



BIOMASS-TO-CHEMICALS IN ENERGY TRANSITION SCENARIOS:
THE CASE OF BRAZIL

Camilla Chaves Nunes de Oliveira

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Planejamento Energético.

Orientador(es): Alexandre Salem Szklo

Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Rio de Janeiro
Outubro de 2020

BIOMASS-TO-CHEMICALS IN ENERGY TRANSITION SCENARIOS

Camilla Chaves Nunes de Oliveira

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

Orientadores: Alexandre Salem Szklo

Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Aprovada por: Prof. Alexandre Salem Szklo, D.Sc.

Prof. Pedro Rua Rodriguez Rochedo, D.Sc.

Prof^a. Joana Portugal Pereira, Ph.D.

Prof. Ernst Worrell, Ph.D.

Prof. Donato Aranda, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

OUTUBRO DE 2020

Oliveira, Camilla Chaves Nunes de Oliveira

Biomass-to-chemicals in energy transition scenarios:
The case of Brazil/ Camilla Chaves Nunes de Oliveira –
Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2020.

XVII, 148 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador (es): Alexandre Salem Szklo

Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de
Planejamento Energético, 2020.

Referências Bibliográficas: p. 111-129.

1. Bio-based chemicals. 2. Energy transition. 3.
Integrated assessment model. 4. Brazil. I. Szklo,
Alexandre Salem *et al.* II. Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético.
III. Título.

Para Henrique, Isadora e Olivia.

“Instruction does much, but encouragement everything.”
- J. W. von Goethe

“Above all, don’t fear difficult moments. The best comes from them.”
- Rita Levi-Montalcini

“Imagination is more important than knowledge. Knowledge is limited.”
- Albert Einstein

“If at first the idea is not absurd, then there is no hope for it.”
- Albert Einstein

“It's extraordinary how inventive one can be with ethanol right now.”
- Daniel Yergin

“Everything is hard before it is easy.”
- J. W. von Goethe

AGRADECIMENTOS

Esta tese não é apenas resultado do meu trabalho. Inúmeras pessoas estiveram envolvidas nesse processo árduo, porém prazeroso, de criação, inovação e conhecimento. Algumas delas colocaram a “mão na massa”, seja colaborando na modelagem e/ou na revisão do texto. Outras, me deram apoio emocional necessário para permanecer nessa aventura.

Começo os meus agradecimentos aos meus grandes mestres: Alexandre Szklo e Pedro Rochedo. Trabalhar com eles, durante sete anos, desde o mestrado, foi uma das experiências mais gratificadoras que tive em minha vida. Foram responsáveis pela minha formação intelectual, científica e profissional, contribuindo na construção dos meus valores éticos. Mesmo do outro lado do oceano, sempre os considerarei como meus eternos orientadores.

Ao meu professor Alexandre Szklo, meus sinceros e profundos agradecimentos, por ter delegado a mim, algumas de suas ideias brilhantes. Sou grata por todo o seu empenho, atenção, dedicação e carinho durante todo o meu processo acadêmico. Importa acrescentar que Alexandre Szklo é uma das pessoas mais inspiradoras que eu já pude conhecer. É uma enciclopédia ambulante que coleciona e compartilha conhecimentos profundos sobre os mais variados assuntos. E o mais importante: faz tudo com solidariedade, ética e humildade.

Ao professor Pedro Rochedo, dedico a minha gratidão pela orientação desde o mestrado, enquanto era ainda meu distinto colega do Cenergia. Agradeço pela sua paciência incomensurável, resolvendo problemas de modelagem em segundos, quando eu me sentia paralisada há semanas. Sou imensamente grata por todas as horas dedicadas a me explicar conceitos, sanar dúvidas, seja presentemente no Cenergia, por telefone ou por Skype, quando eu estava na Holanda ou, recentemente, durante a pandemia. Sentirei imensas saudades de todos esses momentos de dedicação, amizade e parceria.

Agradeço especialmente ao Professor Roberto Schaeffer pelas aulas deslumbrantes, por todas as oportunidades concedidas durante esses sete anos e, pelo seu apoio à minha decisão de fazer o doutorado sanduíche na Holanda.

Agradeço aos professores Donato Aranda e Joana Portugal por aceitarem participar da Banca Examinadora de Qualificação, o que muito contribuiu para o rumo certo deste

trabalho. Um especial agradecimento a Joana por me inspirar e, por estar no Brasil, colaborando (de forma inovadora) com o avanço das nossas pesquisas. Sou grata pela sua amizade e carinho.

Thanks to Professor Ernst Worrell for having hosted me for one year in the fascinating environment of Copernicus Institute of Sustainable Development at Utrecht University. I grew a lot during this period and I had the honor to see the value of my work in a society that encourages and invests in science. Thanks for all the meetings, for having co-authored the first paper of this thesis, and for having accepted to be part of my thesis defense's jury.

Agradeço a todos os funcionários e professores do PPE, em especial, pela atenção sempre constante às questões burocráticas e administrativas da nossa querida Sandrinha, Queila e Paulo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) que, ao me conceder bolsa de estudos no Brasil e no exterior, viabilizou economicamente minha dedicação aos meus estudos e pesquisa, oportunizando a minha estadia na Universidade de Utrecht e no estabelecimento de contatos com grupos de pesquisa na Holanda, quando pude escrever e publicar o primeiro *paper* desta tese.

Thanks to TNO and Rajat Bhardwaj for having given me the opportunity to work for 3 months in a distinguished research center in the Netherlands. Thank you for believing in me and for having co-authored the first paper of this thesis.

À Marianne Zotin, o meu muito obrigada! A conheci no meu último ano de doutorado, quando o Pedro Rochedo a sugeriu como coautora do segundo *paper* desta tese. A sua dedicação, curiosidade e proatividade fizeram com que a elaboração deste *paper* fosse um processo divertidíssimo! Acredito ser de suma importância trabalhar com profissionais que sabem o valor da troca e da criação coletiva. Trabalhar com Marianne foi engrandecedor como profissional e como pessoa, a quem trago, hoje, como uma grande amiga.

Agradeço a todos os meus colegas do Cenergia que traziam alegrias diárias à minha vida. O Cenergia é um laboratório que agrega pesquisadores brilhantes e pessoas fascinantes. Obrigada Esperanza, Bruno, Cindy, Eveline, Mari Império, Tainan, Bernardo, Rebeca,

Rebecca, Rafael, Bela, Eduardo, Camila, Amanda, Fran, Fabio Diuna, Fábio Silva, Camilo, Letícia, Matheus, Paula, Rodrigo, Clarissa. Talita, obrigada pelas conversas em momentos de desespero e, por ter sempre me encorajado a continuar na luta. Você é uma pessoa iluminada que quero sempre perto de mim. Gerd, meu muito obrigada por ter aceito o convite como coautor do terceiro *paper* desta tese. Sem sua expertise de BLUES, essa tese não estaria pronta! Obrigada por toda a sua dedicação e colaboração durante esse processo.

Agradeço a minha melhor amiga e irmã, Fernanda Guedes (minha Nanda), que estudou e trabalhou comigo por doze anos. Obrigada por essa parceria única, durante as diversas fases de nossas vidas. Sinto muitas saudades de “surtar” com você achando que nunca conseguiríamos fazer uma dissertação de mestrado; e, depois, que nunca conseguiríamos entregar nossos relatórios e nossas teses! Muitas alegrias e cumplicidade! Depois dessas realizações, fico feliz que continuaremos surtando juntas, em busca de novas conquistas e crescimento. Esses “surto” são os motores de nossa existência, e ter você em minha vida me dá coragem para continuar alcançando o que, antes, acharia inalcançável. Te amo!

À Isabela, Laura, Caia, Clara, Marília, Coral, Luana, Marina Calderon, Adriana, Rita, Silvia Portugal, Mayara, Babi Bravo, Ju, Mah Caarsi, Manu, Mah Casteja, Dani Gomel, obrigada pela amizade incondicional. Vocês são a família que eu escolhi. Agradeço por sempre estarem torcendo por mim, celebrando as minhas conquistas, e me dando ouvido e colo quando as coisas não iam bem. Que sorte eu tenho em ter grandes amigas! Minhas desculpas pelas ausências durante esses últimos anos quando estava debruçada, quase que inteiramente, em minha tese. Com a missão cumprida, saberão que estarei grudadinha em vocês.

Aos meus pais, Maria Alice e Paulinho, obrigada por terem trabalhado tanto para garantir que eu tivesse a melhor educação que uma pessoa privilegiada pode ter no Brasil. Obrigada por terem escolhido as melhores escolas para eu estudar, o que tornou possível o meu ingresso na UFRJ. Mais do que isso, obrigada por me incentivarem a sonhar e a acreditar que meu lugar é onde eu quiser, basta eu querer muito. Obrigada por me educarem! Estou muito satisfeita com a mulher que sou hoje. Obrigada por me ensinarem que conhecimento é a única coisa que ninguém pode nos tirar. Obrigada pelo apoio financeiro e emocional que me deram durante minha vida acadêmica. Amo vocês!

À minha família maravilhosa, agradeço pelo apoio constante que me dão firmeza para continuar meu caminho, com minhas escolhas. À minha querida e amada irmã Carolina, à Helena, Josefa, ao Bruno, Henrique, Isadora, Olivia, Outra, Bobs, Luiz Mauro, Luiza, Mauro, Tininha, Paulo e Creuza. Vocês são a minha base, o meu porto seguro. Eu só consigo fazer “loucuras” porque os tenho como pilar de força e admiração. Agradeço aos meus muito queridos e amados avós Maria Angélica, Paulo Expedito, Malila e José (*in memoriam*) por terem sido tão importantes na minha vida. À vovó Angélica e ao vovô Paulo, o meu imenso carinho e amor por vibrarem pelas minhas vitórias e me incentivarem a tentar de novo quando eu falhava.

Ich danke der Familie Meilinger, dass sie mich so herzlich empfangen hat. Ein besonderer Dank geht an Werner und Monika, die mich in ihrem schönen Holzhaus beherbergt und mir in meinem ersten Monat in Deutschland dabei geholfen haben, meinen Alltag zu organisieren. Ich weiß nicht, ob ich meine Doktorarbeit ohne ihre Unterstützung hätte schreiben können, während ich gleichzeitig eine neue Arbeitsstelle antrat.

Der Liebe meines Lebens, Valentin, möchte ich die folgenden Sätze widmen. Ich werde dir ewig dankbar sein, Tag und Nacht an meiner Seite zu sein und mich zu ermutigen, höhere Ziele zu erreichen. Und dies, mit deiner alltäglichen Liebe und Fürsorglichkeit. All das, was ich in den letzten zwei Jahren erreicht habe, war nur dank dir möglich. Unser Leben war verrückt und es ist beeindruckend, wie wir den Druck, die vielen Termine und Umzüge in drei verschiedenen Ländern innerhalb von zwei Jahren, den Start von vielen Projekten, neuen Leben und tausend anderen Herausforderungen bewältigt haben. Ich danke dir, dass du in den letzten Monaten bis spät in der Nacht stets an meiner Seite warst und mich in meiner Arbeit unterstützt hast. Danke, dass du meine Texte überarbeitet hast (Mein Gott habe ich mein Englisch mit dir verbessert!), dass du für uns gekocht hast, dich um das Haus und all die anderen Tätigkeiten in unserem Leben gekümmert hast, damit ich mich auf meine Dissertation konzentrieren konnte. Ich danke dem Universum, dass ich mein Leben mit dem besten Menschen auf Erden teile. Te amo!

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

BIOMASS-TO-CHEMICALS EM CENÁRIOS DE TRANSIÇÃO ENERGÉTICA:
O CASO DO BRASIL

Camilla Chaves Nunes de Oliveira

Outubro/2020

Orientadores: Alexandre Salem Szklo

Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Programa: Planejamento Energético

Esta tese visa contribuir para uma melhor representação da biomassa em Modelos de Avaliação Integrada, de forma a avaliar os usos não energéticos da biomassa na bioeconomia, associados aos seus usos energéticos. Para tanto, foram realizados três estudos com foco em petroquímicos básicos, nas necessidades materiais associadas à transição energética e na possível competição entre biomassa e derivados de petróleo. O primeiro estudo compara quatro rotas de produção de eteno de acordo com seu custo estimado de produção no Brasil. O segundo estudo aprofunda a análise sobre a relevância da disposição final e os benefícios da conversão de bioplásticos em material de longa vida. O terceiro estudo consolida os estudos anteriores e tem como objetivo avançar o entendimento do papel da biomassa em cenários de transição energética no Brasil, através da inclusão de um módulo petroquímico no modelo de avaliação integrada do Sistema Brasileiro de Uso da Terra e Energia desenvolvido na COPPE e denominado BLUES. Os resultados dos estudos mostram tanto que a produção de biocombustíveis em um cenário de restrições climáticas também gera co-produtos para produzir biomateriais, substituindo nafta petroquímica, quanto que a transição nos sistemas energéticos pode gerar excedentes de hidrocarbonetos/carboidratos que para servir de matéria-prima para a produção de materiais.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

BIOMASS-TO-CHEMICALS IN ENERGY TRANSITION SCENARIOS:
THE CASE OF BRAZIL

Camilla Chaves Nunes de Oliveira

October/2020

Advisors: Alexandre Salem Szklo

Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Department: Energy Planning

This thesis aims to contribute to a better representation of biomass in Integrated Assessment Models (IAMs), in order to assess the non-energy uses of biomass in the bioeconomy, associated with its energy uses. To this end, three studies were carried out with a focus on basic petrochemical products, the material needs associated with the energy transition, and the possible competition between biomass and oil products. The first study compares four ethylene production routes according to its estimated cost of production in Brazil. The second study further analyzes the relevance of the final disposal and the benefits of converting bioplastics into long-lived material. The third study consolidates previous studies and aims to advance the understanding of the role of biomass in energy transition scenarios in Brazil, through the inclusion of a petrochemical module in the Integrated Assessment Model of the Brazilian System for the Use of Land and Energy developed at COPPE and called BLUES. The results of the studies show that the production of biofuels under a scenario of carbon emission constrains co-generates products to produce biomaterials, replacing petrochemical naphtha, and that the transition in energy systems can also generate surplus hydrocarbons / carbohydrates that serve as raw material for the production of materials, as well.