na ausência de oxigénio a cerca de 500°C, obtendo-se frações de hidrocarbonetos líquidos (óleo de madeira), sólidos (carvão vegetal) e gases (MCKENDRY, 2002a). As frações de produtos obtidos são influenciadas pela composição química da biomassa e das condições de operação, podendo a eficiência de conversão em combustível líquido atingir cerca de 80% (EU, 1999; ASTON UNIVERSITY, 1996).
- **Oxidação** – com a introdução de ar na zona de oxidação diversas reações ocorrem entre o oxigénio presente no ar e o carbono sólido produzindo monóxido de carbono. As reações ocorrem a temperaturas da ordem dos 975 a 1.275 K as principais das quais são apresentadas seguidamente, onde o sinal positivo indica a libertação de calor.

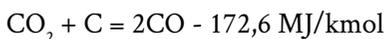


Durante a reação de combustão 12,01 kg de carbono são completamente queimadas com 22,39m³ de oxigénio fornecido pelo ar para obter 22,26 m³ de dióxido de carbono e 393,8 MJ de calor. O hidrogénio presente no combustível reage com o oxigénio produzindo vapor de água.

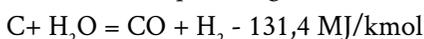


- **Redução** – na zona de redução, um elevado número de reações químicas ocorre a altas temperaturas sem a presença de oxigénio. Assumindo gasificação de biomassa, o primeiro passo do processo é a decomposição termoquímica dos componentes celulósicos com produção de voláteis e resíduo carbonoso. As principais reações de redução que ocorrem na gasificação são as seguintes (MASCHIO et al., 1994; DEMIRBAS, 2002; NETO et al., 2005):

Reação de Boudouard



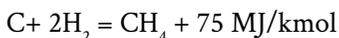
Reação com vapor de água:



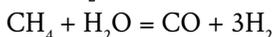
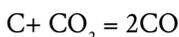
Produção de água



Produção de metano



As reações principais mostram ser necessário fornecer calor durante o processo de redução. Desse modo, a temperatura do gás irá baixar durante esta etapa. No caso de gasificação completa, todo o carbono é queimado ou reduzido a monóxido de carbono, um gás combustível, e alguma outra matéria mineral que é vaporizada. Como resíduos temos cinza e eventualmente algum carbono não queimado. Outras reações ocorrem durante o processo de gasificação, tais como:



Os principais produtos da reação da biomassa são as seguintes (WANG *et al.*, 1997):

Pirólise da biomassa $\rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2 + \text{CO} + \text{hidrocarbonetos}$

Reformação catalítica de vapor $\rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2 + \text{CO} + \text{hidrocarbonetos}$

Gasificação de biomassa $\rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2 + \text{CO} + \text{N}_2$ (ar como oxidante)

O processo de gasificação pode ser classificado de acordo com as suas várias vertentes. As mais importantes são (REED, 2002):

- Processo de gasificação: Atmosférica ou Pressurizada

- Tipo de leito de gasificação: Fixo ou Fluidizado
- Agente de gasificação: Ar, Oxigénio ou Vapor de água
- Aquecimento do gaseificador: Direto ou Indireto

Três qualidades de gás sintético poderão ser produzidas a partir da tecnologia de gasificação por variação do agente de gasificação, o método de operação ou as condições de operação. O poder calorífico do gás obtido pode ser classificado da seguinte forma (MCKENDRY, 2002b):

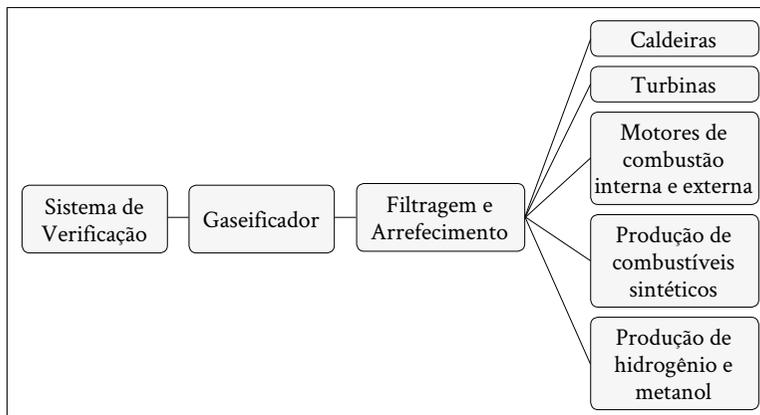
- Baixo: 4 - 6 MJ/Nm³ (utilizando ar ou ar/vapor)
- Médio: 12 - 18 MJ/Nm³ (utilizando oxigénio e vapor)
- Elevado: 40 MJ/Nm³, utilizando hidrogénio e hidrogenização

A eficiência global de conversão de biomassa em energia através da gasificação é da ordem dos 75 a 80% (MCKENDRY, 2002b).

4.3. Componentes de uma instalação de gasificação

Uma instalação de gasificação é composta por quatro unidades fundamentais: o sistema de alimentação, unidade de gasificação, unidade de filtragem e arrefecimento e a unidade de conversão (MCKENDRY, 2002b).

Figura 2 - Esquema simplificado de uma instalação de gasificação



Seguidamente descrevem-se resumidamente os diferentes componentes da instalação.

4.3.1. Sistema de alimentação

A tecnologia desenvolvida para a alimentação de sistemas de combustão de baixa pressão poderá também ser aplicada em sistemas de gasificação (BRIDGWATER, 2002). Dentre estes sistemas encontram-se: rampa, parafuso de sem-fim, etc.

4.3.2. Gaseificadores

Os gaseificadores, também designados por reatores ou gasógenos, são os dispositivos onde ocorre a conversão termoquímica da biomassa. Vários tipos de gaseificadores têm sido desenvolvidos, podendo ser divididos em dois grandes grupos: os de leito fixo e os de leito fluidizado (BRIDGWATER, 1995). A sua diferenciação é feita no meio utilizado para o suporte da biomassa no gaseificador. Os principais tipos de gaseificadores são descritos de seguida.

Gaseificadores de leito fixo

Tipicamente os gaseificadores de leito fixo possuem uma grelha que serve de suporte à biomassa sólida e para manter a zona da reação estacionária. São relativamente fáceis de projetar e operar, e mais indicados para aplicações de pequena a média potência (abaixo de 1 MW). Existe, no entanto, alguma dificuldade em manter temperaturas uniformes e assegurar misturas adequadas na zona de reação. Como consequência, o rendimento é variável assim como a composição final do gás combustível obtido. Os dois principais tipos de gaseificadores de leito fixo são: co-corrente (downdraft) e contracorrente (updraft).

Fluxo paralelo

Esse tipo de gaseificador tem um longo histórico de utilização para a produção de gás sintético derivado de madeira nomeadamente para utilização em motores de combustão interna. Nesse gaseificador a biomassa entra pelo topo e o agente oxidante entra num ponto intermédio e desce no mesmo sentido da biomassa. Depois de passar pelo processo de redução, o agente oxidante sobe sem entrar em contacto direto com a biomassa que está entrando, apenas trocando calor para auxiliar o processo de pirólise.

O ar entra na região de pirólise e produz uma chama com a queima de grande parte dos voláteis. Essa chama é conhecida como combustão pirolítica onde a quantidade limitada de ar produz gases combustíveis além de gás carbónico e água. Quando os voláteis restantes são obrigados a passar pela zona de oxidação, atingem temperaturas altas que os transforma em gases não condensáveis.

Após a zona de combustão a biomassa é transformada em carvão vegetal, o dióxido de carbono e o vapor de água que vem da região de combustão reagem com esse carvão para gerar mais monóxido de carbono e hidrogénio. Esse processo provoca um acentuado decréscimo da temperatura do gás já que as reações de redução são endotérmicas.

As vantagens desse gaseificador são (CIFERNO, MARANO, 2002):

- Cerca de 99,9% do alcatrão formado é consumido, quase não requerendo limpeza desse contaminante;
- Os minerais permanecem com o carvão/cinza, reduzindo a necessidade de um ciclone;
- Tecnologia provada, processo simples e de baixo custo.
- As desvantagens são:
- Requer alimentação de biomassa com índice de humidade baixo (< 20%), na maior parte dos casos será necessário proceder a operações de secagem;

- O gás combustível produzido abandona o gaseificador a elevadas temperaturas, requerendo arrefecimento antes de ser utilizado;
- 4 a 7% do carbono não é convertido.

Contra-corrente

No tipo contracorrente a biomassa geralmente entra pelo topo enquanto o ar entra pela parte inferior. O gás combustível sai pela parte superior e as cinzas da madeira saem pela base, caracterizando o fluxo contracorrente. Ao entrar no gaseificador o ar reage com o carvão vegetal formado logo acima, e produz gás carbónico e vapor de água a temperaturas elevadas (~1000°C). Esses produtos são empurrados para cima e reagem endotermicamente com o carvão para formar CO e H₂, caindo para cerca de 750° C. Esses gases ainda quentes fornecem o calor necessário para a pirólise e a secagem da biomassa.

Os voláteis produzidos na pirólise não atingem altas temperaturas e, portanto, não são totalmente transformados, gerando alcatrão e condensáveis em excesso. Se esse gás for utilizado para queima direta, sem arrefecimento, não há maiores problemas e seu poder calorífico é um pouco maior pela presença dos voláteis. Geralmente entre 5 e 20% do alcatrão e condensáveis são carregados juntamente com o gás.

A temperatura da grelha deve ser limitada para não haver problemas de desgaste nem formação de escória pelas altas temperaturas da reação do carbono com o ar.

O gás produzido pelos gaseificadores é habitualmente destinado ao uso direto em caldeiras. O gás deixa o gaseificador com temperaturas relativamente baixas (tipicamente menos de 500° C), logo o processo tem uma eficiência térmica elevada. Além disso, as especificações do tamanho do combustível não são críticas a esse gaseificador. O elevado índice de alcatrão faz dele um candidato improvável para aplicações em motores alternativos devido ao exigente sistema de filtragem.

As vantagens dele são (CIFERNO, MARANO, 2002):

- Processo simples e de baixo custo;
- Suporta biomassa com elevada humidade e com elevado índice inorgânico (por exemplo, resíduos sólidos urbanos);
- Tecnologia provada

A desvantagem principal desse gaseificador é:

- O gás sintético contém 10 a 20% de alcatrão, requerendo limpeza intensiva antes de ser utilizado quer em motor, turbina ou na produção de combustíveis sintéticos.

Leito fluidizado

Um leito fluidizado resulta quando um fluido, geralmente um gás, flui para cima através de um leito de partículas sólidas adequadamente dimensionadas numa velocidade suficientemente alta para fazer flutuar as partículas, vencer a influência da gravidade, e dar a elas uma aparência de grande turbulência.

Essa tecnologia é bastante utilizada nas convencionais instalações de combustão e é baseada num sistema que ao contrário dos resíduos serem queimados sobre uma grelha, o leito é composto por partículas inertes tais como areia ou cinzas. Quando o ar é bombeado através do leito, essas partículas comportam-se como um fluido. Em comparação com a queima em massa, os sistemas de combustão em leito fluidizado possibilitaram a redução das emissões de gases, parcialmente devido ao próprio processo e, também, porque se pode acrescentar cal ao leito. Como aproximadamente um terço das despesas nas unidades de queima em massa é derivado do sistema de controlo de poluição do ar, torna-se possível economizar já que os sistemas de leito fluidizado têm menores necessidades de controlo de poluição do ar.

Os gaseificadores de leito fluidizado têm a vantagem de misturar extremamente bem e de permitirem uma elevada transferência de calor, tendo por resultado condições mais uniformes e reações

químicas mais eficientes. A tecnologia fluidizada é mais apropriada para geradores com capacidades acima de 10 MW porque pode ser usada com combustíveis diferentes, requer câmaras de combustão relativamente compactas e permite um bom controlo operacional. Os gaseificadores de leito fluidizado foram e são foco de pesquisa considerável a provar estão os diversos projetos e comercialização nos últimos anos.

Existem dois tipos principais de gaseificadores de leito fluidizado: o borbulhante e o circulante que se passam a descrever.

Leito Fluidizado Borbulhante

Num gaseificador leito fluidizado borbulhante (LFB) a velocidade do gás deve ser suficientemente alta de modo que as partículas que constituem o leito sejam elevadas e assim expandir a base e fazer com que borbulhe como um líquido. Um gaseificador LFB tem tipicamente uma câmara cilíndrica ou retangular projetada de modo que o contacto entre o gás e o combustível sólido facilite a secagem e redução de dimensões. A maior inércia térmica da massa de partículas do leito em comparação com o gás permite estabilizar a temperatura do leito.

A temperatura do leito é controlada de modo a não atingir a temperatura da fusão da cinza produzida pela combustão. Enquanto a biomassa é introduzida no leito, a maioria dos compostos orgânicos vaporizam por pirólise e são também parcialmente oxidados. A combustão exotérmica fornece o calor para manter a base na temperatura necessária para volatilizar o combustível adicional. O leito pode ser projetada e operado de modo a se ajustar à taxa de alimentação requerida, de modo que a taxa de ar seja mais baixa do que a quantidade teórica do oxigênio necessária para a oxidação da biomassa. Nessas circunstâncias, o gás e os compostos sólidos do produto deixam a base que contem combustível não gaseificado. O poder calorífico e a percentagem de alcatrão do gás combustível resultante

aumenta com a diminuição da quantidade de ar relativo à necessidade teórica de oxigênio. A temperatura de operação típica nesse tipo de sistema é de 900 a 1.000° C.

As vantagens da gasificação em leito fluidizado borbulhante são (Bridgwater e Evans, 1993):

- Gás produzido de características uniformes;
- Distribuição quase uniforme da temperatura no reator;
- Flexível quanto às dimensões da biomassa;
- Promove elevadas taxas de transferência de calor entre o material inerte, o combustível e o gás;
- Elevada conversão possível com baixo teor de alcatrão e carbono não convertido.

As desvantagens são:

- As grandes dimensões das partículas do leito podem constituir um escape para o gás combustível.

Leito Fluidizado Circulante

Enquanto a velocidade do gás aumenta numa câmara fluidizada borbulhante, a base dos sólidos continua a expandir-se, e uma fração crescente de partículas é fundida fora do leito. Um coletor de partículas pode ser utilizado para capturar as partículas maiores que são devolvidas ao leito. Este conceito de combustão suspensa é chamado leito fluidizado circulante (LFC).

Um gaseificador LFC não é diferenciada de uma base fluida borbulhando naquela lá é nenhuma separação distinta entre a zona densa dos sólidos e a zona diluída dos sólidos (figura 8). A distribuição de dimensões das partículas, a taxa de atrito e a velocidade do gás determinam a residência ótima dos sólidos no leito.

Em geral, o tipo de gaseificador é selecionado com base no tipo de biomassa disponível, na potência da instalação e na qualidade pretendida para o gás obtido.

As vantagens desse tipo de gaseificador são (BRIDGWATER, 1993):

- Apropriado para reações rápidas;
- Elevada transferência de calor devido à elevada capacidade térmica do material do leito;
- Elevada conversão possível com baixo teor de alcatrão e carbono não convertido.

As desvantagens são:

- Os gradientes de temperatura ocorrem no sentido do fluxo do combustível sólido;
- As dimensões das partículas do combustível determinam a velocidade mínima de transporte; velocidades elevadas podem resultar na erosão do equipamento;
- Troca de calor mais menos eficiente do que no leito fluidizado borbulhante.

Na tabela 1 apresenta-se um resumo da classificação dos gaseificadores em termos de direção do escoamento de combustível e oxidante, o tipo de suporte e a fonte de calor necessária à ao desenrolar das reações químicas.

Tabela 1 - Classificação de gaseificadores (REED, SIDDHARTHA, 2001; BRIDGWATER, EVANS, 1993)

Tipo de gaseificador	Direcção escoamento		Suporte	Fonte de calor
	Combustível	Oxidante		
Leito fixo contracorrente	Descendente	Ascendente	Grelha	Combustão de carvão
Leito fixo fluxo paralelo	Descendente	Descendente	Grelha	Combustão parcial de voláteis
Leito fluidizado borbulhante	Ascendente	Ascendente	Nenhum	Combustão parcial de voláteis e carvão

Leito fluidizado circulante	Ascendente	Ascendente	Nenhum	Combustão parcial de voláteis e carvão
-----------------------------	------------	------------	--------	--

Na tabela 2 resumem-se as principais características dos gaseificadores apresentados.

Tabela 2 - Características de gaseificadores

	Leito fixo		Leito fluidizado	
	Fluxo Paralelo	Contra-corrente	Borbulhante	Circulante
Temperatura de reação (°C)	1000	1000	850	850
Temperatura gás (°C)	800	250	800	850
Alimentação (t/h)	0,5	10	10	20
Potência elétrica (MWe)	0,1 a 1	1 a 10	1 a 20	2 a 100
Características do gás combustível				
Conteúdo de alcatrão	Baixo	Elevado	Moderado	Baixo
Conteúdo e partículas	Moderado	Baixa	Elevada	Elevada
Poder calorífico (MJ/Nm ³)	4,5 a 5,0	5,0 a 6,0	Pobre	Médio
Flexibilidade do sistema de alimentação				
Dimensão	Boa	Muito boa	Razoável	
Mistura	Pobre	Pobre	Muito boa	Excelente
% humidade	Moderada	Muito boa	Boa	Boa
% cinzas	Pobre	Pobre	Muito boa	Muito boa
Eficiência				

Conversão do carbono	Muito boa	Muito boa	Moderada	Muito boa
Térmica	Muito boa	Excelente	Boa	Muito boa

4.3.3. Sistema de filtragem

Construir e operar um gaseificador é relativamente simples, porém, muitos sistemas têm falhado após menos de 100 horas de operação devido a incrustação com alcatrão. É necessário testar as propriedades físicas e químicas do gás para determinar a sua adequação ao propósito do sistema. Durante o desenvolvimento do equipamento é necessário medir os seguintes valores:

- Composição do Gás – percentagem em volume de CO, CO₂, H₂, H₂O, CH₄, C₂ e hidrocarbonetos, além de N₂, para calcular o poder calorífico do gás e analisar a operação do gaseificador.
- Poder Calorífico – pode ser calculado pela composição ou medido através de calorímetro sem necessidade de se conhecer a composição. Em geral o gás deve possuir poder calorífico superior a 4 MJ/Nm³ para a maioria das aplicações.
- Quantidade de Alcatrões – a quantidade de condensáveis orgânicos no gás em bruto é uma medida do desempenho do gaseificador. Acima de 5000 mg/Nm³ torna-se difícil e bastante dispendiosa a limpeza do gás. O sistema de limpeza deverá reduzir o alcatrão para menos de 10 mg/Nm³.
- Quantidade e tamanho das partículas – o tipo e quantidade dos finos de carvão e fuligem arrastados pelo fluxo de gás podem ajudar a projetar os filtros. Partículas maiores que 10 µm devem ser removidas para um nível abaixo de 10 mg/Nm³ para aplicações em motores.
- Quantidade de vapor de água do gás sintético – é importante para calcular a capacidade de arrefecimento necessária.

A cinza é um elemento importante a ser determinado, apesar de habitualmente a sua percentagem ser inferior a 2%. Acontece que após a pirólise, a cinza e o carbono resultante formam um produto que irá passar pelo processo de redução. À medida que isso acontece as suas dimensões diminuem podendo cair através da grelha ou ser arrastado juntamente com os gases para o ciclone. Esse carvão é abrasivo devido aos minerais presentes na cinza e pode causar desgaste no sistema utilizador, devendo ser eliminado.

O alcatrão apresenta-se na forma de uma névoa de finas gotículas que se aglomeram em gotas maiores que cobrem partículas sólidas. A remoção dessas partículas é essencial, principalmente no caso de utilização em motor de combustão interna onde entupiriam as válvulas e partes móveis do motor.

Para retirada dos partículas utiliza-se geralmente ciclones, filtros de tecidos e/ou precipitadores eletrostáticos, sendo importante manter a temperatura acima dos 300°C para evitar a condensação de vapores. O alcatrão é retirado usualmente através de um lavador de gases, apesar de existirem tentativas de obter uma conversão catalítica que transforma os vapores condensáveis em gases não-condensáveis.

O arrefecimento posterior até à temperatura ambiente é importante por dois motivos: condensa o vapor de água presente no gás e melhora o rendimento do sistema utilizador pela maior densidade do gás e prevenção da pré-ignição.

5. MODELAÇÃO DA GASIFICAÇÃO DA BIOMASSA

O funcionamento eficaz de um gasificador de biomassa depende de um número de reações químicas complexas, como já visto anteriormente, incluindo a pirólise, a oxidação parcial do carbono fixo no combustível, a gasificação, o craqueamento de alcatrão e oxidação parcial dos produtos de pirólise. Com vista a facilitar a compreensão de todas as fases e processos inerentes à gasificação da biomassa foram criados e desenvolvidos diversos modelos matemáticos. Os

principais objetivos desses modelos são, estudar os processos termoquímicos que ocorrem durante a gasificação da biomassa, avaliar a influência das principais variáveis, como por exemplo, o teor de humidade existente no gás e a temperatura de gasificação ideal.

Alguns estudos consideram apenas a composição final do produto químico em equilíbrio, enquanto outros levam em conta os diferentes processos ao longo do gasificador, distinguindo pelo menos duas zonas, sendo esse último um modelo mais detalhado e complexo. Os modelos podem ser divididos em equilíbrio e cinéticos de acordo com Puig-Arnaut *et al.* (2010).

A primeira abordagem desse tipo de modelação é datada da década de 1950, quando Gumz implementou um modelo em equilíbrio para a produção de um gás. Posteriormente, na década de 1960-70, a NASA (National Aeronautics and Space Administration) desenvolveu vários trabalhos, que desenvolveram modelos para cálculos de equilíbrio de combustíveis de foguetes, os quais apresentaram novas metodologias de cálculo e complexas relações de equilíbrio.

Devido essa modelação não considerar de forma detalha a geometria do sistema, nem os passos intermédios inerentes ao processo de gasificação, esses modelos de equilíbrio são utilizados tanto para representar gasificadores de leito fixo como de leito fluidizado.

Os modelos cinéticos fornecem informações essenciais sobre a cinética para descrever a conversão dos mecanismos durante o processo de gasificação da biomassa, o que é crucial para conceção, avaliação e melhoria dos gasificadores. Esses modelos são precisos, detalhados e também computacionalmente intensivos.

No Departamento de Engenharias da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, tem sido desenvolvido trabalho experimental em torno da gasificação, recorrendo a um gasificador experimental, bem como têm sido desenvolvidos modelos numéricos capazes de descrever o processo de gasificação, quer baseados no equilíbrio termodinâmico (*EQUIGASI v1*), quer baseados na cinética (*MOGASI v1*). Ambas as abordagens têm conduzido a resultados satisfatórios, com

erros inferiores a 3%, quando comparados com os resultados experimentais. Os modelos numéricos em uso fazem recurso das linguagens de programação Fortran e Visual C#.

Na secção seguinte, detalhar-se-á o desenvolvimento de um modelo baseado no equilíbrio termodinâmico, recorrendo a algumas espécies de biomassa.

5.1. Modelo matemático baseado no equilíbrio

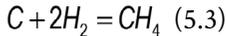
O modelo de equilíbrio assume que todas as reações estão em equilíbrio termodinâmico. Espera-se que os produtos da pirólise queimem e atinjam o equilíbrio na zona de redução antes de deixar o gasificador, por conseguinte, podemos usar um modelo de equilíbrio num gasificador de co-corrente utilizando as reações que se seguem:



Reação de gás de água ou reação carbono vapor

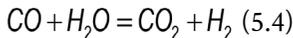


Reação de formação de metano



As Equações (5.1) e (5.2) podem ser combinadas para obtermos a

Reação de deslocamento:



A constante de equilíbrio para a formação do metano (Equação (5.3)) é

$$K_1 = \frac{P_{CH_4}}{(P_{H_2})^2} \quad (5.5)$$

e a constante de equilíbrio para a reação de deslocamento (Equação (5.4)) é

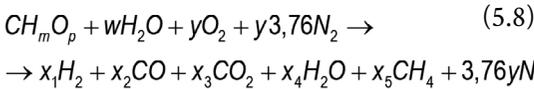
$$K_2 = \frac{P_{CO_2} P_{H_2}}{P_{CO} P_{H_2O}} \quad (5.6)$$

A partir da análise final da biomassa e das frações de massa de carbono, hidrogénio, oxigénio, nitrogénio e enxofre, a substituição na fórmula geral de biomassa, $C_nH_mO_pN_qS_r$, pode ser calculada, assumindo que $n = 1$, através das seguintes expressões:

$$m = \frac{HM_c}{CM_H} \quad (5.7)$$

$$p = \frac{OM_c}{CM_O}$$

O algoritmo que permite estimar a composição do gás de síntese é baseado no equilíbrio químico entre as diferentes espécies, ou seja, a quantidade para cada espécie presente nos reagentes terá que ser igual à quantidade da mesma espécie nos produtos, tendo também em conta que se trata de um gasificador co-corrente, de acordo com Melgar *et al.* (2007). Portanto, a reação global para a gasificação da biomassa num gasificador de co-corrente pode ser escrita,



onde W é a quantidade de água por $kmol$ de biomassa, Y , a quantidade de oxigénio por $kmol$ de biomassa, X_1 , X_2 , X_3 , X_4 e X_5 são os coeficientes estequiométricos para cada espécie química presente nos produtos da reação.

O teor de humidade por mol de biomassa (MC) permite-nos chegar a uma equação para o cálculo da quantidade de água por $kmol$ de biomassa (W) da seguinte forma,

$$MC = \frac{\text{massa de água}}{\text{massa de biomassa}} \rightarrow MC = \frac{18w}{24 + 18w}$$

Portanto,

$$w = \frac{24MC}{18(1 - MC)} \quad (5.9)$$

Na reação global existem seis incógnitas, X_1 , X_2 , X_3 , X_4 , X_5 e Y representando as cinco espécies desconhecidas dos produtos e o teor de oxigénio presente na reação. Portanto são necessárias seis equações que são formuladas com base no seguinte:

Balanço do Carbono

$$1 = X_2 + X_3 + X_5 \quad (5.10)$$

Balanço do Hidrogénio

$$m + 2w = 2X_1 + 2X_4 + 4X_5 \quad (5.11)$$

Balanço do Oxigénio

$$p + w + 2y = X_2 + 2X_3 + X_4 + 2X_6 + 2X_7 \quad (5.12)$$

Constante de equilíbrio a partir da reação de formação do metano (Equação (5.5))

$$K_1 = \frac{X_5}{X_1^2} \quad (5.13)$$

Constante de equilíbrio a partir da reação de deslocamento (Equação (5.6))

$$K_2 = \frac{X_1 X_3}{X_2 X_4} \quad (5.14)$$

A equação para o balanço de calor para o processo de gasificação, assumindo um processo adiabático, é:

$$\begin{aligned}
H_{f_{biomassa}}^0 + w(H_{f_{H_2O(l)}}^0 + H_{(vap)}) + yH_{f_{O_2}}^0 + y3,76H_{f_{N_2}}^0 = \\
= x_1H_{f_{H_2}}^0 + x_2H_{f_{CO}}^0 + x_3H_{f_{CO_2}}^0 + x_4H_{f_{H_2O(vap)}}^0 + x_5H_{f_{CH_4}}^0 + \\
+ \Delta T \left[x_1C_{p_{H_2}} + x_2C_{p_{CO}} + x_3C_{p_{CO_2}} + x_4C_{p_{H_2O}} + x_5C_{p_{CH_4}} + y3,76C_{p_{N_2}} \right] \quad (5.15)
\end{aligned}$$

Como $H_{f_{H_2}}^0, H_{f_{N_2}}^0, H_{f_{O_2}}^0$ são iguais a zero à temperatura ambiente, a Equação (5.15) reduz-se a:

$$\begin{aligned}
H_{f_{biomassa}}^0 + w(H_{f_{H_2O(l)}}^0 + H_{(vap)}) = x_2H_{f_{CO}}^0 + x_3H_{f_{CO_2}}^0 + x_4H_{f_{H_2O(vap)}}^0 + x_5H_{f_{CH_4}}^0 + \\
+ \Delta T \left[x_1C_{p_{H_2}} + x_2C_{p_{CO}} + x_3C_{p_{CO_2}} + x_4C_{p_{H_2O}} + x_5C_{p_{CH_4}} + y3,76C_{p_{N_2}} \right] \quad (5.16)
\end{aligned}$$

onde $H_{f_{biomassa}}^0$, é a entalpia de formação da biomassa, $H_{f_{H_2O(l)}}^0$ é a entalpia de formação da água no estado líquido, $H_{(vap)}$ é a entalpia de vaporização da água, $H_{f_{H_2O(vap)}}^0$ é a entalpia de formação do vapor de água, $H_{f_{CO}}^0, H_{f_{CO_2}}^0, H_{f_{CH_4}}^0, H_{f_{SO_2}}^0$ são as entalpias de formação dos produtos gasosos, $C_{p_{H_2}}, C_{p_{CO}}, C_{p_{CO_2}}, C_{p_{H_2O}}, C_{p_{CH_4}}, C_{p_{N_2}}, C_{p_{O_2}}$ são os calores específicos dos produtos gasosos, $\Delta T = T_2 - T_1$, onde T_2 é a temperatura de gasificação na zona de redução e T_1 é a temperatura ambiente na zona de redução.

A Equação (5.15) pode ser simplificada da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
dH_{biomassa} + wdH_{H_2O(l)} = x_1dH_{H_2} + x_2dH_{CO} + \\
+ x_3dH_{CO_2} + x_4dH_{H_2O(vap)} + x_5dH_{CH_4} + 3,76ydH_{N_2} \quad (5.17)
\end{aligned}$$

onde $dH_{(para\ qualquer\ gás)}$, é a entalpia de formação + a variação da entalpia:

$$dH_{(para\ qualquer\ gás)} = H_f^0 + \Delta H \quad (5.18)$$

$$\Delta H = \Delta T (C_{p(g)})$$

$$dH_{H_2O(l)} = H_{f_{H_2O(l)}}^0 + H_{(vap)},$$

$$dH_{biomassa} = H_{f_{biomassa}}^0$$

As Equações (5.10) a (5.14) e (5.17) representam seis equações com seis incógnitas. As Equações (5.13) e (5.14) são equações não lineares, enquanto que as restantes são lineares. O sistema de equações formado pelas seis equações, quatro lineares e duas não lineares, pode ser reduzido para um sistema de três equações, uma linear e duas não lineares.

Da Equação (5.10),

$$x_5 = 1 - x_2 - x_3 \quad (5.19)$$

Da Equação (5.11),

$$x_4 = \frac{m}{2} + w - x_1 - 2x_5 \quad (5.20)$$

Substituindo a Equação (5.19) na Equação (5.20), temos:

$$x_4 = \frac{m}{2} + w - x_1 - 2(1 - x_2 - x_3) \Leftrightarrow x_4 = -x_1 + 2x_2 + 2x_3 + \frac{m}{2} + w - 2 \quad (5.21)$$

Da Equação (5.12),

$$y = \frac{1}{2}(x_2 + 2x_3 + x_4 - p - w) \quad (5.22)$$

Substituindo a Equação (5.21) na Equação (5.22), tem-se:

$$y = \frac{1}{2} \left[x_2 + 2x_3 + \left(\frac{m}{2} + w - x_1 - 2 + 2x_2 + 2x_3 \right) - p - w \right] \quad (5.23)$$

$$y = \frac{1}{2} \left[-x_1 + 3x_2 + 4x_3 - p + \frac{m}{2} - 2 \right]$$

Da Equação (5.13),

$$x_5 = K_1 x_1^2 \quad (5.24)$$

Substituindo a Equação (5.19) na Equação (5.24), temos:

$$1 - x_2 - x_3 = K_1 x_1^2 \Leftrightarrow K_1 x_1^2 + x_2 + x_3 - 1 = 0 \quad (5.25)$$

Da Equação (5.14),

$$x_1 x_3 = x_2 x_4 K_2 \quad (5.26)$$

Substituindo a Equação (5.20) na Equação (5.26), temos:

$$x_1 x_3 - x_2 \left(\frac{m}{2} + w - x_1 - 2 + 2x_2 + 2x_3 \right) K_2 = 0 \Leftrightarrow \quad (5.27)$$

$$\Leftrightarrow x_1 x_3 + K_2 (x_2 x_1) - 2K_2 (x_2)^2 - 2K_2 (x_2 x_3) - \left(-2 + w + \frac{m}{2} \right) K_2 x_2 = 0$$

Substituindo as Equações (5.19), (5.21) e (5.23) na Equação (5.17), temos:

$$\begin{aligned} & x_1 dH_{H_2} + x_2 dH_{CO} + x_3 dH_{CO_2} + \left(-x_1 + 2x_2 + 2x_3 + \frac{m}{2} + w - 2 \right) dH_{H_2O(g)} + \quad (5.28) \\ & + (1 - x_2 - x_3) dH_{CH_4} + 3,76 \times \frac{1}{2} \left(-x_1 + 3x_2 + 4x_3 - \rho + \frac{m}{2} - 2 \right) dH_{N_2} + \\ & + x_6 dH_{SO_2} + x_7 dH_{O_2} - dH_{biomassa} - w dH_{H_2O(l)} = 0 \Leftrightarrow \\ & \Leftrightarrow \left(dH_{H_2} - dH_{H_2O(g)} - 1,88 dH_{N_2} \right) x_1 + \left(dH_{CO} + 2dH_{H_2O(g)} - dH_{CH_4} + 5,64 dH_{N_2} \right) x_2 + \\ & + \left(dH_{CO_2} + 2dH_{H_2O(g)} - dH_{CH_4} + 7,52 dH_{N_2} \right) x_3 + \left(\frac{m}{2} + w - 2 \right) dH_{H_2O(g)} + dH_{CH_4} + \\ & + 1,88 \left(-\rho + \frac{m}{2} - 2 \right) dH_{N_2} - dH_{biomassa} - w dH_{H_2O(l)} = 0 \end{aligned}$$

Para simplificar a Equação (5.28),

$$A = dH_{H_2} - dH_{H_2O(g)} - 1,88 dH_{N_2}$$

$$B = dH_{CO} + 2dH_{H_2O(g)} - dH_{CH_4} + 5,64 dH_{N_2}$$

$$C = dH_{CO_2} + 2dH_{H_2O(g)} - dH_{CH_4} + 7,52 dH_{N_2}$$

$$D = \left(\frac{m}{2} + w - 2 \right) dH_{H_2O(g)} + dH_{CH_4} + 1,88 \left(-\rho + \frac{m}{2} - 2 \right) dH_{N_2} - dH_{biomassa} - w dH_{H_2O(l)}$$

Portanto a Equação (5.28) simplifica-se a:

$$Ax_1 + Bx_2 + Cx_3 + D = 0 \quad (5.29)$$

Temos então um sistema de três equações, duas não lineares, (5.25) e (5.27) e uma linear, (5.29). Portanto teremos que recorrer ao método de *Newton-Raphson* para resolver o sistema.

5.2. Resultados

De modo a compreendermos qual a influência da composição da biomassa, foram obtidos resultados para, madeira, cascas de arroz, papel e RSU's (Resíduos Sólidos Urbanos).

Variámos ainda para cada tipo de biomassa o teor de humidade e a temperatura de gasificação, com o intuito de perceber qual a influência que cada variável tem na composição do gás de síntese.

5.2.1. Variação do teor de humidade

As percentagens de hidrogénio aumentam ligeiramente com o aumento do teor de humidade, verificando-se que as cascas de arroz são as que apresentam uma maior percentagem de hidrogénio, variando entre aproximadamente 23% e os 24%, para o intervalo [0, 40%] de teor de humidade. Enquanto que os RSU's são os que produzem menor percentagem de hidrogénio, oscilando entre 16% e 17% (Figura 3).

Os valores de monóxido de carbono, para todos os tipos de biomassa estudados, diminuem com o aumento do teor de humidade (Figura 4). Verifica-se ainda que as cascas de arroz e o papel são os que mais produzem monóxido de carbono, apresentando valores muito semelhantes com o aumento do teor de humidade, variando entre 38% e 27%, para o intervalo [0, 40]% de teor de humidade O material de biomassa que apresenta menor produção de monóxido

de carbono são os RSU's, com valores entre os 30% e os 22%, para o intervalo [0, 40]% de teor de humidade.

Os conteúdos de metano aumentam com o aumento do teor de humidade. Observa-se ainda que as cascas de arroz é o material de biomassa que apresenta maior percentagem de metano, variando de 1,02% a 1,17%, para o intervalo [0, 40]% de teor de humidade. Enquanto que os RSU's é o apresenta menor produção de metano, variando dos 0,59% aos 0,73% (Figura 5).

No que diz respeito ao conteúdo em dióxido de carbono (Figura 6), esse aumenta com o aumento do teor de humidade, para todos os materiais de biomassa estudados. A madeira é o que produz mais dióxido de carbono, variando dos cerca de 3% aos 10%. Já o que produz menor quantidade de dióxido de carbono são as cascas de arroz, variando entre 1% a 8%. Verifica-se ainda que o conteúdo de dióxido de carbono é semelhante para o papel e para os RSU's.

Figura 3 - Concentração de hidrogénio em função do teor de humidade, a 800° C, para diferentes tipos de biomassa

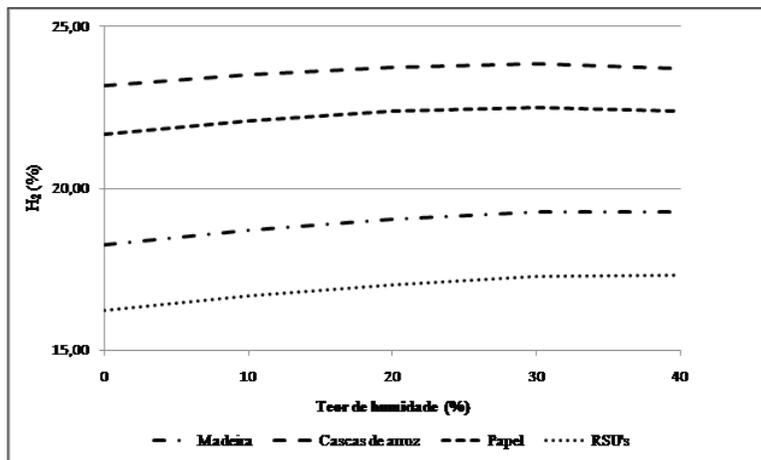


Figura 4 - Concentração de monóxido de carbono em função do teor de humidade, a 800° C, para diferentes tipos de biomassa

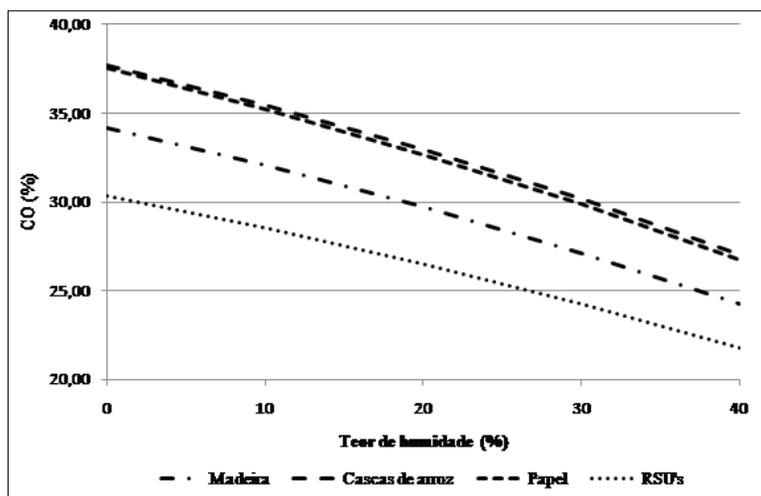


Figura 5 - Concentração de metano em função do teor de humidade, a 800° C, para diferentes tipos de biomassa

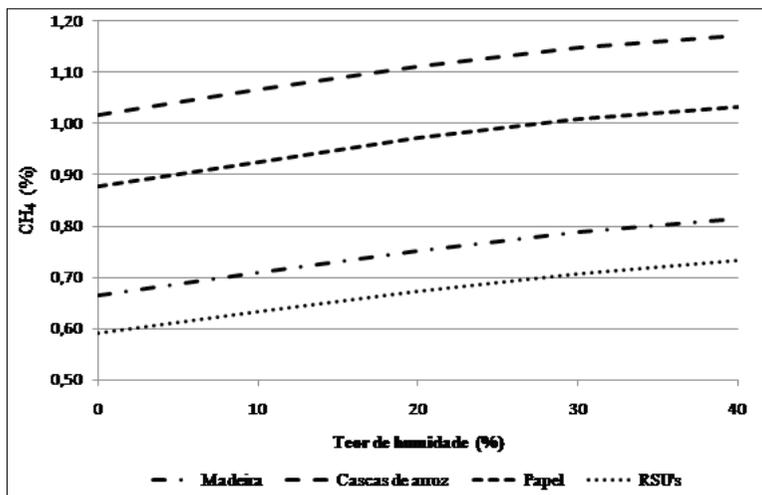
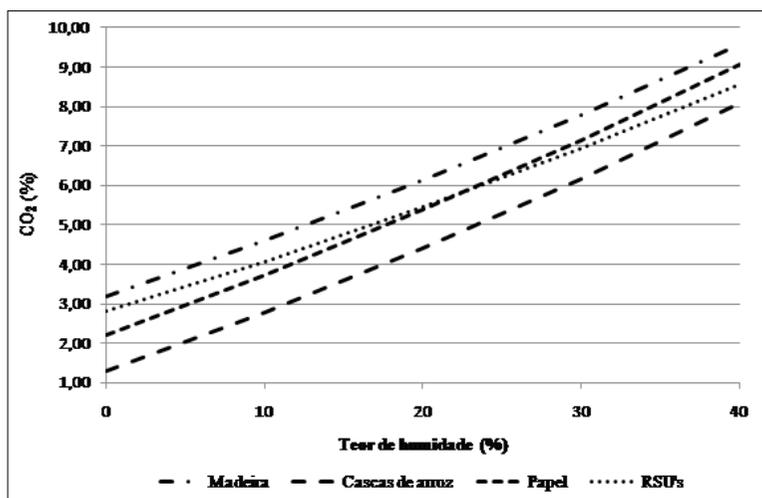
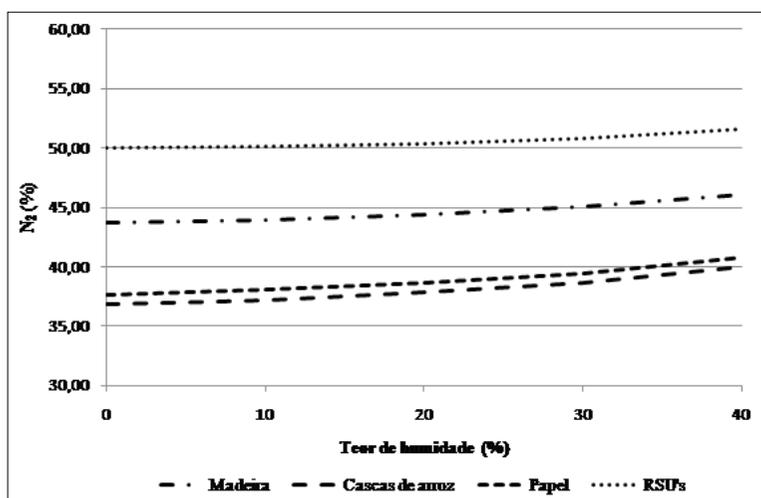


Figura 6 - Concentração de dióxido de carbono em função do teor de humidade, a 800° C, para diferentes tipos de biomassa



De um modo geral para todos os tipos de biomassa estudados a percentagem de nitrogénio aumenta com o aumento do teor de humidade (Figura 7), sendo que até aos 20% de teor de humidade mantêm-se relativamente constantes. Os RSU's são os que produzem maior quantidade de nitrogénio, que para um intervalo de 0% a 40% do teor de humidade, oscila entre os 50% e os 52%. Já o que produz menos nitrogénio são as cascas de arroz, com valores a variar entre os 37% e os 40%.

Figura 7 - Concentração de nitrogénio em função do teor de humidade, a 800° C, para diferentes tipos de biomassa



5.2.2. Variação da temperatura de gasificação

Na figura 8, observa-se que, de um modo geral, a percentagem de hidrogénio aumenta até se atingir a temperatura de gasificação de 1073,15 K (800° C). A partir desse valor diminui até ser atingida a temperatura de 1273,15 K (1.000° C). As cascas de arroz são o tipo de biomassa estudado que apresenta uma maior percentagem

de hidrogénio, variando entre 22% e 24%, para uma temperatura de gasificação entre 873,15 K (600° C) e 1273,15 K (1.000° C). Os RSU's é a biomassa estudada que apresenta menor percentagem de hidrogénio, oscilando entre 16% e 17%, para uma temperatura de gasificação entre 873,15 K (600° C) e 1273,15 K (1.000° C).

Os conteúdos de monóxido de carbono aumentam com o aumento da temperatura de gasificação, para todos os tipos de biomassa estudados (Figura 9). Verificamos também que as percentagens de monóxido de carbono para as cascas de arroz e para o papel são bastante semelhantes, apresentados valores entre 30% e os 34%, para uma temperatura de gasificação entre 873,15 K (600° C) e 1273,15 K (1.000° C).

As quantidades de metano, figura 10, diminuem com o aumento da temperatura de gasificação, para todos os tipos de biomassa estudados, até atingirem uma temperatura de 1173,15 K (900° C). A partir desse os outros valores obtidos são semelhantes, aproximando-se de 0%.

Figura 8 - Concentração de hidrogénio em função da temperatura de gasificação, com um teor de humidade de 20%, para diferentes tipos de biomassa

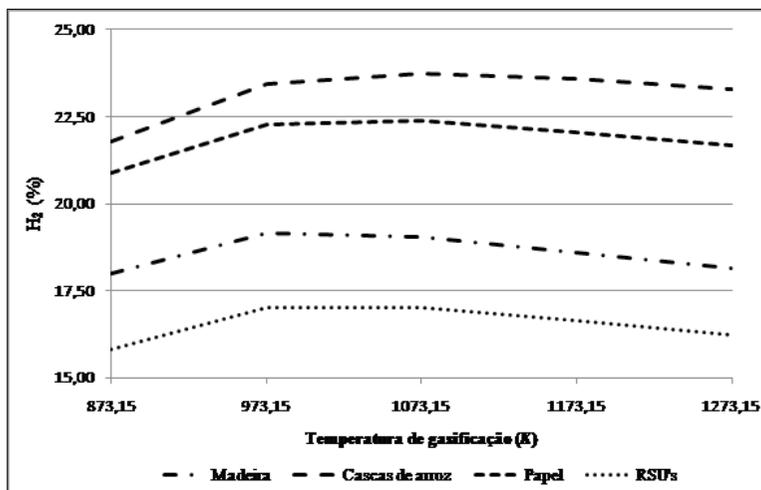


Figura 9 - Concentração de monóxido de carbono em função da temperatura de gasificação, com um teor de humidade de 20%, para diferentes tipos de biomassa

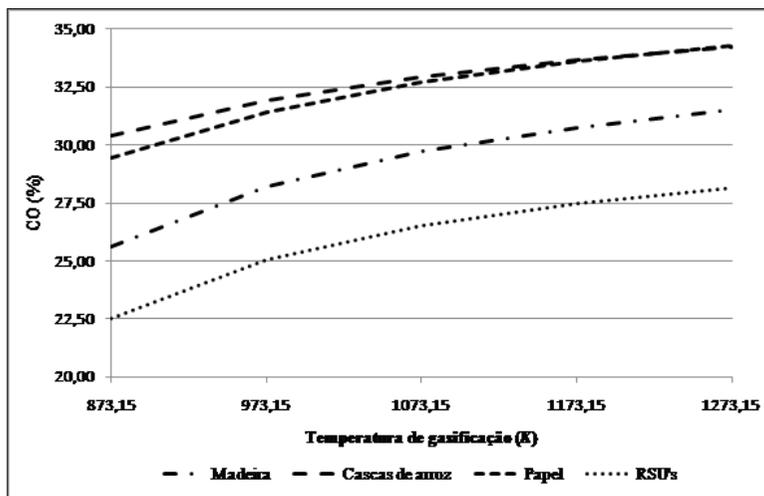
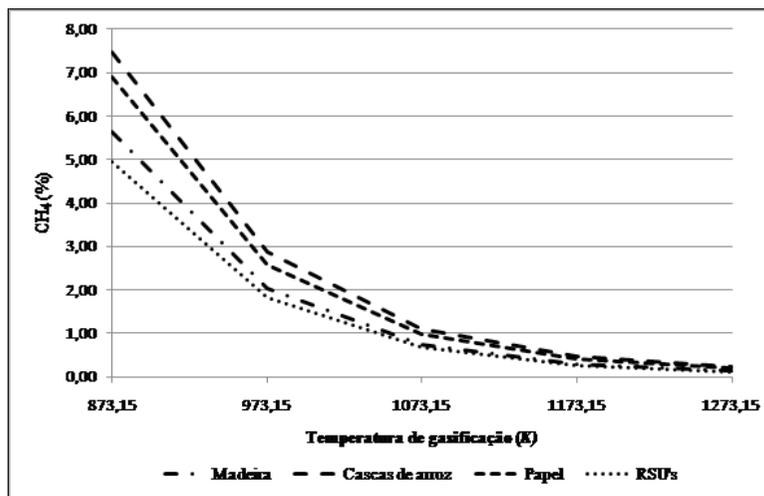


Figura 10 - Concentração de metano em função da temperatura de gasificação, com um teor de humidade de 20%, para diferentes tipos de biomassa



A presença de dióxido de carbono decresce com o aumento da temperatura de gasificação, para todos os tipos de biomassa (Figura 11). Verifica-se os valores de dióxido de carbono para os pedaços de madeira são os mais elevados, variando dos 11% aos 5%, para uma temperatura de gasificação de 873,15 K (600° C) a 1273,15 K (1.000° C).

A presença de nitrogénio aumenta com o aumento da temperatura de gasificação, para todos os tipos de biomassa (Figura 12).

5.2.3. Variação do teor de humidade e temperatura de gasificação

Com o intuito de perceber qual a temperatura de gasificação ideal e qual o teor de humidade adequado para se maximizar a quantidade de metano para os pedaços de madeira, fez-se variar as duas variáveis em simultâneo. Como mostra a tabela 4, as condições ideais são 873,15 K (600° C) e 40% de humidade relativa, onde a percentagem de metano presente no gás de síntese atinge os 6,38%.

Figura 11 - Concentração de dióxido de carbono em função da temperatura de gasificação, com um teor de humidade de 20%, para diferentes tipos de biomassa

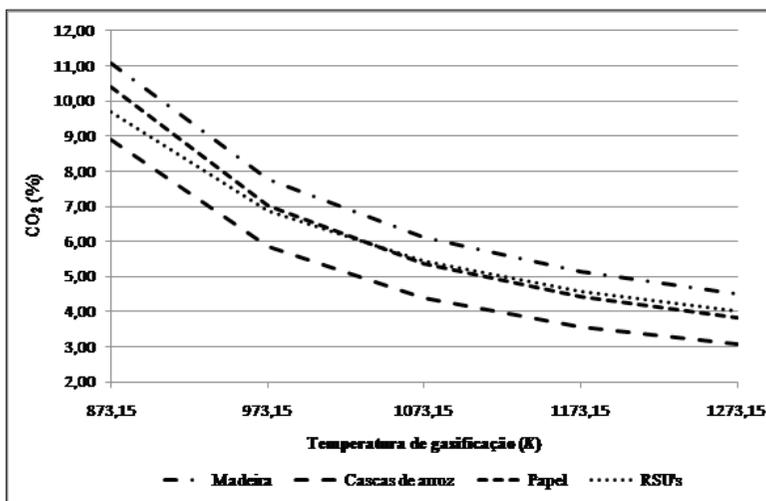


Figura 12 - Concentração de nitrogénio em função da temperatura de gasificação, com um teor de humidade de 20%, para diferentes tipos de biomassa

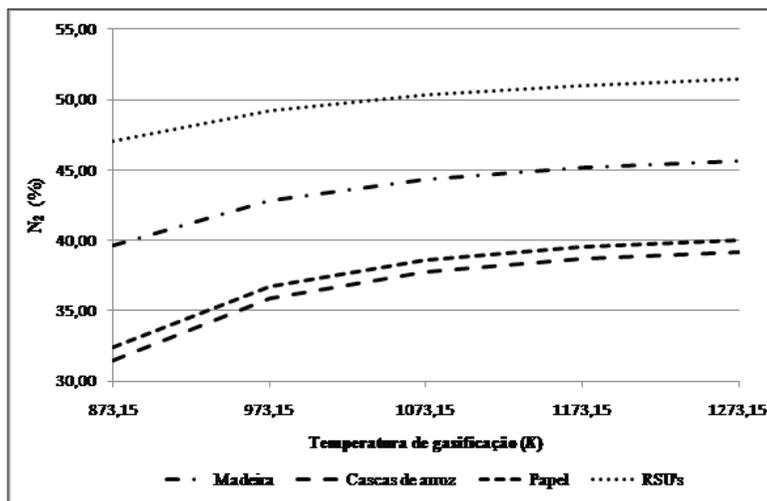


Tabela 3 - Variação do teor de humidade e da temperatura de gasificação para as percentagens de metano, nos pedaços de madeira

	873,15K	973,15K	1073,15K	1173,15K	1273,15K
0%	4,54	1,73	0,66	0,28	0,13
10%	5,11	1,89	0,71	0,29	0,14
20%	5,64	2,04	0,75	0,31	0,14
30%	6,09	2,18	0,79	0,32	0,14
40%	6,38	2,27	0,81	0,32	0,14

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos, em termos da variação do teor de humidade, mostram que para todos os tipos de biomassa estudados, pedaços de madeira, cascas de arroz, papel e RSU's, as percentagens de metano aumentam com o aumento do teor de humidade.

Relativamente aos resultados obtidos através da variação da temperatura de gasificação, concluiu-se que os conteúdos de metano diminuem de forma significativa com o aumento da temperatura de gasificação.

Pode concluir-se que o teor de humidade adequado para ser obtido um gás de síntese rico metano, será cerca de 40%, sendo que a partir desse teor, a presença de metano começa a diminuir. No que diz respeito à temperatura ideal de gasificação, conclui-se que essa será de 873,15 K (600° C).

De um modo geral, e como o intuito do processo de gasificação da biomassa é o de extrair um gás de síntese de elevado rendimento, conclui-se que as cascas de arroz e o papel seriam os tipos de biomassa com maior rentabilidade, em termos de produção de metano.

REFERÊNCIAS

ASTON UNIVERSITY, 1996. **The fast pyrolysis of oilseed rape**. ETSU, B/M5/00533/18/Rep.

BHATTACHARYA, S. C. Commercialization options for biomass energy technologies. *In: ESCAP Countries*. Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, Asian Institute of Technology, 2001.

BRIDGWATER, A. V.; TOFT, A. J.; BRAMMER, J. G. A Techno-economic comparison of power production by biomass fast

pyrolysis with gasification and combustion. **Journal of Renewable & Sustainable Energy Reviews**, p. 181-248, 2002.

BRIDGWATER, A. V. The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation. **Fuel**, v. 14, n. 5, p. 631-653, 1995.

BRIDGWATER, A. V.; EVANS, G. D. An assessment of thermochemical conversion systems for processing biomass and refuse. **Energy Technology Support Unit (ETSU)** on behalf of the Department of Trade, ETSU B/T1/00207/REP, 1993.

CARPENTIERI, M.; CORTI, A.; LOMBARDI, L. Life cycle assessment (LCA) of an integrated biomass gasification combined cycle (IBGCC) with CO₂ removal. **Journal of Energy Conversion and Management**, v. 46, p. 1790-1808, 2005.

CIFERNO, J. P.; MARANO, J. J. **Benchmarking biomass gasification technologies for fuels: chemicals and hydrogen production**. U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory, 2002.

DEMIRBAŞ, A. Hydrogen production from biomass by the gasification process. *In: Taylor & Francis, Journal of Energy Sources*, n. 24, p. 59-68, 2002.

DEMIRBAŞ, A.; ÇAĞLAR, A. Catalytic steam reforming of biomass and heavy oil residues to hydrogen. **Energy Educ. Sci. Technology**, n. 1, p. 45-52, 1998.

EU, 1999. **Biomass conversion technologies**. EUR 18029 EN. ISBN: 92-828-5368-3.

KNOEF, H. Gasification of biomass & waste: practical experience. **III International Slovach Biomass Forum**. February, 2003.

MASCHIO, G. A.; LUCCHESI, G.; STOPPATO. Production of syngas from biomass. **Journal of Bioresource Technology**, v. 48, p. 119-126, 1994.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass: conversion technologies. part 2. **Journal of Bioresource Technology**, n. 83, p. 47-54, 2002a.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass: gasification technologies. part 3. **Journal of Bioresource Technology**, v. 83, p. 55-63, 2002b.

MELGAR, A.; PÉREZ, J. F.; LAGET, H.; HORILLO, A.. Thermochemical equilibrium modeling of a gasifying process. **Energy Conversion and Management**. 2007.

PUIG-ARNAUT, M.; BRUNO, J. C.; CORONAS, A. Review and analysis of biomass gasification models. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2010.

REED, T. B.; SIDDHARTHA, G. **A survey of biomass gasification**. 2nd ed. 2001.

REED, T. Encyclopaedia of biomass thermal conversion: the principles and technology of pyrolysis, gasification and combustion. **Biomass Energy Foundation Press**, 3rd ed., 2002.

RUI NETO, A. *et al.* Fluidised bed co-gasification of coal and olive oil industry wastes. **Fuel**, v. 84, p. 1635-1644, 2005.

WANG, D; CZERNIK, D. S.; MONTANE, M. M.; CHORNET, E. Biomass to hydrogen via fast pyrolysis and catalytic steam reforming of the pyrolysis oil or its fractions. **Ind. Eng. Chem. Res**, v. 36, p. 1507-1518, 1997.

ZAINAL, Z. A.; ALI, R.; LEAN, C. H.; SEATHAKAMU, K. N. **Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials**. Energy Conversion and Management, 2001.

CAPÍTULO 8

Carbono na madeira como importante propulsor de uma economia verde

*José Tarcísio da Silva Oliveira
Marina Donaria Chaves Arantes
Jordão Carbral Moulin
Brunela Pollastrelli Rodrigues*

1. INTRODUÇÃO

A madeira é um material orgânico, renovável, variando suas características de espécie para espécie e dentro da mesma espécie, ou seja, um material heterogêneo, mas muito versátil. De modo geral, todas as madeiras são constituídas de aproximadamente, 49-50% de carbono,

44-45% de oxigênio, 6% de hidrogênio, 0,1-1% de nitrogênio e 0,4-0,5% de compostos minerais (TSOUMIS, 1991). Por meio da combinação desses elementos é formada uma estrutura química complexa e altamente organizada, representada pela hemicelulose, celulose, lignina, extrativos e os componentes minerais.

Particularmente em relação ao carbono, esse representa por volta de 50% da massa de matéria seca na madeira e constitui elemento importante como fonte de energia para uma variada gama de organismos vivos e ainda é o responsável por muitas propriedades da madeira e suas distintas formas de utilização, sobretudo como fonte de energia renovável (FOELKEL, 1977).

Nos tempos atuais as fontes de carbono renováveis, com destaque para as plantas lenhosas, têm atraído atenção de pesquisadores de todo mundo, como potenciais substitutos de matérias-primas não renováveis e sobretudo poluentes. De acordo com a Rojas-Briales (2012), o conceito de sustentabilidade é crucial para o entendimento do potencial da floresta como fornecedora global de matéria-prima e energia renovável, bem como fonte natural de bem-estar para futuras gerações e para a manutenção de ecossistemas vitais atuando como infraestrutura verde. É inegável o papel desempenhado pela floresta no ciclo de carbono da terra. Por volta de 3,2 bilhões de metros cúbicos de madeira são anualmente abatidas pelas florestas do mundo (FAO, 2010), mas seu enorme potencial para substituição por materiais não renováveis tem de longe não sido considerado.

A biomassa contida nas florestas afeta o ciclo de carbono pela remoção de carbono da atmosfera por meio do processo de fotossíntese, que consiste na conversão do dióxido de carbono (CO_2) e água nos açúcares necessários ao crescimento das árvores e ainda na liberação do oxigênio para na atmosfera: $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + \text{energia solar} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$. Quando a madeira é queimada ou decomposta, o carbono armazenado é liberado num processo inverso da fotossíntese, ou seja: $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 \rightarrow 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$.

A madeira é um material que requer uma mínima quantidade de energia para seu processamento, possuindo um baixo nível de energia incorporada relativo a muitos outros materiais de construção, tais como aço, concreto, alumínio ou plástico (FPL, 2010). Energia incorporada refere-se à quantidade de energia para a colheita, processamento, fabricação e transporte para o ponto de utilização do material madeira ou seus produtos.

Face à relevância de temas relacionados ao carbono, como principal constituinte elementar da madeira e as suas implicações ambientais nos mecanismos de desenvolvimento limpo, este capítulo discutirá os aspectos globais das florestas no sequestro e manutenção do estoque de carbono pelas árvores, aspectos relacionados às alterações do clima, relatos de experiências regionais, metodologias de quantificação do teor de carbono na madeira e nas florestas e dados relativos ao percentual de carbono em algumas importantes espécies produtoras de madeiras.

2. ECONOMIA VERDE E MUDANÇAS CLIMÁTICAS

A necessidade de uma economia verde, é suportada principalmente pela proximidade de exaustão dos combustíveis fósseis tal como o petróleo e os riscos técnicos de energia de outras fontes, como a nuclear por exemplo. O problema de energia está no aumento da população mundial de sete bilhões de pessoas no presente, e projetada para nove bilhões de pessoas em 2050 e também pelo crescimento da classe média das economias emergentes. Ambos fatores vão em direção ao aumento da demanda e consumo de energia e matérias-primas (ROJAS-BRIALES, 2012).

Os produtos à base de madeira quando são utilizados, acumulam carbono por períodos que variam de poucos dias a diversas décadas, a depender do tipo de produto e também da espécie lenhosa utilizada na sua confecção. Em relação a outros materiais de construção, produtos de madeira consomem menos energia e geram baixas

emissões quando manufaturados. Devido ao potencial das florestas no sequestro de carbono, o uso de produtos florestais poderá ser significativo na mitigação das mudanças climáticas (RUUSKA *et al.*, 2012). Ainda segundo os mesmos autores, importantes questões a respeito da utilização de produtos florestais na mitigação das alterações do clima devem ser pesquisadas: (i) Qual é o balanço de carbono, se as árvores são colhidas para serem utilizadas em diferentes tipos de produtos? (ii) Qual é o efeito da rotação e idade dos povoamentos? e (iii) Quais serão os efeitos das estratégias de manejo na absorção e sequestro de carbono?

Os produtos de madeira e os biocombustíveis são coprodutos do manejo florestal sustentável, juntamente com outros bens fornecidos pela floresta, tais como ar puro, água e habitação. De acordo com Sedjo e Tian (2012) a madeira como fonte de bioenergia é tratada como carbono neutro, uma vez que o crescimento da biomassa recaptura o carbono liberado na produção de energia, entretanto, existem questionamentos de que o uso de florestas para energia, poderá incorrer a redução de carbono das florestas, mas tal argumento é falho, uma vez que a demanda por energia de biomassa poderá aumentar o estoque de madeira, um recurso renovável. Segundo esses mesmos autores, para uma floresta manejada, um substancial aumento antecipado na demanda futura não reduzirá o carbono na floresta, como tem sido questionado, mas sim aumentará os estoques florestais e de carbono devido à expansão das atividades de manejo florestal.

Para Lippke *et al.* (2012) a produção de múltiplos coprodutos de base madeireira com diferentes usos, resultando em diferentes valores complica a contabilidade de mitigação do carbono. Torna-se então importante entender como as implicações de manejo do ciclo de vida das florestas impactam a energia nacional e os objetos das emissões de carbono e outros valores da floresta.

Os produtos de madeira ou à sua base têm muitas vantagens ambientais sobre alternativas não madeireiras, com Bergman *et al.* (2014) reconhecendo que tais méritos ajudam na competitividade

da madeira quando se considera os impactos das mudanças climáticas, uma vez que a manufatura de produtos de madeira exige menos combustíveis fósseis do que materiais de construção não madeireiros como concreto, metais ou plásticos. Carrano *et al.* (2014) afirmaram que são manufaturados cerca de 500 milhões de novos paletes anualmente nos Estados Unidos, somando aproximadamente 2 bilhões desses produtos já em circulação no país, sendo a madeira o material que corresponde a 90% de tais produtos. Esses autores abordaram as estimativas da quantidade de carbono ou as emissões de gás de efeito estufa, que surgem em todas as fases do ciclo de vida do paleta. Entre os principais fatores afetando o ciclo de vida desses produtos e consequentemente o tempo de captura de carbono, estão o projeto estrutural, às operações de logísticas e às condições ambientais em serviço.

Jaeger e Vervoort (2012) relataram que no quarto relatório de avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas em Florestas, cientistas revelaram que uma estratégia de manejo sustentável para a manutenção ou o aumento do estoque de carbono nas florestas, seria a produção de madeira, fibra e energia. Ainda segundo esses autores, nesse contexto é importante notar que: (i) As florestas europeias fornecem um estoque de carbono de 150-200 bilhões de toneladas de CO₂, com crescimento a cada ano de 661.000 ha, sequestrando mais de 0,5 bilhão de toneladas de CO₂; (ii) o estoque de produtos de madeira armazena uma estimativa de 220 milhões de toneladas de CO₂. Anualmente, esse estoque aumenta, armazenando mais de 20 milhões de toneladas de CO₂; (iii) a substituição de materiais tipicamente utilizados na construção por produtos de madeira leva a uma economia entre 0,7 e 1,1 toneladas de CO₂/m³; e (iv) a madeira é um combustível de carbono neutro no qual pode ser utilizado como substituto aos combustíveis fósseis.

De acordo com Negra *et al.* (2009), entre 1995 e 2005 a taxa de carbono sequestrado nas florestas dos Estados Unidos foi da ordem de 150 milhões de toneladas anuais (não incluindo o solo), uma quantidade de carbono equivalente a aproximadamente 10% das emissões de

carbono nacional. Nos Estados Unidos, de acordo com Skog (2008), o carbono contido nos produtos de madeira em utilização, e também como resíduos em aterros são estimados em 25 bilhões de toneladas e acumula a uma taxa de aproximadamente 28 milhões de toneladas por ano. Muito desse carbono contido em produtos de madeira está nos estoques de casas dos Estados Unidos, estimado em 116 milhões de unidades no ano 2000. Ainda segundo Skog (2008) no ano de 2001, por volta de 680 milhões de toneladas de carbono foram armazenadas no estoque de casas dos Estados Unidos, ou próximo de um terço do total de carbono (2,5 bilhões de toneladas) citado acima.

Conforme o Forest Products Laboratory/FPL (2010), o carbono emitido para produzir uma tonelada de concreto está por volta de oito vezes aquele emitido para produzir uma tonelada de componentes estruturais de madeira. Semelhante comparação para o aço, indica que sua produção emite por volta de 21 vezes mais carbono para igual massa de um componente estrutural de madeira. Fica então evidente que os produtos de madeira ou produzidos à sua base, também mitigam emissões de carbono quando utilizados como substitutos para o aço, o concreto, os quais emitem mais gases do efeito estufa em sua produção.

Devido os produtos de madeira possuir esse baixo nível de energia incorporada, comparado com outros materiais de construção e devido a madeira possuir metade do teor de carbono por unidade de massa, os produtos de madeira podem realmente serem denominados de carbono negativo (BOWYER *et al.* 2008).

3. EXPERIÊNCIAS REGIONAIS RELACIONADAS AO SEQUESTRO DE CARBONO PELAS FLORESTAS

O aquecimento global, causado pelo aumento dos Gases de Efeito Estufa (GEE) em decorrência das atividades humanas, é um dos principais problemas ambientais da atualidade. Segundo a Indústria Brasileira de Árvores - IBÁ (2015), estudos científicos encomendados

pela Organização das Nações Unidas (ONU) alertam que as mudanças no clima podem provocar graves impactos ambientais, econômicos e sociais. De acordo com os cientistas, existem duas maneiras de combater o aquecimento global: reduzir a emissão de GEE e remover o dióxido de carbono (CO₂) liberado na atmosfera. As florestas plantadas são grandes aliadas do planeta nesse segundo quesito.

Ainda, segundo a mesma fonte, setor estima ainda um estoque de 2,4 bilhões de toneladas de CO₂ em suas áreas de preservação e conservação, por meio de Áreas de Preservação Permanente (APPs), de Reserva Legal (RL) e de Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPNs). Ao preservar 5,4 milhões de hectares de áreas naturais, mais da metade do tamanho total dos plantios, o setor conserva um importante estoque de carbono e contribui para a preservação da biodiversidade brasileira.

O uso de biomassa florestal como fonte de energia renovável tem recebido muita atenção como resposta às mudanças climáticas e ao incremento por demandas globais por energia. De acordo com Miah *et al.* (2011) a substituição de combustíveis fósseis por biomassa poderá ter um forte efeito na mitigação das alterações climáticas por meio de redução dos gases do efeito estufa, os quais podem ser importantes considerações para projeto de MDL (mecanismos de desenvolvimento limpo) em Bangladesh. Entre as fontes de biomassa, as florestas estão desempenhando um papel significativo no suprimento de biomassa para energia. Tem sido estimado que a biomassa contabiliza por volta de 15% do consumo mundial de energia e por volta de 38% do consumo de energia primária nos países em desenvolvimento (SIMS, 2003). Também tem sido estimado que a biomassa contabiliza mais de 90% do total de suprimento de energia em áreas rurais dos países em desenvolvimento (BHATTACHARYA, SALAM, 2002).

Relativo ao efeito das alterações climáticas no crescimento de florestas e conseqüentemente no sequestro de carbono, Alan *et al.* (2010) utilizaram um modelo de ecossistema (SIMA) para investigar o impacto do clima e variação nos regimes de desbastes

simultaneamente com a energia e produção da madeira, bem como sobre o crescimento e estoques de carbono durante o período de 2010-2099 no Sul (abaixo de 64° N) e Norte (acima de 64° N) da Finlândia. De acordo com os resultados, tanto a energia quanto a produção de madeira aumentaram com o efeito das mudanças climáticas, com esse efeito sendo maior no norte comparado ao sul da Finlândia. Para esses autores, as alterações no clima, como definidas por aumento na temperatura e na concentração de CO₂ e mudanças nos padrões de precipitação, podem implicar em elevada taxa de decomposição de matéria orgânica, levando assim a maior disponibilidade de nutrientes para as árvores. Tais alterações irão provavelmente aumentar o crescimento, melhorar a produtividade da floresta, alterar a estrutura, ou seja, a composição de espécies, e o funcionamento do ecossistema florestal boreal. Ainda de acordo com Alan *et al.* (2010), essa interação entre o manejo florestal e condições climáticas tem não somente o papel vital na manutenção do crescimento da floresta, mas é também, altamente relevante na manutenção de produção de energia para a substituição de combustíveis fósseis, integrada com a produção de madeira e armazenando carbono no contexto de mitigação das mudanças climáticas.

Keyse e Zarnoch (2012) estudando os efeitos de tratamentos silviculturais como desbaste, idade e qualidade de sítio no estoque de carbono em árvores vivas (Mg ha⁻¹), afirmaram que a taxa média líquida anual de carbono armazenado na biomassa de árvore viva foi significativamente maior em povoamentos desbastados em relação aos não desbastados. De acordo com esses mesmos autores, dado os fatores que influenciam a produção por desbaste, é razoável assumir que a resposta à captura e armazenamento de carbono devido ao seu efeito não é uniforme, mas a floresta captura e armazena carbono após o desbaste e comumente varia com o tipo de floresta, classe de idade, condição edafoclimática e a dimensão do desbaste prescrito. Segundo Harmon *et al.* 2009 e Ryan *et al.* 2010, as operações de desbaste acopladas com a expansão da idade de rotação é uma ação de

manejo que poderá ser utilizada para aumentar o carbono armazenado em árvores vivas.

Opuni-Fripong *et al.* (2013) estudaram aspectos relacionados à produtividade, tolerância a pragas e sequestro de carbono por árvores de *Khaya grandifoliola* em uma floresta semidecidual seca em Ghana, no continente africano. Nesse estudo foram realizadas comparações de tais parâmetros considerando plantios puros e mistos de *Khaya grandifoliola*, vulgarmente conhecida como mogno africano. Aos quatro anos de idade, tais autores afirmaram que *K. grandifoliola* acumulou mais carbono em povoamento puro ($10.126 \pm 557,2 \text{ kg ha}^{-1}$) do que em povoamento misto ($1.976 \pm 335,1 \text{ kg ha}^{-1}$), mas a mistura das espécies de árvores, incluindo *K. grandifoliola*, acumulou mais carbono ($11.929 \pm 401,3 \text{ kg ha}^{-1}$) do que *K. grandifoliola* em povoamento puro, embora sem diferença estatística. Na tabela 1, estão algumas importantes informações acerca da produção de biomassa e carbono sequestrado para quatro espécies de folhosas estabelecidas em povoamentos puros e mistos em zona de floresta semidecidual seca em Ghana.

Tabela 1 - Estimativas de sequestro de carbono por hectare em povoamentos puros e mistos na zona de floresta semidecidual seca de Ghana

Espécie*	Densidade (árvore/ha)	Biomassa (kg/árvore) (kg/ha)		Carbono sequestrado (kg/árvore) (kg/ha)	
<i>K. grandifoliola</i> (povoamento puro)	756	26,8	20.252	13,4	10.126
<i>K. grandifoliola</i> (povoamento misto)	209	18,8	3.953	9,4	1.976
<i>C. odorata</i> (povoamento misto)	178	67,4	11.999	33,6	6.000
<i>T. superba</i> (povoamento misto)	197	39,5	7.779	19,7	3.889

<i>T. grandis</i> (povoamento puro)	584	40,9	23.905	20.4	11.953
--	-----	------	--------	------	--------

* *Khaya grandifoliola*, *Cedrela odorata*, *Terminalia superba*, *Tectona grandis*.
Fonte: Opuni-Fripong *et al.* (2013).

Observa-se na tabela 1 o potencial de espécies como *K. grandifoliola*, e *T. grandis*, conhecidas vulgarmente como mogno africano e teca na captura de carbono quando estabelecidas em plantios puros. Tais espécies, com estudos avançados relativos a introdução como alternativas de reflorestamentos em diversas regiões tropicais, além de excepcionais características quanto a captura de carbono, são reconhecidos pela excepcional qualidade das madeiras produzidas. Especificamente relativo à madeira de teca, essa pode estar sem nenhuma dúvida inserida numa lista das dez melhores madeiras a nível mundial, em face de suas propriedades tecnológicas superiores.

As plantações florestais podem ser muito importantes no sequestro de carbono da atmosfera (MONTAGNINI, PORRAS, 1998; KELTY, 2006; DERWISCH *et al.*, 2009; HODJMAN, MUNGER, 2009). É também importante não somente avaliar a produtividade de plantações de árvores nativas em plantios puros e mistos, mas também o sequestro de carbono como parte dos serviços ambientais que as plantações podem fornecer (REDONDO-BRENER, MONTAGNINI, 2006). Opuni-Fripong *et al.* (2013) afirmaram que tais resultados concordam com aqueles de Redondo-Brener e Montagnini (2006) que relataram que espécies como *Callophyllum brasiliense*, *Virola koschnyi*, *Vochysia ferruginea* e *Balizia elegans* tiveram desempenho melhor em plantações puras para sequestro de carbono do que em povoamentos mistos. Em termos de sequestro de carbono, a espécie *K. grandifoliola* foi capaz de sequestrar mais carbono por árvore em povoamentos puros do que em mistos, mas a mistura de espécies (três espécies) acumulou muito mais carbono por hectare do que em plantio puro de *K. grandifoliola*. Esses autores ainda afirmaram que um investidor em carbono poderá entretanto lucrar mais com

plantios mistos, uma vez que no longo prazo esses fixarão mais carbono devido a diferentes idades de rotação das árvores.

De acordo com Brawner *et al.* (2012), em torno de 130.000ha de plantações de folhosas têm sido estabelecidas no nordeste da Austrália nos últimos anos e diferenças significativas na sobrevivência, altura, diâmetro, área basal, incremento médio anual de volume, incidência de brocas do fuste, taxa de sequestro de carbono e produtividade em polpa celulósica foram observadas na idade de 10 anos. Para todas as regiões, na idade considerada, o maior volume de incremento, ou seja, de 30 m³/ha/ano foi observado em *Eucalyptus pellita* na costa norte tropical, com o maior DAP de 19,6cm, sendo observado em *Eucalyptus dunni* na região norte. No caso do *E. dunni*, tal crescimento equivale a 274 toneladas de CO₂ equivalentes ou 74 toneladas de polpa celulósica por hectare.

Apesar de representar somente 0,8% de sua área territorial, o Brasil possui expressiva área de plantações florestais, segundo Colodette *et al.* (2012) o País possui uma área de 7 milhões de hectares, constituída basicamente de *Eucalyptus* (69,6%) e *Pinus* (23,4%). Segundo esses mesmos autores, a produtividade de alguns clones de *Eucalyptus*, atinge os 100 m³/ha/ano em algumas regiões do país, o que demonstra o enorme potencial de sequestro de carbono das espécies desse gênero, que sem nenhuma dúvida, face sua elevada plasticidade relativo à adaptação nas diferentes condições de solo e clima do Brasil e ainda produzir madeira para atendimento aos diversos segmentos industriais, poderá contribuir para o país definitivamente alcançar suas metas de sustentabilidade e real inserção na economia verde. Segundo a Indústria Brasileira de Árvores - IBÁ (2014), em 2013 a área ocupada por plantios florestais de *Eucalyptus* totalizava 5.300.000 ha. Ainda em 2014, os 7,74 milhões de hectares de árvores plantadas no Brasil foram responsáveis pelo estoque de aproximadamente 1,69 bilhão de toneladas de dióxido de carbono (tCO₂), representando incremento de 1,2% em relação a 2013.

As florestas plantadas são mais eficientes do que as florestas nativas no sequestro de CO₂. Como os ciclos, entre o cultivo da muda e a colheita, duram em média sete anos, no caso do eucalipto, e 14 anos, no caso do pinus, as árvores nesses plantios estão em constante crescimento, pois assim que são colhidas, novas mudas são plantadas em seu lugar. Quanto mais jovem o vegetal, maior a necessidade de energia para crescer, o que, conseqüentemente, implica em maior absorção de carbono. As florestas plantadas também fornecem matéria-prima renovável para a geração de energia do setor, em substituição ao uso de fontes fósseis, e dessa forma contribuem para a redução das emissões de GEE. Por exemplo, o óleo combustível que representava mais de 50% da matriz energética do setor hoje representa menos de 6%, sendo substituído por biomassa e subprodutos, como licor preto (IBÁ, 2015).

Goetz *et al.* (2013), avaliando o sequestro de carbono numa floresta estruturada de *Pinus sylvestris* na Espanha, discutiram a importância da correta determinação dos benefícios da produção de madeira e também da necessidade de uma medição precisa do desempenho de sequestro de carbono do produto final. Nesse estudo considerase não somente o fato de que o carbono permanece sequestrado nos produtos de madeira após o abate das árvores (STAVINS, 1999), mas também que o tempo de permanência do carbono sequestrado no produto de madeira varia com o tamanho da árvore.

Avaliando o sequestro de carbono em florestas de *Pinus taeda* (loblolly pine) geneticamente melhorado aos 40 anos de idade no sudeste dos Estados Unidos, Aspinwall *et al.* (2012) afirmaram que devido à elevada produção, essas florestas, oriundas de melhoramento genético podem desempenhar importante papel na mitigação da elevação de carbono (CO₂) na atmosfera via sequestro de carbono (C). Desde 1977, próximo de 100% das plantações de loblolly pine no sudeste dos Estados Unidos, tem sido com material genético melhorado e de acordo com esses mesmos autores, em anos recentes, mais de 400.000 hectares dessa espécie melhorada, têm sido plantados

anualmente. Estimativa indica que o melhoramento genético tem resultado em um adicional de 3,7 bilhões de metros cúbicos (17% de aumento) e 1.100 Tg (13%) de volume de produção e sequestro de carbono, respectivamente, relativo ao volume de produção e sequestro de carbono com material sem nenhum melhoramento genético.

As florestas armazenam por volta de 45% do carbono (C) terrestre global (BONA, 2008), desempenhando um papel fundamental no equilíbrio de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera – sendo esse sequestro de carbono pelas florestas e produtos de madeira –, é frequentemente citado como potencial meio de mitigação do aumento do teor de CO₂, resultante de ações antropogênicas (DIXON *et al.*, 1994; NABUURS *et al.*, 2007; RYAN *et al.* 2010). Durante os anos 90's a fixação de carbono pelas florestas foi estimada com sendo 2,6 Pg/ano, representando por volta de 33% das emissões globais de carbono por combustíveis fósseis e decorrentes de mudanças do uso da terra (DENMAN *et al.*, 2007).

4. MÉTODOS DE QUANTIFICAÇÃO DO TEOR DE CARBONO EM FLORESTAS E MADEIRA

A partir do Protocolo de Kyoto, em 1997, estabelecido pela Convenção Quadro da mudança do clima das Nações Unidas, foi se consolidando o mercado de carbono, em que países industrializados passaram a ter obrigações e quotas de redução das emissões de carbono, devendo esses países reduzir as emissões em seus próprios territórios ou trocar direitos de emissão, ou ainda adquirir os créditos de carbono gerados em outros lugares do globo por meio do mercado de carbono (OLIVEIRA *et al.*, 2011).

Com o desenvolvimento do mercado de carbono, as árvores passaram a ser valorizadas também pelo serviço do carbono florestal, ou seja, com valor monetário de mercado pela quantidade de carbono capturado e retido em sua matéria lenhosa.

A quantificação de carbono sequestrado pela biomassa presente na floresta é calculada a partir do produto da massa seca total dos componentes arbóreos pelos seus respectivos teores de carbono (DALLAGNOL *et al.*, 2011), embora os principais entraves são as obtenções dos dados referentes as variáveis da biomassa seca em estudo, para isso existem dois métodos, o indireto e o direto.

O método indireto consiste na estimativa de carbono acumulado, utilizando dados do inventário florestal para gerar equações de regressão e estimar a biomassa florestal para posteriormente calcular a massa em carbono, alguns trabalhos adotam ou recomendam o teor de carbono como 50% do peso da biomassa (FANG *et al.*, 2001; SOARES, OLIVEIRA, 2002; GORGENS *et al.*, 2005). Para Chave *et al.* (2005) as variáveis mais importantes para construção de modelos alométricos são em ordem decrescente: DAP, densidade da madeira, altura total e tipologia florestal.

Algumas florestas de países que compreendem os continentes da América, Ásia e Oceania são monitoradas desde os anos de 1950's. Chave *et al.* (2005) estudaram os dados obtidos tanto do crescimento dessas plantas quanto do clima, para gerar modelos de regressões que estimem a biomassa que está acima do solo de uma árvore, o total de árvores no experimento foi de 2410 com diâmetro a 1,30 acima do solo (DAP) igual ou superior a 5 cm. Como foram muitas florestas analisadas com distintas características, foram então classificadas em três tipos para maior confiabilidade na regressão: i) Floresta úmida: ocorre quando a evapotranspiração das florestas é menor que o índice de chuva no mês, ou seja, possui alto índice de chuva (maior do que 3500 mm/ano) e não é sazonal; ii) Floresta tropical úmida: ocorre quando a evapotranspiração da floresta é menor que o índice de chuva em menos de 5 meses do ano, o índice de chuva é de 1500 a 3500 mm/ano; iii) Floresta seca: É a floresta que possui stress hídrico, com índice de chuva abaixo de 1500 mm/ano, até 5 meses do ano com ausência de chuva. Após a obtenção da biomassa presente na floresta pela equação da regressão é necessário multiplicar tal valor

pela estimativa de carbono, como comentado anteriormente alguns autores recomendam utilizar 50%. A floresta úmida, tropical úmida e seca correspondem as equações 1, 2 e 3 respectivamente.

$$AGB = \rho \times \text{expo}(-1,239 + 1,980 \ln(D) + 0,207 (\ln(D))^2 - 0,0281 (\ln(D))^3) \quad (1)$$

$$AGB = \rho \times \text{expo}(-1,499 + 2,148 \ln(D) + 0,207 (\ln(D))^2 - 0,0281 (\ln(D))^3) \quad (2)$$

$$AGB = \rho \times \text{expo}(-0,667 + 1,784 \ln(D) + 0,207 (\ln(D))^2 - 0,0281 (\ln(D))^3) \quad (3)$$

em que:

AGB = biomassa seca acima do solo da árvore;

ρ = densidade básica da madeira (g cm^{-3});

D = diâmetro da árvore à 1,30 m da altura (cm).

No Brasil, a quantificação dos estoques de carbono sequestrados em espécies comerciais conhecidas, como araucária, eucalipto e o pinus, poderá de acordo com Oliveira *et al.* (2011) ser realizada com a aplicação dos softwares da série Sis, como por exemplo, o SisEucalipto, SisAraucária e SisPinus; sendo um método indireto. A partir de informações de volumes das árvores, biomassa, densidade básica e outras variáveis dendrométricas, o estoque de carbono das florestas poderá ser estimado (Tabela 2). Segundo os mesmos autores, esses softwares servem para fazer uma prognose e quantificar a biomassa das árvores e do carbono retirado da atmosfera por elas.

Tabela 2 - Softwares e respectivas equações para estimativa de estoque de carbono

Software/ Espécie	Equação para estimar carbono - C*	Referência-base
SisAcácia <i>Acacia mearnsii</i>	(1,33V).(0,41).(0,4248) ¹	Sardeles <i>et al.</i> (2009)
SisAraucária <i>Araucaria angustifolia</i>	(1,53V).(0,41).(0,43)	Watzlawick <i>et al.</i> (2003)
SisBracatinga <i>Mimosa scabrella</i>	(1,43V).(0,48).(0,44)	Machado <i>et al.</i> (2006)

SisEucalipto <i>Eucalyptus grandis</i>	(1,25V).(0,49).(0,42)	Silva (1996)
SisPinus Pinus taeda	(0,0001-0,0040. D+0,0193.D ² .H+ 0,5728.I).0,41	Corte e Sanqueta (2007)
SisTeca <i>Tectona grandis</i>	-	Rondon (2006); Gouveia e Ângelo (2002)

Nota: *Para a obtenção do teor de CO₂ multiplica-se o carbono (C) pelo fator de conversão igual a 3,6667. V = volume do tronco com casca, C = teor de carbono, D = DAP (cm), H = altura total (m), I = idade (anos).

Fonte: Oliveira *et al.* (2011) modificado.

A utilização do método indireto tem por objetivo reduzir o custo de determinação da massa da biomassa e a consequente alteração das áreas amostrais, no entanto Dallagnol *et al.* (2011) afirmaram que esse método pode superestimar ou subestimar os estoques de carbono em função da variabilidade do teor de carbono da biomassa, que pode variar de 39 a 51%, Watzlawick *et al.* (2003) afirmaram que essa variabilidade pode ocorrer em função da idade da biomassa, condição de manejo, desbastes, desrama e densidade de indivíduos por hectare.

A metodologia indireta fornece a aproximação do estoque de carbono acumulado, mas segundo Oshio (2010) esse método não atende exigências de projetos que envolvam o mercado de carbono no âmbito do MDL, face às exigências desse mercado. Para reduzir os erros de estimativa de carbono capturado e viabilizar projetos, é recomendado a utilização do método direto.

O método direto de quantificação dos estoques de carbono consiste na obtenção da amostragem destrutiva a partir da derrubada e pesagem das árvores amostrais. O volume total de madeira do fuste, muitas vezes, dificultam e inviabilizam a pesagem e secagem de todo esse material, para contornar tal problema, Soares *et al.* (1996) demonstraram por meio da Equação 4 o cálculo para obtenção

da biomassa seca do fuste e na Equação 5 a biomassa seca dos galhos, folhas, casca e raízes.

$$BSF = V \times DBM \quad (4)$$

em que:

BSF = biomassa seca do fuste das árvores (kg);

V = volume rigoroso do fuste sem casca das árvores (m³);

DBM = densidade básica da madeira do fuste das árvores (kg m⁻³).

$$BS = Pu(a) \times Ps(b) / Pu(c) \quad (5)$$

em que:

BS = biomassa total (kg);

Pu(a) = massa úmida total no campo (kg);

Ps(b) = massa seca da amostra (kg);

Pu(c) = massa úmida da amostra (kg).

Para o cálculo final da quantidade de carbono presente em cada componente arbóreo, amostras são fracionadas e encaminhadas ao laboratório para obtenção do teor de carbono, os quais podem ser obtidos a partir de análises químicas e/ou físicas; a análise química elementar é a mais utilizada e geralmente utiliza-se o equipamento analisador elementar para obtenção do teor de carbono.

Além dos métodos diretos e indiretos para mensurar o carbono da biomassa existem alguns outros não tradicionais, em estudo para comparar todos os métodos, Qureshi *et al.* (2012) analisaram cinco metodologias, i) método direto; ii) indireto com modelagem de processos fisiológicos das plantas; iii) indireto com modelos desenvolvidos por técnicas de sensoriamento remoto; iv) medidas de fluxo de carbono pela técnica de *Eddy Covariance*: consiste no fluxo de CO₂ entre a atmosfera e a superfície das plantas, é medido pela covariância entre a flutuação da velocidade do vento e a proporção de CO₂, segundo Baldocchi (2003) a velocidade de flutuação do vento, bem como, a concentração de CO₂ são medidas por meio de sensores posicionados em diferentes estratos da floresta; v)

Biomass Expansion Factor (BEF): são fatores de expansão do volume de madeira em biomassa.

Qureshi *et al.* (2012) afirmam que cada um dos métodos possui vantagens e desvantagens que variam de acordo com o objetivo proposto. O método indireto com modelagem de processos fisiológicos das plantas envolvem muitas variáveis nos modelos e conforme Monserud *et al.* (2003) são operacionalmente complexos e limitados a pequenas áreas, são dependentes da produtividade local e do crescimento da planta. O método com modelos desenvolvidos por técnicas de sensoriamento remoto possuem limitações por dependerem de fontes de dados confiáveis que são obtidos dos métodos diretos (DONG *et al.*, 2003). A técnica de *Eddy Covariance* possui limitação em sua aplicação, pois são aplicáveis somente em condições ambientais estáveis, por causa da sensibilidade dos sensores. A estimativa de carbono pelo método de *Biomass Expansion Factor* não utiliza de forma precisa todas as variações de biomassa e ocasiona baixa precisão. De todos os métodos, o direto, apresentou maiores vantagens, como simplicidade de operação, baixo custo e alta precisão. Na tabela 3 pode ser visualizado o resumo de cada método.

Tabela 3 - Resumo das características de diferentes métodos de quantificar o carbono da biomassa

Método	Operacional	Custo	Precisão	Escala Espacial	Eficiência (tempo)
Fisiológico	Complexo	Alto	Baixa	Limitada	Dispendioso
Sensores remotos	Simple	Alto	Baixa	Ampla	Eficiente
<i>Eddy Covariance</i>	Complexo	Alto	Baixa	Variável	Eficiente
Direto	Simple	Baixo	Alta	Variável	Dispendioso

<i>Biomass Expansion Factor</i>	Simplex	Baixo	Baixa	Ampla	Eficiente
---	---------	-------	-------	-------	-----------

Fonte: Adaptado de Qureshi *et al.* (2012).

5. DADOS RELATIVOS AO TEOR DE CARBONO EM IMPORTANTES ESPÉCIES LENHOSAS

As variações no teor de carbono na madeira de 102 clones em área de distribuição natural em *Larix kaempferi* (Japanese Larch) foram investigadas por Fukatsu *et al.* (2008), com teor de carbono médio variando de 50,5% no alburno, 50,94% no cerne e considerando o tronco como um todo o valor médio foi de 50,80% de carbono, com diferença significativa nesses teores entre os clones estudados. Para essa espécie, os mesmos autores afirmaram que os baixos coeficientes de variação da ordem de 0,43%, 0,42% e 0,41% no cerne, alburno e em todo tronco, respectivamente, entre os clones, pode resultar em pequena variação genética, resultando em pequeno ganho genético no teor de carbono, indicando que o melhoramento genético do teor de carbono por seleção tem um pequeno efeito sobre o melhoramento genético da capacidade de sequestro de carbono em *L. kaempferi*.

O teor de carbono na madeira tem sido considerado como sendo de aproximadamente 50% (massa/massa), independente das espécies, e esse valor tem sido utilizado para estimar o carbono armazenado na madeira e floresta. Recentes estudos, entretanto, indicaram que existe uma grande variação no teor de carbono entre as espécies. Elias e Potivin (2003) mediram o teor de carbono em madeira de folhosas tropicais e encontraram teores de carbono variando de 44,4% a 49,4%. Já Lamlom e Savidge (2003) analisaram o cerne de 19 espécies de coníferas e 22 de folhosas e relataram que as coníferas (44,21% - 55,20%) tiveram mais elevados teores de carbono que as folhosas (46,27% - 49,97%), com tais resultados sugerindo que as variações no teor de carbono entre as espécies devem ser levados em

consideração na avaliação precisa de sequestro de carbono em árvores e florestas.

Santos *et al.* (2012) estudaram as propriedades da madeira, bem como as estimativas de massa, carbono e energia de clones de *Eucalyptus* plantados em diferentes locais no Estado de Minas Gerais, Brasil. Foram utilizados três clones híbridos de *Eucalyptus urophylla*, provenientes de plantios comerciais de uma empresa florestal, nos municípios de Turmalina e Itacambira, MG. Foram selecionadas árvores com diâmetro médio representativo de cada povoamento. Foram colhidas quatro árvores, por clone e local, totalizando 24 amostras. Os clones foram coletados em plantios comerciais com espaçamento de 3,0x3,0 m aos 6 anos de idade. Nesse estudo observou-se relação positiva entre incremento médio anual e acúmulo de massa de matéria seca de madeira, massa de carbono e energia. Os valores médios de teor de carbono e demais parâmetros avaliados nesse estudo estão na tabela 4.

Tabela 4 - Valores médios do teor de carbono na madeira, em %, e das estimativas de massa de matéria-seca de madeira, massa de carbono e energia dos diferentes clones estudados, desenvolvidos em Turmalina e Itacambira, MG

Clones	Turmalina	Itacambira
Carbono (%)		
1	45,81bA	48,59aA
2	47,53aA	45,99aA
3	47,06aA	47,01aA
Massa seca de madeira (t/ha/ano)		
1	23,28aA	16,5bB
2	19,49aC	20,18aA
3	21,40aB	15,27bB
Carbono (%)		
1	10,66aA	8,02bB
2	9,27aB	9,29aA

3	10,07aB	7,18bB
Energia disponível (k W.h/ha/ano)		
1	122428,60aA	84971,36bB
2	100980,57aB	103169,31aA
3	110302,95aB	79953,66bB

Nota: Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha ou pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Santos *et al.*, 2012.

De modo geral, quanto ao percentual de carbono, não há grandes diferenças em relação ao teor de carbono na madeira de diferentes espécies do gênero *Eucalyptus* (ARANTES, 2009; SANTOS *et al.*, 2011), variando de 40 a 50%. Deve ser ressaltado que os teores de carbono, assim como de outros elementos da madeira, podem ser influenciados pelo tipo de solo e pela adubação. Os valores encontrados por Santos *et al.* (2012) e constantes na tabela 3 variam entre 45,81% e 48,59%.

A baixa variação do teor de carbono da madeira entre diferentes clones de *E. urophylla* e *E. grandis* aos 54 meses foi verificada por Couto (2011), o material de estudo foi proveniente da cidade de Martinho Campos, Minas Gerais, Brasil. O maior e menor valor do *E. urophylla* foi 50,27 e 49,13% respectivamente e para o *E. grandis* foi de 50,30 e 49,46% (Tabela 5).

Tabela 5 - Teor de carbono da madeira de diferentes clones de *E. urophylla* e *E. grandis* aos 54 meses de idade

Clones de <i>E. urophylla</i>	Carbono (%)	Clones de <i>E. grandis</i>	Carbono (%)
1	48,13	1	49,81
2	49,45	2	49,23
3	48,95	3	49,17

4	47,99	4	49,49
5	49,41	5	48,85
6	49,82	6	49,38
7	48,42	7	50,30
8	47,65	8	49,72
9	49,34	9	49,69
10	49,88	10	48,94
11	49,31	-	-
12	50,27	-	-
13	49,45	-	-
14	49,22	-	-
15	49,68	-	-
Média	49,13	Média	49,46

A diferença no teor de carbono na madeira de coníferas e folhosas é significativa. O alto teor de carbono em madeira de conífera (*Pinus taeda*) quando comparado com madeiras de folhosas (*E. grandis* x *E. urophylla* e *Acácia mearnsii*) pode ser visualizado na tabela 6, vale destacar a diferença do teor de carbono da madeira entre as espécies na idade de 5 anos, em que o *Pinus taeda* apresentou 5,28% de carbono a mais que o *E. grandis* x *E. urophylla* e 9,90% que a *Acácia mearnsii*, essa superioridade do teor de carbono na conífera está relacionada diretamente com seus maiores valores do teor de lignina e extrativos. Na tabela 5 ainda pode ser observado pouca influência da idade no teor de carbono na madeira, sendo que na espécie de *Acácia mearnsii* a variação foi de 0,57%, *E. grandis* x *E. urophylla* de 0,21% e 2,4% para o *Pinus taeda*.

Tabela 6 - Teor de carbono da madeira de *Acácia mearnsii*, *E. grandis* x *E. urophylla* e *Pinus taeda* em diferentes idades

Espécie	Idade (ano)	Carbono (%)	Local de plantio	Fonte
<i>Acácia mearnsii</i>	1	44,27	Municípios de Cristal e Piratini, Rio Grande do Sul, Brasil	Sanquetta <i>et al.</i> (2014)
	3	44,34		
	5	44,10		
	7	43,77		
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	3	48,72	Município Bom Sucesso, Minas Gerais, Brasil	Santana <i>et al.</i> (2012)
	4	48,74		
	5	48,72		
	6	48,65		
	7	48,73		
<i>Pinus taeda</i>	5	54,00	Rio Negrinho, Santa Catarina, Brasil	Sette JR. <i>et al.</i> (2005)
	12	55,60		
	14	55,50		
	18	56,40		
	25	55,30		
	26	54,60		

Estudando a madeira de eucalipto, Soares *et al.* (2014) encontraram correlação positiva entre a densidade básica e a relação carbono/hidrogênio (C/H) e negativa com os teores de cinza, nitrogênio, oxigênio, enxofre e relação siringil/guaiacil (S/G). Nesse estudo foi utilizada madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* em três idades distintas (3, 5 e 7 anos), provenientes de plantio comercial localizado no Estado de São Paulo, Brasil. Os teores de carbono encontrados por esses autores foram de 43,97% para idade de 3 anos e densidade básica igual a 0,37 gcm⁻³, 44,49% para madeira de 5 anos e densidade básica igual a 0,44 gcm⁻³ e finalmente teor carbono de 45,6% para a idade de 7 anos e densidade básica igual 0,54 gcm⁻³.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A madeira é sem nenhuma dúvida um dos mais fascinantes e principalmente um dos poucos materiais ecologicamente corretos utilizados pelo homem nas mais distintas aplicações. Por outro lado, é um material mais complexo em termos de constituição química e propriedades tecnológicas, uma vez que por ser proveniente de um ser vivo que é a árvore, está sujeita tanto às variações genéticas, como também aos efeitos do ambiente.

Quimicamente é constituída por aproximadamente 50% de carbono, elemento esse que, covalentemente ligados uns aos outros elementos para formar as microfibrilas de celulosas, é o responsável pelas excepcionais propriedades mecânicas alcançadas pelas mais distintas espécies de madeiras. Esse mesmo carbono, constituindo as paredes dos diferentes tipos celulares, nas milhares de espécies lenhosas das florestas terrestre, um dia, já esteve livre na atmosfera na forma de gás carbônico emitida como produto das atividades antrópicas e que tanto nos preocupa nos dias atuais. Portanto, graças às florestas, o carbono atmosférico é capturado e principalmente permanece aprisionado durante todo um ciclo de vida das árvores e ainda permanece inalterado durante a utilização dos inúmeros produtos de madeira.

Nas últimas décadas tem aumentado a preocupação, sobretudo dos países desenvolvidos, com as alterações climáticas provocadas pelo excesso de gases do efeito estufa na atmosfera, e que vem causando um enorme desequilíbrio nos regimes pluviométricos e temperaturas de diversas regiões do planeta e conseqüentemente afetando a produção agrícola e a sobrevivência de boa parte da população mundial. Nesse contexto, as florestas e sobretudo a utilização de seus produtos, através de sistemas florestas manejados, são de extrema importância para manter o equilíbrio das concentrações de gás carbônico na atmosfera, via captura e armazenamento de carbono por longos períodos.

No campo da energia o termo biomassa, representando a matéria seca lenhosa no caso da madeira, vem a cada dia ganhando mais importância como fonte não mais alternativa, mas definitiva e verdadeiramente correta sob o aspecto ecológico, em que o carbono constituindo metade desse material poderá ser energeticamente utilizado de forma indefinida, renovável e sobretudo inesgotável. As práticas de manejo atualmente disponíveis, permitem rotações curtas e uma constante captura e re-uso do carbono atmosférico na produção de energia limpa e a custos competitivos, principalmente levando em consideração os danos irreparáveis que muitas fontes energéticas têm causado ao planeta.

O Brasil, além de possuir um significativo estoque de carbono em seus milhões de hectares de florestas nativas, representando por volta da metade de seu território, possui ainda considerável área de florestas plantadas, mas ainda ínfima em relação ao espaço territorial ocupado e em relação à área de florestas nativa. No Brasil, tais plantações propiciam excepcionais oportunidades de captura e armazenamento de carbono atmosférico, uma vez que graças aos seus elevados índices solarimétricos e demais condições ambientais possibilitam índices de produtividade jamais alcançados em outras regiões do planeta.

Para que o carbono da madeira possa ser utilizado eficientemente, tanto para produção de energia renovável, como na forma de inúmeros produtos úteis no nosso dia a dia, existe a necessidade ainda de muito conhecimento, oriundos de trabalhos de pesquisas, já sendo realizados em todo mundo. A eficiência do aproveitamento da madeira na geração de uma economia verde, refletida por baixas emissões de carbono, manutenção do equilíbrio dos níveis de carbono atmosférico, através de captura e armazenamento de carbono, somente poderá ser alcançada com a união de esforços de pesquisadores multidisciplinares, envolvendo importantes áreas da química da madeira, do manejo florestal, da silvicultura entre outras.

Com as buscas de métodos para mitigação dos gases do efeito estufa a captura de carbono das madeiras tem despertado o interesse

mundial como uma alternativa, em consequência, estudos têm sido realizados para quantificar o carbono dessa biomassa, em que os principais métodos que se destacam são os diretos e indiretos, sendo que no direto realiza-se por meios destrutivos das árvores para sua quantificação do carbono, e o indireto é por estimativa do carbono acumulado através de regressões obtidas pelos dados do inventário florestal.

Em estudos realizados para verificar o teor de carbono na madeira, foi encontrado para a madeira de eucalipto o valor médio de 49%, havendo baixa variação desse valor entre espécies desse gênero. Quando se analisa o teor de carbono na madeira de diferentes espécies já se pode encontrar maior variação, como no caso do *Pinus taeda*, que possui valor médio de 55,5%. Então, essa diferença de carbono presente nas mais diversas espécies das florestas globais desperta o interesse e importância em estudar cada indivíduo para o cálculo mais preciso do teor de carbono presente na madeira.

Tais estudos deverão levar em consideração, o melhoramento de espécies no que diz respeito a produtividade e sobretudo a otimização dos teores de carbono das espécies, que apesar de aparentemente apresentar pequena variação, pode sim ser representativo quando tais materiais são utilizados em larga escala. Pesquisas relativas às operações de manejo, são imprescindíveis na otimização e na viabilidade econômica de florestas de ciclos curtos para o suprimento de matéria-prima lenhosa aos mais diferentes segmentos industriais.

Em última análise, o carbono que constitui por volta da metade da massa seca da madeira, é aquele mesmo elemento que constitui os hidrocarbonetos energéticos, derivados do petróleo e também aquele principal componente da dieta alimentar de praticamente todos os seres vivos existentes no nosso planeta e também está constituindo a composição química de muitos outros importantes produtos utilizados pela humanidade ao longo dos anos. Portanto propriedades como biodegradável, renovável e sobretudo constituída em sua

grande parte de carbono, credenciam a madeira a ser a grande protagonista de uma economia verde verdadeiramente limpa e de baixo impacto ambiental.

REFERÊNCIAS

ALAN, A.; KILPELAINEN, A.; KELLOMAKI, S. Potential energy wood production with implications to timber recovery and carbon stocks under varying thinning and climate scenarios in Finland. **Bioenergy Research**, v. 3, p 363-372, 2010.

ARANTES, M. D. **Variação nas características da madeira e do carvão vegetal de um híbrido de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake**. 158 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras. Lavras/MG: [s.d.].

ASPINWALL, M. J.; MCKEAND, S. E.; SKING, J. Carbon sequestration from 40 years of planting genetically improved loblolly pine across the southeast United States. **Forest Science**, v. 58, n. 5, p. 446-456, 2012.

BALDOCCHI, D. D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. **Global Change Biology**, v. 9, p. 479-492, 2003.

BERGMAN, R.; PUETTMANN, M.; TAYLOR, A.; SKOG, K. E. The carbon impacts of wood products. **Forest Products Journal**, v. 64, n. 7-8, p. 220-231, 2014.

BHATTACHARYA, S. C.; SALAM, P. A. Low greenhouse gas biomass option for cooking in the developing countries. **Biomass Bioenergy**, v. 22, p; 305-317, 2002.

BONAN, G. B. Forest and climate: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. **Science**, n. 320, p. 1444-1449, 2008.

BOWYWER, J.; BRATKOVICH, S.; LINDBERG, A.; FERNHOLZ, K. **Wood products and carbon protocols**: carbon storage and low energy intensity should be considered. p. 13. Minneapolis, MN: Dovetail Partners, 2008.

BRAWNER, J.; LEE, D.; MEDER, R. Carbon capture and productivity of plantation forests in north-eastern Australia. *In: **Proceedings***, IUFRO Conference Division, v. 5, n. 8-13, p. 123. Lisbon, Portugal: jul. 2012.

CARRANO, A. L.; THORN, B. K.; WELTAG, H. Characterizing the carbon footprint of wood pallet logistics. **Forest Products Journal**, v. 64, n. 7-8, p. 232-241, 2014.

COLODETTE, J. L.; GOMES, G. M.; GOMES, F. J. B. The Brazilian Forest industry: focusing on eucalypt. *In: **Proceedings***, IUFRO conference division, v. 5, n. 8-13, p. 51-56. Lisboa, Portugal: july 2012.

COUTO, A. M. **Modelagem da densidade básica e caracterização química em clones de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis***. p. 72. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG: 2011.

DALLAGNOL, F. S.; MOGNON, F.; SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. Teores de carbono de cinco espécies florestais e seus compartimentos. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 4, p. 410-416, 2011.

DENMAN, K. L. *et al.* Couplings between changes in the climate systems and biogeochemistry. *In: SOLOMON, S. D. et al. (eds.) **Climate change 2007**: the physical science basis. Contribution of Working*

Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. p. 500-587. Cambridge, U.K: Cambridge University Press, 2007.

DERWISCH, S.; SCHWENDENMANN, L.; OLSCHIEWSKI, R.; HOLSCHER, D. Estimation and economic evaluation of above ground carbon storage of *Tectona grandis* plantation in eastern Maine. **New Forest**, v. 37, p. 227-240, 2009.

DIXON, R. K.; BROWN, S.; HOUGHTON, R. A.; SOLOMON, A. M.; TREXELER, M. C.; WISNIEWSKI, J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. **Science**, n. 263, p. 185-190, 1994.

DONG, J.; *et al.* Remote sensing estimates of boreal and temperate forest woody biomass: carbon pools, sources, and sinks. **Remote Sensing of Environment**, n. 84, p. 393-410, 2003.

ELIAS, M.; POTVIN, C. Assessing inter- and intra-specific variation in trunk carbon concentration for 32 neotropical trees species. **Canadian Journal Forest Research**, n. 33; p. 1039-1045, 2003.

FANG, J.; CHEN, A.; PENG, C.; ZHAO, S. C. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. **Science**, v. 292; n. 5525, p. 2320-2322, 2001.

FAO. Global forest resource assessment. **Forestry Paper**, n. 163, p. 346, 2010.

FOELKEL, C. E. **Qualidade da madeira**: teoria. Belo Oriente: s. ed., 1977.

GOETZ, R. U.; HRITONENKO, N.; MUR, R. J.; XABADIA, A.; YATSENKO, Y. Forest management and carbon sequestration in

size-structured forest: the case of *Pinus sylvestris* in Spain. **Forest Science**, v. 56, n. 3, p. 242-256, 2013.

GORGENS, E. B.; OLIVEIRA, M. L.; LEITE, H. G.; BRUM NETO, M. S. Metodologia para monitoramento do estoque de carbono: revisão e estudo de caso. **Biomassa & Energia**, v. 2, n. 2, p. 169-175, 2005.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. Wood handbook: wood as an engineering material. **General Technical Report FPL-GTR-190**. Department of Agricultural, Forest Service, Forest Products Laboratory. p. 508. Madison/WI, U.S: 2010.

FUKATSU, E.; FUKUDA, Y.; TAKAHASHI, M.; NAKADA, R. Clonal variation of carbon content in wood of *Larix kaempferi* (Japanese Larch). **Journal of Wood Science**, n. 54, p. 247-251, 2008.

HARMON, M. E.; MORENO, A.; DOMINGO, J. B. Effects of partial harvest on the carbon stores in Douglas-fir/western hemlock forests: a simulation study. **Ecosystems**, n. 12, p. 777-779, 2009.

HODGANAN, T.; MUNGER, J.; Managing afforestation and reforestation project for carbon sequestration for land managers and policy makers. In: TYRRELL, M. L.; ASHTON, M. S.; SPALDING, D.; GENTRY, B (eds.). **Forest and Carbon: A Synthesis of Science, Management, and Policy for Carbon Sequestration in Forests**. p. 313-346, 2009.

LAMLON, S. H.; SAVIDGE, R. A. A reassessment of carbon content in wood: variation within and between 41 North American species. **Biomass Bioenergy**, v. 25, p. 381-388, 2003.

JAEGER, F.; VERVOORT, E. Forest and climate: how do harvest wood products help? *In: Proceedings*, IUFRO Conference Division 5, n. 8-13, p. 269-270. Lisbon, Portugal: jul. 2012.

KELTY, M. The role of species mixtures in plantations forestry. **Forest Ecology Management**, n. 233, p. 195-204, 2006.

KEYSE, T. L.; ZARNOCH, S. J. Thinning, age, and site quality influence live tree carbon stocks in upland hardwood forests of the southern Appalachians. **Forest Science**, v. 58, n. 5, p. 407-418, 2012.

LIPPKE, B.; *et al.* Comparing life-cycle carbon and energy impacts for biofuel, wood product, and forest management alternatives. **Forest Products Journal**, v. 62, n. 4, p. 247-257, 2012.

MIAH, M. D.; KOIKE, M.; SHIN, M. Y.; AKTHER, S. Forest biomass and bioenergy production and the role of CDM in Bangladesh. **New Forests**, n. 42, p. 63-84, 2011.

MONTAGNINI, F.; PORRAS, C. Evaluating the role of plantation as carbon sink: an example of an integrative approach from the humid tropics. **Environment Management**, v. 22, n. 3, p. 459-470, 1998.

MONSERUD, R. A. Evaluating forest models in a sustainable forest management context. *Forest Biometry. Modeling and Information Science*, v. 1, n. 35-47, 2003.

MU, W.; BEN, H.; RAYAUSKAR, A.; DENG, Y. Lignin pyrolysis components and upgrading-technology review. **Bioenergy Research**, n. 6, p. 1183-1204, 2013.

Nabuurs, G.B. *et al.* Forestry. *In: METZ, B.; DAVIDSON, O. R.; BOSCH, P. R.; DAVE, R.; MYERS, L. A. (eds.). Climate Change*

2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. p. 541-584. Cambridge, U.K: Cambridge University Press, 2007.

NEGRA, C.; SWEEDO, C.; CAVENDER-BARES, K.; O MALLEY, R. Indicators of carbon storage in U.S. ecosystems: baseline for terrestrial carbon accounting. **Journal of Environmental Quality**, n. 37, p. 1376-1382, 2008.

OLIVEIRA, E.B.; NAKAJIMA, N.Y.; CHANG, M.; HALIOK, M. Determinação da quantidade de madeira, carbono e renda da plantação florestal. **EMBRAPA Florestas**, n. 220, p. 37, 2011.

OPUNI-FRIMPONG, E.; OPOKU, S. M.; STORRER, A. J.; YEBOAH, B. D. Productivity, pest tolerance and carbon sequestration of *Khaya grandifoliola* in tree dry semi-deciduous forest of Ghana: a comparison in pure stands and mixed stands. **New Forests**, n. 44, p. 863-879, 2013.

OSHIRO, C. G. **Processo de medição de carbono de biomassa arbórea nãoagressivo ao ecossistema – estudo de caso: *Mimosa scabrella* Bentham**. p. 81. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba/PR: [s.d.].

QURESHI, A.; PARIVA.; BADOLA, R.; HUSSAIN, S. A. A review of protocols used for assessment of carbon stock in forested landscapes. **Environmental Science & Police**, n. 16, p. 81-89, 2012.

REDONDO-BRENES, A.; MONTAGNINI, F. Growth, productivity, above ground biomass, and carbon sequestration of pure and mixed native tree plantations in the Caribbean Lowlands of Costa Rica. **Forest Ecology Management**, v. 232, n. 1-3, p.168-178, 2012.

ROJAS-BRIALES, E. Global and European challenges of forests moving towards green economies. *In: Proceedings*, IUFRO conference division 5, n. 8-13, p. 19-23. Lisbon, Portugal: jul. 2012.

RUUSKA, A.; HAKKINEN, T.; HAAPIO, A.; PINTO-SEPPÄ, I. The role of wooden construction products in the mitigation of climate change: finish case studies. *In: Proceedings*, IUFRO conference division 5, n. 8-13, p. 125. Lisbon, Portugal: jul. 2012.

RYAN, M. G. *et al.* A synthesis of science on forests and carbon for the US forests. **Issue Ecology**, n. 13, p. 1-16, 2010.

Sanquetta, C.R. *et al.* Estoques de biomassa e carbono em povoa-mentos de acácia negra em diferentes idades no Rio Grande do Sul. **Scientia Florestalis**, v. 42, n. 103, p. 361-370, 2014.

SANTANA, W. M.; CALEGARIO, N.; ARANTES, M. D.; TRUGILHO, P. F. Effect of age and diameter class on the properties of wood from clonal *Eucalyptus*. **Revista Cerne**, v. 18, n. 1, p. 1-18, 2012.

SANTOS, L. C.; CARVALHO, A. M.; PEREIRA, L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C.; TRUGILHO, P. F. Propriedades da madeira e estimativa de massa, carbono e energia de clones de *Eucalyptus* plantados em diferentes locais. **Revista Árvore**, v. 36, n. 5, p. 971-980, [s.d.].

SANTOS, R. C. *et al.* Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Florestalis**, v. 39, n. 90, p. 221-230, 2011.

SEDJO, R.; TIAN, X. Does wood bioenergy increase carbon stocks in forests? **Journal of Forestry**, v. 110, n. 6, p. 304-311, 2012.

SETTE JR, C. R.; NAKAJIMA, N. Y.; GEROMINI, M. P. Captura de carbono orgânico em povoamentos de *Pinus taeda* L. na região de Rio Negrinho, SC. **Floresta**, v. 36, n. 1, p. 1-12, 2005.

SIMS, R. E. **Bioenergy options for a cleaner environment**: in developed and developing countries. Oxford, UK: Elsevier Ltd., 2003.

SKOG, K. E. Sequestration of carbon in harvested wood products for the United States. **Forest Products Journal**, v. 58, n. 6, p. 56-72, 2008.

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J.; HOEFLER, J. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 38, n. 3, p. 543-549, 2004.

SOARES, C. P.; OLIVEIRA, M. L. Equações para estimar a quantidade de carbono na parte aérea de árvores de eucalipto em Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, v. 26, n. 5, p. 533-539, 2002.

SOARES, C. P.; PAULA NETO, F.; SOUZA, A. L.; LEITE, H. G. Modelos para estimar a biomassa da parte aérea em um povoamento de *Eucalyptus grandis* na região de Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, v. 20, n. 2, p. 179-189, 1996.

STAVINS, R. The cost of carbon sequestration: a revealed preference approach. **American Economic Review**, v. 89, n. 4, p. 994-1009, 1999.

WATZLAWICK, L. F.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E. Carbono orgânico em povoamentos de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze no sul do Estado do Paraná, Brasil. **Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais**, v. 1, n. 2, p. 63-68, 2003.

CAPÍTULO 9

*Sequestro de carbono
em floresta: reflexões
metodológicas em contexto
de floresta tropical*

Domingos Manuel Mendes Lopes

Teresa Raquel Duque Enes

Leónia do Carmo Santos Nunes

José Luís Penetra Cerveira Lousada

RELEVÂNCIA DOS ESTUDOS DE SEQUESTRO DE CARBONO

As florestas são responsáveis por 40% da superfície terrestre, representando 90% da biomassa terrestre e 70% da produtividade total.

Os ecossistemas florestais têm 1146 Pg de *stock* de carbono, o que corresponde a cerca de 76% de todo o carbono na biosfera terrestre, pelo que desempenham um papel crucial na regulação do balanço do carbono regional e global (WANG *et al.*, 2013). Dada a relevância das florestas na dinâmica de sequestro de carbono, elas adquirem um papel extremamente relevante para o qual os Engenheiros Florestais e demais técnicos do ambiente têm de dirigir a sua atenção.

O funcionamento e serviços prestados pelos ecossistemas, a produção de matéria-prima industrial (por exemplo, madeira), bem como a capacidade de sequestro de carbono das florestas dependem de produtividade primária das árvores (SANTOS *et al.*, 2002).

O fluxo de carbono entre a atmosfera e a vegetação terrestre pode ser expressa numa base anual em termos de produtividade primária líquida (GOETZ, PRINCE, 1996) dado que a produtividade primária líquida estima a quantidade de carbono atmosférico fixado pelas plantas e acumulado como biomassa. Dessa forma, a alocação de carbono pela produtividade primária líquida nas florestas é um tópico importante para futuras pesquisas, pois as alterações climáticas globais estão intimamente ligadas com esse equilíbrio (GOWER *et al.*, 1996; NADELHOFFER, RAICH, 1992).

Os desafios actuais tornam-se particularmente difíceis devido às áreas extensas de floresta, complexidade de monitorização eficiente e quantificação de dinâmicas de carbono. Estudos que identifiquem metodologias capazes de avaliar dinâmicas de sequestro de carbono tornam-se, por isso, muito relevantes.

Neste capítulo são definidas variáveis que traduzem a capacidade de sequestro de carbono por parte das florestas que são analisadas e comparadas diferentes metodologias, com o intuito de identificar vantagens e desvantagens metodológicas a diferentes contextos de aplicação. Em última análise pretende-se reforçar a importância que os ecossistemas florestais têm no sequestro de carbono, em especial num país com uma dimensão e uma capacidade produtiva que o colocam na linha da frente mundial, como é o Brasil.

CONCEITOS TEÓRICOS ASSOCIADOS AO SEQUESTRO DO CARBONO: O CONCEITO DE PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA LÍQUIDA

A Produtividade Primária Líquida anual (PPL) representa o valor líquido de carbono capturado pelas plantas através da fotossíntese, em cada ano (MELILLO *et al.*, 1993; CAO, WOODWARD, 1998). Assim, a PPL expressa os fluxos líquidos de carbono entre a atmosfera e vegetação terrestre através da fotossíntese, num determinado período de tempo (GOETZ, PRINCE, 1996). Na prática, a PPL pode ser definida e medida em termos de biomassa ou em termos de trocas de CO₂ (FIELD *et al.*, 1995), isto é, alicerçadas em quantificação de biomassa ou em conceitos de ecofisiologia.

Em termos de dinâmica da biomassa, a PPL pode ainda ser definida como (a) o sequestro de carbono ou (b) o incremento de biomassa absoluta. As duas abordagens estão relacionadas entre si com (a) sendo aproximadamente equivalente à metade de (b), isto é, cerca de 50% de biomassa seca é carbono. Cao e Woodward (1998) definem PPL como:

$$\text{PPL} = \text{CF} + \text{CT} + \text{CR} \quad (\text{Eq. 1})$$

onde CF, CT e CR representam, respetivamente, o carbono sequestrado pela folhada, tronco e raízes.

Em termos de biomassa total, Waring *et al.* (1998) definem PPL como:

$$\text{PPL} = \Delta\text{B} + \text{perdas} \quad (\text{Eq. 2})$$

onde, ΔB quantifica a diferença da biomassa da planta, num determinado intervalo de tempo (por norma, um ano) e as perdas representam os resíduos produzidos durante esse intervalo (por exemplo, folhas e ramos mortos).

Quando se refere a PPL numa abordagem de trocas gasosas, isto é, assente numa componente exclusiva de ecofisiologia da árvore, Field *et al.* (1995) e Waring *et al.* (1998) definem PPL como:

$$\text{PPL} = \text{PPB} + \text{Ra} \quad (\text{Eq. 3})$$

onde PPB representa a produção primária bruta, e Ra é a respiração autotrófica ou a combinação de crescimento suporte e a respiração de manutenção.

Numa abordagem mais simplista, e porque os estudos têm mostrado que a PPL está linearmente relacionada com a radiação anual fotossintética ativa, absorvida (APAR), Law e Waring (1994) e Paruelo *et al.* (1997) propuseram uma outra expressão para estimar PPL como:

$$NPP = \epsilon \cdot APAR \quad (\text{Eq. 4})$$

onde ϵ é a eficiência da conversão de energia. Prince (1991) sugeriu que os modificadores ambientais que atuam sobre um ϵ ótimo deve ser adicionado ao modelo, de modo a contabilizar os efeitos do ambiente que estão relacionados com a eficiência com que a radiação absorvida é utilizada (Equação 5).

$$NPP = [IPAR \cdot f(T) \cdot f(S) \cdot f(DPV)] \cdot \epsilon \quad (\text{Eq. 5})$$

onde os limites ambientais para a produção são temperaturas de congelamento (T), secas (S) e *déficit* de pressão de vapor elevada (DPV).

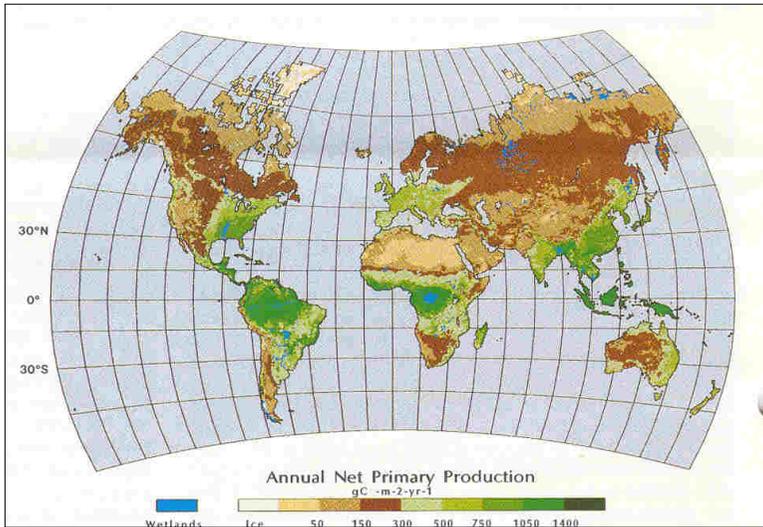
Field *et al.* (1995) afirmam que, embora conceitualmente simples, as estimativas de campo de PPL podem ser muito difíceis de medir com precisão. As avaliações baseadas em biomassa devem quantificar os processos que decorrem ao nível do solo, incluindo a produção de raízes e exsudação. As avaliações assentes em trocas gasosas são problemáticas devido à dificuldade em medir tanto a PPB como a Ra. Portanto, torna-se difícil obter estimativas de campo da PPL para grandes áreas, com base exclusivamente em abordagens tradicionais. Por conseguinte, os investigadores contam com modelos para estimar a PPL que variam em complexidade, desde modelos de correlação simples até à construção de complexos modelos ecofisiológicos que tentam descrever os processos fisiológicos das árvores (GOETZ, 1997), como o FOREST-BGC (RUNNING, COUGHLAN, 1988).

A PPL é uma variável ecológica extremamente importante devido à sua relevância para a gestão dos ecossistemas. É uma variável

necessária a uma eficiente monitorização do impacto da atividade humana sobre os ecossistemas nas diferentes escalas espaciais: local, regional e global (MELILLO *et al.*, 1993). Trata-se de uma das variáveis ecológicas mais completas e complexas, uma vez que reflete o crescimento de todo o ecossistema, evitando assim, a análise de apenas uma parte dos seus componentes. Tradicionalmente, e até em um passado recente, onde a visão produtivista da floresta prevalecia em relação a uma visão mais integradora e ecológica, os técnicos de inventário florestal apenas focavam no estrato arbóreo, devido à sua importância econômica, enquanto os ecologistas se concentravam principalmente nos estratos inferiores, devido à sua relevância ecológica. Ao unir essas duas abordagens, a PPL fornece uma visão completa do ecossistema incluindo as informações do estrato arbóreo, mas também dos arbustos e de todas as perdas produzidas a partir de cada estrato. Este potencial holístico da PPL justifica o seu papel como uma das variáveis-chave escolhidas para analisar o impacto das alterações climáticas, ou qualquer outra intervenção humana ou causas naturais nos ecossistemas.

Nos estudos desenvolvidos à grande escala, Melillo *et al.* (1993) apresentaram algumas estimativas globais da PPL (Figura 1). A título de exemplo, a PPL estimada para a Europa varia entre 300 e 750 g C m⁻² ano⁻¹. Segundo os autores, mais de metade da PPL global anual ocorre nos trópicos, entre as latitudes de 22,5° S e 22,5° N, principalmente ocupada por floresta tropical. As tipologias de vegetação menos produtivas incluem o deserto polar, a tundra, e o deserto, que coletivamente respondem por 3% da PPL terrestre e cobrem 16,7% da massa terrestre.

Figura 1 - Estimativa da PPL anual para toda a biosfera terrestre



Fonte: Melillo *et al.* (1993).

Os valores de PPL apresentam grande variação entre diferentes ecossistemas florestais e nas diferentes regiões do mundo (Tabela 1). A Produtividade Primária Líquida aérea (PPLa) apresenta valores muito heterogêneos, passando de 0,33 em povoamentos de *Pinus* sp., até 0,90 em povoamentos de *Populus* sp. A importância da Produtividade Primária Líquida do solo (PPLs) é indicativo da importância da biomassa das raízes e também varia muito de espécie para espécie, e mesmo dentro da mesma espécie, de povoamento para povoamento, de acordo com as condições ambientais (ver povoamentos de *Fagus* sp. e *Picea* sp.). A relação entre a Produtividade Primária Bruta (PPB) e a PPL indica o papel desempenhado pela respiração em termos de fotossíntese e tem um valor médio na ordem do 0,49. No entanto, Waring *et al.* (1998) avançou um número arredondado global de 0,45 para essa razão e Sands (2001), um valor de 0,47 apenas para *Eucalyptus* sp.

Tabela 1 - Produtividade Primária Líquida aérea (PPLa), Produtividade Primária Líquida do Solo (PPLs), Produtividade Primária Líquida (PPL) e Produtividade Produção Bruta (PPB) para diferentes ecossistemas

Espécie	PPLa	PPLs	PPL	PPB	Unidades	$\frac{PPLa}{PPL}$	$\frac{PPL}{PPB}$	Referências Bibliográficas
<i>Pinus ponderosa</i>	136		413		g C m ⁻² ano ⁻¹	0.33		Law <i>et al.</i> (2000)
<i>Picea abies</i>	1300	1550	2850		g C m ⁻² ano ⁻¹	0.46		Gower <i>et al.</i> (1997)
<i>Picea glauca</i>	2600	1100	3700		g C m ⁻² ano ⁻¹	0.70		Gower <i>et al.</i> (1997)
<i>Pinus banksiana</i>	1210	1050	2260		g C m ⁻² ano ⁻¹	0.54		Gower <i>et al.</i> (1997)
<i>Pinus sylvestris</i>	1450	1150	2600		g C m ⁻² ano ⁻¹	0.56		Gower <i>et al.</i> (1997)
<i>Betula pubescens</i>	1100	400	1500		g C m ⁻² ano ⁻¹	0.73		Gower <i>et al.</i> (1997)
<i>Populus tremuloides</i>	3520	400	3920		g C m ⁻² ano ⁻¹	0.90		Gower <i>et al.</i> (1997)
<i>Picea mariana</i>	113±17				g m ⁻² ano ⁻¹			Bonan (1991)
<i>Picea glauca</i>	366±17				g m ⁻² ano ⁻¹			Bonan (1991)
<i>Populus</i>	565±17				g m ⁻² ano ⁻¹			Bonan (1991)
<i>Betula</i>	470±17				g m ⁻² ano ⁻¹			Bonan (1991)
<i>Populus balsamifera</i>	552±17				g m ⁻² ano ⁻¹			Bonan (1991)
<i>Pinus radiata</i>	559	511	1110	2415	g C m ⁻² ano ⁻¹	0.50	0.46	Waring <i>et al.</i> (1998)
<i>Q. rubra</i> + <i>A. rubrum</i>	457	202	659	1246	g C m ⁻² ano ⁻¹	0.69	0.53	Waring <i>et al.</i> (1998)
<i>Picea</i> + <i>Tsuga</i>	525	156	681	1399	g C m ⁻² ano ⁻¹	0.77	0.49	Waring <i>et al.</i> (1998)
<i>Fagus</i> /Itália	8.7		13.5		ton ha ⁻¹ ano ⁻¹	0.64		Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> (2000)
<i>Fagus</i> /França	7.0		9.0		ton ha ⁻¹ ano ⁻¹	0.78		Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> (2000)
<i>Fagus</i> /Alemanha	7.7		10.8		ton ha ⁻¹ ano ⁻¹	0.71		Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> (2000)
<i>Fagus</i> /República Checa.	12.5		16.6		ton ha ⁻¹ ano ⁻¹	0.75		Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> (2000)
<i>Fagus</i> /Dinamarca	8.9		12.3		ton ha ⁻¹ ano ⁻¹	0.72		Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> (2000)

<i>Picea</i> /Itália	10.9		16.7	ton ha ⁻¹ ano ⁻¹	0.65		Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> (2000)
<i>Picea</i> /França	7.4		8.8	ton ha ⁻¹ ano ⁻¹	0.84		Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> (2000)
<i>Picea</i> /Alemanha	10.3		13.9	ton ha ⁻¹ ano ⁻¹	0.74		Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> (2000)
<i>Picea</i> /República Checa	9.9		13.0	ton ha ⁻¹ ano ⁻¹	0.76		Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> (2000)
<i>Picea</i> /Dinamarca	11.5		16.7	ton ha ⁻¹ ano ⁻¹	0.69		Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> (2000)
<i>Picea</i> /Suécia	11.6		18.8	ton ha ⁻¹ ano ⁻¹	0.62		Scarascia-Mugnozza <i>et al.</i> (2000)

Fontes: Bonan (1991), Gower *et al.* (1997), Waring *et al.* (1998), Law *et al.* (2000), Scarascia-Mugnozza *et al.* (2000).

METODOLOGIAS PARA A QUANTIFICAÇÃO DO SEQUESTRO DO CARBONO

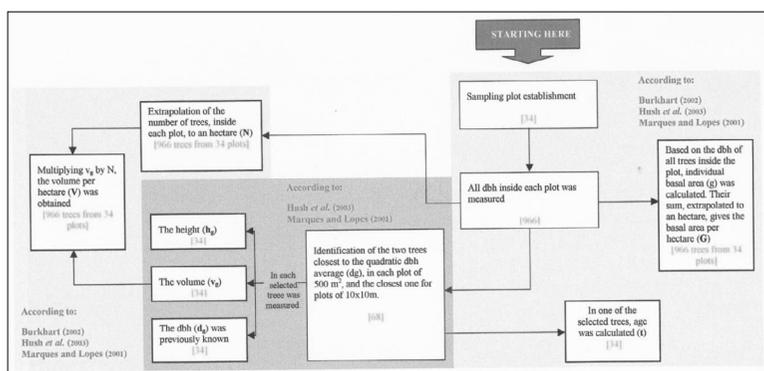
Abordagem alométrica

A possibilidade de utilizar equações alométricas para quantificar dinâmicas de biomassa, logo o sequestro de carbono, foi já abordado na definição da PPL (Capítulo 2). A grande dificuldade reside na obtenção de equações de biomassa total da árvore ou por componentes. Num contexto de floresta tropical essa dificuldade pode ser acrescida pelo fato de existir uma enorme biodiversidade na floresta.

Em seguida descreve-se a metodologia para obtenção de equações de biomassa tendo por base um estudo de caso desenvolvido num povoamento de monocultura em Portugal (*Pinus pinaster* Aiton) (LOPES, 2005). Essa metodologia (Figura 2) pode facilmente ser replicada para biomas existentes no Brasil, embora com dificuldades acrescidas devido à diversidade de espécies existentes, dado que cada espécie requer equações específicas. As parcelas de amostragem instaladas eram circulares com uma área de 500 m². As medições dendrométricas básicas, nomeadamente diâmetros e alturas,

foram recolhidas e registadas. O diâmetro à altura do peito (DAP) de todas as árvores foi medido em duas ocasiões, usando uma suta de braços. Nesse caso em concreto, as medições ocorreram em 1997 e 2001. Após essa etapa, é possível determinar o diâmetro médio quadrático (d_g) e identificar as duas árvores com DAP mais próximo ao d_g para outras medições. Numa das árvores médias foi recolhida uma verrumada para permitir determinar a idade média.

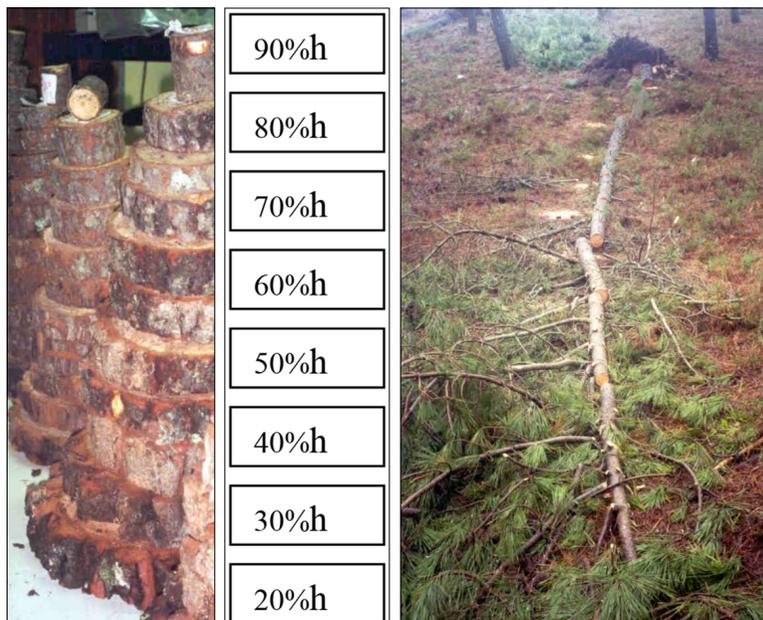
Figura 2 - Resumo da metodologia seguida nas medições dendrométricas



Dado que para esse estudo específico (LOPES, 2005) não existiam equações de biomassa para *Pinus pinaster*, houve a necessidade de recolher informação e de se proceder ao ajustamento de equações por componentes de biomassa da árvore. Em seguida apresenta-se uma descrição sumária o procedimento com o objetivo de reforçar a dificuldade e trabalho envolvidos nesse processo, onde trinta árvores foram destrutivamente amostradas. As árvores foram cortadas perto da superfície do solo e a altura total da árvore foi medida. Os ramos da base, o maior e um imediatamente abaixo do topo foram localizados e seus comprimentos medidos. Foram identificados os pontos onde um disco do tronco fosse removido: 10 a 15 cm a partir da base do solo (base), DAP e, em seguida, em intervalos de 10%, com início a 10% da altura total e fim a 90% da altura. A espessura da

casca e diâmetro foram medidos em cada ponto e um disco espesso foi removido a partir da base de cada secção de haste e preservadas num saco de plástico a ser pesado no laboratório. Caules remanescentes foram cortados em pequenas secções para facilitar a pesagem em balança com uma precisão de 0,5 kg ().

Figura 3 - Amostras do tronco



Todos os ramos mortos e vivos foram separados e pesados usando balanças com precisão de 1 kg (Figura 4). Dois ramos vivos a partir do meio da copa foram selecionados aleatoriamente para medições laboratoriais mais tarde.

O núcleo central de cada sistema radicular foi identificado, e sempre que possível as raízes foram cuidadosamente removidas do solo para que pudessem ser extraídas intactas para a pesagem. Isso provou ser um processo difícil e demorado.

Figura 4 - A raiz de uma árvore de *Pinus pinaster*



No laboratório, cada disco amostra foi pesado em balança eletrônica e o volume foi determinado utilizando o método de Arquimedes. Na prática, o volume foi obtido por imersão das fatias num balde de água, suspenso e sem tocar nos lados do balde, e o peso registrado pela variação do volume foi obtido para cada rodela. O volume coincide com o peso obtido e é dado em cm^3 . Foi então possível estimar a densidade verde.

As amostras foram depois mantidas numa estufa a 100°C durante 4 a 5 dias até que o peso fosse estabilizado. Naquele momento a madeira não continha humidade e cada fatia foi novamente pesada, a fim de determinar a densidade anidra das amostras.

Em cada ramo amostra, folhas, troncos e frutos foram separados para medir a contribuição relativa de cada componente para o peso total da árvore. Depois disso, alguns rebentos foram colhidos de cada subamostra para prosseguir com as medições de peso e volume, seguindo a mesma metodologia aplicada para as amostras do tronco de modo a determinar a densidade de cada componente,

após material seco. A metodologia também foi repetida para uma subamostra de cada raiz.

As equações pré-selecionadas para a estimativa da biomassa anidra (B) do tronco para *Pinus pinaster* foram:

$$\begin{aligned} B &= -128,264 + 1168,689 \text{ DAP} \\ R^2 &= 83,8\%; \\ R^2_{\text{adj}} &= 83,2\% \end{aligned} \quad (\text{Eq. 4.22})$$

$$\begin{aligned} B &= -36,775 + 53,359 [\text{DAP (h)}] \\ R^2 &= 96,0\%; \\ R^2_{\text{adj}} &= 95,9\% \end{aligned} \quad (\text{Eq. 4.23})$$

$$\begin{aligned} \text{Log}(B) &= 3,769 + 2,706 \log(\text{DAP}) \\ R^2 &= 98,6\%; \\ R^2_{\text{adj}} &= 97,9\% \end{aligned} \quad (\text{Eq. 4.24})$$

As equações pré-selecionadas para a estimativa da biomassa anidra da copa de *Pinus pinaster* foram:

$$\begin{aligned} B &= -44,192 + 307,597 \text{ DAP} \\ R^2 &= 71,2\%; \\ R^2_{\text{adj}} &= 70,1\% \end{aligned} \quad (\text{Eq. 6})$$

$$\begin{aligned} B &= -8,192 + 40,159 [\text{DAP (CW)}] \\ R^2 &= 88,2\%; \\ R^2_{\text{adj}} &= 87,7\% \end{aligned} \quad (\text{Eq. 7})$$

$$\begin{aligned} \text{Log}(B) &= 2,911 + 2,130 \log(\text{DAP}) \\ R^2 &= 76,5\%; \\ R^2_{\text{adj}} &= 75,6\% \end{aligned} \quad (\text{Eq. 8})$$

As equações pré-selecionadas para a estimativa da biomassa anidra da raiz de árvores individuais de *Pinus pinaster* foram:

$$B = -4,562 + 71,248 d_{\text{base}}$$

$$R^2=93,3\%;$$

$$R^2_{\text{adj}}=93,0\% \quad (\text{Eq. 9})$$

$$B = - 4,673 + 53,308 d_{\text{base}} + 0.399 h$$

$$R^2=95,6\%;$$

$$R^2_{\text{adj}}=95,3\% \quad (\text{Eq. 10})$$

$$\text{Log}(B) = 1,972 + 1,221 \log(\text{DAP})$$

$$R^2=93,7\%;$$

$$R^2_{\text{adj}}=93,5\% \quad (\text{Eq. 11})$$

D base; CW, h: onde Dbase representa o diâmetro da base da árvore, CW a largura da copa e h a altura da árvore

A folhada e biomassa aérea do sub-bosque

Os detritos acima do solo foram medidos usando uma tela de serapilheira de 40 x 60 cm colocada aleatoriamente dentro da parcela de amostragem, de acordo com a metodologia proposta por Gower *et al.* (1997). As telas foram instaladas em janeiro de 2001 e os detritos foram recolhidos nos meses de maio, julho, setembro e dezembro de 2001. As amostras provenientes dos detritos foram secas a 70° C durante 3 ou 4 dias. Após o processo de secagem o material vegetal foi novamente pesado para determinação da biomassa seca. Tendo estabelecido a relação entre a biomassa verde/biomassa seca a partir do peso de detritos recolhidos numa amostra de 40x60 cm, foi então possível calcular a quantidade total de matéria seca por hectare.

A biomassa aérea do estrato arbustivo foi medida seguindo a metodologia proposta por Gower *et al.* (1997). Parcelas de 1x1 m foram localizadas aleatoriamente dentro de cada parcela de amostragem de 500 m², em junho de 2002. Toda a vegetação acima do solo foi removida e armazenada num saco plástico e mantida num local fresco. A vegetação foi separada o mais rapidamente possível

e pesada. As amostras de cada espécie foram secas a 70° C por 3 ou 4 dias e após secas o material foi pesado para determinar a biomassa seca de cada espécie em cada parcela de amostragem. Com base no peso seco foi realizada a estimativa da vegetação na superfície do sub-bosque por hectare.

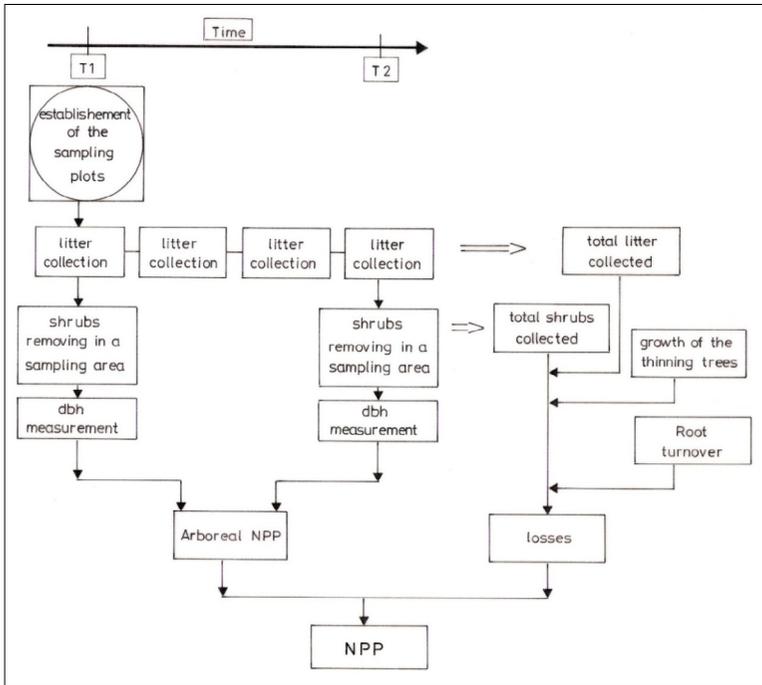
Metodologia utilizada para a medição da PPL

Como mencionado anteriormente, a PPL foi definida em termos de biomassa por Waring *et al.* (1998) como: $PPL = \Delta B + \text{Perdas}$; ou seja, as perdas foram quantificadas por recolha e quantificação de todas as perdas encontradas dentro da sub-área de 40 x 60 cm, ao longo de um ano. Os acréscimos de biomassa (ΔB) foram determinados através da equação 12.

$$\Delta B = \frac{B_{\text{final}} - B_{\text{inicial}}}{\text{período de tempo entre as medições}} \quad (\text{Eq. 12})$$

A figura 5 apresenta a metodologia utilizada para a estimativa da PPL tendo por base equações de biomassa ajustadas.

Figura 5 - Metodologia para estimativa da PPL numa abordagem alométrica



Modelos ecofisiológicos

O funcionamento e serviços prestados pelos ecossistemas, a produção de matéria-prima industrial (por exemplo, madeira), bem como a capacidade de sequestro de carbono das florestas dependem de produtividade primária das árvores (SANTOS *et al.*, 2002).

O fluxo líquido de carbono entre a atmosfera e a vegetação terrestre pode ser expressa numa base anual em termos de produtividade primária líquida (GOETZ, PRINCE, 1996). Assim, a produtividade primária líquida estima a quantidade de carbono atmosférico fixado pelas plantas e acumulado como biomassa. Dessa forma, a alocação de carbono para a produtividade primária líquida nas florestas é um tópico importante para futuras pesquisas, pois as alterações climáticas

globais estão intimamente ligadas com esse equilíbrio (GOWER *et al.*, 1996; NADELHOFFER, RAICH, 1992).

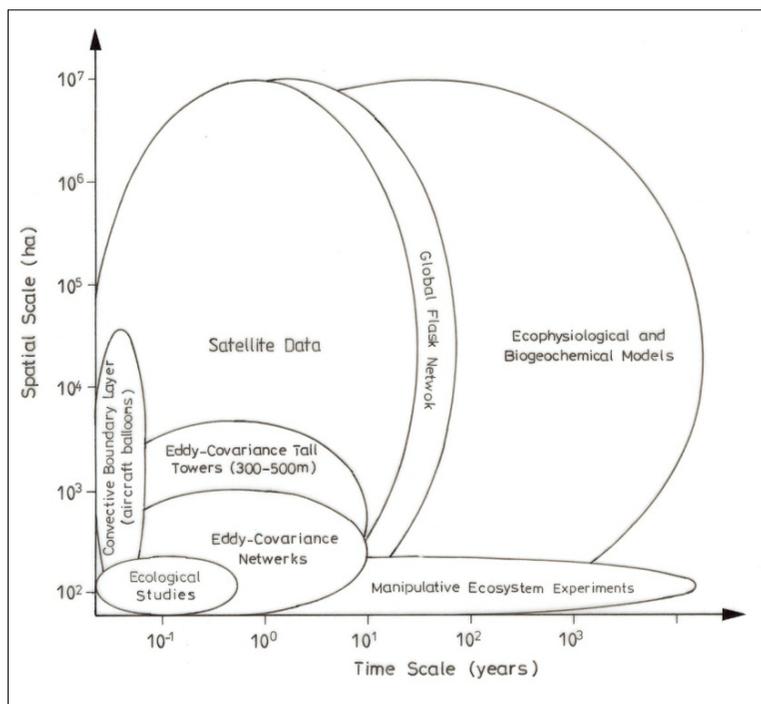
Como referido no ponto anterior, os métodos comuns para estimar a produtividade primária implicam amostragens repetidas de biomassa para obter informações sobre o acréscimo de biomassa (medições do acréscimo de diâmetro e altura), produção de folhada e perdas de herbivoria de povoamentos florestais. Essa avaliação implica o abate de um número adequado de árvores amostra que seja representativa das condições médias de crescimento das árvores no povoamento em estudo ou dentro das classes de diâmetro de árvores que compõem o povoamento (SCARASCIA-MUGNOZZA *et al.*, 2000). Esses métodos requerem muito trabalho de campo, recorrem ao processo destrutivo, são muito demorados com custos elevados devido às grandes quantidades e dimensões de biomassa que é necessário processar para obter resultados, especialmente quando a variação dentro e entre as parcelas é alta, o que os torna inadequados para pesquisas ecológicas globais (CLARK *et al.*, 2001; GOWER *et al.*, 2001; LANDSBERG, GOWER, 1997; NATH *et al.*, 2009; RANDERSON *et al.*, 2002).

Outra opção para avaliar a produtividade na gestão florestal e os impactos da gestão no desenvolvimento da floresta ao longo do tempo é através de modelos de simulação biogeoquímica.

Uma variedade de métodos tem sido utilizada para estimar a PPL, em diferentes escalas temporais e espaciais, conforme resumido na figura 6. As estimativas para grandes áreas têm variado desde simples modelos de correlação até modelos ecofisiológicos complexos que tentam simular e descrever as transferências de energia entre vegetação-atmosfera (GOETZ, 1997). Esses modelos diferem acen-tuadamente na abordagem, complexidade, precisão, exatidão e custo. Alguns calculam a PPL apenas como uma função do clima; outros levam em conta os solos e a disponibilidade de nutrientes; outros ainda calculam a PPL baseada em grande parte sobre a intercessão da radiação solar pela vegetação (FIELD *et al.*, 1995). Normalmente,

esses modelos operam em medições pontuais pelo que têm de ser extrapoladas espacialmente. No entanto, a dificuldade e o erro associado a essas abordagens pode ser grande devido à grande heterogeneidade da paisagem e à normalmente baixa densidade de amostragem (GOETZ *et al.*, 1999). Neste contexto, os modelos ecofisiológicos e biogeoquímicos podem constituir-se uma das únicas metodologias capazes de prever fenômenos por um longo período de tempo e numa grande escala espacial. As informações obtidas a partir de satélites estão estritamente ligadas com essas metodologias.

Figura 6 - Técnicas de monitorização disponíveis para diferentes escalas temporais e espaciais em que ocorrem os processos ecológicos



Fonte: IPCC (2000).

Esses modelos de base processual são ferramentas essenciais para avaliar a produtividade do ecossistema e para prever os efeitos das alterações climáticas (ÅGREN *et al.*, 1991; LANDSBERG, GOWER, 1997; Ryan *et al.*, 1996), assim como quantificar interações e respostas das florestas a diferentes fatores de clima e solo, além de estimar a produtividade regional e global (NORBY, LUO, 2004). Isso é particularmente importante em cenários de aumento do CO₂ atmosférico e alterações climáticas globais, dado que a PPL tem variações em grande escala e também pela necessidade da sua estimativa de forma sistemática e global (GOWER *et al.*, 1999; MELILLO *et al.*, 1993).

A capacidade de estimar a quantidade de CO₂ assimilado através da fotossíntese melhorou como resultado do desenvolvimento de técnicas experimentais e de modelação (RUNNING, HUNT, 1993; WARING *et al.*, 1998). Dessa forma, a aplicação desse tipo de ferramentas de apoio à tomada de decisão pode ajudar a escolher a melhor alternativa de gestão florestal. Os modelos têm grandes aproximações à realidade, mesmo que, inevitavelmente, haverá fatores ambientais que influenciam o crescimento em um local que não são incluídos como parte do sistema de previsão (LUCAS *et al.*, 2000). No entanto, os modelos são ferramentas importantes para compreender os processos dos ecossistemas florestais a escalas de espaço e tempo para além dos limites das medições diretas (RUNNING, 1994), e são ferramentas práticas que podem servir de apoio à decisão na gestão dos povoamentos florestais e na previsão de possíveis efeitos, nomeadamente os resultantes das ações de gestão (LANDSBERG, GOWER, 1997).

Os modelos de base processual têm sido desenvolvidos para estimar a capacidade produtiva local e utilizados para investigar os impactos da potencial mudança ambiental em sistemas florestais (RYAN *et al.*, 1996). Os primeiros modelos baseados em processos fisiológicos apareceram nos anos 80 (MCMURTIE *et al.*, 1990; MOHREN *et al.*, 1984; MÄKELA, HARI, 1986; RUNNING, COUGHLAN, 1988; VALENTINE, 1988). Modelos de base processual significam que esses são baseados no conhecimento dos processos fisiológicos que ocorrem

em plantas e de que forma esses processos são afetadas pelas condições ambientais em que as plantas estão crescendo. Modelos ecofisiológicos de base processual preveem o desenvolvimento da árvore e do povoamento em processos primários tais como a produção fotossintética, respiração ou alocação de carbono (MOHREN *et al.*, 1984; MÄKELA, HARI, 1986). Eles têm características físicas, químicas e relações ecofisiológicas e recorrem à estatística para preencher a lacuna no conhecimento, sempre que necessário.

Esses modelos preveem a produtividade primária com o objetivo de avaliar tanto a produtividade da floresta como balanços de carbono, ao nível da árvore individual (GROTE, PRETZSCH, 2002) ou ao nível do povoamento (LANDSBERG, 2003). Fornecem também informações sobre os ciclos do carbono, azoto e água, apoiando assim uma compreensão abrangente e gestão dos ecossistemas.

Landsberg e Waring (1997) consideram que, para responder às diversas questões sobre os efeitos das alterações climáticas, é necessária uma grande variedade de modelos, cada um com o seu domínio específico de aplicação. Existe uma grande variedade de modelos de simulação da produção florestal, que fornecem cenários para analisar os fatores que influenciam a produtividade no ecossistema (MCMURTRIE *et al.*, 1994). Esses modelos apresentam diferenças significativas na abordagem, complexidade, precisão, exatidão e custo. Diferem na escala temporal, nas ligações entre os ciclos de carbono, azoto e água, na fotossíntese e fixação de CO₂.

No atual contexto de instabilidade ambiental, esse tipo de ferramentas é necessário prever como os diferentes ecossistemas serão afetados no futuro. Os modelos de base processual são certamente um bom avanço para a compreensão e previsão da evolução da floresta.

Estudos para estimar a PPL nas florestas e quantificar o balanço de carbono têm sido realizados e metodologias para a quantificação do carbono sequestrado nos ecossistemas florestais tornaram-se especialmente importantes no contexto do Protocolo de Quioto (TOMÉ *et al.*, 2010). Países signatários são sujeitos a ter um sistema

nacional de estimativa das emissões antropogênicas de gases com efeito de estufa e remoções. A crescente consciência das alterações climáticas tem criado a necessidade de compreender os seus impactos sobre o ambiente, a produção dos ecossistemas e também os efeitos no balanço de carbono na floresta.

Um destes modelos ecofisiológicos é o Biome-BGC, um modelo utilizado amplamente para avaliar os processos dos ecossistemas florestais a diferentes escalas de aplicações (PIETSCH *et al.*, 2005; RUNNING, HUNT, 1993; THORNTON *et al.*, 2002). Esse modelo é utilizado para simular os ciclos do carbono, azoto e água em diferentes ecossistemas florestais (THORNTON *et al.*, 2002; WHITE *et al.*, 2000). O Biome-BGC é um modelo de base processual frequentemente utilizado para prever a produtividade dos ecossistemas florestais em relação às condições de clima e solo, assim como as alterações climáticas e do aumento do CO₂ atmosférico. Recentemente tem sido aplicado para simular o comportamento de florestas de várias partes do globo (CHIESI *et al.*, 2012; HAN *et al.*, 2014; NUNES *et al.*, 2015; WANG *et al.*, 2009).

Sensoriamento remoto

Como referido anteriormente, existem contextos em que a escala de análise, ou a necessidade de repetição das avaliações e estudo das dinâmicas de sequestro de carbono obrigam o recurso a meios de sensoriamento remoto. A possibilidade de obter estimativas para áreas muito amplas de forma rápida e expedita, tornam esse um meio fundamental quando, por exemplo, a área de trabalho é um estado ou um país da dimensão do Brasil.

Em seguida, serão analisadas algumas potencialidades para, de forma autônoma, ou em conjugação com outras metodologias, avaliar os sequestros de carbono em ecossistemas naturais, especialmente em áreas florestais.

O acoplamento dos modelos de produção ao sensoriamento remoto

As abordagens tradicionais de pesquisas ecológicas e fisiológicas estão para serem expandidas para escalas regionais e globais, adequadas a um país com a escala como a do Brasil. Os novos e importantes desafios (por exemplo, mudança no uso da terra, problemas de poluição, evolução demográfica e alterações climáticas) requerem investigação nessas escalas. Numa tentativa de lidar com tais dimensões de escala já estão sendo projetados modelos capazes de avaliar os padrões de características-chave dos ecossistemas (LAW, WARING, 2000). Tradicionalmente os dados necessários para *input* de modelos de menor escala são obtidos por medições *in-situ*, exigindo um intensivo trabalho de amostragem (LUCAS *et al.*, 2000). Nemani e Running (1989) reforçam que os avanços na tecnologia de sensoriamento remoto fornecem agora uma nova ferramenta para monitorizar a vegetação terrestre.

A ligação entre o sensoriamento remoto e a ecofisiologia não só proporciona um meio espacialmente explícitos de monitorar variações temporais na fotossíntese, mas também de fornecer informações sobre as condições de monitoramento e mudanças na vegetação, especialmente as variáveis ecológicas como o índice de área foliar, a absorção de luz, entre outros (GOETZ, PRÍNCE, 1996). Também tem sido mostrado que os dados de sensores remotos podem ser utilizados em quadros de modelação relativamente simples para estimar a PPL mundial de vegetação terrestre (GOETZ, PRINCE, 1996). Esses modelos empregam a relação entre as propriedades de reflexão e absorção da radiação fotossinteticamente ativa (APAR). O uso desses dados na modelação da PPL compensa algumas das limitações inerentes aos modelos ecofisiológicos (por exemplo, extensão espacial), mas traz um novo conjunto de limitações e incertezas (GOETZ, 1996). De acordo com Field *et al.* (1995), os modelos baseados em APAR são atraentes devido à sua ligação direta com dados de satélite,

mas o seu poder é limitado devido à dificuldade de converter um índice de vegetação por satélite numa estimativa da fração de radiação absorvida. Apesar de algumas limitações, os recentes avanços em metodologias de imagens e processamento (RUNNING, NEMANI, 1988; LUCAS *et al.*, 2000), a cobertura de satélite regular da vegetação global fornece um dos únicos meios práticos de fazer essas estimativas em escalas globais.

O programa MODIS

O Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) é o instrumento-chave da NASA para monitorizar as superfícies terrestre e oceânica, num contexto de alterações globais, e aprofundar a compreensão das complexas interações entre a atmosfera, oceanos, superfície terrestre e biosfera. O principal objetivo do MODIS é o de fornecer uma abrangente série de observações globais da Terra, dos oceanos e da atmosfera, nas regiões visível e infravermelho do espectro eletromagnético à escala global (GSFC, 2002).

O MODIS pretende complementar informação já disponibilizada, alargando assim o conjunto de dados recolhidos a partir de sensores de satélites anteriores, tais como:

- O National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) do Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), utilizado para meteorologia e controlo da temperatura da superfície do mar, o gelo do mar e da vegetação;
- LANDSAT, utilizado para monitorar as condições terrestres; e
- NOAA (HIRS), usado para observar as condições atmosféricas (NASA, 2004).

O Terra, o primeiro satélite EOS, foi lançado em 18 de dezembro de 1999, com cinco sensores remotos. A EOS mais abrangente é o Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) (LINDSEY, HERRING, 2003). A coleta de dados começou em março de 2000.

O conceito de design do MODIS

O instrumento MODIS fornece alta sensibilidade radiométrica (12 bits) em 36 bandas espectrais que variam num comprimento de onda entre 0,4 μm a 14,4 μm . Duas faixas são gravadas com uma resolução nominal de 250 m no nadir, com cinco bandas em 500 m, e os restantes 29 bandas em 1 km. Um padrão de varredura de 55 graus \pm na órbita de 705 km EOS atinge uma faixa de 2330 km e oferece uma cobertura global a cada um a dois dias. O sistema óptico é composto por um telescópio afocal de dois espelhos fora do eixo, que direciona a energia para quatro conjuntos de objetivas de refração; um para cada região do espectro dos VIS, NIR, SWIR / MWIR e LWIR.

Componentes

Terra MODIS e Aqua MODIS visualizam toda a superfície da Terra a cada 1 a 2 dias, com aquisição de dados em 36 bandas espectrais (NASA, 2004). O instrumento MODIS foi concluído em meados de 1995. O sistema de aterramento MODIS disponível comercialmente fornece dados MODIS em tempo real, além de um conjunto completo de recursos de análise de dados que permitem uma previsão precisa dos impactos das mudanças globais, e pode constituir uma ferramenta essencial para ajudar os decisores políticos na tomada de decisões.

Produtos de dados MODIS

Há 44 produtos padrão disponibilizados pelo projeto MODIS e acessíveis para *download* para que os utilizadores possam descarregar e utilizar nas suas investigações, numa vastíssima gama de áreas científicas, incluindo a oceanografia, biologia e ciência atmosférica. Dentre muitas das aplicações possíveis dos produtos MODIS, destacam-se a monitorização e gestão dos recursos naturais, classificação de usos e alterações de usos da superfície da terra, na detecção de incêndios,

no mapeamento de neve, em estudos relacionados com a saúde humana, na agricultura, entre muitos. Alguns dos produtos MODIS são apresentados no quadro 2. Esses são organizados de acordo com as linhas de investigação (atmosfera, terra, criosfera e massas oceânicas). Cada produto é identificado por um primeiro grupo de três letras, referindo-se ao projeto MODIS (MOD), seguido de um código de dois números (por exemplo, os produtos de PPL têm sempre uma designação MOD17).

Quadro 2 - Alguns dos produtos disponíveis MODIS

Linha de investigação	Produto MODIS
Atmosfera	MOD 04 - Aerossóis MOD 05 - Água precipitável total MOD 06 - Nuvens MOD 07 - Perfis atmosféricos MOD 08 - Grelha de Produtos atmosféricos MOD 35 - Máscara de nuvens
Terra	MOD 09 - da Superfície MOD 11 - Temperatura e Emissividade da Superfície da Terra MOD 12 - Uso do solo/Alterações do uso do solo MOD 13 - Índices de vegetação (Max NDVI e MVI) MOD 14 - Anomalias Termiais, Fogos e Biomassa Ardida MOD 15 - Índice de Área Foliar e FPAR MOD 16 - Evapotranspiração MOD 17 - Fotossíntese Líquida e Produtividade Primária MOD 43 - Refletância da Superfície MOD 44 - Conversão da Vegetação de Cobertura
Linha de investigação	Produto MODIS

Criosfera	MOD 10 - Cobertura de Neve
	MOD 29 - Cobertura de gelo nos oceanos
Oceano	MOD 19 - Concentração de Pigmentos
	MOD 20 - Fluorescência da Clorofila
	MOD 21 - Concentração da Clorofila a
	MOD 22 - Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR)
	MOD 23 - Concentração de Sólidos Suspensos
	MOD 24 - Concentração de Matéria Orgânica
	MOD 26 - Coeficiente de Atenuação de Água Oceânica
	MOD 27 - Produtividade Primária dos Oceanos
	MOD 28 - Temperatura da Superfície dos Oceanos
MOD 36 - Coeficiente de Absorção Total	

O programa MODIS disponibiliza imagens a uma periodicidade temporal regular, de estimativa global da produtividade primária bruta (PPB) e da produtividade primária líquida anual (PPLa), de toda a superfície terrestre, com uma resolução espacial de 1 km (RUNNING *et al.*, 2000; THORNTON *et al.*, 2002). Esses dados são salvos como arquivos formatados EOS HDF numa matriz bidimensional de 1200 colunas por 1200 linhas, e estão disponíveis gratuitamente para o público a partir do site do programa MODIS, ou de outros, como por exemplo do Numerical Terradynamic Simulation Group (ZHAO *et al.*, 2005). Como a georreferenciação das imagens MODIS, foi executada com o software MODIS Reprojection Tool (MRT), disponibilizado também pelo site do programa MODIS.

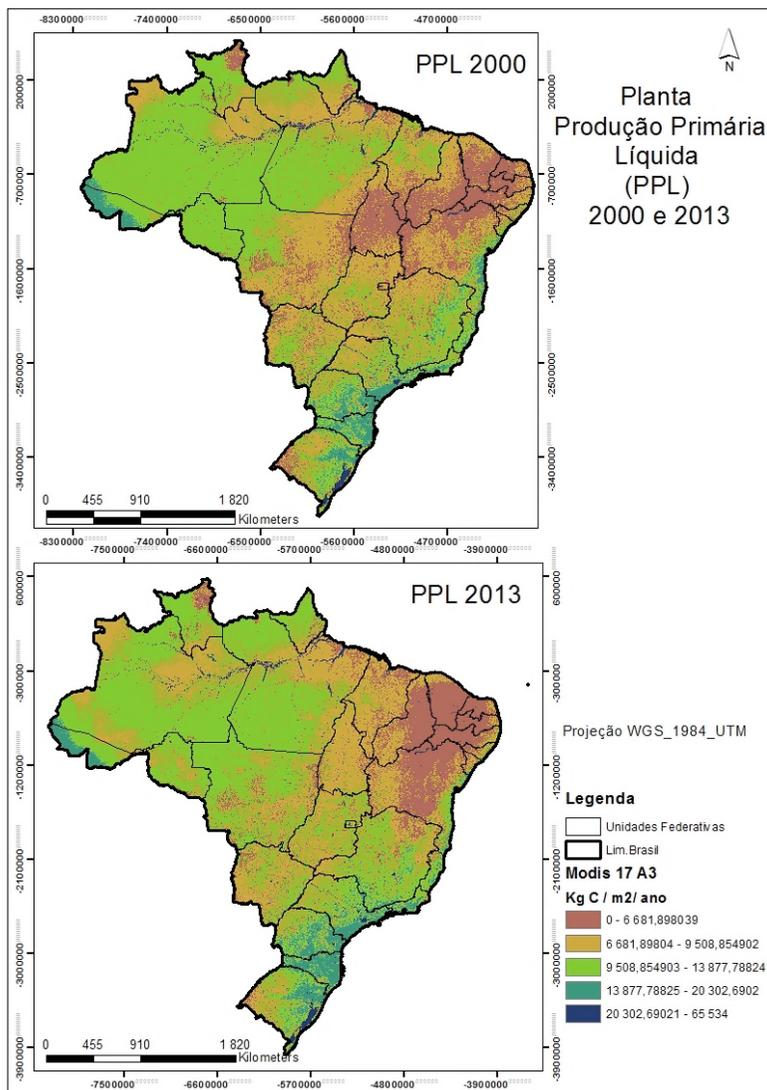
Devido à extensão territorial do Brasil, uma imagem apenas não é suficiente para a sua representação, sendo necessárias 17 imagens para cobrir todo o território. No sistema de coordenadas das imagens MODIS, os ficheiros hdf correspondentes à localização do Brasil são os seguintes:

h10v09, h10v9, h11v8, h11v9, h11v10, h12v8, h12v9, h12v10, h12v11, h13v8, h13v9, h13v10, h13v11, h13v12, h14v9, h14v10 e h14v17.

O MRT aqui representa uma ferramenta fundamental para agregar todas essas imagens e apresentar um único mosaico que represente todo o território brasileiro.

A figura 7 apresenta estimativas de sequestro de carbono para todo o Brasil para os anos de 2000 e 2013, a partir de imagens MODIS. É possível identificar as áreas mais e menos produtivas do país, mas além disso, ir monitorizando tendências de evolução que possam permitir às autoridades públicas definir políticas que promovam uma redução de degradação de ecossistemas e maximizem a produtividade desses ecossistemas. Esse tipo de informação, não é de fácil obtenção tendo em conta a dimensão da área, a dificuldade e morosidade de outras metodologias necessárias à obtenção desses valores. Neste contexto, parece-nos que essa fonte de informação pode ser extremamente válida para um conjunto vasto de situações.

Figura 7 - Produção Primária Líquida do Brasil, para os anos 2000 e 2013, a partir de imagens MODIS



CONSIDERAÇÕES FINAIS

São vários os métodos disponíveis para quantificar dinâmicas de sequestro de carbono, em ecossistemas naturais, em especial em floresta. Este capítulo aborda alguns dos métodos disponíveis, mas não se pretende considerar como o resultado de uma pesquisa exaustiva das metodologias. Contudo, abordam-se um conjunto vasto de metodologias diferentes em complexidade e aplicáveis a diferentes contextos de trabalho.

Sendo esse um dos temas mais pertinentes com que se debatem os gestores florestais, o capítulo pretende ser uma fonte de informação e de estímulo para a prossecução desse tipo de trabalho, que permita intensificar a quantificação de dinâmicas de sequestro de carbono, para um conhecimento mais aprofundado e sustentado sobre a importância da floresta, no contexto mundial.

REFERÊNCIAS

ÅGREN, G. I.; MCMURTRIE, R. E.; PARTON, W. J.; PASTOR, J.; SHUGART, H. H.; State-of-the-art of models of production-decomposition linkages in conifer and grassland ecosystems. **Ecol. Appl**, v. 2, p. 118-138, 1991.

BOND-LAMBERTY, B.; GOWER, S. T.; AHL, D. E.; THORNTON, P. E. Reimplementation of the Biome-BGC model to simulate successional change. **Tree Physiol.**, v. 25, p. 413-424, 2005.

CAO, M.; WOODWARD, F. I. Net primary and ecosystem production and carbon stocks of terrestrial ecosystems and their responses to climate change. **Global Change Biol**, v. 4, p. 185-198, 1998.

CHIESI, M. Use of BIOME-BGC to simulate water and carbon fluxes within Mediterranean macchia. **iForest**, v. 5, p. 38-43, 2012. DOI: 10.3832/ifor0605-009

CLARK, D. A.; BROWN, S.; KICKLIGHTER, D. W.; CHAMBERS, J. Q.; THORMLINSON, J. R.; NI, J. Measuring net primary production in forests: concepts and field methods. **Ecol. Appl.**, n. 11, p. 371-384, 2001.

FIELD, C. B.; RANDERSON, J. T.; MALMSTROM, C. M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. **Remote Sens. Environ.**, n. 51, p. 74-88, 1995.

GOETZ, S. J. Modelling carbon fluxes, net primary production, and light utilization. *In: Boreal Forest Stands*. Dissertation. com, p. 122, 1996.

GOETZ, S. J. Multi-sensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site. **Int. J. Remote Sens.**, v. 18, n. 1, p. 71-94, 1997.

GOETZ, S. J.; PRINCE, S. D. Remote sensing of net primary production in boreal forest stands. **Agric. For. Meteorol.**, n. 78, p. 149-179, 1996.

GOETZ, S. J.; PRINCE, S. D.; GOWARD, S. N.; THAWLEY, M. M.; SMALL, J.; JOHNSTON, A. Mapping net primary production and related biophysical variables with remote sensing: application to the BOREAS region. **J. Geophysical Res.**, v. 104 (D22), n. 27, p. 719-727, 1999.

GOWER, S. T.; KUCHARIK, C. J.; NORMAN, J. M. Direct and indirect estimation of leaf area index, FAPAR, and net primary

production of terrestrial ecosystems. **Remote Sens. Environ**, n. 70, p. 29-51, 1999.

GOWER, S. T.; KRANKINA, O.; OLSON, R. J.; APPS, M.; LINDER, S.; WANG, C. Net primary production and carbon allocation patterns of boreal forest ecosystems. **Ecol. Appl**, n. 11, p. 1395-1411, 2001.

GOWER, S. T.; PONGRACIC, S.; LANDSBERG, J. J. A global trend in belowground carbon allocation: Can we use the relationship at smaller scales? **Ecology**, n. 77, p. 1750-1755, 1996. DOI: doi.org/10.2307/2265780

GOWER, S. T.; VOGEL, J. G.; NORMAN, J. M.; KUCHARIK, C. J.; STEELE, S. J.; STOW, T. K. Carbon distribution and aboveground net primary production in aspen, jack pine and black spruce stands in Saskatchewan and Manitoba, Canada. **J. Geophysical Res**, v. 102 (D24), n. 29, p. 29-41, 1997.

GROTE, R.; PRETZSCH, H. A model for individual tree development based on physiological processes. **Plant Biology**, n. 4, p. 167-180, 2002.

GSFC. **MODIS**: moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, Goddard Space Flight Center, p. 21. NASA, USA: 2002.

HAN, Q.; LUO, G.; LI, C.; XU, W. Modeling the grazing effect on dry grassland carbon cycling with Biome-BGC model. **Ecol. Complexity**, n. 17, p. 149-157, 2014.

IPCC. Land use, land-use change, and forestry. **Intergovernmental Panel on Climate Change**, 377 p. Cambridge University Press, 2000.

LANDSBERG, J. J. Modelling forest ecosystems: state of the art, challenges, and future directions. **Can. J. For. Res.**, n. 33, p. 385-397, 2003.

LANDSBERG, J. J.; GOWER, S. T. Application of physiological ecology to forest management. **Physiol. Ecol. Ser. Academic Press**, p. 354. San Diego, CA: 1997.

LANDSBERG, J. J.; WARING, R. H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. **For. Ecol. Manage.** n. 95, p. 209-228, 1997.

LAW, E. B.; WARING, R. H. Combining remote sensing and climatic data to estimate net primary production across Oregon. **Ecol. Appl.**, v. 4 , n. 4, p. 717-728, 1994.

LAW, B. E.; WARING, R. H.; ANTHONI, P. M.; ABER, J. D. Measurements of gross and net ecosystem productivity and water vapour exchange of a *Pinus ponderosa* ecosystem, and an evaluation of two generalized models. **Global Change Biol.**, n. 6, p. 155-168, 2000.

LINDSEY, R.; HERRING, D. **MODIS**: moderate-resolution imaging spectroradiometer. p. 21, Goddard Space Flight Center, NASA, Greenbelt, Maryland: 2003.

LOPES, D. **Estimating Net Primary Production in *Eucalyptus globulus* and *Pinus pinaster* ecosystems in Portugal**. p. 291. Doctoral Thesis, Kingston University and Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro: 2005.

LUCAS, N. S.; CURRAN, P. J.; PLUMMER, S. E.; DANSON, F. M. Estimating the stem carbon production of a coniferous forest using

an ecosystem simulation model driven by the remotely sensed red edge. **Int. J. Remote Sens.**, v. 21, n. 4, p. 619-613, 2000.

MÄKELA, A.; HARI, P., Stand growth model based on carbon uptake and allocation in individual trees. **Ecol. Model.**, n. 33, p. 205-229, 1986.

MCMURTRIE, R. E. *et al.* Water/nutrient interactions affecting the productivity of stands of *Pinus radiata*. **For. Ecol. Manage.**, n. 30, p. 381-413, 1990.

MCMURTRIE, R. E.; GHOLZ, H. L.; LINDER, S.; GOWER, S. T. Climatic factors controlling the productivity of pine stands: a model-based analysis. **Ecol. Bulletins**, n. 43, p. 173-188, 1994.

MELILLO, J. M.; MCGUIRE, A. D.; KICKLIGHTER, D. W.; MOORE III, B.; VOROSMARTY, C. J.; SCHLOSS, A. L. Global climate change and terrestrial net primary production. **Nature**, n. 363, p. 234-240, 1993.

MOHREN, G.; VAN GERWEN, C.; SPITTERS, C. Simulation of primary production in even-aged stands of Douglas fir. **For. Ecol. Manage.**, n. 9, p. 27-49, 1984.

NADELHOFFER, K. J.; RAICH, J. W. Fine root production estimates and belowground carbon allocation in forest ecosystems. **Ecology**, n. 73, p. 1139-1147, 1992. DOI: doi.org/10.2307/1940664

NASA. **Landsat 7**. 2004a. <http://Landsat.gsfc.nasa.gov/>.

NATH, A. J.; DAS, G.; DAS, A. K. Above ground standing biomass and carbon storage in village bamboos in North East India. **Biomass Bioenerg**, n. 33, p. 1188-1196, 2009.

NEMANI, R. R.; RUNNING, S. W. Testing a theoretical climate-soil-leaf area hydrologic equilibrium of forests using satellite data and ecosystem simulation. **Agric. For. Meteorol.**, n. 44, p. 245-260, 1989.

NORBÝ, R. J.; LUO, Y. Evaluating ecosystem responses to rising atmospheric CO₂ and global warming in a multi-factor world. **New Phytol.**, n. 162, p. 281-293, 2004. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2004.01047.x

NUNES, L.; GOWER, S. T.; PECKHAM, S. D.; MAGALHÃES, M.; LOPES, D.; REGO, F. C. Estimation of productivity in pine and oak forests in the north of Portugal using Biome-BGC. **Forestry**, v. 88, n. 2, p. 200-212, 2015. DOI:10.1093/forestry/cpu044

PARUELO, J. M.; EPSTEIN, H. E.; LAUENROTH, W. K.; BURKE, I. C. ANPP estimates from NDVI for the central grassland region of the United States. **Ecological**, v. 78, n. 3, p. 953-958, 1997.

PIETSCH, S. A.; HASENAUER, H.; RHORNTON, P. E. BGC-model parameters for tree species growing in central European forests. **For. Ecol. Manage**, n. 211, p. 264-295, 2005.

PRINCE, S. D. Satellite remote sensing of primary production: comparison of results for Sahelian grasslands 1981-1988. **Int. J. Remote Sens.**, v. 12, n. 6, p. 1301-1311, 1991.

RANDERSON, J. T.; CHAPIN, F. S.; HARDEN, J. W.; NEFF, J. C.; HARMON, M. ENet ecosystem production: a comprehensive measure of net carbon accumulation by ecosystems. **Ecol. Appl.**, n. 12, p. 937-947, 2002.

RUNNING, S. W. Testing forest-BGC ecosystem process simulation across a climate gradient in Oregon. **Ecol. Appl.**, v. 4, n. 2, p. 238-247, 1994.

RUNNING, S. W.; COUGHLAN, J. C. A general model of forest ecosystem processes for regional applications. I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes. **Ecol. Model.**, v. 42, n. 2, p. 125-154, 1988.

RUNNING, S. W.; HUNT, E. R. Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME-BGC, and an application for global scale models. *In*: EHLERINGER, J. R.; FIELD, C. B. (eds.). **Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe**, p. 141-158. San Diego, USA: Academic Press, 1993.

RUNNING, S. W.; NEMANI, R. R. Relating seasonal patterns of the AVHRR vegetation index to simulated photosynthesis and transpiration of forests in different climates. **Remote Sens. Environ.**, n. 24, p. 347-367, 1988.

RUNNING, S. W.; THORNTON, P. E.; NEMANI, R. N.; GLASSY, J. M. Global terrestrial gross and net primary productivity from the Earth Observing System. *In*: SALA, O. E.; JACKSON, R. B.; MOONEY, H. A.; Howarth, R. W. (eds.) **Methods in Ecosystem Science**, Springer, p: 44-57, 2000.

RYAN, M. G. *et al.* Comparing models of ecosystem function for temperate conifer forest. I. Model description and validation. *In*: BREYMEYER, A.; HALL, D. O.; MELILLO, J. M.; Ågren, G. I. (eds.), **Global Change: Effects on Forests and Grasslands**, p. 313-362. John Wiley and Sons, 1996.

SANDS, P. 3PGpjs: a user-friendly interface to 3-PG, the Landsberg and Waring model of forest productivity. **Technical Report n° 140**, CRC Sustainable Production Forestry, p. 24, Austrália: Hobart, 2001.

SANTOS, F. D.; FORBES, K.; MOITA, R. (eds.). Climate change in Portugal. **Scenarios, Impacts and Adaptation Measures - SIAM Projects**. Grávida, Lisbon, Portugal: 2002.

SCARASCIA-MUGNOZZA, G.; BAUER, G. A.; PERSSON, H.; MATTEUCCI, G.; MASCI, A. Tree biomass, growth and nutrient pools. *In*: SCHULZE, E.-D. (eds.), Carbon and nitrogen cycling in European forest ecosystems. **Ecol. Stud.**, n. 142, p. 49-62. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2000.

THORNTON, P. E. *et al.* Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests. **Agric. For. Meteorol.**, n. 113, p. 185-222, 2002.

TOMÉ, M. *et al.* Long-term net primary production and carbon budget predictions for eucalyptus and maritime pine using the 3PG model. *In*: LOPES, D.; TOMÉ, M.; LIBERATO, M.; SOARES, P. (eds.), **IUFRO conference Mixed and Pure Forests in a Changing World**, p. abst 81. Vila Real, Portugal: 2010.

VALENTINE, H. T. A carbon-balance model of stand growth: a derivation employing pipe-model theory and the self-thinning rule. **Ann. Bot.**, n. 62, p. 389-396, 1988.

WANG, W. *et al.* of the effects of forest management strategies on carbon sequestration in evergreen broad-leaved (*Phoebe bournei*) plantation forests using FORECAST ecosystem model. **For. Ecol. Manage.**, n. 300, p. 21-32, 2013.

WANG, W. *et al.* A hierarchical analysis of terrestrial ecosystem model Biome-BGC: equilibrium analysis and model calibration. **Ecol. Mod.**, n. 220, p. 2009-2023, 2009.

WARING, R. H.; RUNNING, S. W. Forest ecosystems. **Academic Press**, p. 370, 1998.

WHITE, M. A.; THORNTON, P. E.; RUNNING, S. W.; NEMANI, R. R. Parameterization and sensitivity analysis of the Biome-BGC terrestrial ecosystem process model: net primary production controls. **Earth Interactions**, n. 4, p. 1-85, 2000. Disponível em: <http://www.ntsg.umd.edu/>

ZHAO, M.; HEINSCH, F. A.; NEMANI, R. N.; RUNNING, S. W. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. **Remote Sens. Environ.**, n. 95, p. 164-176, 2005.

Lista de autores

Ailton Teixeira do Vale

Engenheiro Florestal, Professor UNB. Email: ailton.vale@gmail.com

Amadeu Duarte da Silva Borges

Professor UTAD. Email: amadeub@utad.pt

Amaury Paulo de Souza

Engenheiro Florestal, Professor UFV. Email: amaury@ufv.br

Armindo Aires Afonso Martins

Engenheiro Agrônomo, Professor Aposentado UTAD. Email: amartins@utad.pt

Brunela Pollastrelli Rodrigues

Engenheira Florestal, Doutora em Ciências Florestais-UFES. Email: brunelapollastrelli@yahoo.com.br

Domingos Manuel Mendes Lopes

Engenheiro Florestal, Professor UTAD. Email: dlopes@utad.pt

Flávio Cipriano de Assis do Carmo

Engenheiro Florestal, Professor UFCG. Email: flavio.carmo@ufcg.edu.br

Gheila Corrêa Ferres Baptestini

Engenheira Agrícola e Ambiental. Email: gheilacf@yahoo.com.br

Jordão Cabral Moulin

Engenheiro Industrial Madeireiro, Professor, UFES. Email: jordao_cm@hotmail.com

José Carlos Carvalho

Engenheiro Florestal. Membro da Delegação brasileira junto à COP 21, da CQNUMC. Diretor Geral do IEF/MG, Secretário de Estado de Meio Ambiente de Minas Gerais e Ministro do Meio Ambiente. Email: jose.carlos.carvalho@terra.com.br

José Luís Penetra Cerveira Lousada

Engenheiro Florestal, Investigador, Professor UTAD. Email: jlousada@utad.pt

José Tarcísio da Silva Oliveira

Engenheiro Florestal, Professor UFES. Email: jose.t.oliveira@ufes.br

Júlio Cezar Machado Baptestini

Engenheiro Agrícola e Ambiental. Professor IFES-Alegre. Email: julio.baptestini@ifes.edu.br

Leónia do Carmo Santos Nunes

Engenheira Florestal, Professora Instituto Superior de Agronomia de Lisboa. Email: leonianunes@gmail.com

Luciano José Minette

Engenheiro Florestal. Professor UFV. Email: minette@ufv.br

Luiz Vicente Gentil

Engenheiro Agrônomo, Doutor em Ciências Florestais. Professor UnB. Email: lvgentil13@gmail.com

Marina Donaria Chaves Arantes

Engenheira Florestal. Professora UFSJ - Campus Sete Lagoas/MG. Email: mdonariac@ufsj.edu.br

Mauricio Paiva

Licenciatura em Ciências Agrícolas, Professor IFES. Email: paivamau@gmail.com

Nilton Cesar Fiedler

Engenheiro Florestal, Professor Titular UFES. Email: nilton.fiedler@ufes.br

Teresa Raquel Duque Enes

Engenheira Florestal. Professora UTAD. Email: tenes@utad.pt

