



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO**
ESCOLA DE QUÍMICA

BRUNA CRISTINA OLIVEIRA

COMPLEXIDADE EM BIORREFINARIAS

RIO DE JANEIRO

2016



Bruna Cristina Oliveira

COMPLEXIDADE EM BIORREFINARIAS

Dissertação de Mestrado apresentada ao corpo docente do curso de pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências.

Orientadores: José Vitor Bomtempo, D.Sc.

Fábio de Almeida Oroski, D.Sc.

RIO DE JANEIRO

2016

Oliveira, Bruna Cristina.

Complexidade Em Biorrefinarias/ Bruna Cristina Oliveira. – 2016.

125f. : il. 30 cm

Dissertação (Mestrado em Tecnologia de processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Rio de Janeiro, 2016.

Orientador: José Vitor Bomtempo e Fábio de Almeida Oroski.

1. Biorrefinaria. 2. Dinâmica de Sistemas. 3. Análise econômica. 4. Química Verde. I. Bomtempo, José Vitor; Oroski, Fábio. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola de Química. III. Complexidade de Biorrefinarias.



COMPLEXIDADE EM BIORREFINARIAS

Bruna Cristina Oliveira

Orientadores: José Vitor Bomtempo, D.Sc.

Fábio de Almeida Oroski, D.Sc.

Dissertação de Mestrado apresentada ao programa do curso de Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências.

Aprovada em 08 de Outubro de 2016.

Presidente, José Vitor Bomtempo, D.Sc., TPQB/EQ/UFRJ

Prof. Fábio de Almeida Oroski, D.Sc., TPQB/EQ/UFRJ

Gabriel Lourenco Gomes, D.Sc., BNDES

Angelo Milani Junior, D.Sc., PETROBRAS

Prof. Flávia Chaves Alves, D.Sc., TPQB/EQ/UFRJ

RIO DE JANEIRO

2016

Agradecimentos

Enfim o fim, talvez aquele fim com uma pontinha de “gostaria de ir mais além”, mas também com um gosto de vitória por ter me desafiado a caminhar por caminhos desconhecidos. São muitas as pessoas que me ajudaram emprestando seu tempo, seus ouvidos, oferecendo conselhos e até orações. Apesar de citar o nome de apenas algumas delas, gostaria de expressar o meu mais sincero obrigada a todas essas pessoas amigas.

Agradeço em primeiro lugar a Deus por me amar apesar de tudo. Também agradeço imensamente aos meus pais, Fernando e Eneida, por todo o incentivo que me deram para qualquer escolha que eu fizesse.

Agradeço ao meu irmão, meu amado irmão, que sempre vibrou com a minha vida acadêmica, com cada pesquisa que eu iniciava. Meu irmão, mais que amigo, meu companheiro, que dividiu comigo todas as angústias que tive ao longo da vida.

Ao meu amor, Felipe, que suportou fortemente e com tanto amor nos olhos todos os ataques de grosseria, impaciência e nevosismo da minha parte. E ainda ousava dar muitos palpites neste trabalho. Confesso que todas as vezes que acalmei meu espírito para ouvi-los, fui muito bem recompensada.

Aos meus sobrinhos, Ana Laura e Lucas, que, mesmo não contribuindo intelectualmente para o desenvolvimento deste trabalho, foram responsáveis por muitos dos meus sorrisos que me aliviavam da pressão dos estudos.

Agradeço aos meus orientadores, Professor José Vitor e Professor Fábio Oroski, pelo voto de confiança, pela paciência diante da confusão mental que eu sofri na elaboração desse projeto. Posso dizer que oitenta por cento da vontade de fazer um trabalho bem feito (pelo menos era o que eu desejava), veio da ambição de me superar como engenheira (pelo lado positivo, claro). Os vinte por cento restantes foram da gratidão do sim destes dois professores tão queridos na minha vida.

Por fim, agradeço ao CAPES pelo suporte financeiro.

Resumo da Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Ciências.

COMPLEXIDADE EM BIORREFINARIAS

Bruna Cristina Oliveira
Outubro de 2016

Orientadores: José Vitor Bomtempo, D.Sc.
Fábio de Almeida Oroski, D.Sc.

As biorrefinarias são unidades de processamento de biomassa cuja concepção, ainda em desenvolvimento, busca abranger o aproveitamento integral da biomassa, a produção de biocombustíveis, bioprodutos e energia, e o aproveitamento dos resíduos gerados. As biorrefinarias integradas, que possuem seus processos combinados entre si, podem assim apresentar um elevado grau de complexidade tecnológica, comercial e organizacional. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo discorrer a respeito das complexidades envolvidas na estruturação de biorrefinarias a base de cana-de-açúcar. Com este objetivo modelos de biorrefinarias foram propostos e classificados de acordo com suas características: plataformas, produtos, processos e matérias-primas. Em seguida, os modelos de biorrefinarias foram analisados em relação a sua complexidade, utilizando uma métrica de complexidade conhecida como BCI (Biorefinery Complexity Index). Como o esperado, os resultados mostram que a complexidade aumenta com o adição de novos processos, matéria-primas, produtos e plataformas a biorrefinaria, e com a maior integração entre eles. Porém a métrica do BCI considera cada processo de maneira isolada, sem considerar possíveis interações com outros processos dentro de uma biorrefinaria integrada. Também desconsidera fatores externos à biorrefinaria, mas que afetam diretamente a mesma, tais como a oferta de matéria-prima ou estado mercadológico dos produtos, o que pode gerar algumas distorções no valor do índice de complexidade em relação à percepção da complexidade para o investimento em biorrefinarias.

Abstract of Dissertation presented to the Programa de Pós-Graduação em Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro Federal as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science.

BIOREFINERY COMPLEXITY

Bruna Cristina Oliveira

October, 2016

Supervisors: José Vitor Bomtempo, D.Sc.

Fábio de Almeida Oroski, D.Sc.

Biorefineries are biomass processing units whose design, still in development, seeks to cover the benefit of biomass, biofuels, bioproducts energy, and the recovery of generated waste. Integrated biorefineries, which have combined processes, can exhibit a high degree of technical, commercial and organizational complexity. In this context, this work aims to discuss the complexities involved in the structure of sugar cane biorefineries. To this end, biorefinery models have been proposed and classified according to their characteristics: platforms, products, processes and raw materials. Then, these biorefinery models were analyzed for their complexity, using a metric known as BCI – Biorefinery Complexity Index. As expected, the results show that the complexity score increases with addition of new processes, raw materials, products and platforms and the increase of integration between them. However, the BCI metric considers each case independently, without considering possible interactions with other processes within an integrated biorefinery. It also ignores external factors that could directly affect the biorefinery, such as the supply of raw material or marketing status of the product, which can cause some distortions in the value of complexity score and in the perception of complexity for investment in biorefineries.

Sumário

Agradecimentos.....	v
Figuras	xi
Tabelas.....	xiii
Nomenclatura	xv
Capítulo I: Introdução	1
I.1 – Objetivos	3
I.2 – Organização.....	3
Capítulo II – Biorrefinarias.....	5
II. 1 – O Conceito de biorrefinaria e suas implicações	5
II.2 – Classificação das biorrefinarias.....	8
II.2.1 – Classificação segundo Cherubini <i>et al.</i> , (2009)	9
II.2.1.1 - Plataformas.....	9
II.2.1.2 - Produtos	10
II.2.1.3 - Matéria-prima	10
II.2.1.4 - Processos.....	11
II.2.2 – Classificação segundo Kamm <i>et al.</i> , (2004)	12
II.2.2.1 – Biorrefinaria de fase I	12
II.2.2.2 – Biorrefinaria de fase II	12
II.2.2.3 – Biorrefinaria de fase III	12
II.3 – Modelo de biorrefinaria ideal.....	12
II.4 – Considerações do Capítulo II	15
Capítulo III – Complexidade	17
III.1 – Complexidade e suas definições.	17
III.2– Métricas de Complexidade	20
III.2.1 – <i>Biorefinery Complexity Index</i> - BCI.....	20
III.2.2 – Outras métricas	23
III.3 – Relevância do trabalho de Jungmeier <i>et al.</i> , (2014)	30
III.4 – Síntese do Capítulo III	34
Capítulo IV – Setor sucroalcooleiro e as biorrefinarias	36
IV.1 – Principais produtos do setor sucroalcooleiro.....	36
IV.1.1 - Caldo da cana-de-açúcar	37

IV.1.2 - Etanol.....	38
IV.2 – Principais resíduos do setor sucroalcooleiro	39
IV. 2.1 - O Bagaço e a Palha	40
IV. 2.2 – A vinhaça e a torta de filtro	42
IV. 2.3 – Dióxido de carbono.....	46
IV.3 – Sobre o Ácido succínico.....	47
IV.4 – Síntese do capítulo IV	49
Capítulo V - Metodologia.....	51
V.1 - Estrutura dos modelos de biorrefinarias	51
V.1.1 – Modelos de biorrefinarias com foco em aproveitamento da biomassa sem diversificação de produtos	53
V.1.1.1 – Biorrefinaria A1	53
V.1.1.2 – Biorrefinaria A2	54
V.1.1.3 – Biorrefinaria A3	55
V.1.2 – Modelo de biorrefinaria com enfoque em aproveitamento da biomassa com diversificação de produtos	56
V.1.3 – Modelos de biorrefinarias com foco na valorização e aproveitamento de resíduos do setor sucroalcooleiro.....	57
V.2 – Análise da Complexidade.....	60
V.2.1 – Identificação das características dos modelos de biorrefinarias. 60	
V.2.2 – Identificação dos TRLs	63
V.2.3 – Obtenção do BCI	63
Capítulo VI – Resultados e discussões	65
VI. 1 – Aplicação do BCI em biorrefinarias com foco em aproveitamento da biomassa sem diversificação de produtos.....	65
VI.1.1 – Biorrefinaria A1	65
VI.1.2 – Biorrefinaria A2.....	66
VI.1.3 – Biorrefinaria A3.....	68
VI.2 – Aplicação do BCI em biorrefinarias com aproveitamento de biomassa e foco em diversificação de produtos.....	70
VI.3 – Aplicação do BCI nas biorrefinarias com aproveitamento de biomassa e foco no aproveitamento e valorização de resíduos	74
VI.3.1 - Biorrefinaria V1	74
VI.3.2 - Biorrefinaria V2.....	76

VI. 4 – Síntese dos resultados	79
Capítulo VII – Conclusões	86
VII. 1 – Conclusões	86
Referências	90
Apêndice.....	98
Apêndice.1- Processos envolvidos no setor sucroalcooleiro.....	98
Etapas preliminares.....	98
Etapa de extração do caldo de cana	99
Etapa de tratamento do caldo de cana	100
Produção de açúcar	102
Produção de etanol	103
Etapas de processamento da palha e do bagaço da cana-de-açúcar	105
Pré tratamento	105
Hidrólise enzimática	106
Apêndice 2 – Valores de TRL (segundo JUNGMEIER <i>et al.</i> , (2014)).....	106

Figuras

Figura 1: Representação conceitual do desenvolvimento sustentável (Adaptado de Wellisch <i>et al.</i> , (2010)	13
Figura 2: Domínios do projeto. Ilustração extraída de Pimentel, (2007)	24
Figura 3: <i>Composição do Market Readiness Level (MRL)</i> . Fonte: Hasenauer <i>et al.</i> , (2015)	31
Figura 4: Alguns produtos químicos com baixas massas moleculares obtidos a partir da sacarose (ANTUNES <i>et al.</i> , 2010)	38
Figura 5: Equação de obtenção do etanol a partir da sacarose	38
Figura 6: Alguns produtos oriundos da alcoolquímica que possuem potencial como plataformas em biorrefinaria (RODRIGUES, 2011)	39
Figura 7: Estrutura química do ácido butanodióico	47
Figura 8: Estado de Comercialização de 25 produtos selecionados da plataforma de açúcar. Fonte: (E4TECH <i>et al.</i> , 2015)	49
Figura 9: Relação entre os modelos de biorrefinarias utilizados no presente trabalho.....	51
Figura 10: Fluxograma da Biorrefinaria A1	53
Figura 11: Fluxograma da Biorrefinaria A2	54
Figura 12: Fluxograma da Biorrefinaria A3	56
Figura 13: Fluxograma da Biorrefinaria D1	57
Figura 14: Fluxograma da Biorrefinaria hipotética V1	58
Figura 15: Fluxograma da Biorrefinaria V2	59
Figura 16: Espectro de Inovações. Fonte: Coyle, (2011)	73
Figura 17: Gráfico complexidade das biorrefinarias estudadas	81
Figura 18: Ilustração das etapas de preparação da cana-de-açúcar	98

Figura 19: Etapa de extração do caldo da cana	99
Figura 20: Etapa de tratamento do caldo	102
Figura 21: Produção de açúcar	103
Figura 22: Produção do etanol.....	105
Figura 23: TRL para plataformas	106
Figura 24: TRL para matérias-primas	107
Figura 25: TRL para produtos energéticos.....	107
Figura 26: TRL para produtos	108
Figura 27: TRL para processos termoquímicos	108
Figura 28: TRL para processos bioquímicos	108
Figura 29: TRL de processos químicos	108
Figura 30: TRL de processos mecânicos I	108
Figura 31: TRL de processos mecânicos II	108

Tabelas

Tabela 1: Resumo das diferenças entre as biorrefinarias e refinarias. (FERNANDO <i>et al.</i> , 2006; BENNETT; PEARSON, 2009; JONG; JUNGMEIER, 2015).....	8
Tabela 2: Descrição do Índice de Disponibilidade Tecnológica. Adaptado de Jungmeier <i>et al.</i> , (2014)	23
Tabela 3: Características relativas aos quatro domínios em tipos distintos de projeto (CALADO <i>et al.</i> , 2009; SUH, 1995)	25
Tabela 4: Descrição do MRL. Fonte: Hasenauer <i>et al.</i> , (2015)	32
Tabela 5: Composição química de diferentes biomassas lignocelulósicas com potencial para obtenção de etanol de segunda geração (Fonte: SANTOS <i>et al.</i> , (2012))......	41
Tabela 6: Caracterização de algumas correntes de vinhoto (SILVEIRA <i>et al.</i> , 2012).....	43
Tabela 7: Composição média do biogás proveniente de diferentes resíduos orgânicos	44
Tabela 8: Resumo das principais oportunidades e desafios dos resíduos de maior relevância no setor sucroalcooleiro	50
Tabela 9: Critério adotado para estruturação dos modelos de biorrefinarias	52
Tabela 10: Identificação das biorrefinarias hipotéticas segundo a Classificação de Cherubini <i>et al.</i> , (2009).	60
Tabela 11: TRLs das características não encontradas no trabalho de Jungmeier <i>et al.</i> , (2014)	63
Tabela 12: Valor de BCI para biorrefinaria A1	66
Tabela 13: Valor de BCI para Biorrefinaria A2	67
Tabela 14: Valor de BCI para Biorrefinaria A3	68
Tabela 15: Valor do BCI para o caso da Biorrefinaria D1	71

Tabela 16: Valor do BCI para o caso da Biorrefinaria V174

Tabela 17: Valor do BCI para o caso da Biorrefinaria V277

Tabela 18: Complexidade das biorrefinarias estudadas79

Nomenclatura

ATR	<i>Açúcares Redutores Totais</i>
BCI	<i>Biorefinery Complexity Index</i>
BCP	<i>Biorefinery Complexity Profile</i>
BNDES	<i>Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social</i>
DOE	<i>United States Department of Energy</i>
FC	<i>Feature Complexity</i>
FCI	<i>Feature Complexity Index</i>
FINEP	<i>Financiadora de Estudos e Projetos</i>
HVLV	<i>High Value Low Volume</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
MRL	<i>Market Readiness Level</i>
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
LCB	<i>Lignocellulosic Biorefinery</i>
LVHV	<i>Low Value High Volume</i>
NF	<i>Number of Feature</i>
PAISS	<i>Plano de Apoio à Inovação dos Setores Sucroenergético e Sucroquímico</i>
SSB	<i>Sugar and Starchy Biorefinery</i>
TGB	<i>Triglyceride Biorefinery</i>
TRL	<i>Technology Readiness Level</i>

Capítulo I: Introdução

O crescimento acelerado das economias emergentes, com destaque para China, em contraste com o ritmo mais modesto das economias desenvolvidas, gerou reflexos na expressiva demanda por matérias-primas e energia (CUNHA *et al.*, 2011; EPE, 2015). Demanda que estimulou a promoção de um desenvolvimento sustentável, que persiste como um desafio a ser enfrentado no cenário mundial, tanto por países desenvolvidos quanto por países em desenvolvimento (BASTOS, 2012; SANTANA, 2012). Desenvolvimento sustentável pode ser descrito como uma mudança socioeconômica positiva que permite às gerações atuais e futuras o suprimento de suas necessidades (BRUNDTLAND, 1987). O desenvolvimento é sustentável quando as práticas exercidas nele são viáveis economicamente, socialmente e ambientalmente (BRUNDTLAND, 1987).

Um modo de promover o desenvolvimento sustentável é a substituição das matérias-primas fósseis por renováveis de forma eficiente do ponto de vista econômico, social e ambiental (SAMMONS *et al.*, 2008). Pode-se citar como exemplo a cana utilizada para obtenção de etanol no Brasil, em substituição ou complementação ao petróleo para geração de gasolina. Neste caso, as razões vão além da busca por “sustentabilidade”, englobando também a necessidade de minimizar a dependência ao petróleo e ao gás natural, e a busca por segurança energética (NOGUEIRA *et al.*, 2008), fator primordial para o crescimento econômico de um país (OLIVEIRA, 2015).

Neste contexto de desenvolvimento sustentável surge o termo biorrefinaria, em paridade à definição de refinarias advinda do setor de petróleo e gás. Trata-se de um conceito em construção, mas pode ser compreendido como um setor industrial que utiliza biomassas, matéria orgânica de origem animal ou vegetal, para obtenção de biocombustíveis e demais produtos químicos comumente gerados no setor petroquímico. Para Peck *et al.*, (2009), as biorrefinarias são capazes de utilizar de forma eficiente dos recursos limitados de biomassa e reduzir questões contenciosas relacionadas à disputa do seu uso na geração de biocombustíveis e bioprodutos¹ com o uso da biomassa para outros fins relevantes, tais como a produção de alimentos. Ademais, a criação de

¹ Bioproduto é definido como qualquer produto gerado a partir de biomassa (COUTINHO; BOMTEMPO, 2011)

biorrefinarias integradas, ou seja, com múltiplos processos conectados, é considerado um caminho para implantação de sistemas de produção mais sustentáveis, ou mesmo um "novo paradigma da produção" (PECK *et al.*, 2009).

Para o caso brasileiro, as biorrefinarias seriam uma maneira atraente de não apenas promover maior segurança energética, mas também alavancar o setor industrial (BASTOS, 2012), posto que em uma biorrefinaria é possível realizar um aproveitamento eficiente da biomassa, de resíduos agrícolas e agroindustriais (palhas, bagaço, serragens, etc.) para obter novos biocombustíveis e bioprodutos. Desta forma, as biorrefinarias promoveriam a diversificação de produtos, impactando de forma positiva as diversas cadeias produtivas envolvidas e repercutindo em benefícios para a sociedade, como geração de empregos e renda, na conquista de mercados externos, na diminuição de importações, dentre outros (EMBRAPA AGROENERGIA, 2011). Ademais, a implementação de biorrefinarias no Brasil é oportuna considerando a familiaridade brasileira com a tecnologia de biocombustíveis, por exemplo, a partir da cana-de-açúcar e soja (NOGUEIRA *et al.*, 2013).

Todavia, obter através de uma biorrefinaria o aproveitamento completo da biomassa e dos resíduos gerados ao longo do processamento, com diversificação de produtos entre outros benefícios, implica em ter um maior número de processos, produtos, matérias-primas e/ou maior grau de integração nos processos. Quanto mais completa for uma biorrefinaria; com maior avanço no aproveitamento da biomassa, de seus resíduos e com maior diversificação de produtos; mais complexa tende a ser sua estrutura.

Existem na literatura diferentes propostas de biorrefinarias integradas, tais como o trabalho de Forster *et al.*, (2013) que analisa biorrefinarias integradas que utilizam resíduos agroindustriais no Brasil, porém são poucos os trabalhos que abordam a complexidade inerente à sua estrutura. Esta complexidade pode determinar a atratividade de uma biorrefinaria do ponto de vista do investidor (JUNGMEIER *et al.*, 2014). Entretanto, as informações necessárias para compreensão da complexidade ainda são insuficientes, tornando qualquer tomada de decisão para investimento arriscada. Desta forma, a complexidade pode ser um obstáculo para o desenvolvimento das biorrefinarias. Estudos que visam o conhecimento, exploração e análise das complexidades envolvidas em uma biorrefinaria são relevantes para alavancar este tipo de unidade industrial. Com o conhecimento da natureza da complexidade é possível

ter uma estimativa dos custos, riscos, fraquezas e potencialidades de uma biorrefinaria.

I.1 – Objetivos

Considerando o contexto apresentado, o presente trabalho tem como objetivo discorrer a respeito das complexidades envolvidas na estruturação de biorrefinarias à base de cana-de-açúcar, que serão configuradas de acordo com três enfoques distintos: aproveitamento máximo de biomassa, maior diversificação de produtos, utilização e valorização de resíduos. Pretende-se também identificar, quantificar os fatores que determinam a complexidade e analisar a intensidade das relações estabelecidas entre estes fatores. Algumas questões foram propostas e serão gradualmente respondidas no decorrer do trabalho;

1. O que se entende como complexidade e como o conceito pode ser aplicado no caso das biorrefinarias?
2. Como se atribui a complexidade aos diferentes tipos de biorrefinaria?
3. De que forma a maior utilização da biomassa, a diversificação de produtos e a utilização de resíduos afetam a complexidade de uma biorrefinaria à base de cana?

I.2 – Organização

Este trabalho está organizado em seis capítulos incluindo o presente capítulo introdutório. Com o objetivo de obter uma compreensão básica a respeito das biorrefinarias, permitindo a análise de sua complexidade, o Capítulo II apresenta uma breve revisão do conceito de biorrefinaria e suas classificações, e da relação das biorrefinarias com o desenvolvimento sustentável. Essas informações serão utilizadas para definir os modelos de biorrefinarias estudados nesta dissertação.

O Capítulo III visa apresentar algumas definições e métricas de complexidade, a fim de determinar qual será a métrica aplicada para a análise da complexidade das biorrefinarias nesta dissertação.

No Capítulo IV aborda-se a importância do setor sucroalcooleiro para o fortalecimento das biorrefinarias tendo como principal argumento a

relevância dos principais resíduos e produtos deste setor para as biorrefinarias. Este capítulo também destaca o potencial do ácido succínico como um bioproduto para biorrefinarias à base de cana. O ácido succínico é um dos produtos produzidos nos modelos de biorrefinarias analisados neste trabalho. Pretende-se, com este capítulo, justificar a motivação do estudo das complexidades especificamente em biorrefinarias que utilizam cana-de-açúcar como matéria-prima.

A metodologia utilizada para analisar a complexidade de biorrefinarias a base de cana é exposta no Capítulo V. Em seguida, o Capítulo VI mostra os resultados desta análise e apresenta as discussões destes resultados. Por fim, o Capítulo VII conclui esta dissertação, incluindo sugestões de trabalhos futuros.

Capítulo II – Biorrefinarias

O conceito de biorrefinaria é frequentemente expresso como uma estrutura industrial análoga a uma refinaria, porém tendo como matéria-prima processada a biomassa e não o petróleo e o gás (JONG; JUNGMEIER, 2015). Entretanto, existem outras definições, inclusive definições que se opõem à analogia feita com as refinarias. Dada a natureza atual fluida do conceito, múltiplas definições de biorrefinaria foram propostas procurando abranger as diferentes configurações nas quais as biorrefinarias ocorrem.

Considerando as inúmeras configurações nas quais uma biorrefinaria pode ocorrer e seus possíveis efeitos na complexidade, este capítulo tem como objetivo esclarecer e tratar os conceitos e fatores envolvidos em uma biorrefinaria. Pretende-se alcançar este objetivo por meio da apresentação das principais definições e classificações existentes sobre biorrefinarias e suas respectivas implicações. Esses conceitos servirão como base para a discussão posterior sobre a complexidade.

Este capítulo será organizado da seguinte forma. Na Seção II.1 são apresentadas as definições de biorrefinaria encontradas na literatura, incluindo a definição que será adotada neste trabalho. A Seção II.2 discorre sobre as diferentes abordagens de classificação de biorrefinarias encontradas na literatura. A Seção II.3 discute alguns requisitos necessários para que uma biorrefinaria seja considerada uma biorrefinaria ideal, ou seja, biorrefinarias que buscam promover um desenvolvimento sustentável, tendo como base as definições e classificações anteriormente apresentadas. Por fim, a Seção II.4 apresenta as considerações finais sobre o presente capítulo.

II. 1 – O Conceito de biorrefinaria e suas implicações

O conceito de biorrefinaria originou-se no final da década de 1990 como resultado da ameaça de escassez de combustíveis fósseis e do aumento da utilização da biomassa como matéria-prima renovável para a produção de produtos não alimentícios, tais como plásticos, biossurfactantes e, principalmente, biocombustíveis (MAITY, 2014). Um dos objetivos de uma biorrefinaria é reduzir a dependência da matéria-

prima fóssil e minimizar os impactos ambientais causados pelo uso deste insumo.

De acordo com o Departamento de Energia dos Estados Unidos (sigla em inglês *DOE*) uma biorrefinaria é uma planta de processamento onde fontes de biomassa são extraídas e convertidas em um espectro de produtos com valor de mercado (MAITY, 2014). Biomassa, por sua vez, pode ser compreendida como qualquer matéria orgânica disponível de forma renovável ou recorrente, tais como culturas energéticas, resíduos e dejetos agrícolas, florestais, industriais e urbanos (MAITY, 2014).

A Agência Internacional de Energia (sigla em inglês *IEA* Bioenergy Task 42) considera biorrefinamento como o processamento **sustentável** de biomassa em um espectro de energia e de **produtos comercializáveis** (CHERUBINI *et al.*, 2009). Esta definição é mais restrita que a definição elaborada pelo DOE. Para a IEA, o simples processamento da biomassa, gerando produtos com valor de mercado, não caracteriza uma biorrefinaria. É preciso que o processamento ocorra de maneira sustentável.

O Laboratório Americano de Energia Renovável (sigla em inglês NREL) define biorrefinaria como uma instalação que integra processos e equipamentos de conversão de biomassa para a produção de combustíveis, energia e produtos químicos (MAITY, 2014). Além de não fazer menção à sustentabilidade no processamento da biomassa ou ao valor de mercado de seus produtos, esta definição possui outra particularidade: biorrefinaria é um conceito restrito ao processamento integrado da biomassa. Ou seja, uma biorrefinaria possui várias tecnologias de conversão (termoquímico, bioquímica, etc.) que são combinadas para reduzir o custo da produção, aumentar a flexibilidade na produção dos produtos e obter sua própria fonte energética (FERNANDO *et al.*, 2006). Comparando esta definição com as definições anteriores elaboradas pela IEA e pelo DOE, entende-se que se trata de um conceito limitado às biorrefinarias integradas, enquanto para o IEA e o DOE biorrefinarias podem ser tanto integradas quanto estruturas semelhantes aos complexos industriais² (JONG *et al.*, 2012).

O conceito de biorrefinaria encontrado no trabalho de Fernando *et al.*, (2006) é semelhante às definições anteriores: as biorrefinarias

² Complexo industrial é um conjunto dinâmico de empresas ligadas entre si por uma rede de fluxos de compra e venda de insumos básicos; de preço e expectativas de demanda de produção e investimento; de processo técnico; e das ligações com o resto do sistema industrial para formação de externalidades (PERROUX, 1961 apud CARVALHO, 1997).

transformam materiais biológicos abundantes em produtos rentáveis economicamente utilizando uma combinação de tecnologias e processos. Porém, o ponto determinante neste conceito está na principal meta de uma biorrefinaria. Segundo Fernando *et al.*, (2006) uma biorrefinaria deve produzir, de maneira integrada, produtos comercializáveis de dois tipos: produtos de alto valor com baixo volume (*High Value Low Volume* - HVLV) e produtos de baixo valor com alto volume (*Low Value High Volume* - LVHV), utilizando uma série de operações unitárias³ (FERNANDO *et al.*, 2006). Estas operações unitárias seriam projetadas para maximizar os produtos de alto valor, minimizando os fluxos de resíduos através da conversão de intermediários LVHV em energia (FERNANDO *et al.*, 2006). Os produtos de alto valor aumentam a rentabilidade, enquanto os combustíveis de alto volume ajudam a atender a demanda de energia global e determinam a escala do projeto da biorrefinaria (FERNANDO *et al.*, 2006).

É possível encontrar a biorrefinaria sendo conceitualizada de forma análoga às refinarias de petróleo (MAITY, 2014; FERNANDO *et al.*, 2006), as quais usam matéria-prima fóssil para geração de combustíveis e produtos químicos. Para Fernando *et al.*, (2006), a similaridade está em submeter a biomassa a processos complexos gerando variados produtos, equiparando-se ao processamento sofrido pelo petróleo e pelo gás para obtenção de uma variedade de produtos. Maity, (2014) também destaca que, assim como a refinaria de petróleo pode obter produtos intermediários para geração de outros produtos, a biorrefinaria também gera produtos intermediários para obtenção de inúmeros produtos. Um exemplo é a nafta, produto intermediário na petroquímica, que gera o eteno e vários outros produtos. Nas biorrefinarias tem-se a celulose como exemplo de produto intermediário, gerando etanol e outros bioprodutos. Todavia Bennett; Pearson, (2009) questionam estas semelhanças. Para Bennett; Pearson, (2009), as frações obtidas da destilação e do craqueamento do petróleo são distintas e alocadas por diferenciação para a produção de gasolina, diesel, óleo de turbina ou olefinas. Já as etapas iniciais de processamento da biomassa geram produtos intermediários, como a celulose ou o gás de síntese. Estes produtos intermediários podem ser processados para obtenção de bioprodutos variados ou serem direcionados para produção de apenas um produto. Como é possível escolher quais produtos serão produzidos dentro de uma biorrefinaria, a possibilidade é maior de ocorrer competição direta entre os produtos pelo uso da biomassa.

³ Operações unitárias são sequências de operações físicas necessárias à viabilização econômica de um processo químico. Podem-se tomar como exemplo, operações de cristalização e filtração (ISENMANN, 2013).

No trabalho de Jong; Jungmeier, (2015) semelhanças e diferenças foram encontradas entre biorrefinarias e refinarias. A maior semelhança foi o número de produtos intermediários que ambas geram. A maior diferença foi em relação à natureza da matéria-prima: homogênea para as refinarias e heterogênea para as biorrefinarias. A biomassa, matéria-prima na biorrefinaria, é constituída de componentes variados, tais como carboidratos, lignina, proteínas e outros. A consequência dessa heterogeneidade é a necessidade de uma combinação de processos variados para geração de produtos, elevando a dificuldade e os custos de processamento. Esta característica pode ser um dos fatores que justificam a existência de poucos produtos em escala comercial produzidos em biorrefinarias, aliada a falta de maturidade tecnológica e mercadológica das biorrefinarias. A Tabela 1 mostra um resumo das principais diferenças discutidas neste trabalho entre as refinarias e as biorrefinarias.

Tabela 1: Resumo das diferenças entre as biorrefinarias e refinarias. (FERNANDO et al., 2006; BENNETT; PEARSON, 2009; JONG; JUNGMEIER, 2015)

Refinaria	Biorrefinaria
Matéria-prima relativamente homogênea	Matéria-prima heterogênea
Maior parte de processos físico-químicos	Combinação de processos de natureza distinta (termoquímico, químicos, bioquímico,...)
Geração de muitos intermediários em escala comercial	Geração de poucos intermediários em escala comercial
Processamento primário da matéria-prima gera produtos diferenciados	Processamento primário da matéria-prima gera produtos intermediários que podem ser destinados para produção de um mesmo produto ou produtos distintos

II.2 – Classificação das biorrefinarias

O conceito de biorrefinaria ainda está em desenvolvimento. Como consequência disso, não existe uma classificação única para as biorrefinarias. Grande parte das classificações existentes baseia-se no: (i) tipo de matéria-prima (por exemplo, biorrefinaria verde, biorrefinaria integral de colheitas, biorrefinaria lignocelulósica, biorrefinaria marinha),

(ii) tipo de tecnologia (por exemplo, bioquímica, biorrefinaria termo-química), (iii) estado da tecnologia da plataforma (biorrefinaria convencional, biorrefinaria avançada, biorrefinaria de 1º e 2º geração), (iv) principal produto (etanol, biodiesel, etc) e (v) intermediário produzido (gás de síntese, açúcar, lignina) (CHERUBINI *et al.*, 2009). Porém, apenas dois tipos de classificações serão abordados com maior detalhamento neste trabalho por serem considerados os mais completos, abrangendo todos os tipos possíveis de biorrefinarias: a classificação de Cherubini *et al.*, (2009) e a classificação de Kamm *et al.*, (2004).

II.2.1 – Classificação segundo Cherubini *et al.*, (2009)

Cherubini *et al.*, (2009) elaboram uma abordagem na qual cada sistema de biorrefinaria é tratado de forma autônoma e classificado de acordo com as suas características (recursos). A ideia básica é que cada sistema individual de biorrefinaria possa ser classificado usando as quatro características principais: plataformas, produtos, matérias-primas e processos.

II.2.1.1 - Plataformas

São elementos intermediários obtidos da matéria-prima e que geram uma gama de produtos na biorrefinaria. As plataformas fazem a conexão entre a matéria-prima e os produtos finais. São consideradas os principais pilares da classificação das biorrefinarias, visto que podem ser obtidas a partir de diferentes processos de conversão aplicados a inúmeros tipos de matérias-primas (CHERUBINI *et al.*, 2009).

As mais importantes plataformas, de acordo com Cherubini *et al.*, (2009), são encontradas em biorrefinarias voltadas para produção de biocombustíveis. Algumas destas plataformas são listadas a seguir:

- Biogás oriundo de digestão anaeróbia;
- Gás de síntese a partir da gaseificação;
- Gás hidrogênio (H₂), a partir da reação de deslocamento de água e gás, reforma a vapor, eletrólise da água e fermentação;
- Açúcar C6 (por exemplo, glicose, frutose, galactose: C₆H₁₂O₆), a partir da hidrólise da sacarose, amido, celulose e hemicelulose;
- Açúcar C5 (por exemplo, xilose, arabinose: C₅H₁₀O₅), a partir da hidrólise de hemicelulose, por exemplo;

- A lignina, a partir do processamento de biomassa lignocelulósica;
- Líquidos oriundos da pirólise;
- Óleo (triglicerídeos) a partir de oleaginosas, algas e resíduos de óleo base;
- Suco orgânico, que consiste na fase líquida extraída da prensagem de biomassa úmida e contém composição química variada;
- Eletricidade e calor, podendo ser usados internamente para atender às necessidades de energia da biorrefinaria ou podem ser vendidos à rede de energia.

II.2.1.2 - Produtos

Dividem-se em dois grandes grupos segundo seu produto principal (CHERUBINI *et al.*, 2009):

Sistemas de biorrefinarias direcionados para produção de energia, onde a biomassa é utilizada principalmente para a produção de energias alternativas (biocombustíveis, energia e/ou calor). Os demais produtos, como alimentos para animais, são vendidos (situação mais comum), ou modificados para geração de bioprodutos com maior valor agregado, visando aperfeiçoar o desempenho econômico e ecológico da cadeia de suprimento da biomassa total.

- *Sistemas de biorrefinarias com foco na obtenção de bioprodutos*, os quais geram primariamente produtos de base biológica, tais como: biomateriais, lubrificantes, alimentos, rações, etc. Os resíduos do processo podem ser submetidos a outros processamentos, visando à obtenção de outros produtos ou de energia (para uso interno ou venda).

II.2.1.3 - Matéria-prima

Neste caso, as biorrefinarias são diferenciadas pelo tipo de matéria-prima empregada para geração de produtos. As biorrefinarias são classificadas em dois grandes grupos: biorrefinarias destinadas a processar uma cultura específica, e as biorrefinarias que processam resíduos (CHERUBINI *et al.*, 2009).

No grupo das biorrefinarias destinadas a processar uma cultura específica, estão os subgrupos das biorrefinarias que processam:

- Culturas que produzem açúcares (como a cana-de-açúcar);
- Grãos (ex.: sorgo, milho);
- Cultura dos lignocelulósicos (ex.: madeira);
- Cultura que geram óleo vegetal (ex.: soja);
- Culturas gramíneas (ex.: Forragens).

Para as biorrefinarias que processam resíduos, estão inclusos os seguintes subgrupos:

- Óleo residual (ex.: gordura animal, óleo residual de cozinha);
- Resíduos lignocelulósicos (ex.: resíduos da agricultura);
- Resíduos orgânicos (ex.: lixo urbano).

II.2.1.4 - Processos

Os processos que caracterizam uma biorrefinaria foram agrupados em quatro grupos na classificação de Cherubini *et al.*, (2009):

- *Processos mecânicos/físicos* (por exemplo, pré-tratamento, moagem, separação, destilação). Estes processos não alteram a estrutura química dos componentes da biomassa, apenas realizam uma redução de tamanho ou uma separação de componentes na matéria-prima;
- *Processos bioquímicos* (por exemplo, a digestão anaeróbia, a fermentação aeróbia e anaeróbia, conversão enzimática). São processos que ocorrem em condições brandas (baixa temperatura e pressão), com utilização de microrganismos ou enzimas;
- *Processos químicos* (por exemplo, hidrólise, transesterificação, hidrogenação, oxidação), onde ocorre alteração química do substrato;
- *Processos termoquímicos* (por exemplo, pirólise, gaseificação, *hydrothermal upgrading* (HTU), combustão), onde a matéria-prima passa por condições extremas (alta temperatura e/ou pressão, com ou sem um meio catalítico).

II.2.2 – Classificação segundo Kamm *et al.*, (2004)

Nesta classificação as biorrefinarias são divididas em três tipos: biorrefinarias de fase I, biorrefinarias de fase II e biorrefinarias de fase III.

II.2.2.1 – Biorrefinaria de fase I

Estas biorrefinarias são capazes de processar apenas uma matéria-prima em proporções fixas e sem flexibilidade de processamento, isto é, não possuem muita flexibilidade de escalonamento e não variam o tipo de matéria-prima utilizada ou o tipo de produto produzido. As unidades que utilizam soja para produção de biodiesel ilustram este tipo de biorrefinaria.

II.2.2.2 – Biorrefinaria de fase II

Biorrefinarias de fase II também processam um tipo de biomassa, porém possuem capacidade de produzir maior variedade de produtos e, portanto, são mais flexíveis em relação às oscilações de demanda, preço e obrigações contratuais. Uma biorrefinaria que utiliza milho para produção de etanol e ração animal é um exemplo de biorrefinaria de fase II.

II.2.2.3 – Biorrefinaria de fase III

É o tipo mais avançado de biorrefinaria. São capazes de processar diferentes tipos de biomassa, combinar tecnologias de processamento e, conseqüentemente, são aptas a gerar uma ampla variedade de produtos. Um bom exemplo de uma biorrefinaria de fase III é a biorrefinaria de biomassa lignocelulósica, que combina processos variados para modificação da biomassa, podendo gerar diversos produtos.

II.3 – Modelo de biorrefinaria ideal

O conceito de biorrefinaria não é novo, porém a necessidade de ações que visem à sustentabilidade da biorrefinaria, tais como a valorização de seus coprodutos, são ideias recentes. Biorrefinarias sustentáveis podem ser consideradas biorrefinarias ideais. Uma biorrefinaria ideal atende aos requisitos de uma biorrefinaria sustentável, ou seja, promove o desenvolvimento sustentável. O desenvolvimento sustentável ocorre em três dimensões interconectadas: ambiental, social e econômico. Conforme a representação conceitual da Figura 1, uma

biorrefinaria só é sustentável quando exerce práticas nas três dimensões citadas anteriormente, ou seja, as práticas exercidas pela biorrefinaria devem estar no centro do diagrama da Figura 1. Quando as atividades executadas pela biorrefinaria não ocorrem nas três dimensões concomitantemente, a biorrefinaria possui um desenvolvimento imparcial, viável ou tolerável, de acordo com a ilustração da Figura 1 (WELLISCH *et al.*, 2010).

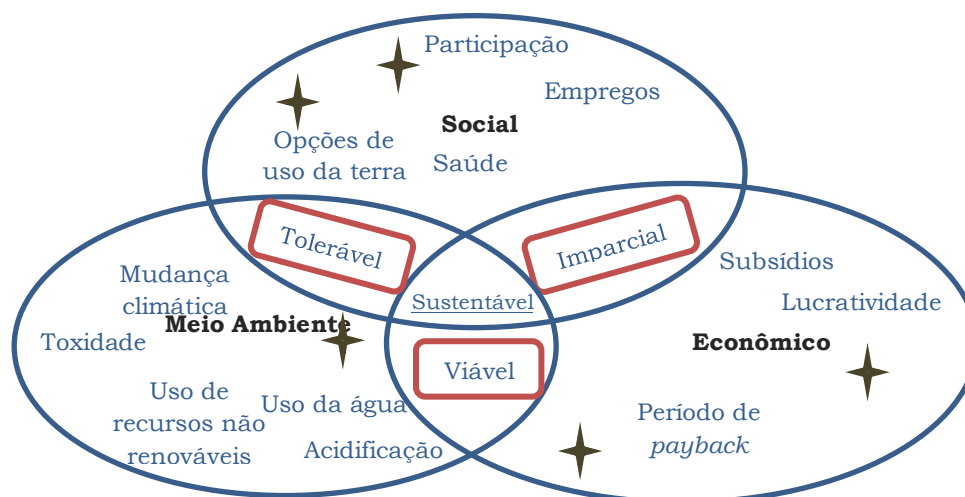


Figura 1: Representação conceitual do desenvolvimento sustentável (Adaptado de Wellisch *et al.*, (2010)

O conceito de uma biorrefinaria ideal pode estar vinculado ao conceito de biorrefinaria integrada. Uma biorrefinaria integrada produz vários produtos, que incluem energia e bioquímicos, obtidos por processos conectados entre si, de modo a reduzir os custos envolvidos na biorrefinaria (Fernando *et al.*, 2006). Quanto maior o grau de integração entre os processos, mais sustentável espera-se que a biorrefinaria seja, pois maior é a possibilidade desta biorrefinaria ter uma produção eficiente energeticamente pela transferência de calor de um processo para outro. Isto reduz o custo de produção de cada produto gerado (FATIH DEMIRBAS, 2009).

Além do requisito da sustentabilidade e da integração dos processos, entende-se que uma biorrefinaria ideal deverá almejar o melhor aproveitamento da biomassa de modo a reduzir a quantidade necessária da matéria-prima, minimizando conflitos referentes ao uso da terra e à competição pelo uso de algumas biomassas que possuem emprego alimentício. A redução e aproveitamento de resíduos também é algo necessário em uma biorrefinaria ideal. Processar resíduos, gerando produtos com maior valor agregado, diminui os impactos ambientais e confere aos produtos obtidos uma identidade sustentável. Ainda, considerando que geralmente o biocombustível é o produto principal, e que este produto tem sua competitividade ameaçada com as variações no

preço do petróleo, a obtenção de produtos de maior valor de mercado, através dos coprodutos, pode mitigar os impactos econômicos sofridos pela competição direta com os produtos do petróleo.

No caso da cana-de-açúcar no Brasil pesquisas, incentivos governamentais e privados, buscam a evolução das usinas que geram apenas álcool e açúcar de mesa para biorrefinarias integradas empenhadas em obter um melhor aproveitamento da cana e a geração de novos produtos, tais como o uso do bagaço e da palha para geração de etanol de segunda geração e outros bioprodutos. Como exemplo disso tem-se as duas biorrefinarias inauguradas recentemente, a GRANBIO em 2014 e a Raízen em 2015, que usam a palha e o bagaço da cana para obtenção do etanol 2G. Só a biorrefinaria da Raízen tem capacidade de produção de mais de 42 milhões de litros de etanol por ano (TIENGO, 2016). A previsão é de expansão de mais sete unidades para a produção do etanol 2G até 2024⁴(TIENGO, 2016). Outro exemplo pertinente vem do fomento governamental às indústrias sucroalcooleiras através do plano PAISS que buscou impulsionar a produção do etanol celulósico (NYKO et al., 2013).

A descrição de uma biorrefinaria ideal pode ser definida como uma biorrefinaria de fase III na classificação de Kamm *et al.*, (2004): biorrefinarias capazes de processar uma maior variedade de biomassa, combinar tecnologias de processamento e, conseqüentemente, aptas a gerar uma ampla variedade de produtos. Esse tipo de biorrefinaria possui a estrutura mais avançada (KAMM *et al.*, 2004) mas, na medida em que aumentam as possibilidades de matérias-primas, maior é o número de processos que podem não ser facilmente combinados por dificuldades técnicas ou carência de informações importantes (STUART *et al.*, 2014). E mais, o crescimento do número de produtos inviabiliza a adoção de um único modelo de negócios⁵, pois é necessário gerenciar produtos com mercados e demandas diferentes e, conseqüentemente, com modelos de negócios distintos (STUART *et al.*, 2014).

⁴ Ainda em fase de validação da tecnologia.

⁵ Modelo de negócios pode ser descrito como a articulação entre os diferentes componentes ou "blocos de construção", para produzir uma proposição de valor ao mercado, gerando valor à firma (DEMIL, LECOCQ E WARNIER 2006 apud OROSKI, 2013). Blocos de construção podem ser compreendidos como elementos estudados para geração de valor, tais como: tipo de relacionamento com cliente, canais de distribuição do produto, entre outros.

II.4 – Considerações do Capítulo II

Este capítulo apresentou o conceito de biorrefinaria para possibilitar o exame e a identificação da natureza de sua complexidade.

A Seção II.1 evidenciou a existência de definições distintas para as biorrefinarias. A definição adotada nesse trabalho é proposta pela IEA, pois engloba várias formas de biorrefinaria. A IEA considera biorrefino como o processamento **sustentável** de biomassa em um espectro de **produtos comercializáveis** e de energia. Esta definição expressa de forma direta a necessidade do caráter sustentável da biorrefinaria, porém não apresenta grandes restrições quanto à maneira com que esse processamento sustentável deve ser feito ou sobre quais produtos devem ser produzidos.

Como consequência do atual processo de conhecimento e domínio das tecnologias envolvidas nas biorrefinarias, assim como da existência de variadas definições sobre as biorrefinarias, a Seção II.2 buscou comentar sobre a existência de inúmeras classificações oriundas das definições de biorrefinarias, focando-se em duas classificações: a classificação de Cherubini *et al.*, (2009) e de Kamm; Kamm, (2004). A classificação de Cherubini *et al.*, (2009) adotada ao longo deste trabalho, classifica uma biorrefinaria por quatro características: plataforma, produtos, matéria-prima e processos. Desta maneira, a classificação de Cherubini *et al.*, (2009) abrange um grande número de configurações de biorrefinaria de modo eficiente. Além disso, é a partir desta classificação que será possível quantificar as complexidades existentes em uma biorrefinaria. Este último ponto será abordado com maiores detalhes no capítulo seguinte.

Na Seção II.3 foi discutido o conceito da biorrefinaria ideal. Como mencionado ao longo deste capítulo, o ato de processar biomassa é antigo, porém processá-la de maneira sustentável é uma ideia recente. A partir do conhecimento das limitações do uso da biomassa, tais como competição com a produção de alimento, é possível entender a necessidade de promover o melhor aproveitamento da matéria-prima. Uma maneira de alcançar esse objetivo é através do aproveitamento dos resíduos gerados ao longo da produção, agregando valor e criando um portfólio de produtos lucrativo para biorrefinaria. Entretanto, a estruturação de uma biorrefinaria sustentável envolve muitos fatores como processos, matérias-primas, mercados, entre outros. Combinar esses fatores exige compreensão dos seus comportamentos dentro das biorrefinarias, incluindo o conhecimento sobre suas possíveis interações. Frequentemente, quanto maior o número de fatores (processos, matérias-

primas, mercados, entre outros) relacionados a uma biorrefinaria, maiores são as incertezas a respeito da atuação desses fatores na biorrefinaria e, como consequência, maiores são as complexidades envolvidas nesta biorrefinaria. O próximo capítulo apresentará o que se entende como complexidade para que seja possível compreender melhor como se relacionam os elementos dentro de uma biorrefinaria e, com isso, aumentar as chances de sucesso no desenvolvimento de uma biorrefinaria.

Capítulo III – Complexidade

Segundo o dicionário Houaiss, (2010), “complexidade” é o nome dado ao que possui a qualidade de ser complexo. Por sua vez, “complexo” significa o que se compõe de elementos diversos relacionados entre si. No entanto, variações deste conceito são observadas em decorrência de sua aplicação em áreas distintas, simbolizando diversos tipos ou níveis de complexidade (WANG; TUNZELMANN, VON, 2000). Em decorrência dessa multiplicidade de definições de complexidade, análises feitas a respeito da complexidade, por exemplo, sua natureza, a existência ou não de interações entre diferentes tipos/níveis de complexidade, não são facilmente realizadas.

Deste modo, ao dissertar sobre complexidades em uma biorrefinaria, caso proposto neste trabalho, faz-se necessário determinar a definição de complexidade adotada. Este capítulo se destina a estabelecer o que será compreendido como complexidade. Isto é, qual a definição básica que norteará todo o presente trabalho e quais são as formas propostas para se quantificar a complexidade de uma biorrefinaria.

Para alcançar tais objetivos, este capítulo está dividido em quatro seções: a Seção III.1 apresenta algumas definições sobre complexidade em áreas como engenharia de projetos, gestão e demais áreas que possam ser aplicadas no contexto de uma biorrefinaria; a Seção III.2 aborda métricas que podem ser utilizadas para quantificar a complexidade em biorrefinarias; a Seção III.3 versa sobre alguns aspectos da métrica desenvolvida por Jungmeier *et al.*, (2014), escolhida para quantificar a complexidade das biorrefinarias nesta dissertação, e sua relevância para o presente trabalho; por fim, a Seção III.4 apresenta uma síntese dos principais pontos abordados neste capítulo.

III.1 – Complexidade e suas definições.

Segundo Luhmann (1998 apud RODRIGUES *et al.*, 2013) a complexidade ocorre em um conjunto de elementos inter-relacionados

dentro de um sistema⁶. Não existem elementos sem conexões relacionais e não existem conexões com elementos externos. Complexidade surge da impossibilidade de descrever, identificar ou representar todas as possíveis relações em um sistema devido à quantidade de elementos e interações, ou devido ao desconhecimento dos componentes do sistema (NEVES *et al.*, 2006). Como não existe elemento sem interação com outro, torna-se obrigatório relacionar elementos entre si, mesmo quando não se sabe como essa relação ocorre. A complexidade surge da ignorância de como essas relações ocorrem, ou seja, complexidade significa obrigação à seleção de um conjunto de modelos representativos do sistema, obrigação à seleção significa contingência e contingência significa risco (LUHMANN, 1998).

Na engenharia de projetos, uma das maneiras de conceitualizar a complexidade consiste em um conjunto composto por elementos, onde o conjunto de propriedades de cada elemento excede a soma das partes. Ou seja, a complexidade não inclui apenas uma propriedade aditiva simples dos componentes, mas reconhece a presença de propriedades emergentes que somente são encontradas no conjunto (SUMMERS *et al.*, 2010).

Outra visão da complexidade foca-se na concepção do projeto de interesse. A complexidade tem relação com o esforço necessário para se alcançar determinado objetivo, ou para a implementação do projeto. (BRAHA *et al.*, 1998; SUMMERS *et al.*, 2010). Para o caso das biorrefinarias seria equivalente a dizer que a complexidade tem correlação com os processos ou etapas necessárias para sua construção.

Já para Wang *et al.*, (2000), “complexidade” pode carregar o sentido ou de “profundidade”, ou de “amplitude”, ou ambos. Complexidade no sentido de “profundidade” refere-se à sofisticação analítica de um elemento. No sentido de “amplitude”, refere-se ao número de objetos que têm de ser investigados para desenvolver um determinado assunto. Em resumo, a amplitude está relacionada ao grau de heterogeneidade, e a profundidade, com o nível de sofisticação. O que decidirá o sentido da complexidade será o objetivo da análise. Psicólogos observam a complexidade no sentido da profundidade, enquanto biólogos analisam a complexidade de um sistema pelo sentido da amplitude. Na maioria dos casos, quanto maior é a complexidade em relação à profundidade, menor é a complexidade em relação à amplitude (WANG *et al.*, 2000).

⁶ Para Luhmann, um sistema é um conjunto de elementos que interagem entre si, possuindo suas próprias operações internas. Este sistema não interage com o entorno, ou seja, com qualquer elemento que seja externo ao sistema (RODRIGUES *et al.*, 2013).

Tendo como foco o caso específico das biorrefinarias, Jungmeier *et al.*, (2014) assumiram que a complexidade é influenciada pelo número de características⁷ existentes em uma biorrefinaria, assim como o estado tecnológico de cada uma dessas características de maneira individual. Diferentemente das definições de complexidade anteriores, não existe influência na complexidade oriunda de interações entre as características de uma biorrefinaria. Deste modo, não existe diferença na complexidade causada pela forma como os elementos estão relacionados. Sendo assim, biorrefinarias integradas e não integradas são quantitativamente iguais em complexidade desde que a natureza e a quantidade de características destas biorrefinarias sejam idênticas.

Estas definições, apesar de distintas, sugerem que a complexidade de uma biorrefinaria deverá ser avaliada sobre elementos que a compõem e a forma como se interligam. Estes elementos não são necessariamente físicos ou internos à biorrefinaria, porém devem ter como requisito, para a análise, serem de grande relevância para a existência de uma biorrefinaria.

Stuart *et al.*, (2014) ilustram como as complexidades podem ocorrer através de um exemplo de uma biorrefinaria que utiliza a madeira como matéria-prima. Nesta biorrefinaria pode-se comercializar somente a madeira, utilizar a celulose para produzir papel ou outros bioprodutos, tais como etanol. É possível ainda vender os resíduos da madeira sem transformá-los em celulose. Quanto mais bioprodutos forem produzidos a partir da celulose, maior será o número de processos e maior será a dificuldade de integrá-los. Por se tratarem de processos diferentes do setor madeireiro, serão necessários profissionais especializados e a criação de conexões com o setor demandante destes novos bioprodutos. Deste modo, cada bioproduto pode se enquadrar em um modelo específico de negócios. Todavia, para moldar um modelo de negócios, é preciso conhecimento amplo do mercado, tecnologia e produtos, o que muitas vezes não ocorre, visto que são conhecimentos em áreas diversas e distintas da área comum de atuação do setor madeireiro. A falta de conhecimento de cada novo mercado de atuação e as dificuldades técnicas oriundas da integração de um número maior de processos geram incertezas que, por sua vez, se caracterizam como aumento na complexidade da biorrefinaria.

⁷ As características de uma biorrefinaria são referentes à classificação das biorrefinarias por Cherubini *et al.*, (2009), abordada em detalhes no item II.2 do Capítulo II. Estas são: plataforma, matéria-prima, produtos e processos.

III.2– Métricas de Complexidade

A presença de complexidade em qualquer projeto está intimamente ligada a incertezas, gerando riscos ao mesmo (JUNGMEIER *et al.*, 2014; SUMMERS, *et al.* 2010). Desta maneira, o conhecimento sobre a complexidade é determinante para minimizar os riscos de um projeto. O uso de métricas de complexidade deve permitir não apenas a sua mensuração, mas também fornecer informações a respeito da natureza da complexidade.

Devido à significância das métricas para análise de complexidade de uma biorrefinaria, esta seção expõe algumas métricas existentes em engenharia de projetos, por entender que a implantação e o desenvolvimento de uma biorrefinaria é, em sua essência, o desenvolvimento de um grande projeto, podendo ser conduzido pela ótica da engenharia de projetos. Além disso, esta seção apresenta com maior destaque a métrica desenvolvida pelo trabalho Jungmeier *et al.*, (2014) em virtude de ser a única métrica, até o momento, direcionada para biorrefinarias e, devido a isso, adotada para o desenvolvimento desta dissertação.

III.2.1 – *Biorefinery Complexity Index* - BCI

Como mencionado no Capítulo II existem muitas maneiras distintas de se definir as biorrefinarias. Como consequência, pode-se encontrar variados tipos de biorrefinarias. A ausência de um conceito claro e universal dificulta a formação de uma classificação única para as biorrefinarias. Ademais, cada conceito de biorrefinaria influenciará na forma como será analisada sua complexidade. A compreensão do que representa complexidade em relação às biorrefinarias também não é aparente. É arriscado até mesmo julgar uma biorrefinaria sob a perspectiva de riscos tecnológicos e econômicos. Como consequência, torna-se difícil para a indústria, decisores, investidores e para o governo, escolher quais são as opções mais promissoras no curto, médio e longo prazo. Diante disso, cria-se uma necessidade de compreender o que representa a complexidade em uma biorrefinaria e quantificá-la (JUNGMEIER *et al.*, 2014).

Com o objetivo de suprir essa necessidade, Jungmeier *et al.*, (2014) propuseram a aplicação do Índice de Complexidade da Biorrefinaria

(*Biorefinery Complexity Index* - BCI). Esse índice é representado por um número adimensional, inteiro e positivo que expressa o grau de complexidade de uma determinada biorrefinaria. O BCI foi criado com base no sistema de classificação de biorrefinarias de Cherubini *et al.*, (2009) e no "Índice de Complexidade de Nelson⁸" para refinarias de petróleo, abordado com maior riqueza de detalhes no trabalho de Jungmeier *et al.*, (2014).

Para elaboração do índice, Jungmeier *et al.*, (2014) assumiram pressupostos básicos a respeito da complexidade de uma biorrefinaria, descritos a seguir:

1. O número de diferentes características de uma biorrefinaria influencia a complexidade. As características de uma biorrefinaria são referentes à classificação das biorrefinarias por Cherubini *et al.*, (2009), abordada em detalhes na Seção II.2.1. São estas: plataforma, matéria-prima, produtos e processos.
2. O estado da tecnologia de cada característica da biorrefinaria exerce influência sobre sua complexidade. A complexidade diminui quanto mais próximo uma tecnologia está de uma aplicação comercial, o que significa riscos técnicos e econômicos menores que outras tecnologias.

Tomando os pressupostos assumidos por Jungmeier *et al.*, (2014), obtém-se o BCI de acordo com a Equação (I).

$$BCI = \sum_{i=1}^4 FCI_i \quad (I)$$

Onde:

i = Característica da biorrefinaria segundo a classificação de biorrefinarias de Cherubini *et al.*, (2009);

$i = \{1, 2, 3, 4\}$; Onde:

1 = Plataforma;

⁸ Índice de Complexidade de Nelson é uma medida de complexidade de refinaria desenvolvida em 1960 por W. L. Nelson. O índice mede a complexidade e o custo de cada unidade de processo na refinaria utilizando como referência a coluna de destilação, a qual possui complexidade igual a 1. Quanto maior o índice de Nelson de uma refinaria, maior será sua complexidade (JUNGMEIER *et al.*, 2014).

2 = Matéria-prima;

3 = Produtos;

4 = Processos.

FCI_i = Índice de complexidade da característica.

O FCI , variável da Equação (I), chama-se *Feature Complexity Index* (Em português Índice de Complexidade Característica). O FCI avalia o estado técnico e econômico da arte e os potenciais riscos econômicos de cada característica na biorrefinaria.

De acordo com a Equação (II), o Índice de Complexidade Característica possui relação direta com o número de elementos (NF sigla em inglês de *Number of Features*) e com a Complexidade Característica (FC sigla em inglês de *Feature Complexity*) de cada uma das características encontradas na biorrefinaria.

$$FCI_i = NF_i \times FC_i \quad (II)$$

A Complexidade Característica (FC), de forma análoga ao caso das refinarias de petróleo, tem relação com o estado tecnológico ou Nível de Disponibilidade Tecnológica (sigla em inglês *TRL*), correspondente a uma determinada característica.

O *TRL (Technology Readiness Level)* é um tipo de sistema de medição criado pela NASA para avaliar o nível de maturidade de uma determinada tecnologia. O estado tecnológico varia linearmente de 1 até 9, sendo 1 para tecnologias que estão em nível básico de pesquisa e 9 referente a uma tecnologia avançada com nível de aplicação comercial (Tabela 2). Quanto mais desenvolvida for a tecnologia aplicada a uma determinada característica, menor será o grau de complexidade atribuído à mesma, conforme a Equação (III). Cada tecnologia é analisada em função de seus parâmetros atribuindo-se à mesma um determinado nível de *TRL* (EARTO, 2014).

Tabela 2: Descrição do Índice de Disponibilidade Tecnológica. Adaptado de Jungmeier *et al.*, (2014)

Nível de disponibilidade tecnológica(TRL)	Descrição	Complexidade característica(FC)
1	Pesquisa básica	9
2	Pesquisa aplicada	8
3	Função crítica ou prova de conceito estabelecido	7
4	Teste de Laboratório/ Elaboração de protótipo	6
5	Testes laboratoriais de sistema integrado / semi-integrado	5
6	Sistema de protótipo avaliado	4
7	Sistema de piloto integrado demonstrado	3
8	Sistema incorporado em um projeto comercial	2
9	Sistema provado e pronto para implementação comercial completa	1

$$FC_i = 10 - TRL_i \quad (III)$$

Por fim, o BCI é representado pelo Perfil de Complexidade da Biorrefinaria (BCP) de acordo com o formato abaixo:

$$\text{BCP: BCI } (FCI_1/FCI_2/FCI_3/FCI_4)$$

III.2.2 – Outras métricas

O trabalho de Summers *et al.*, (2010) apresenta diferentes métricas de complexidades oriundas da ciência da computação, da teoria da informação e da teoria de projeto. Algumas dessas métricas foram consideradas relevantes para esta dissertação e por isso são comentadas neste trabalho. Nestas métricas o projeto é encarado sob a ótica da Teoria de Projeto Axiomático representada pela Figura 2.

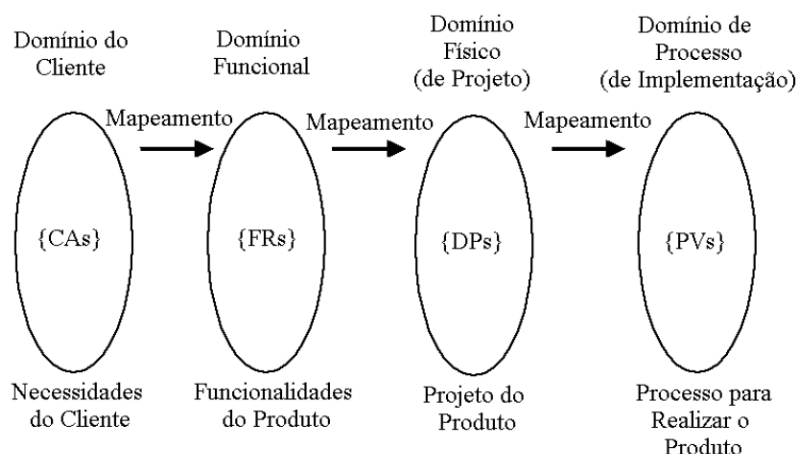


Figura 2: Domínios do projeto. Ilustração extraída de Pimentel, (2007)

O Projeto Axiomático é definido como a criação de soluções sintetizadas para formar produtos, processos ou sistemas que satisfaçam necessidades dos clientes, percebidas através do mapeamento dos seus desejos. Os atributos do cliente (CA, do inglês, *customer attributes*) representam as necessidades dos clientes. Estas necessidades frequentemente nascem de um problema ou da percepção do cliente para um problema. Estas necessidades podem ser descritas através de características ou atributos desejados pelo cliente, referentes ao sistema ou produto.

De acordo com a Figura 2, as necessidades dos clientes são mapeadas por projetistas e expressas em termos dos requisitos funcionais (FR). Um requisito funcional (FR, do inglês, *functional requirement*) pode ser definido como sendo uma saída ou resposta requerida de um produto ou projeto que caracterize uma necessidade percebida pelo cliente (PIMENTEL, 2007). O conjunto desses requisitos funcionais é chamado de domínio funcional. A maneira como os requisitos funcionais serão atendidos é mapeada no conjunto dos Parâmetros de Projeto (*Design Parameters* – DP) (PIMENTEL, 2007). Os parâmetros de projeto estão em um domínio físico. Estabelecida a estrutura física que permitirá o alcance das metas do projeto, determina-se as variáveis do processo que poderão ser utilizadas nos DPs (PIMENTEL, 2007). Estas variáveis estão representadas na Figura 2 pela sigla PV (*Process variables* em inglês).

Na elaboração de um projeto os requisitos funcionais e os parâmetros de projeto relacionam-se entre si em um processo contínuo de busca e proposição de soluções (denominado de processo zig zag), fazendo com que ocorra a interação de requisitos de projetos e parâmetros de

projeto de maneira ordenada. Em um projeto de grande porte também pode ocorrer o mesmo processo de zig zag entre os outros domínios (CALADO *et al.*, 2009).

Na Tabela 3 estão apresentadas para projetos distintos as características relativas de cada domínio. O projeto que mais se assemelha ao caso das biorrefinarias é o “projeto de sistemas”, descrito na última linha desta tabela.

Tabela 3: Características relativas aos quatro domínios em tipos distintos de projeto (CALADO *et al.*, 2009; SUH, 1995)

		Domínio			
		Cliente (CA)	Funcional (FR)	Físico (DP)	Processos (PV)
Tipos de Projeto	Manufaturados	Atributos os quais os clientes desejam	Requisitos funcionais especificados para o produto	Variáveis físicas que possam satisfazer os requisitos funcionais	Variáveis de processo que possam controlar os parâmetros de projeto (DP)
	Materiais	Desempenho desejado	Propriedades requeridas	Micro-estrutura	Processos
	Software	Atributos desejados no software	Resultados	Variáveis de entrada e algoritmos	Sub-rotinas
	Organizações	Satisfação do cliente	Funções da organização	Programas ou áreas	Pessoas e/ou recursos que possam suportar os programas
	Sistemas	Atributos desejáveis do sistema como um todo	Requisitos funcionais do sistema	Máquinas, componentes e sub-componentes	Recursos (humanos, financeiros, materiais, etc.)

Com base na Tabela 3 e considerando uma biorrefinaria como um sistema, pode-se entender que em um caso em que o desejo do cliente seja uma biorrefinaria sustentável com lucro alto, um dos requisitos de projetos pode ser o uso de biomassas de baixo custo. Então, determinados processos que possibilitem a cogeração de energia e o processamento da matéria-prima seriam parâmetros de processo. Enquanto funcionários, quantidade de produto produzido, etc, seriam variáveis de projeto.

✓ *Complexidade dual: real e imaginária*

Esta métrica, oriunda da teoria da informação, considera que a complexidade é composta por duas partes: real e imaginária. A parte real da complexidade, definida na Equação IV, é a probabilidade de cumprir os requisitos de um projeto (FR) (SUMMERS *et al*, 2010). Neste contexto a probabilidade de cumprir os FRs é contabilizada pela ótica das dificuldades inerentes à natureza do projeto. Assim, projetos mais simples maximizam a probabilidade de atender aos requisitos de projeto, minimizando a complexidade.

$$C_R = \sum_{i=1}^n \ln \left| \frac{1}{P_i} \right| \quad (IV)$$

Onde:

C_R = Parte real da complexidade;

n = O número de requisitos a serem obedecidos em um projeto;

P_i = Probabilidade de satisfazer o i-ésimo requisito.

A parte imaginária considera a incerteza referente ao desconhecimento do projetista em relação ao projeto (Equação V). Esta incerteza é mensurada através da probabilidade do projetista alcançar o objetivo almejado do projeto. Desta forma, se existem “n” requerimentos e “n” parâmetros, a probabilidade do projetista obter a ordenação correta dos “n” parâmetros de modo a atender aos “n” requerimentos representará a parte imaginária da complexidade (SUMMERS *et al*, 2010).

$$C_I = \ln \left| \frac{1}{P_{prob}} \right| = \ln(n!) \quad (V)$$

Na Equação V, o número de requisitos é igual ao número de parâmetros do projeto e:

C_I = Parte imaginária da complexidade;

P_{prob} = Probabilidade de obter o conjunto de parâmetros de projeto que satisfaça os requisitos do mesmo.

Uma forma de ilustrar a presença da complexidade dual nas biorrefinarias é analisando biorrefinarias à base de cana. Supondo que um empresário do setor sucroalcooleiro deseje desenvolver uma biorrefinaria que tenha enfoque em aproveitamento da biomassa (desejo do cliente). O projetista poderá mapear nas necessidades do cliente do setor sucroalcooleiro requisitos do projeto tais como o aproveitamento do bagaço e da palha para cogeração de energia e geração de etanol de segunda geração (E2G). Existe uma dificuldade inerente à estrutura do bagaço que necessita de mais processos para sua conversão entre outras dificuldades relativas ao projeto. A probabilidade de atender aos requisitos de projeto devido a essa complexidade determinará a parte real da complexidade. No entanto, quanto maior for o conhecimento do projetista a respeito sobre os requisitos do projeto, maior será a probabilidade de atender a esses requisitos pela escolha do melhor conjunto de parâmetros. Esta probabilidade estabelece a contribuição imaginária da complexidade. Neste caso os processos podem ser compreendidos como parâmetros de projetos.

A métrica da complexidade dual pode ser encarada como uma extensão da métrica do BCI. O BCI considera que a complexidade das biorrefinarias é afetada por apenas dois fatores: pelo número de características (elementos) de uma biorrefinaria e pelo nível tecnológico de cada característica. Esses fatores são estabelecidos pela ótica do projeto e não do projetista. Deste modo o BCI representa a parte real da complexidade

✓ *Complexidade medida através da entropia de informações*

A complexidade de um projeto pode ser mensurada através da entropia da função de probabilidade de que os requisitos do projeto sejam atendidos (EL-HAIK *et al.*, 1999). A entropia aqui se refere ao conceito de entropia da informação, que mensura a quantidade de incerteza, ou de informação, sobre um problema ou objetivo. Quanto mais informações são necessárias para atingir um objetivo, maior a incerteza. (ROCHA *et al.*, 2011).

A Equação (VI) representa a complexidade de um projeto, mensurada através do conceito de entropia da informação. Esta complexidade é composta por dois componentes: o primeiro termo referente à variabilidade e o segundo termo da equação referente à vulnerabilidade do projeto. (EL-HAIK *et al.*, 1999).

$$H(f\{\mathbf{FR}\}) = H(f\{DP\}) + \ln|\det[\mathbf{A}]| \quad (\text{VI})$$

Onde:

FR é o vetor de requerimentos funcionais, ou seja, conjunto de exigências independentes a serem cumpridas e que caracterizem o objetivo do projeto como um todo;

$f(x)$ é a função de densidade de probabilidade de “x”

$H(y)$ é a Entropia de “y”

DP é o vetor de parâmetros do projeto;

A é a matriz de projeto relacionando os parâmetros com os requerimentos de projeto;

A primeira parcela corresponde à variabilidade, sendo representada pela entropia da função de densidade de probabilidade dos parâmetros do projeto. A função de densidade de probabilidade expressa a probabilidade dos parâmetros de projeto satisfazerem os requerimentos do projeto. A entropia refere-se a quão informativa é essa distribuição. Quanto mais concentrada é a distribuição da probabilidade, menor o seu grau de variabilidade e menor será a entropia. Por consequência, menor será a complexidade do projeto (EL-HAIK *et al.*, 1999).

O segundo termo, referente à vulnerabilidade, é determinado pelo logaritmo neperiano do determinante da matriz **A**. A matriz **A**, matriz de projeto, é composta pelos coeficientes de sensibilidade do projeto (Equação VII) (EL-HAIK *et al.*, 1999). A contribuição da vulnerabilidade na complexidade é compreendida pela presença de três fatores: mapeamento, sensibilidade e dimensão. O mapeamento refere-se à posição dos elementos não nulos na matriz de projeto; a sensibilidade considera a grandeza e o sinal dos elementos não-nulos de **A**; e por fim, o fator de dimensão está associado ao tamanho do problema, ou seja, ao número de requisitos a serem alcançados no projeto (EL-HAIK *et al.*, 1999).

Pela Equação VII pode-se observar que os elementos da matriz são gerados por uma relação entre os requisitos funcionais e os parâmetros de projeto. Quando a matriz **A** é quadrada e seus elementos são nulos com exceção dos elementos da matriz diagonal, o projeto é considerado desacoplado ou independente. Isto significa que é possível ajustar os parâmetros de modo a atender um requisito de projeto sem afetar outro. Ou seja, cada parâmetro se relaciona com apenas um requisito. Este projeto é considerado o ideal por possuir menor complexidade.

$$A_{ij} = \frac{\partial fFRr_i}{\partial DP_j} \quad (VII)$$

FR_i é o i-enésimo requisito funcional a ser atendido no projeto;
 DP_j é o j-enésimo parâmetro de projeto aplicado de modo a atender os requisitos do projeto.

Quando existe mais de um parâmetro que satisfaça um requisito, é possível que o projeto seja semi-independente ou semi-acoplado. A matriz A de um projeto semi-acoplado também é quadrada, porém possui elementos não-nulos acima ou abaixo da diagonal principal. Portanto, quando for possível alterar a ordem dos DPs e dos FRs, de modo a obter uma matriz A triangular sem interferir na correlação de cada FRs com seus DPs, a matriz A é semi-acoplada. Esta característica indica que, em um projeto semi-independente, existe uma ordem para que os parâmetros de projetos sejam implementados (EL-HAIK *et al.*, 1999).

Existe também o projeto acoplado. Este tipo de projeto é o que possui a maior complexidade, visto que não é possível alterar qualquer parâmetro para satisfazer um requisito sem afetar outro requisito. A matriz A de um projeto acoplado possui mais linhas que colunas, ou seja, o número de requisitos de projeto é maior que o número de parâmetros. Neste caso existe mais de uma solução. A probabilidade de escolher a solução ótima entre estas soluções é menor. Para obter apenas uma solução em um projeto acoplado é necessária a adição de um número maior de parâmetros suficiente para transformar a matriz de projeto em uma matriz quadrada (PIMENTEL, 2007; SILVA *et al.*, 2010; EL-HAIK *et al.*, 1999).

Para estimar a complexidade de uma biorrefinaria, propósito desta dissertação, utilizando a métrica da entropia da informação, podem-se assumir como FRs os produtos e matérias-primas a serem transformadas. A partir destes domínios bem estabelecidos, prossegue-se para a escolha dos DPs. O parâmetro de projeto mais evidente são os processos. Neste caso, um FR provavelmente será atendido por mais de um DP, pois o tipo de processamento adotado para uma determinada matéria-prima vai impactar nos produtos e plataformas geradas. Então um projeto de biorrefinaria nunca será desacoplado, porém a obtenção de uma biorrefinaria semi-acoplada ou acoplada dependerá dos domínios determinados para a mesma.

A métrica de complexidade que utiliza a entropia de informação não considera a interferência do grau de conhecimento do projetista na composição da complexidade de forma explícita, como se observa na métrica apresentada anteriormente. Pode-se, no entanto, considerar que existe a influência, mesmo que indireta, do conhecimento do projeto pelo projetista na complexidade quando mensurada pela entropia de informação. Isto porque a parte crítica do projeto é a correta definição dos FRs. Esta definição requer que o projetista conheça o problema e as suas relações. Uma definição imprecisa pode implicar uma solução complexa, desnecessária ou mesmo inaceitável (SILVA et al., 2010).

III.3 – Relevância do trabalho de Jungmeier *et al.*, (2014)

O trabalho de Jungmeier *et al.*, (2014) foi o pioneiro no desenvolvimento de uma métrica de complexidade para biorrefinarias. Sua aplicação em pesquisas que visem a análise da complexidade de biorrefinarias é importante para alavancar uma maior exploração dessas complexidades. No entanto, é possível que a métrica do *BCI* resulte em valores de complexidade desacoplados da realidade. Esta observação tem como base a discussão contida em Jungmeier *et al.*, (2014) a respeito do *BCI*, tal como o uso do *TRL* não ser adequado como peso para produtos e matéria-prima. Além disso, muitos conceitos e métricas de complexidade comentadas neste capítulo consideram a contribuição das interações entre elementos dentro do sistema. Como o *BCI* não considera a influência de interações entre os elementos, reforça a hipótese de que esta métrica possa não abordar plenamente as complexidades de uma biorrefinaria.

Um dos fatores que deve ser repensado na métrica do *BCI* é o *TRL*, que funciona como um peso atribuído a cada característica da biorrefinaria. Segundo Jungmeier *et al.*, (2014), ao utilizar o *TRL* para cada característica da biorrefinaria, pode ocorrer uma dupla contribuição da tecnologia no cálculo da complexidade. Isto porque o estado tecnológico de produtos e de matérias-primas deriva de processos e plataformas. O que foi proposto pelo próprio autor é utilizar um novo “peso” para matérias-primas e produtos no lugar do *TRL*. Este novo peso seria chamado de *MRL* (sigla em inglês *Market Readiness Level*) e seria uma espécie de fator mercadológico baseado na lógica proposta pelo *TRL*. Então o *BCP* seria composto de duas partes, uma para o *TRL* de processos e plataformas e outra referente ao *MRL* para matéria-prima e produtos.

A maneira com que o *MRL* mensura o grau de maturidade mercadológica de um elemento pode variar de acordo com a área em que o mesmo será aplicado. Isto pode ser observado no trabalho de Farel *et al.*, (2014) que desenvolveu um *MRL* para análise de ferramentas de software, onde o menor nível mercadológico é o de concepção, nível em que é possível encontrar trabalhos publicados a respeito do software; e o nível máximo, nível 7, é o nível em que os softwares são amplamente utilizados em campos industriais e acadêmicos. Todavia o trabalho de Hasenauer *et al.*, (2015) apresenta um *MRL* composto por quatro elementos, conforme ilustrado no esquema da Figura 3: prontidão no fornecimento, disponibilidade da demanda, disponibilidade do cliente e do produto.



Figura 3: Composição do Market Readiness Level (MRL). Fonte: Hasenauer *et al.*, (2015)

De posse das perguntas formuladas na Figura 3, foram estabelecidos os níveis mercadológicos contidos na Tabela 4.

Tabela 4: Descrição do MRL. Fonte: Hasenauer *et al.*, (2015)

Nível de Disponibilidade Mercadológica (MRL)	Descrição
1	A insatisfação de algumas necessidades foi identificada
2	Pesquisa aplicada
3	Identificação das potenciais oportunidades de negócio
4	Análises do sistema e do ambiente estão sendo realizadas
5	Execução de pesquisas de mercado
6	Alvo definido
7	Análise da indústria
8	Análise dos concorrentes e posicionamento
9	Proposição de valor definida
10	Modelo de negócios definido de forma coerente

A descrição dos níveis mercadológicos na Tabela 4 induz a concluir que a sugestão Hasenauer *et al.*, (2015) é interessante para o mapeamento do grau de desenvolvimento da oportunidade de inserção de uma matéria-prima/um produto no mercado. Porém esta sugestão é incompleta para análise sobre a posição mercadológica deste produto/ matéria-prima. O MRL proposto por Hasenauer *et al.*, (2015) não informa se o elemento analisado já está sendo implementado e adotado pelo mercado, ou fornece informações a respeito da natureza competitiva entre seus concorrentes e substitutos. Também não apresenta como são regidas a oferta e a demanda dos produtos ou matérias-primas analisadas, além de outras informações pertinentes. Além disso, seria necessário uma modificação na fórmula do FC para que o valor da complexidade característica não tenha o mínimo nulo.

Deve-se notar que a descrição dos níveis tanto do TRL quanto do MRL não é feita de maneira padronizada. Isto é, diferentes entidades podem interpretar o índice de maneira variada e, assim, obter diferentes pontuações de níveis mercadológicos e tecnológicos para uma mesma tecnologia. Como consequência, o BCI pode apresentar variações de acordo com os TRL e MRL utilizados. Pode ainda ocorrer modificação temporal do TRL e do MRL de acordo com o avanço tecnológico e mercadológico das tecnologias envolvidas.

Diante dos questionamentos e críticas feitas à métrica do BCI expostas nesta seção e diante de comparações da métrica do BCI com ambas as métricas de complexidades abordadas na Seção II.2, modificações no BCI são propostas nessa dissertação. Sugere-se que cada biorrefinaria seja representada de acordo com o vetor da Equação (VII).

$$B = \begin{bmatrix} Pl \\ MP \\ P \\ PR \end{bmatrix} \quad (VII)$$

Onde:

Pl = Plataforma

MP = Matéria-prima

P = Produto

PR = Processo

O peso para cada característica de uma biorrefinaria, TRL ou MRL , seria representado pelo vetor da Equação (VIII).

$$W = [w_{Pl} \quad w_{MP} \quad w_P \quad w_{PR}] \quad (VII)$$

Onde:

w_a = Peso atribuído a característica “a” da biorrefinaria

$a = \{Pl, MP, P, PR\}$

Através dessa representação matemática das características e peso das características, seria permitido considerar a possibilidade de uma interação entre as características. Essa interação poderia aumentar ou diminuir o peso de cada característica no cálculo do BCI. Matematicamente seria representada pela matriz quadrada D de ordem n , sendo n o número de características da biorrefinaria analisada. Por conseguinte, o BCI se expressaria de acordo com a Equação (VIII).

$$BCI = WDB \quad (VIII)$$

Quando todas as características da biorrefinaria atuam de forma independente na composição da biorrefinaria, são irrelevantes ou inexistentes as interações entre as características. Neste caso a matriz D é

uma matriz identidade, diagonal principal unitária e os demais elementos nulos. Então o BCI pode ser obtido pela Equação (I) citada na Seção III.2.1:

$$BCI = \sum_{i=1}^4 FCI_i \quad (I)$$

Quando a matriz D possui elementos na diagonal principal não-nulos e não unitários e os demais elementos nulos, significa que apesar das características da biorrefinaria atuarem de maneira independente, o TRL ou MRL, atribuído ao elemento de maneira isolada sofre uma alteração quando a característica se encontra no contexto da biorrefinaria. Por fim, quando a matriz D possui elementos não nulos fora da diagonal principal, as interações entre as características são significantes na composição da complexidade de uma biorrefinaria.

Acredita-se que a representação do BCI pela Equação (VIII) pode corrigir erros referentes à existência de possíveis interações entre as características ou referente a distorções na atribuição do TRL/MRL, mas ainda é preciso analisar a existência ou não de outras características que possam influenciar a complexidade das biorrefinarias. Contudo esta proposta não será testada nesta dissertação, servindo somente de sugestão para trabalhos futuros.

III.4 – Síntese do Capítulo III

Este capítulo se propôs a apresentar como será compreendida a complexidade neste trabalho, e algumas formas de quantificá-la e qualificá-la.

Na Seção III.1 buscou-se evidenciar variações na definição da complexidade. Essas variações dependem da natureza do objeto analisado. Mesmo com as diferenças na maneira de conceituá-la, foi possível compreender que a complexidade tem relação com o número de elementos que compõem o conjunto ou o sistema analisado, com a natureza desses elementos e com a incerteza das propriedades que emergem de possíveis interações entre os elementos.

Na Seção III.2 abordaram-se algumas métricas de quantificações de complexidades, dentre elas a métrica do BCI proposta por Jungmeier *et al.*, (2014). Esta métrica é a métrica adotada para análise da complexidade

de biorrefinarias nesta dissertação, por se tratar de uma métrica específica para as biorrefinarias. O BCI considera que a complexidade da biorrefinaria é determinada pelo número de características⁹ pertencentes a ela e pelo nível tecnológico de cada característica (Equação I).

Como a maioria das definições de complexidade consideram interações entre os elementos e como Jungmeier *et al.*, (2014) mencionaram a possibilidade de distorções na quantificação da complexidade pelo BCI, a Seção III.3 levantou a hipótese de que a métrica do BCI pode não fornecer a dimensão real da complexidade. Uma das sugestões feitas para melhorar a métrica do BCI foi proposta no mesmo trabalho de Jungmeier *et al.*, (2014) e consiste em desconsiderar o efeito do nível tecnológico das matérias-primas e produtos. Para essas duas características seria considerado seu nível mercadológico. Desta maneira seria evitada a dupla contribuição da tecnologia no cálculo da complexidade, visto que o estado tecnológico de produtos e de matérias-primas deriva de processos e plataformas. O uso de um fator mercadológico para o BCI também seria interessante porque permitiria considerar a contribuição de fatores relevantes para biorrefinarias na complexidade, fatores estes abordados no Capítulo II, tais como demanda do produto e oferta de biomassa.

A segunda sugestão, comentada na Seção III.3, refere-se a uma proposta de modificação na representação matemática do BCI para que seja permitida a contabilização das interações entre as características, quando ocorrerem. Esta modificação possibilitaria também eliminar erros causados por variações na atribuição do TRL.

Dando prosseguimento à presente dissertação, o próximo capítulo abordará a relação do setor sucroalcooleiro com o desenvolvimento das biorrefinarias no Brasil.

⁹ Entendem-se como características de uma biorrefinaria as plataformas, os produtos, as matérias-primas e os processos contidos nessa biorrefinaria, conforme a classificação de biorrefinarias proposta em Cherubini *et al.*, (2009).

Capítulo IV – Setor sucroalcooleiro e as biorrefinarias

O Brasil possui um relevante setor de agronegócios, com participação de aproximadamente 23% do PIB de 2015 (CNA, 2015), o que confere ao Brasil o domínio do setor de agronegócios e uma grande oferta de biomassa. Isto aumenta o interesse brasileiro em investir em economias oriundas de biomassa, tais como as biorrefinarias, com o objetivo de valorizar a biomassa local (Cruz *et al.*, 2014). Um exemplo disso é o setor sucroalcooleiro que, por sua tradição no processamento da cana em etanol, pode vir a atrair muitos investimentos em geração de bioproductos no contexto de biorrefinarias.

Entende-se que para que as indústrias do setor químico assegurem mercados com produtos competitivos, é preciso garantir a matéria-prima em escala e tecnologia (TORRES, 2009). Neste ponto a cana-de-açúcar destaca-se devido ao seu cultivo no Brasil ser considerado maduro e com volumes e custos atrativos, o que facilita o avanço de pesquisas que busquem o desenvolvimento de biorrefinarias sustentáveis. Em decorrência disso, este trabalho analisará a complexidade de modelos de biorrefinarias a base de cana-de-açúcar.

O objetivo deste capítulo é explicitar as potencialidades do setor sucroalcooleiro para a aplicação de biorrefinarias. Para alcançar este objetivo este capítulo está dividido em quatro seções: a Seção IV.1 aborda a importância dos principais produtos sucroalcooleiros para a biorrefinaria; a Seção IV.2 mostra os resíduos comumente gerados no setor sucroalcooleiro e também sobre sua relevância em uma biorrefinaria; a Seção IV.3 falará sobre o ácido succínico, bioproducto produzido nos modelos de biorrefinarias analisados no presente trabalho; e a Seção IV.4 finaliza o capítulo apresentando uma síntese dos assuntos abordados.

IV.1 – Principais produtos do setor sucroalcooleiro

Os produtos tradicionalmente obtidos da indústria da cana são: o etanol, o açúcar de mesa, o caldo da cana-de-açúcar e energia. O álcool etílico e o caldo de cana (sacarose) destacam-se no contexto das biorrefinarias, pois servem como plataformas para geração de uma gama

de bioprodutos. A seguir será apresentada uma breve revisão destes dois bioprodutos.

IV.1.1 - Caldo da cana-de-açúcar

A importância do caldo de cana está na sacarose, componente principal do caldo. A sacarose é um açúcar resultante da união de uma molécula de glicose com uma molécula de frutose, e com grande versatilidade de transformação em inúmeros bioprodutos. Sendo uma matéria-prima de fonte renovável e de baixo custo, a sacarose vem despertando um crescente interesse como reagente na síntese de derivados de açúcar. Denomina-se sucroquímica o segmento da indústria química que utiliza a sacarose para geração de bioprodutos (FERREIRA *et al.*, 2009).

Comumente, a sacarose é utilizada nas sucroalcooleiras para produção de açúcar de mesa e etanol. Produtos estes que exigem grande volume de produção compatível com a escala de mercado. Devido à grande oferta de açúcar e etanol no mercado e ao baixo grau de diferenciação destes produtos, tanto o etanol quanto o açúcar possuem pouco valor agregado (Antunes *et al.*, 2010).

Os demais produtos químicos gerados da sacarose são, em sua maioria, oriundos de importações e com alto valor agregado, o que contribui para o déficit da balança comercial química do país. Isto gera oportunidades de investimento na produção destes produtos em território nacional (ANTUNES *et al.*, 2010), visto que o Brasil possui inúmeras fontes de sacarose (FERREIRA *et al.*, 2009). A Figura 4 mostra alguns dos produtos químicos obtidos a partir da sacarose em escala industrial por processos químicos ou fermentativos (aeróbicos e anaeróbicos). Muitos destes produtos também são plataformas, podendo gerar outras substâncias (ANTUNES *et al.*, 2010).

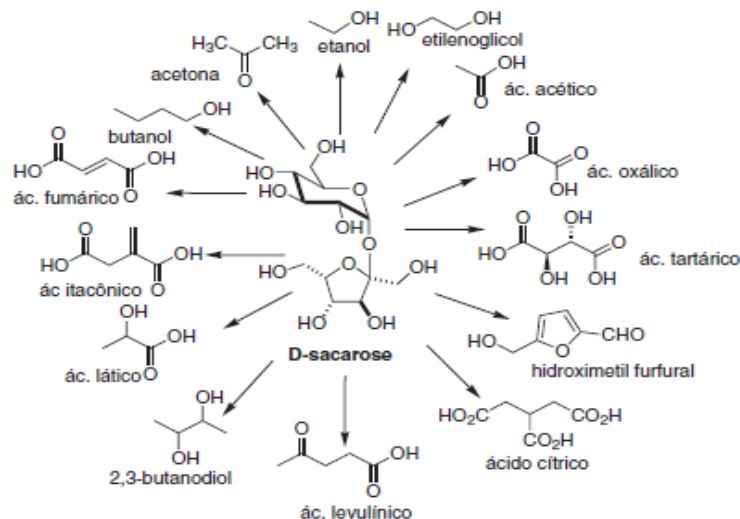


Figura 4: Alguns produtos químicos com baixas massas moleculares obtidos a partir da sacarose (ANTUNES *et al.*, 2010)

IV.1.2 - Etanol

O etanol, álcool etílico, é obtido através da fermentação da sacarose (Figura 5). É comum a sua aplicação para fins energéticos (biocombustíveis), domésticos ou industriais (produção de cosméticos e etc). Entretanto, são muitas as oportunidades vislumbradas para o etanol, visto que o mesmo serve como plataforma para fabricação de diversos produtos químicos. Ao uso do etanol como plataforma dá-se o nome de álcoolquímica. (ANTUNES *et al.*, 2010)



Figura 5: Equação de obtenção do etanol a partir da sacarose

A álcoolquímica teve início no Brasil nas primeiras décadas do século XX. As empresas Elekeiroz, Usina Colombina e Rhodia destacaram-se neste período pela produção de cloreto de etila, ácido acético, anidrido acético, acetato de celulose e éter etílico. Desde o seu surgimento a álcoolquímica é diretamente afetada pelo setor petroquímico, pois a maior parte dos seus produtos também pode ser obtida pelo processamento do petróleo. Assim, flutuações no preço do petróleo afetam diretamente o setor álcoolquímico. Um patamar baixo de preço poderia inviabilizar

investimentos neste setor, tornando-o impraticável economicamente (Garcia *et al.*, 2015).

Apesar da inconstância da alcoolquímica por influência da petroquímica, a química do etanol ainda é considerada uma alternativa para o desenvolvimento de biorrefinarias pela diversidade de produtos que podem ser gerados. A Figura 6 mostra um esquema com alguns dos produtos obtidos do etanol para a aplicação em biorrefinarias.

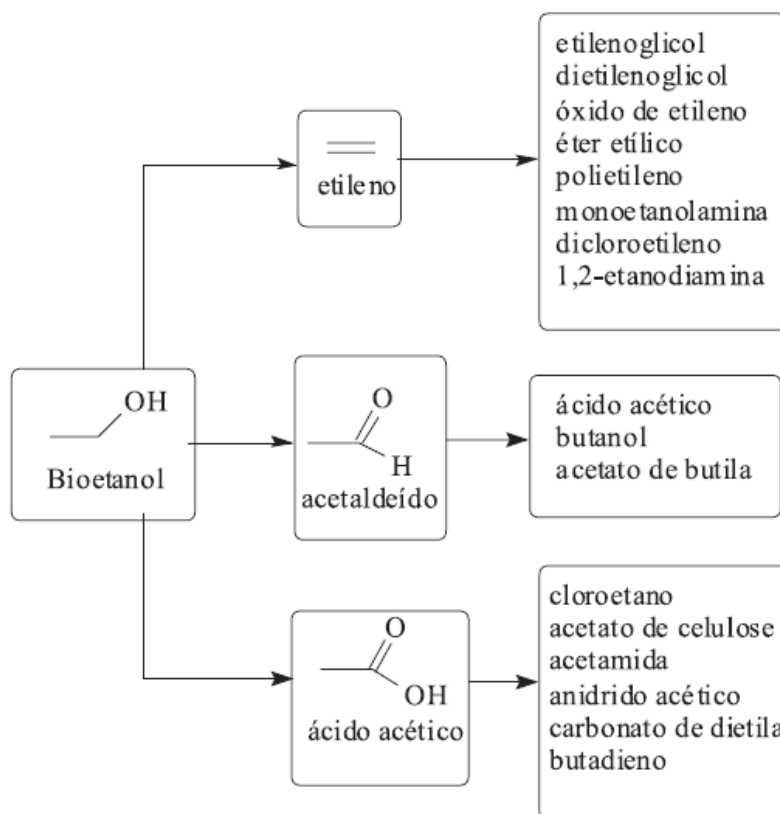


Figura 6: Alguns produtos oriundos da alcoolquímica que possuem potencial como plataformas em biorrefinaria (RODRIGUES, 2011)

IV.2 – Principais resíduos do setor sucroalcooleiro

O crescimento do consumo de produtos derivados da cana **encoraja** uma expansão da produção e, conseqüentemente, a geração de resíduos do setor sucroalcooleiro. Com efeito, o processamento de resíduos sucroalcooleiros tende a aumentar consideravelmente nos próximos anos. O aproveitamento desse tipo de resíduo ocorre não apenas pela preocupação ambiental, mas também pela potencial geração de lucro e

redução do desperdício (JÚNIOR, 2011). Um exemplo disso é o uso do bagaço para cogeração de energia e produção de biocombustíveis.

Os principais resíduos do setor sucroenergético são a vinhaça, o gás carbônico, o bagaço, a palha e a torta de filtro. Atualmente, com exceção do gás carbônico, todos estes resíduos são reaproveitados de alguma forma. A relevância desses resíduos para as biorrefinarias é abordada nas subseções seguintes.

IV. 2.1 - O Bagaço e a Palha

A palha e o bagaço da cana-de-açúcar são matérias-primas lignocelulósicas tendo em sua composição química a celulose, hemicelulose, lignina, cinzas e outros componentes com quantidades não expressivas. Estes outros componentes incluem compostos orgânicos também chamados de extrativos (ésteres, álcoois, esteróides e outros) e inorgânicos (sulfatos, oxalatos, carbonatos e silicatos de cálcio, potássio e magnésio, principalmente) que podem variar em quantidade devido as modificações genéticas e as condições de cultivo (SANTOS, 2012).

Os componentes que mais se destacam, tanto na palha quanto na cana, são a celulose, a hemicelulose e a lignina. A celulose e a lignocelulose devido à possibilidade de transformação em açúcares, plataformas para geração de outros produtos, e a lignina pelo seu alto teor energético.

A celulose, $(C_6H_{10O_5})_n$, é o principal componente da parede celular da fibra vegetal. Trata-se de um polímero de cadeia longa, composto de apenas um tipo de monômero (glicose) e por isso classificado como homopolissacarídeo (SANTOS, 2012).

Diferente da celulose, as hemiceluloses são constituídas por vários tipos de unidades de açúcares pertencentes aos grupos das pentoses, hexoses, ácidos hexourônicos e desoxiexoses, tais como glicose, galactose, manose, xilose, arabinose e ácido glicurônico. As macromoléculas de hemicelulose encontram-se intercaladas às microfibrilas de celulose, promovendo a elasticidade e impedindo que elas se toquem. Além disso, desempenham funções de regulação do crescimento e desenvolvimento das plantas. São também solúveis em água e facilmente solubilizadas em solução alcalinas. São fundamentalmente amorfas, sendo mais suscetíveis

a pré-tratamentos químicos do que a outros tipos de pré-tratamentos (SANTOS, 2012).

A lignina é uma substância de estruturas complexa, bastante heterogênea, macromolécula tridimensional fenilpropanóidica formada pela polimerização dos álcoois p-cumarílico, coniferílico e sinapílico. A proporção destes três compostos resulta em diferentes tipos de ligninas. As ligninas formadas pela combinação dos álcoois coniferílico e p-cumarílico apresentam estruturas mais complexas do que as formadas pelos álcoois coniferílico e sinapílico. Existe também uma variação na composição e na organização dos constituintes da lignina de uma espécie para outra, dependendo da matriz de celulose-hemicelulose. A função da lignina, associada à celulose na parede celular, é conferir rigidez, impermeabilidade e resistência aos tecidos vegetais a ataques microbiológicos e mecânicos (SANTOS, 2012).

A proporção de cada um dos principais componentes do bagaço e da palha da cana está apresentada na Tabela 5.

Tabela 5: Composição química de diferentes biomassas lignocelulósicas com potencial para obtenção de etanol de segunda geração (Fonte: SANTOS *et al.*, (2012)).

Biomassa Lignocelósica	% Celulose	% Hemicelulose	% Lignina
Palha de cana	40-44	30-32	22-25
Bagaço de cana	32-48	19-24	23-32
Madeira dura	43-47	25-35	16-24
Madeira mole	40-44	25-29	25-31
Talo de milho	35	25	35
Espiga de milho	45	35	15
Algodão	95	2	0,3
Palha de trigo	30	50	15
Sisal	73,1	14,2	11
Palha de arroz	43,3	26,4	16,3
Forragem de milho	38-40	28	7-21
Fibra de coco	36-43	0,15-0,25	41-45
Fibra de bananeira	60-65	6-8	5-10
Palha de cevada	31-45	27-38	14-19

Pela proporção em que são produzidos e devido à sua composição, o bagaço e a palha são um dos mais importantes subprodutos para a

indústria sucroalcooleira. Suas aplicações atuais são: combustível para caldeira, co-geração de energia e na alimentação de gado confinado. Porém, podem também servir para geração de biocombustíveis e outros bioprodutos (ALCARDE, 2009).

IV. 2.2 – A vinhaça e a torta de filtro

A vinhaça é o subproduto da destilação do licor de fermentação do álcool da cana-de-açúcar. Trata-se de um líquido residual, também conhecido regionalmente por restilo ou vinhoto. O constituinte principal da vinhaça é a matéria orgânica, basicamente sob a forma de ácidos orgânicos e, em menor quantidade, por cátions como o potássio, cálcio e magnésio (Happi *et al.*, 1992). A proporção de cada elemento dependerá da fermentação adotada, do tipo de levedura e do aparelho utilizado para destilação (MANOCHIO, 2015). Para cada tonelada de cana processada, 80 litros a 120 litros de vinhaça são gerados (BONASSA *et al.*, 2015).

Já a torta de filtro é um resíduo proveniente da filtração do caldo de cana extraído no filtro rotativo através de moenda (NOGUEIRA *et al.*, 2013). Sua composição varia conforme a variedade da cana, tipo de solo, maturação da cana, processo de clarificação do caldo e outros. Tem-se cerca de 40 kg de torta de filtro por tonelada de cana moída, a qual possui 75% da sua composição em água e a porcentagem restante constituída de cálcio, nitrogênio e potássio (NOGUEIRA *et al.*, 2013).

A aplicação mais comum desses resíduos é como adubo no plantio da cana-de-açúcar. A torta de filtro é rica em fósforo. Os solos brasileiros são pobres em fósforo, provocando distúrbios no metabolismo e desenvolvimento das plantas (BONASSA *et al.*, 2015). A vinhaça, por sua vez, promove a correção do pH do solo, aumentando a capacidade de troca catiônica (CTC), a disponibilidade de certos nutrientes e a retenção de água, além de ajudar no desenvolvimento da microflora e microfauna do solo (LAIME *et al.*, 2011).

Tanto a torta de filtro quanto a vinhaça têm sua aplicação restrita no solo em decorrência do excesso de carga orgânica que podem causar. O excesso de carga orgânica aumenta a demanda química de oxigênio tanto no solo como em lençóis freáticos, por contaminação (RAMALHO *et al.*, 2001).

O excesso de potássio ocasionado pelo uso da vinhaça também pode causar danos, tais como percolagem e lixiviação do solo. Para a torta de filtro existe restrição a sua aplicação no solo devido à concentração de metais pesados existentes neste resíduo, a qual não é absorvida pelas plantas (RAMALHO *et al.*, 2001).

No caso específico da vinhaça oriunda da produção do E2G, o risco de contaminação é ainda maior do que os outros tipos de vinhaça, visto que o teor de carga orgânica em biomassas lignocelulósicas é maior do que os encontrados nos demais tipos de biomassa (MANOCHIO, 2015). Pela Tabela 6 é possível comparar o nível de carga orgânica encontrada na vinhaça de vários tipos de biomassa pelo valor da DQO¹⁰. É possível observar que a DQO da vinhaça 2G, vinhaça oriunda do processamento de biomassa lignocelulósica, pode ser de 4 a 5 vezes maior do que a vinhaça 1G. Ainda, a vinhaça oriunda de materiais lignocelulósicos pode conter altos níveis de metais pesados provenientes dos processos de hidrólise ácida e a presença de inibidores incomuns, como compostos extraídos da madeira associados aos compostos fenólicos presentes na matéria-prima (MANOCHIO, 2015). Também é possível notar na Tabela 6 que, ao contrário da vinhaça de etanol 1G, o teor de nutrientes encontrados na vinhaça 2G (nitrogênio, fósforo e potássio) é baixo ou quase nulo. É provável então que não haja interesse no aproveitamento da vinhaça 2G para fertirrigação.

Tabela 6: Caracterização de algumas correntes de vinhoto (SILVEIRA *et al.*, 2012)

Parâmetro	Matéria prima utilizada na fermentação			
	Melaço	Caldo de cana	Misto (caldo de cana + melaço)	Lignocelulose
pH	4,2 - 5,0	3,7 - 4,6	4,4 - 4,6	4,0 - 4,9
Temperatura (°C)	80 - 100	80 - 100	80 - 100	--
DBO ₅ (g O ₂ /L)	25	6 - 16,5	19,8	31,5 - 87,7
DQO (g O ₂ /L)	65	15 - 33	45	75,8 - 109,7
Relação DBO ₅ /DQO	0,39	0,45	0,44	0,39 - 0,80
Sólidos totais (mg/L)	81.500	23.700	52.700	467 - 5805 ^a
Sólidos voláteis (mg/L)	60.000	20.000	40.000	454 - 5715 ^a
Sólidos fixos (mg/L)	21.500	3.700	12.700	13 - 707 ^a
Nitrogênio (mg N/L)	450 - 1.610	150 - 700	480 - 710	205 - 462
Fósforo (mg P ₂ O ₅ /L)	100 - 290	10 - 210	9 - 200	100,5
Potássio (mg K ₂ O/L)	3.740 - 7.830	1.200 - 2.100	3.340 - 4.600	40 - 88
Cálcio (mg CaO/L)	450 - 5.180	130 - 1.540	1.330 - 4.570	8 - 12
Magnésio (mg MgO/L)	420 - 1.520	200 - 490	580 - 700	16 - 24
Sulfato (mg SO ₄ ²⁻ /L)	6.400	600 - 760	3.700 - 3.730	44 - 366
Carbono (g C/L)	11,2 - 22,9	5,7 - 13,4	8,7 - 12,1	22,7 - 33,2
COT(g C/L)	--	--	--	22,7 - 32,6
Relação C/N	16,00 - 16,27	19,70 - 21,07	16,40 - 16,43	49,2 - 124,9
Matéria orgânica (mg/L)	63.400	19.500	3.800	--
Substâncias redutoras (mg/L)	9.500	7.900	8.300	9166 ^b
Fenóis totais (mg/L)	--	--	--	0,4 - 12,4

Onde: SST: sólidos suspensos totais; SSF: sólidos suspensos fixos; SSV: sólidos suspensos voláteis; DQO: demanda química de oxigênio; DBO: demanda bioquímica de oxigênio; COT: carbono orgânico total; ART: açúcares redutores totais.

¹⁰ A Demanda Química de Oxigênio (DQO) é a medida convencionalmente utilizada na área de tratamento de resíduos para indicar o teor de material orgânico do substrato. É medida de forma indireta por meio da oxidação da matéria orgânica

Entretanto existem outras aplicações encontradas na literatura para estes subprodutos, como a combustão para geração de energia. Esta aplicação necessita de uma grande quantidade de energia para promover a evaporação da água contida na torta de filtro e na vinhaça (LAIME *et al.*, 2011). No caso da vinhaça existem estudos que citam sua utilização na construção civil, associado ao cimento, e no mosto, como auxílio na fermentação no açúcar. Porém a aplicação mais viável no contexto das biorrefinarias, tanto para a vinhaça quanto para a torta de filtro, é na produção de biogás (LAIME *et al.*, 2011).

O biogás é um dos produtos da biodigestão anaeróbia de uma biomassa. Sua composição é uma mistura de gases onde o metano e o dióxido de carbono estão em maiores proporções. O potencial energético do biogás está em função da quantidade de metano contida no gás, determinando seu poder calorífico. O teor de metano varia de 40 a 75% dependendo da fonte geradora, como pode ser observado na Tabela 7. A quantidade de biogás produzido na biodigestão corresponde somente a 2,0 a 4,0% do peso da matéria orgânica utilizada no processo. O segundo subproduto fabricado com o biogás é a biomassa não digerida. O interessante para o caso da torta de filtro e da vinhaça é que a biomassa não perde seu valor nutritivo para a adubação orgânica, podendo após a biodigestão ser utilizada normalmente na fertirrigação (GRANATO, 2003).

Tabela 7: Composição média do biogás proveniente de diferentes resíduos orgânicos

(CASTANON, 2002 apud SALOMON, 2007)

Gases	Porcentagem (%)
Metano (CH ₄)	40 – 75
Dióxido de Carbono (CO ₂)	25 – 40
Nitrogênio (N)	0,5 – 2,5
Oxigênio (O)	0,1 – 1
Acido sulfídrico (H ₂ S)	0,1 – 0,5
Amônia (NH ₃)	0,1 – 0,5
Monóxido de Carbono (CO)	0 – 0,1
Hidrogênio (H)	1 - 3

O biogás tem seu uso mais comum na geração de energia térmica através de sua combustão. Nas plantas sucroalcooleiras, por exemplo, esse calor pode ser usado nas caldeiras. Em biorrefinarias integradas, o calor gerado pelo biogás pode reduzir a demanda por bagaço e palha, destinando estes coprodutos para produção de outros bioprodutos, mas existem trabalhos que comentam sobre a aplicação de biogás para secagem de leveduras (LAIME *et al.*, 2011; MORAES *et al.*, 2015). Existe ainda a possibilidade do uso do metano, contido no biogás, como

combustível. O metano substituiria o diesel em automóveis urbanos e em tratores utilizados na colheita da cana. Pode-se ainda aplicar o próprio biogás como combustível de transporte. No entanto não existem atualmente motores de pesados no mercado que operam exclusivamente com esse combustível. Os atuais motores pesados a base de diesel convertido em motores a biogás ainda precisam ser complementados com diesel. A quantidade de diesel suplementado é dependente do grau de purificação de biogás, porque os motores a diesel trabalham com um excesso de ar e, portanto, o teor de CO₂ iria ocupar parte da câmara de combustão, o que pode resultar na redução de energia. (MORAES *et al.*, 2015).

O processo para obter o biogás é a biodigestão anaeróbia. Este processo consiste na conversão da matéria orgânica, em ausência de oxigênio, gerando metano, gás carbônico e outros subprodutos. A biodigestão envolve processos metabólicos complexos que ocorrem em etapas sequenciais, executadas por um consórcio de microrganismos atuando de forma simbiótica, onde o produto de um grupo é o substrato de outro. As principais reações bioquímicas envolvidas no processo dependem de pelo menos três grupos de microrganismos: bactérias fermentativas (ou acidogênicas); bactérias sintróficas (ou acetogênicas) e microrganismos metanogênicos. Cada um desses microrganismos possui uma função específica no sistema de digestão anaeróbia (JUNIOR, 2013). E cada tipo de microorganismo possui suas condições ótimas de trabalho. As bactérias formadoras de ácidos, por exemplo, são bastante resistentes a mudanças das condições externas e de alimentação da fermentação, ao contrário das arqueas metanogênicas, que são bastante suscetíveis a alterações nas condições ambientais (JUNIOR, 2013).

A diversidade de microrganismos com diferentes parâmetros determina um dos desafios a ser superado para o avanço da produção do biogás nas biorrefinarias: alcançar as condições ótimas no biodigestor, capazes de obter eficiência técnica na produção do biogás. Este desafio engloba outras barreiras técnicas criadas pelo conhecimento superficial da digestão anaeróbia. Segundo Moraes *et al.*, (2015) existe uma predominância de abordagens empíricas dos estudos fundamentais de digestão anaeróbia da vinhaça, o que pode gerar uma escassez de informações para o desenvolvimento da técnica do biogás. Como a torta de filtro tem composição semelhante à vinhaça, estendem-se estes desafios para a digestão anaeróbia da torta de filtro.

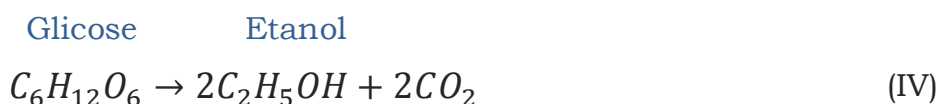
Ainda abordando os desafios da produção de biogás, pelo trabalho de Moraes *et al.*, (2015) é possível encontrar três desafios a serem

ultrapassados. O primeiro desafio refere-se ao uso desses coprodutos na fertirrigação. Esta aplicação ainda se mostra mais segura do que a geração de biogás devido ao maior conhecimento (em relação ao biogás) sobre suas vantagens e desvantagens. O segundo desafio está nos resultados não satisfatórios da produção em escala do biogás. O último desafio está na falta de incentivos, principalmente governamentais, que valorizem o biogás como fonte de energia.

Como já foi dito, o biogás pode ser utilizado na própria biorrefinaria para gerar calor, pode ser utilizado na geração de energia elétrica ou como biocombustível de transporte. O uso mais promissor é como biocombustível de transporte. Todavia, sua aplicação em substituição aos combustíveis de transporte necessita de investimentos tecnológicos em veículos, para que sejam capazes de utilizar o biogás. Porém o uso do metano, gás combustível extraído do biogás, em veículos possui tecnologia mais avançada. Para extrair o metano do biogás são necessários processos adicionais de limpeza e separação dos componentes do biogás, visto que componentes como a água e o dióxido de carbono prejudicam o processo de queima, tornando-o menos eficiente. Também há a presença de gás sulfídrico (H_2S) que pode acarretar corrosão, diminuindo tanto o rendimento quanto à vida útil do motor térmico (Salomon, 2007). Estes tratamentos de limpeza e separação representam um custo adicional que pode inibir sua implementação. Além disso, os processos de armazenagem e transporte não são processos simples. O metano é um gás leve, o que dificulta sua compressão (Salomon, 2007).

IV. 2.3 – Dióxido de carbono

O dióxido de carbono é gerado como resíduo do processo fermentativo do açúcar a etanol, segundo a Equação IV.



O fluxo de CO_2 liberado durante o processo de fermentação é altamente concentrado e com poucas impurezas quando comparado com o mesmo gás oriundo de fontes fósseis. Como consequência, para a implementação de um processo de recuperação de dióxido de carbono nas destilarias de etanol, seriam necessárias apenas as etapas de desidratação e de compressão do gás. Isto caracteriza a cadeia de captura e estocagem

do CO₂ oriundo da fermentação da biomassa como uma cadeia de baixo custo (KHESHGI *et al.*, 2005).

A quantidade de dióxido de carbono gerado na fermentação do açúcar é considerada modesta em relação à quantidade de biomassa utilizada por hectare. Além disso, a produção sazonal de CO₂ dificulta a consolidação de uma demanda para o gás. Contudo, a comercialização deste resíduo é vista como um nicho de mercado, pois reduziria o impacto ambiental da geração de CO₂ na produção e no uso do etanol e poderia ser direcionado para consumidores do setor alimentício e farmacêutico, visto que ambos os setores necessitam de gás CO₂ com elevado grau de pureza (KHESHGI *et al.*, 2005).

IV.3 – Sobre o Ácido succínico

O Ácido Succínico é um ácido orgânico cuja nomenclatura clássica é o ácido butanodióico. Pela sua estrutura química, apresentada na Figura 7, trata-se de um ácido dicarboxílico, devido à presença do grupo carboxila (–COOH) em cada extremidade, composto de quatro átomos de carbono (SANTOS, 2011).

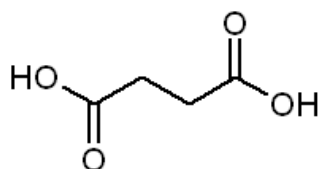


Figura 7: Estrutura química do ácido butanodióico

O ácido succínico é uma das plataformas químicas mais promissoras, o que motivou a escolha deste bioproduto para este estudo (BOZELL *et al.*, 2010). Isto porque sua estrutura química é flexível devido a reatividade dos dois grupos carboxílicos funcionais presentes no ácido succínico, que permitem a geração de produtos finais versáteis e a alta eficiência na fermentação (PATERAKI *et al.*, 2016). Além disso, o ácido succínico pode ser obtido de fontes renováveis de baixo custo, tais como resíduos lignocelulósicos, como o bago e a palha da cana (PATERAKI *et al.*, 2016).

São muitas as aplicações do ácido succínico, tais como intermediário químico para a produção de lacas e ésteres de perfume, bem como para fabricação de sabores, agente bacteriostático ou neutralizante na indústria alimentar. O ácido succínico também tem um mercado

químico especial para produtos tensioativos, corantes, detergentes, solventes, plásticos biodegradáveis, e ingredientes estimulantes do crescimento animal e vegetal. Com base na sua estrutura, o ácido succínico pode ser prontamente convertido em outros produtos químicos, tal como butanodiol. Alguns trabalhos também citam que a policondensação térmica do ácido succínico gera um novo polímero biodegradável, poli (succinato de 1,3-propileno) (CHENG *et al.*, 2012).

O ácido succínico pode ser produzido comercialmente por síntese química envolvendo a hidrólise de produtos derivados do petróleo, os quais estão associados a processos ambientalmente não favoráveis. Esse processo se dá com a oxidação do butano até anidrido maleico, que é hidrolisado até obtenção do ácido maleico. Em seguida, o ácido succínico é obtido através da hidrogenação do ácido maleico. O custo elevado para a conversão de anidrido maleico representa uma limitação para as diversas aplicações do ácido succínico (BORGES, 2011).

Todavia, o apelo por rotas com menor impacto ambiental negativo fez com que se discutisse a obtenção do ácido succínico por rotas fermentativas, como a fermentação anaeróbia do açúcar na presença de dióxido de carbono. O interessante desta rota no contexto das biorrefinarias é que, além de reaproveitar o gás carbônico emitido na fermentação do açúcar C6, o ácido succínico pode ser gerado da fermentação do açúcar C5 oriundo da biomassa lignocelulósica. A utilização do açúcar C5 é uma vantagem para biorrefinarias que processam biomassa lignocelulósica, visto que a fermentação do C5 a etanol não tem se mostrado bem sucedida (KUGLARZ *et al.*, 2016).

Existe ainda outra motivação para a abordagem da produção de ácido succínico ao contexto de uma biorrefinaria, principalmente quando ocorre produção de biogás. O biogás pode ser utilizado como fonte de dióxido de carbono, gás necessário para geração de ácido succínico (lembrando que existe cerca de 25-40% de dióxido de carbono), dispensando a necessidade das etapas de separação e limpeza do biogás para obtenção de metano puro (GUNNARSSON *et al.*, 2014). Isto porque a produção de ácido succínico utilizando biogás, gera como co-produto um gás puro em metano.

No entanto, a produção de ácido succínico tem sua rentabilidade reduzida devido às etapas de recuperação do ácido orgânico logo após a fermentação. Alguns processos industriais requerem o ácido succínico livre, sendo necessário remover todas as impurezas geradas na produção (células, proteínas, sais e subprodutos). Porém, para que a recuperação do

ácido succínico ocorra de forma eficaz industrialmente, melhoras substanciais nas tecnologias de separação são necessárias (BORGES, 2011). De acordo com o Relatório *Sugar Platform* (E4TECH *et al.*, 2015), o ácido succínico está atingindo um nível de implementação comercial (Figura 8). Deste modo, em relação ao TRL descrito no Capítulo IV, o ácido succínico está entre 7 e 8.

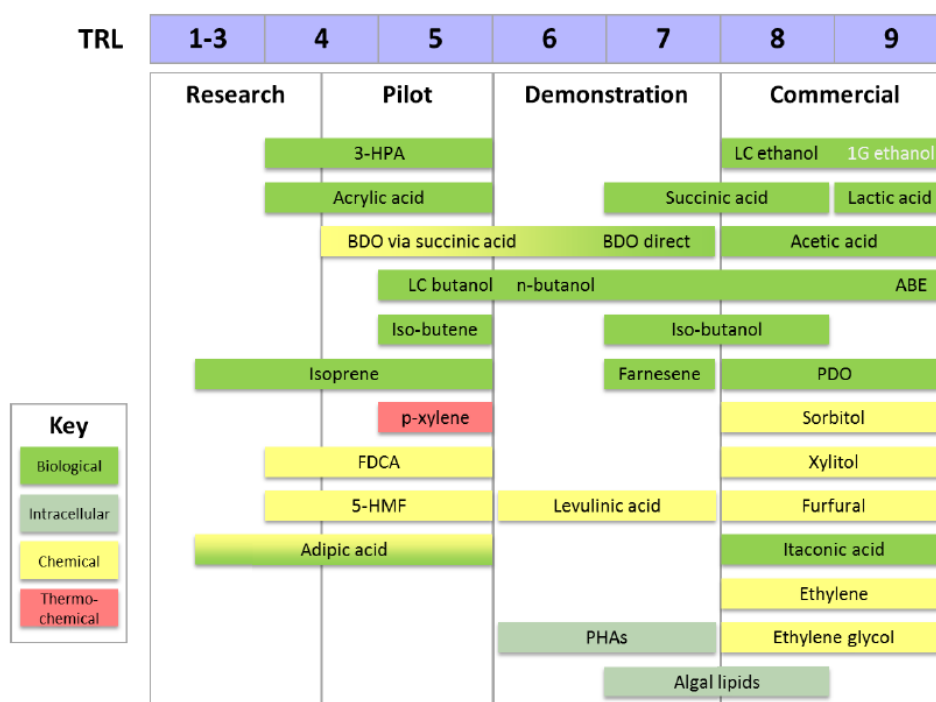


Figura 8: Estado de Comercialização de 25 produtos selecionados da plataforma de açúcar. Fonte: (E4TECH *et al.*, 2015)

IV.4 – Síntese do capítulo IV

Neste Capítulo foi possível comprovar as potencialidades do setor sucroalcooleiro na alavancagem das biorrefinarias. Na Seção IV.1 destacou-se a importância do etanol e da sacarose como plataformas na biorrefinaria, pois ambos são capazes de gerar produtos competitivos que podem representar uma oportunidade de investimento.

Identificam-se ainda oportunidades na exploração dos resíduos do setor sucroalcooleiro. Conforme visto na Seção IV.2, os principais resíduos do processamento da cana podem ser convertidos em produtos de maior valor agregado. Deste modo, os produtos gerados dos resíduos aumentam o lucro das biorrefinarias e permitem, assim, amortizar os custos de produção do etanol, conferindo maior competitividade ao biocombustível frente aos combustíveis fósseis. A Tabela 8 resume as oportunidades e desafios encontrados nos principais resíduos do processamento da cana.

Tabela 8: Resumo das principais oportunidades e desafios dos resíduos de maior relevância no setor sucroalcooleiro

RESÍDUO	OPORTUNIDADE PRINCIPAL	DESAFIOS
Palha	E2G/ energia/ ácido succínico	Disponibilidade da palha/ processamento
Bagaço	E2G/energia/ ácido succínico	Competição entre a cogeração de energia e o E2G
Vinhaça/vinhoto	Biogás	Custo elevado do biodigestor/dificuldades no processamento
Torta de Filtro	Biogás	Custo elevado do biodigestor/dificuldades no processamento
Gás carbônico	Venda/produção de ácido succínico	Custo alto na captura e armazenamento/ sazonalidade da produção

Este capítulo também abordou na Seção IV.3 o ácido succínico como um produto de potencial interesse comercial para as biorrefinarias à base de cana. Além do potencial como plataforma química, a produção de ácido succínico pode se beneficiar dos resíduos sucroalcooleiros. O gás carbônico oriundo da fermentação alcoólica pode ser utilizado na produção do ácido succínico, assim como o biogás gerado da biodigestão da vinhaça e da torta de filtro e as pentoses geralmente não fermentadas a etanol.

As inúmeras possibilidades de aproveitamento dos resíduos e de geração de bioprodutos no setor sucroalcooleiro possibilitam a criação de variadas biorrefinarias com arranjos distintos. Como observado neste capítulo, cada tecnologia ou arranjo possuirá vantagens e desvantagens que muitas vezes refletem a falta de informações pertinentes ao desenvolvimento da tecnologia adotada e do mercado em que estão inseridas. Todas essas desvantagens se dedundam em desafios que contribuem para formação da complexidade em biorrefinarias, a qual é abordada neste trabalho. A metodologia aplicada para o estudo das complexidades de biorrefinarias será discutida no próximo capítulo. O Capítulo V apresenta de que maneira foram propostos diferentes modelos de biorrefinaria diante das variadas opções de configurações. Além disso, o Capítulo V aborda como foi quantificada a complexidade em cada modelo de biorrefinaria.

Capítulo V - Metodologia

Este capítulo detalha a escolha da metodologia e sua aplicação no desenvolvimento da dissertação. De início têm-se a Seção V.I que apresenta os modelos de biorrefinarias utilizados como cenários para este trabalho e como esses modelos foram estruturados. Por fim, a Seção V.II discute a metodologia utilizada para mensurar a complexidade das biorrefinarias.

V.1 - Estrutura dos modelos de biorrefinarias

Para avaliação do impacto provocado complexidade de biorrefinarias de cana-de-açúcar pela inserção de tecnologias adicionais, propôs-se a elaboração de seis modelos de biorrefinarias como cenários para a análise da complexidade. Considerou-se que uma biorrefinaria ideal possui integração entre seus processos, permitindo que ocorra um melhor aproveitamento da biomassa e seus resíduos, assim como uma maior diversificação de produtos. Os modelos foram estruturados estabelecendo uma relação de evolução entre si, rumo a biorrefinaria ideal (Figura 9). Desta maneira, os modelos são divididos em três grupos segundo o critério de estruturação: aproveitamento da biomassa sem diversificação de produtos, diversificação de produtos e aproveitamento e valorização de resíduos.

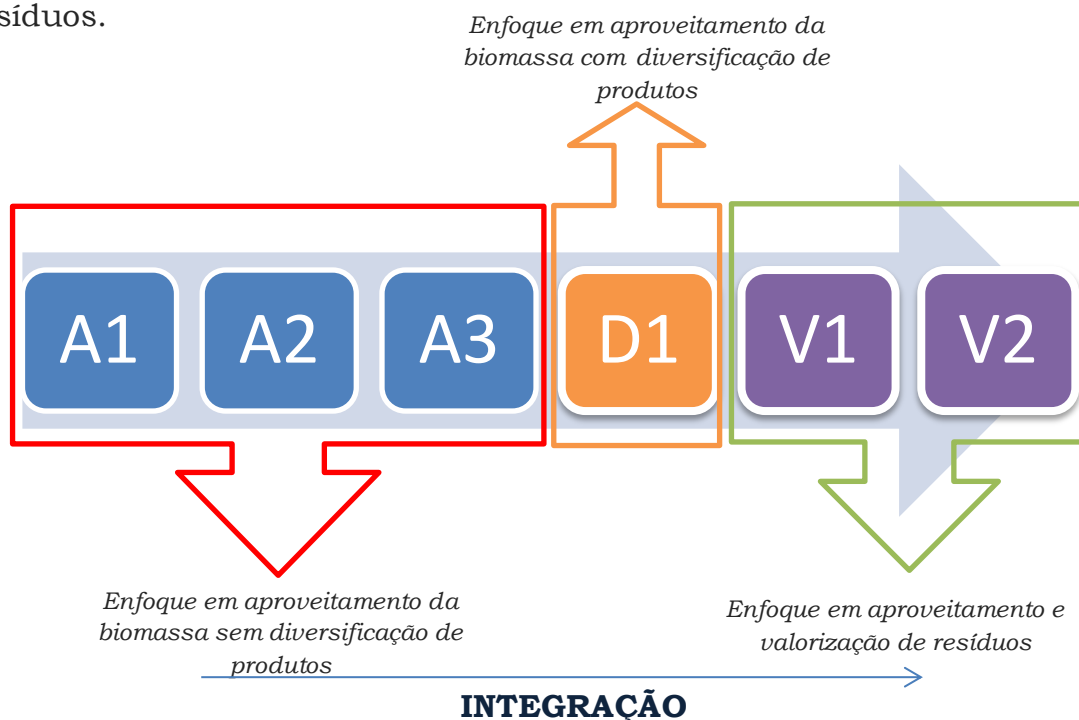


Figura 9: Relação entre os modelos de biorrefinarias utilizados no presente trabalho

Como pode ser observado na Figura 9, de forma crescente, nos três primeiros níveis estão as biorrefinarias criadas com enfoque em aproveitamento de biomassa sem diversificação de produtos (A): Biorrefinaria A1, do tipo básico, com produção de etanol, açúcar e cogeração de energia; Biorrefinaria A2, com produção de etanol 2G a partir do bagaço da cana, geração de etanol 1G, açúcar e cogeração de energia; e Biorrefinaria A3, com produção de etanol 2G a partir do bagaço e da palha geração de etanol 1G, açúcar e cogeração de energia.

Ainda na Figura 9, para o quarto nível tem-se a Biorrefinaria D1. Esta biorrefinaria hipotética tem sua estrutura formada com enfoque em aproveitamento da biomassa como diversificação de produtos (D). A estrutura é semelhante à da Biorrefinaria A3, porém com a adição da produção integrada de ácido succínico. Para os dois últimos níveis, próximos da biorrefinaria ideal, estão as biorrefinarias com enfoque em valorização e aproveitamento de resíduos (V): Biorrefinaria V1, que possui estrutura semelhante à Biorrefinaria A3, porém produz biometano através da biodigestão da vinhaça e da torta de filtro e captura dióxido de carbono da fermentação do açúcar C6 destinado à comercialização; Biorrefinaria V2, que tem estrutura semelhante a da Biorrefinaria V1, todavia produz ácido succínico. Nas seções seguintes, serão apresentadas as particularidades de cada modelo de biorrefinaria. A Tabela 9 mostra um breve resumo dos modelos de biorrefinarias propostos e o critério adotado para sua estruturação.

Tabela 9: Critério adotado para estruturação dos modelos de biorrefinarias

		CRITÉRIO ADOTADO		
		Aproveitamento de biomassa sem diversificação de produtos	Aproveitamento de biomassa com diversificação de produtos	Valorização e aproveitamento de resíduos
MODELO DE BIORREFINARIA	A1	X		
	A2	X		
	A3	X		
	D1		X	
	V1			X
	V2			X

V.1.1 – Modelos de biorrefinarias com foco em aproveitamento da biomassa sem diversificação de produtos

As biorrefinarias criadas com este foco objetivam o aproveitamento completo da cana, considerando a Biorrefinaria A1 como o nível básico de aproveitamento da cana e as Biorrefinarias A2 e A3 ordenadas em modo crescente de aproveitamento da cana.

V.1.1.1 – Biorrefinaria A1

Na Biorrefinaria A1 o processamento da cana-de-açúcar produz açúcar, etanol e energia. A cana-de-açúcar, antes de seguir para as etapas de processamento, gerando produtos, passa por etapas preliminares de preparação, de extração e preparação do caldo. Em seguida, prossegue em etapas distintas de produção de açúcar e etanol. Uma ilustração dos processos da Biorrefinaria A1 está na Figura 10. Os detalhes das etapas preliminares se encontram no Apêndice I.

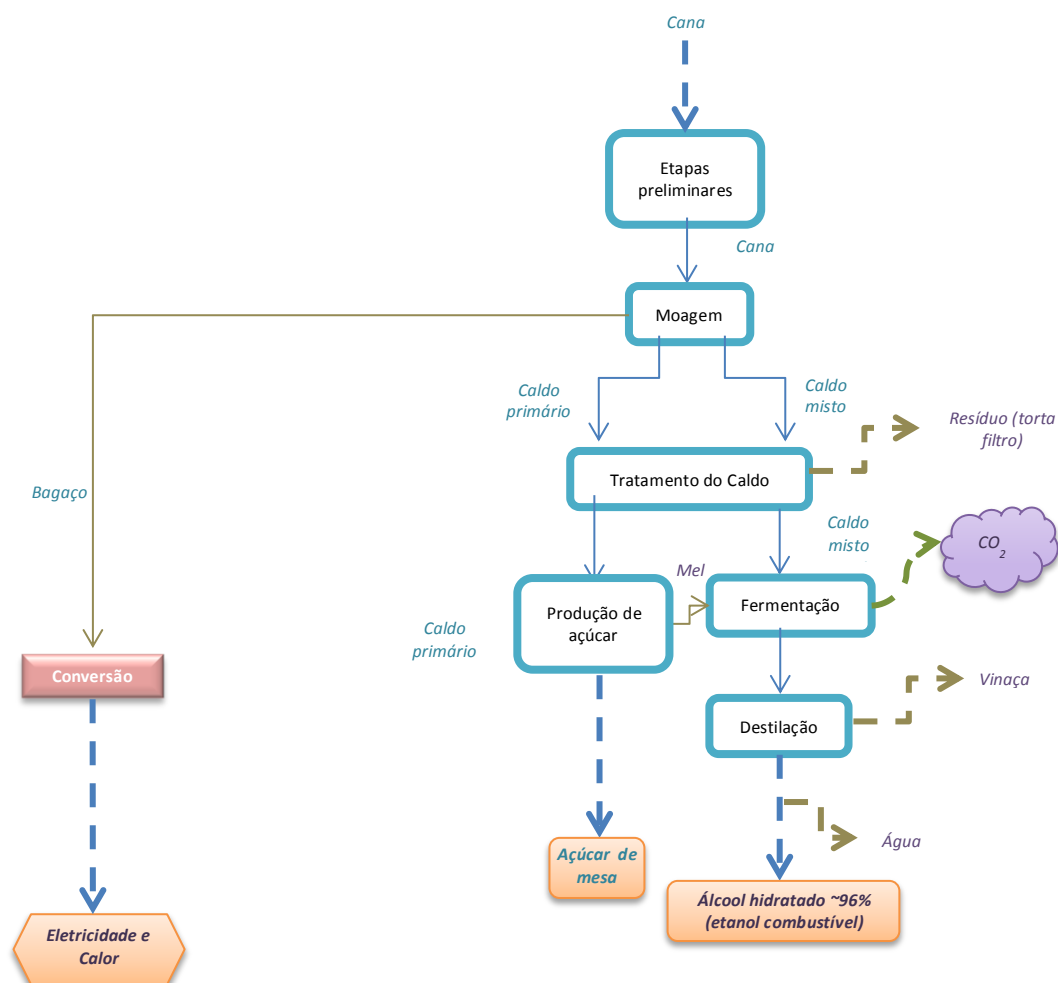


Figura 10: Fluxograma da Biorrefinaria A1

celulose e, dessa forma, permitir a atuação de enzimas específicas na etapa posterior. Existem vários tipos de pré-tratamento, o pré-tratamento escolhido para os modelos de biorrefinaria foi a explosão a vapor por ser frequentemente adotado em vários trabalhos científicos. Deste processo saem duas correntes: celulignina (celulose e uma fração de lignina) e licor de C5 com uma pequena fração de lignina. Em seguida, a celulignina é submetida a um processo de hidrólise enzimática transformação da celulose em açúcar C6, gerando uma corrente sólida residual contendo em grande parte lignina. A corrente sólida segue para a geração de energia e o açúcar C6 é destinado para geração de E2G.

De forma conservadora, não se considera a cofermentação de C5 e C6 ou a fermentação separada do açúcar C5, ainda que essas tecnologias já estejam sendo empregadas em algumas plantas de E2G. Esta observação também é válida para os demais modelos de biorrefinarias.

V.1.1.3 – Biorrefinaria A3

A respeito da Biorrefinaria A3, sua estrutura é semelhante à estrutura da Biorrefinaria A2. Existe, porém, a adição da palha como biomassa lignocelulósica, que será submetida aos mesmos tratamentos sofridos pelo bagaço. Todavia, a palha será submetida a um pré-tratamento adicional de limpeza e cominuição (tratamento mecânico). O produto final oriundo da biomassa lignocelulósica é o etanol de segunda geração. A estrutura está ilustrada na Figura 12.

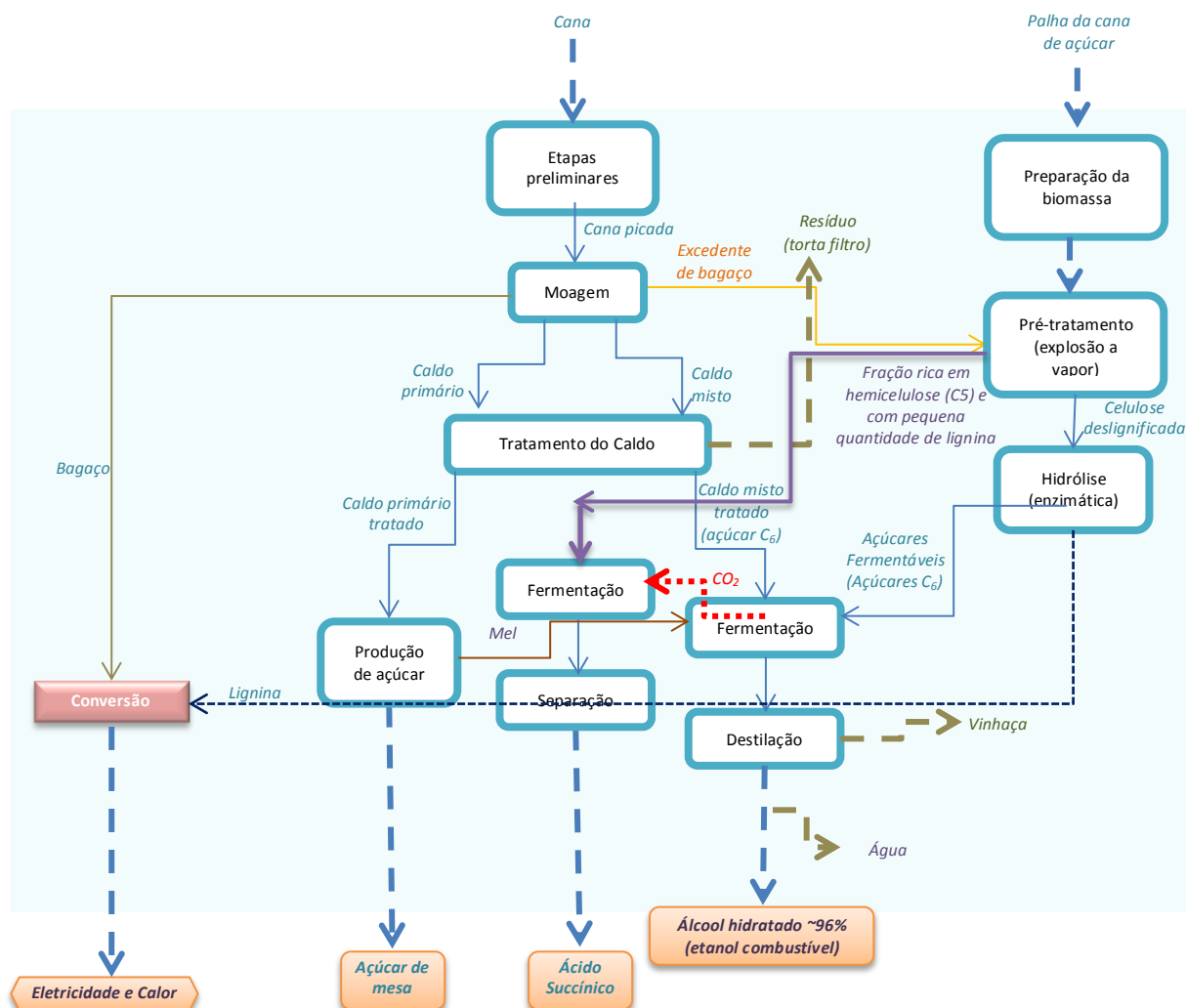


Figura 13: Fluxograma da Biorrefinaria D1

V.1.3 – Modelos de biorrefinarias com foco na valorização e aproveitamento de resíduos do setor sucroalcooleiro

Com base nas vantagens do aproveitamento de resíduos da destilaria de etanol, ressaltadas na Seção IV.2, dois modelos de biorrefinarias foram desenvolvidos: Biorrefinaria V1 (Figura 14) e Biorrefinaria V2 (Figura 15). Na Biorrefinaria V1, além do processamento do bagaço e da palha, ocorre a captura de CO₂ e biodigestão da torta de filtro e da vinhaça gerando biogás. A Biorrefinaria V2, por sua vez, deriva da Biorrefinaria V1, porém possui um processo adicional de produção de ácido succínico a partir da fermentação dos açúcares C5 em presença de dióxido de carbono oriundo do biogás.

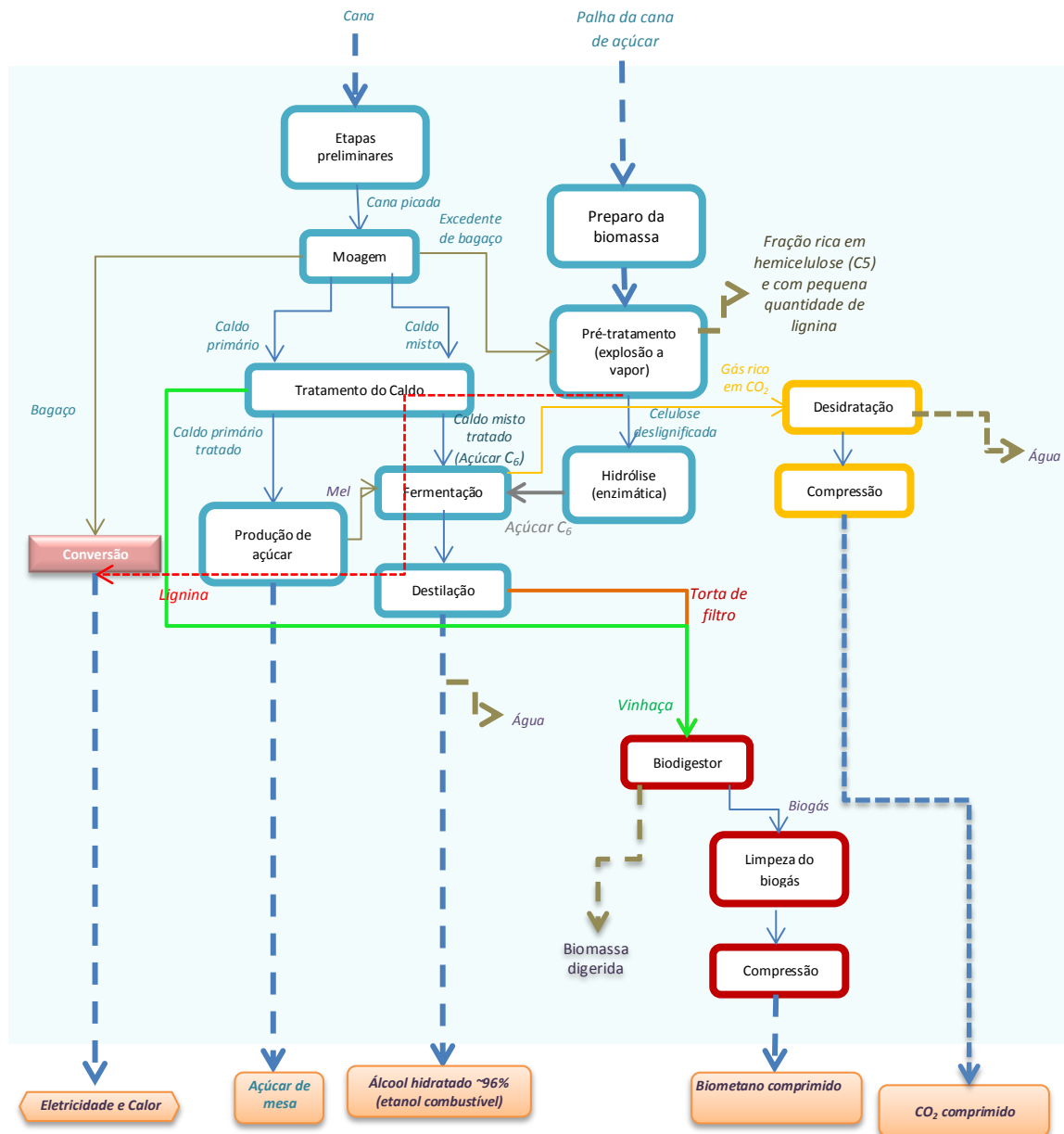


Figura 14: Fluxograma da Biorrefinaria hipotética V1

V.2 – Análise da Complexidade

A análise da complexidade foi realizada pela aplicação da métrica do BCI, proposta no trabalho de Jungmeier *et al.*, (2014). Esta métrica quantifica a complexidade de uma biorrefinaria através do número de características existentes na biorrefinaria e do nível tecnológico (TRL) de cada característica. A escolha desta métrica deve-se a sua aplicabilidade ao caso específico das biorrefinarias.

As características de uma biorrefinaria são definidas pela classificação de biorrefinarias proposta por Cherubini *et al.*, (2009) discriminada na Seção II.2.1. Desta maneira, as subseções seguintes objetivam apresentar mais detalhadamente a identificação das características dos modelos de biorrefinaria (Seção V.2.1), a aplicação do TRL para cada característica (Seção V.2.2) e como esses dados se relacionam com a complexidade na métrica do BCI (Seção V.2.3).

V.2.1 – Identificação das características dos modelos de biorrefinarias.

As características de uma biorrefinaria estão divididas em quatro grupos: plataformas, produtos, processos e matérias-primas (Cherubini *et al.*, 2009). Elas podem ser identificadas através do fluxograma de processos de cada biorrefinaria (Figura 10-Figura 15).

Pela métrica do BCI, estas características compõem a complexidade associadas a um peso, o nível tecnológico (TRL). Como não foi possível obter o TRL para todas as características, processos com TRL desconhecido foram desconsiderados. As características estão descritas na Tabela 10 e o número encontrado ao final de cada célula refere-se ao número total de características.

Tabela 10: Identificação das biorrefinarias hipotéticas segundo a Classificação de Cherubini *et al.*, (2009).

Tipo de biorrefinaria	A1	A2	A3	D1	V1	V2
Critério adotado	Aproveitamento de biomassa sem diversificação de produto	Aproveitamento de biomassa sem diversificação de produto	Aproveitamento de biomassa sem diversificação de produto	Aproveitamento de biomassa com diversificação de produto	Valorização e aproveitamento dos resíduos	Valorização e aproveitamento dos resíduos

Matéria-prima	Cana-de-açúcar(1)	Cana-de-açúcar(1)	Cana-de-açúcar/ palha (2)	Cana-de-açúcar/ palha(2)	Cana-de-açúcar/ palha (2)	Cana-de-açúcar/ palha (2)
Produtos	E1G/ Açúcar de mesa/ Energia (3)	E1G/ E2G/ Açúcar de mesa/ Energia (4)	E1G/ E2G/ Açúcar de mesa/ Energia(4)	E1G/ E2G/ Açúcar de mesa/ Energia/ Ácido succínico (5)	E1G/ E2G/ Açúcar de mesa/ Energia/ / CO ₂ / biometano(7)	E1G/ E2G/ Açúcar de mesa/ Energia/ / CO ₂ / biometano/ Ácido Succínico (8)
Processos	Extração do caldo de cana/ combustão do bagaço/ Fermentação aeróbica do açúcar/ cristalização do açúcar/ Destilação do etanol (5)	Extração do caldo de cana/ combustão do bagaço/ combustão da lignina/ Fermentação aeróbica do açúcar (C6)/ cristalização do açúcar/ Destilação do etanol/Hidrólise enzimática da celulose(bagaço)/ pré-tratamento termo-mecânico da biomassa lignocelulósica (8)	Extração do caldo da cana / pré-tratamento da palha da cana/ combustão do bagaço/ combustão da lignina/ Fermentação aeróbica do açúcar C6/ cristalização do açúcar/ Destilação do etanol/Hidrólise enzimática da celulose(bagaço)/Hidrólise enzimática da biomassa lignocelulósica (explosão a vapor)(10)	Extração do caldo da cana / pré-tratamento da palha da cana/ combustão do bagaço/ combustão da lignina/ Fermentação aeróbica do açúcar C6/ pré-hidrólise da biomassa lignocelulósica (explosão a vapor)/ /Hidrólise enzimática da celulose(bagaço)/Hidrólise enzimática da celulose(palha) / Destilação do etanol/ cristalização do açúcar/Fermentação anaeróbica do açúcar C5 (produção do ácido succínico)/ Separação do ácido succínico)/ Captura do CO ₂ (secagem e compressão) (13)	Extração do caldo da cana / pré-tratamento da palha da cana/ combustão do bagaço/ combustão da lignina/ Fermentação aeróbica do açúcar C6/ pré-hidrólise da biomassa lignocelulósica (explosão a vapor)/ /Hidrólise enzimática da celulose(bagaço)/Hidrólise enzimática da celulose(palha)/ Destilação do etanol/ cristalização do açúcar/ biodigestão da vinhaça e torta de filtro/ Fermentação anaeróbica do açúcar C5 (produção do ácido succínico)/ Captura do CO ₂ (secagem e compressão) (14)	Extração do caldo da cana / pré-tratamento da palha da cana/ combustão do bagaço/ combustão da lignina/ Fermentação aeróbica do açúcar C6/ pré-hidrólise da biomassa lignocelulósica (explosão a vapor)/ /Hidrólise enzimática da celulose(bagaço)/Hidrólise enzimática da celulose(palha)/ Destilação do etanol/ cristalização do açúcar/ biodigestão da vinhaça e torta de filtro/ Fermentação anaeróbica do açúcar C5 (produção do ácido succínico)/ Captura do CO ₂ (secagem e compressão) (14)
Plataformas	Bagaço da cana/ Açúcar C6 (2)	Bagaço da cana/ Açúcar C6 / lignina(3)	Bagaço da cana/ Açúcar C6/ lignina(3)	Bagaço da cana/ Açúcar C6/Açúcar C5/ lignina(4)	Bagaço da cana/ Açúcar C6/ lignina/biogás (4)	Bagaço da cana/ Açúcar C6/Açúcar C5/ lignina/ biogás (5)

Uma simplificação importante, observada na Tabela 10, é que em todas as biorrefinarias, as etapas-preliminares de recepção da cana e desidratação do etanol não foram contabilizadas. Além disso, a etapa de moagem foi considerada como parte da etapa de extração do caldo de cana.

A conversão do bagaço e lignina em energia e calor são contabilizados como processos distintos na Tabela 10 devido a diferença em seus TRL pela natureza da biomassa processada (Figura 27), embora estes mesmos processos sejam representados como sendo um único processo nas Figura 11-Figura 15. O mesmo ocorre nos processos de hidrólise enzimática da celulose oriunda do bagaço e da palha nas biorrefinarias A3 até V2, diferenciando-se pela natureza da biomassa hidrolisada (Figura 28).

Em relação aos produtos é relevante citar que, apesar do E1G e o E2G serem quimicamente idênticos (e por isso serem mesmo produto), a tecnologia de obtenção do E2G distingue-se da tecnologia do E1G. Isto se reflete nos custos e no grau de domínio da tecnologia e, conseqüentemente, no TRL. Por este motivo observa-se na Tabela 10 que os produtos E1G e E2G são computados como produtos distintos.

Ainda sobre as informações contidas na Tabela 10, nota-se que o processo de captura do dióxido de carbono engloba as etapas de lavagem, desidratação (secagem) e compressão, mas não a etapa de captura. Isto porque o dióxido de carbono extraído da fermentação do açúcar C6 possui um elevado grau de pureza, sendo necessária apenas sua exaustão. Assim, o TRL do processo de captura de CO₂ representa a junção do TRL de todas as etapas envolvidas neste processo.

Por fim, é relevante ressaltar que o bagaço, a lignina, os açúcares C5/C6 e o biogás são identificados como plataformas por serem produtos intermediários entre o processamento da matéria-prima (palha e cana) e os produtos finais (etanol, biometano, ácido succínico, etc). Uma característica pode se comportar tanto como plataforma quanto como produto, dependendo da estrutura da biorrefinaria. Em uma biorrefinaria que processa cana, gerando succinato de polibutileno (PBS) a partir do ácido succínico, por exemplo, terá como plataforma o ácido succínico. Isto porque, neste caso o ácido succínico é produto intermediário entre a matéria-prima e o produto final (interno ao sistema).

V.2.2 – Identificação dos TRLs

A maior parte dos valores de TRL das características encontradas na Tabela 10 foi retirada do trabalho de Jungmeier *et al.*, (2014) (Figura 23-Figura 31). O restante foi extraído de outras referências e são apresentados na Tabela 11, seguidos das respectivas referências:

Tabela 11: TRLs das características não encontradas no trabalho de Jungmeier *et al.*, (2014)

Características	TRL	Referência
E2G	8	E4TECH; RE-CORD; WUR, (2015)
Ácido succínico	7 (TRL entre 7-8)	(E4TECH et al., 2015)
Pré-hidrólise da biomassa lignocelulósica (explosão a vapor)	7 (TRL entre 6-8)	E4TECH; RE-CORD; WUR, (2015)
Captura de CO₂ (secagem e compressão)	5 (TRL entre 4-6) ¹¹	Mclaren, (2011)

V.2.3 – Obtenção do BCI

De acordo com a Seção III.2.1, para a métrica do BCI o número de diferentes características de uma biorrefinaria, assim como o estado da tecnologia dessas características, exerce influência sobre sua complexidade. A contribuição do estado tecnológico de cada característica é expressa pela Complexidade Característica (FC), que possui relação com o estado tecnológico ou Nível de Disponibilidade Tecnológica (sigla em inglês *TRL*), correspondente a uma determinada característica. Com os valores dos TRLs correspondentes para cada característica, geram-se os FCs pela Equação III.

$$FC_i = 10 - TRL_i \quad (III)$$

¹¹ Existe outra referência que citou uma faixa maior de TRL para captura de CO₂ oriunda da fermentação: TRL entre 3-7 (KEMPER, 2016).

De posse dos FCs é possível contabilizar o efeito quantitativo das características de uma biorrefinaria através do FCI , Índice de complexidade característica, representado pela Equação II, já mencionada na Seção III.2.1

$$FCI_i = NF_i \times FC_i \quad (II)$$

A soma da contribuição total de cada característica na complexidade da biorrefinaria é regida pela Equação I, citada novamente a seguir.

$$BCI = \sum_{i=1}^4 FCI_i \quad (I)$$

Onde:

i = Característica da biorrefinaria segundo a classificação de biorrefinarias de Cherubini *et al.*, (2009);

$i = \{1,2,3,4\}$; Onde:

1 = Plataforma;

2 = Matéria-prima;

3 = Produtos;

4 = Processos.

FCI_i = Índice de complexidade característica.

O resultado da análise da complexidade nos modelos de biorrefinarias, feita pela métrica do BCI, é detalhada no capítulo a seguir.

Capítulo VI – Resultados e discussões

Este capítulo apresenta detalhadamente o resultado da aplicação da métrica do BCI em cada modelo de biorrefinaria. Além disso, este capítulo examina, por meio do BCI, o efeito de modificações nas características da biorrefinaria sobre sua complexidade. Para este fim este capítulo será dividido em quatro seções. A Seção VI.1 exhibe os resultados da aplicação da métrica do BCI em biorrefinarias com foco em aproveitamento de biomassa sem diversificação de produtos. A Seção VI.2 discute os resultados da aplicação do BCI modelos de biorrefinaria com aproveitamento de biomassa com foco em diversificação de produtos. A Seção VI.3 disserta sobre os resultados da aplicação do BCI em biorrefinarias com aproveitamento de biomassa e foco em aproveitamento e valorização de resíduos sucroalcooleiros. Por fim, a Seção VI.4 finalizará este capítulo discutindo os resultados obtidos.

VI. 1 – Aplicação do BCI em biorrefinarias com foco em aproveitamento da biomassa sem diversificação de produtos

Nesta seção são apresentados os BCIs das Biorrefinarias A1, A2 e A3. Estas biorrefinarias tem como relação o crescente aproveitamento da cana respectivamente: primeiramente apenas o caldo de cana; em seguida, adiciona-se o bagaço; por fim, também a palha é aproveitada.

VI.1.1 – Biorrefinaria A1

As características da Biorrefinaria A1 (Figura 10) foram identificadas através da Tabela 10. Com essas informações foi possível obter as variáveis FC e FCI calculadas a partir das Equações (II) e (III), respectivamente, e gerar o BCI utilizando a Equação (I). A descrição deste cálculo pode ser visualizada na Seção V.2 e o resultado está na

Tabela 12 a seguir.

Tabela 12: Valor de BCI para biorrefinaria A1

Características	Descrição das características	TRL	FC	FCI
Plataformas	Bagaço da cana	9	1	2
	Açúcar C ₆	9	1	
Matéria-prima	Cana-de-açúcar	9	1	1
Produtos	E1G	9	1	3
	Açúcar de mesa	9	1	
	Energia	9	1	
Processos	Extração do caldo	9	1	5
	Combustão do bagaço	9	1	
	Fermentação aeróbica do açúcar (C ₆)	9	1	
	Cristalização do açúcar	9	1	
	Destilação do etanol	9	1	
BCI (Total)				11

A Tabela 12 mostra que o fator com maior peso na complexidade da Biorrefinaria A1 foi os processos, que possui o maior FCI. A contribuição na complexidade ocorreu por consequência do número de processos, dado que todos os processos possuem TRL máximo (peso 1). Deve-se isso à simplicidade dos processos envolvidos, com grau de conhecimento já existente e historicamente aplicado há décadas em diversas unidades industriais.

VI.1.2 – Biorrefinaria A2

De modo análogo ao item VI.1.1, as características da Biorrefinaria V2 (Figura 11) foram identificadas através da Tabela 10. Com essas informações foi possível obter as variáveis FC e FCI calculadas a partir das Equações (II) e (III), respectivamente, e obter o BCI utilizando a Equação

(I). A descrição deste cálculo pode ser visualizada na Seção V.2 e o resultado está na Tabela 13 a seguir:

Tabela 13: Valor de BCI para Biorrefinaria A2

Características	Descrição das características	TRL	FC	FCI
Plataformas	Açúcar C ₆	9	1	5
	Lignina (da Hidrólise)	7	3	
	Bagaço	9	1	
Matéria-prima	Cana-de-açúcar	9	1	1
Produtos	E2G	8	2	5
	E1G	9	1	
	Açúcar de mesa	9	1	
	Energia	9	1	
Processos	Extração da caldo da cana	9	1	12
	Combustão do bagaço	9	1	
	Combustão da lignina	8	2	
	Fermentação aeróbica do açúcar (C ₆)	9	1	
	Cristalização do açúcar	9	1	
	Destilação do etanol	9	1	
	Hidrólise enzimática da celulose (bagaço)	8	2	
	Pré-hidrólise da biomassa lignocelulósica (explosão a vapor)	7	3	
BCI (Total)				23

O aproveitamento do bagaço elevou a complexidade característica dos processos, dos produtos e das plataformas. Como consequência, o BCI da Biorrefinaria A2 é quantitativamente maior que o da Biorrefinaria A1. Nas matérias-primas, porém, o FCI permaneceu constante, pois o bagaço é um subproduto da cana e não poderia ser considerado como uma matéria-prima adicional nessa estrutura.

É importante destacar que estes resultados mostram a influência direta da implementação de uma inovação, elevando a complexidade da biorrefinaria como um todo. O processo de implementação de uma inovação não ocorre de maneira isolada. A presença do “novo” provoca uma busca por novos conhecimentos e por aprendizado. Além disso, toda inovação necessita de gerenciamento mercadológico (TIDD et al., 2008). O gerenciamento da inovação é um desafio que pode se refletir em complexidade para a biorrefinaria, gerando risco e incertezas. Todavia essa complexidade não é considerada na métrica do BCI.

Vale ressaltar também que já se observa neste tipo de biorrefinaria a influência do nível tecnológico (cinco unidades a mais na complexidade) e não apenas no número de características. A causa disso é que o processamento de conversão do material lignocelulósico em biocombustível e em energia está em um grau tecnológico inferior ao do processamento do caldo de cana.

VI.1.3 – Biorrefinaria A3

As características da Biorrefinaria A3 (Figura 12) foram identificadas através da Tabela 10. Com essas informações foi possível obter as variáveis FC e FCI calculadas a partir das Equações (II) e (III), respectivamente, e obter o BCI utilizando a Equação (I). O resultado está exposto na Tabela 14 a seguir:

Tabela 14: Valor de BCI para Biorrefinaria A3

Características	Descrição das características	TRL	FC	FCI
Plataformas	Açúcar C ₆	9	1	5
	Lignina (da Hidrólise)	7	3	
	bagaço	9	1	
Matéria-prima	Cana-de-açúcar	9	1	3
	Palha da cana	8	2	

Produtos	E2G	8	2	5
	E1G	9	1	
	Açúcar de mesa	9	1	
	Energia	9	1	
Processos	Extração do caldo da cana	9	1	16
	Combustão da lignina	8	2	
	Combustão do bagaço	9	1	
	Fermentação aeróbica do açúcar (C6)	9	1	
	Cristalização do açúcar	9	1	
	Destilação do etanol	9	1	
	Hidrólise enzimática da celulose (bagaço)	8	2	
	Hidrólise enzimática da celulose (palha)	8	2	
	Pré-tratamento da palha da cana	8	2	
	Pré-hidrólise da biomassa lignocelulósica (explosão a vapor)	7	3	
	BCI (Total)			

Como esperado, a Biorrefinaria A3 apresenta o maior grau de complexidade dentre as Biorrefinarias com enfoque em aproveitamento da biomassa, ou seja, possui o maior valor de BCI segundo a metodologia proposta por Jungmeier *et al.*, (2014). Entretanto, o crescimento na complexidade da Biorrefinaria A3 em relação à Biorrefinaria A2 foi menor que o crescimento observado na Biorrefinaria A2 em relação à Biorrefinaria A1. Isto ocorre porque a estrutura de processos da Biorrefinaria A3 é praticamente a mesma da Biorrefinaria A2, pois a palha e o bagaço são semelhantes quimicamente (ver Tabela 5) e foram

convertidos para gerarem o mesmo produto e coproduto: E2G e energia (pelo processamento da lignina). Assim, toda estrutura já estabelecida na Biorrefinaria A2 pode ser aproveitada para Biorrefinaria A3.

É importante observar que, além do aumento já esperado na complexidade causado pela adição de mais uma matéria-prima, o FCI das matérias-primas também sofreu um aumento acarretado pelo TRL da palha, inferior ao TRL da cana-de-açúcar. O nível de disponibilidade tecnológica da palha igual a 8 parece se opor a afirmação de que o bagaço e a palha são semelhantes quimicamente, já que o TRL do bagaço é 9, pois a semelhança química deveria acarretar na semelhança de estado tecnológico. Porém, é preciso ter cautela ao destacar a semelhança química entre estas duas biomassas (palha e bagaço), dada a existência de relatos de dificuldades tecnológicas no processamento da palha. Tem-se como exemplo uma biorrefinaria da GRANBIO que teve sua produção de etanol celulósico paralisada por um período durante o ano de 2016 por problemas tecnológicos no processamento da palha (BATISTA, 2016). Um desses problemas era o excesso de impurezas trazidas juntamente com a palha, danificando tubulações, válvulas e outras estruturas metálicas da usina (BATISTA, 2016).

A última observação é a respeito da contribuição da característica processos na complexidade da Biorrefinaria A3. Mesmo com a adição de uma matéria-prima esperava-se que o FCI dos processos se mantivesse inalterado, já que a palha é similar ao bagaço e ambos são convertidos para a geração dos mesmos produtos. Porém, ainda que em menor proporção, os processos exerceram maior peso no BCI pela adição de dois processos: o pré-tratamento da palha e a hidrólise da palha, processo idêntico ao sofrido pelo bagaço, mas considerado distinto na Figura 28. Isto só reforça as diferenças tecnológicas entre o bagaço e a palha da cana.

VI.2 – Aplicação do BCI em biorrefinarias com aproveitamento de biomassa e foco em diversificação de produtos

As características da Biorrefinaria D1 (Figura 13) foram identificadas através da Tabela 10. Com essas informações foi possível obter as variáveis FC e FCI calculadas a partir das Equações (II) e (III), respectivamente, e obter o BCI utilizando a Equação (I). O resultado está exposto na a seguir:

Tabela 15: Valor do BCI para o caso da Biorrefinaria D1

Características	Descrição das características	TRL	FC	FCI
Plataformas	Açúcar C ₆	9	1	8
	Açúcar C ₅	7	3	
	Bagaço	9	1	
	Lignina	7	3	
Matéria-prima	Cana-de-açúcar	9	1	3
	Palha da cana	8	2	
Produtos	E2G	8	2	8
	E1G	9	1	
	Açúcar de mesa	9	1	
	Energia	9	1	
	Ácido succínico	7	3	
Processos	Extração do caldo da cana	9	1	26
	Pré-tratamento da palha	7	3	
	Combustão da lignina	7	3	
	Combustão do bagaço	9	1	
	Cristalização do açúcar	9	1	
	Pré-hidrólise da biomassa lignocelulósica (explosão a vapor)	7	3	
	Hidrólise enzimática da celulose (bagaço)	8	2	
	Hidrólise enzimática da celulose (palha)	8	2	
	Fermentação aeróbica do açúcar (C ₆)	9	1	
	Destilação do etanol	9	1	
	Fermentação anaeróbica do	9	1	

açúcar C5 (produção de ácido succínico)		
Separação do ácido succínico	8	2
Captura de CO2 (secagem e compressão)	5	5
BCI (Total)		45

O acréscimo na complexidade ao incluir uma etapa de geração de ácido succínico foi significativo. Além da produção de ácido succínico requisitar um maior número de processos, dois resíduos são aproveitados para obtenção deste produto: o dióxido de carbono emitido na fermentação que, apesar de não ser contabilizado como produto, eleva o número de processos; e o açúcar C5 obtido na hidrólise da hemicelulose, contabilizado como uma plataforma com TRL duas unidades menor que o açúcar C6.

Atentando-se para os valores de TRL dos processos de obtenção de ácido succínico na Biorrefinaria D1, nota-se uma incompatibilidade com o valor de **TRL de produto** de ácido succínico apresentado na Tabela 15. O **TRL de produto** ácido succínico foi gerado com base na tecnologia de obtenção deste bioproduto e o classifica como produto em fase de testes tecnológicos operando em escala pré-comercial (E4TECH et al., 2015). Espera-se então que os processos envolvidos na geração de ácido succínico tenham TRL baixos, porém estes **processos**, segundo Jungmeier et al., (2014), possuem valores de TRL relativamente altos, pois foram atribuídos aos processos genéricos e não aos processos específicos para este fim. Como exemplo tem-se a fermentação do hidrolisado da hemicelulose, rico em açúcares C5, tais como xilose, para a produção de ácido succínico, que resulta em rendimentos mais baixos de succinato (LI et al., 2010; PATERAKI et al., 2016). O TRL deste processo é atribuído como 9 (Tabela 15) mas, devido ao seu baixo rendimento causado pela falta de domínio sobre a tecnologia, deveria ser atribuído um TRL menor. Outro exemplo é o processo de recuperação do ácido succínico, que também é custoso, principalmente devido as baixas concentrações do bioproduto (CHENG et al., 2012; PATERAKI et al., 2016). O TRL deste processo deveria ser baixo, mas o TRL da etapa de recuperação é 8, o que ainda é considerado alto (Tabela 15).

A contribuição do ácido succínico na complexidade da biorrefinaria D1 poderia ser ainda maior se considerado o desafio comercial da

produção de um bioproduto com características, processos e mercados diferente do açúcar de mesa e dos biocombustíveis. O processo de estabelecimento do bio-ácido succínico envolve atores externos ao da agroindústria, com interesses e competências diversas, tais como empresas de biotecnologia, empresas químicas e produtores de máquinas (ARAÚJO et al., 2015). A relação entre esses atores ainda está sendo construída e, por consequência, possui incertezas envolvidas que aumentam a complexidade.

Um ponto importante a ser enfatizado na Tabela 15 está no valor do TRL atribuído ao processo de captura do dióxido de carbono. De fato este valor pode variar entre 4 e 6, ou seja, a tecnologia de captura de CO₂ por bioprocessos está em fase de testes e desenvolvimento, segundo McLaren, (2011). Pela Figura 16, constata-se que a faixa de TRL de captura de CO₂ corresponde ao período chamado de “vale da morte”. Neste período do gráfico da Figura 16, a tecnologia é desenvolvida por pequenos atores, como empresas de pequeno porte, *startups* e institutos de pesquisa. Todavia, o volume pequeno de investimentos por vezes impede que a tecnologia alcance um nível tecnológico adequado para uma aplicação comercial (TRL entre 7 e 9). Provavelmente este seja um dos motivos da baixa adesão de destilarias à tecnologia de captura de dióxido de carbono, mesmo diante do considerável número de trabalhos que destacam seu caráter promissor. É possível que, em decorrência do baixo nível tecnológico da captura de CO₂, o ácido succínico gerado com o aproveitamento deste gás seja considerado um investimento de risco.

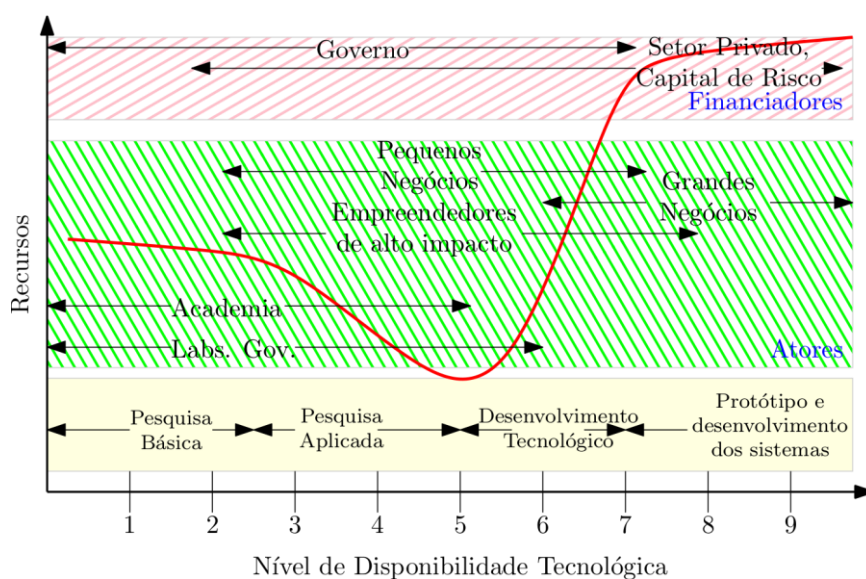


Figura 16: Espectro de Inovações. Fonte: Coyle, (2011)

Ainda que a captura de carbono possa representar uma incerteza, refletindo-se em complexidade, não é possível ter uma dimensão real do

seu impacto na Biorrefinaria D1. Isto porque o efeito dos processos pertencentes à estrutura da Biorrefinaria D1 são contabilizados separadamente no BCI, enquanto que o processo de obtenção do dióxido de carbono foi contabilizado no BCI como se fosse um único processo. De outro modo, o TRL foi atribuído à tecnologia de captura de carbono por um único bioprocessos. Isto faz com que sua influência no FCI da Biorrefinaria D1 seja menor do que se fosse somado considerando os seus componentes.

VI.3 – Aplicação do BCI nas biorrefinarias com aproveitamento de biomassa e foco no aproveitamento e valorização de resíduos

As características deste tipo de biorrefinaria, representado pela Biorrefinaria V1 (Figura 14) e Biorrefinaria V2 (Figura 15), foram identificadas através da Tabela 10. Com essas informações foi possível obter as variáveis FC e FCI calculadas a partir das Equações (II) e (III), respectivamente, obtendo-se o BCI por meio da Equação (I). Os resultados da aplicação do BCI nas Biorrefinarias V1 e V2 estão expostos nas Seções VI.3.1 e VI.3.1 respectivamente.

VI.3.1 - Biorrefinaria V1

A estrutura desta biorrefinaria, representada na Figura 14, consiste em uma usina de etanol e açúcar com captura de dióxido de carbono, produção de ácido succínico e aproveitamento de seus principais resíduos: vinhaça, torta de filtro, bagaço e palha. De acordo com os valores de TRL (Apêndice 2) para as características detectadas na Tabela 10, têm-se os seguintes resultados apresentados na Tabela 16:

Tabela 16: Valor do BCI para o caso da Biorrefinaria V1

Características	Descrição das características	TRL	FC	FCI
Plataformas	Açúcar C ₆	9	1	6
	Lignina	7	3	
	Biogás	9	1	
	Bagaço	9	1	
Matéria-prima	Cana-de-açúcar	9	1	3
	Palha da cana	8	2	
Produtos	E2G	8	2	8
	E1G	9	1	

Processos	Açúcar de mesa	9	1	29
	CO ₂	9	1	
	Biometano	8	2	
	Energia	9	1	
	Extração do caldo da cana	9	1	
	Pré-tratamento da palha	7	3	
	Combustão da lignina	7	3	
	Combustão do bagaço	9	1	
	Cristalização do açúcar	9	1	
	Pré-hidrólise da biomassa lignocelulósica (explosão a vapor)	7	3	
	Hidrólise enzimática da celulose (bagaço)	8	2	
	Hidrólise enzimática da celulose (palha)	8	2	
	Fermentação aeróbica do açúcar (C6)	9	1	
	Destilação do etanol	9	1	
	Biodigestão da vinhaça e torta de filtro	6	4	
	Melhoramento do biogás (geração de biometano)	8	2	
	Captura de CO ₂ (secagem e compressão)	5	5	
	BCI (Total)			46

É possível observar na Tabela 16 que o aumento do BCI da Biorrefinaria V1 em relação à Biorrefinaria D1 foi menor quando comparado ao BCI da Biorrefinaria D1 em relação à Biorrefinaria A3,

posto que, mesmo com o acréscimo de três unidades na complexidade dos processos em relação ao FCI de processos da Biorrefinaria D1, a geração de biogás como plataforma reduziu o FCI de plataformas compensando esse aumento.

Diante destes dados pode-se considerar que a Biorrefinaria V1 possui vantagens para o investimento visto que, mesmo com o aumento da complexidade, o maior número de produtos elevou a viabilidade da biorrefinaria como um todo. Todos os modelos de biorrefinaria discutidos neste trabalho possuem como produto principal o etanol, porém biocombustíveis em geral tendem a sofrer mais com as oscilações do preço do petróleo que outros produtos. A geração de produtos variados complementa a renda e minimiza os custos de produção, principalmente do etanol 2G. Desta forma, os biocombustíveis se tornariam mais competitivos frente aos combustíveis fósseis.

Interessante notar que o aumento da variedade de produtos ocorre pela valorização de coprodutos da biorrefinaria como a torta de filtro, a vinhaça e o dióxido de carbono e não pela adição de matéria-prima. Como consequência, a complexidade não incidiu sobre as matérias-primas e estas se mantiveram constantes.

Por último, existe a possibilidade do BCI da Biorrefinaria V1 estar subestimado devido as diferentes características da vinhaça 1G e 2G. Conforme citado na Seção IV.2.2, o DQO da vinhaça 2G é maior que a da vinhaça 1G inviabilizando seu uso *in natura* como fertilizante. Nenhum estudo abordou o uso da vinhaça 2G **digerida** como fertilizante, o que conduz a hipótese de semelhança com a vinhaça 1G digerida. Porém, a anulação dessa hipótese acarretaria a separação dos processos de fermentação do açúcar C6 e destilação, elevando a complexidade de processos significativamente.

VI.3.2 - Biorrefinaria V2

A estrutura desta biorrefinaria está representada na Figura 15, consistindo em uma usina de etanol e açúcar com captura de dióxido de carbono, produção de ácido succínico e aproveitamento de seus principais resíduos: vinhaça, torta de filtro, bagaço e palha. De acordo com os valores de TRL (Apêndice 2), para as características detectadas na Tabela 10 tem se os seguintes resultados apresentados na Tabela 17:

Tabela 17: Valor do BCI para o caso da Biorrefinaria V2

Características	Descrição das características	TRL	FC	FCI
Plataformas	Açúcar C ₆	9	1	9
	Açúcar C ₅	7	3	
	Lignina	7	3	
	Biogás	9	1	
	Bagaço	9	1	
Matéria-prima	Cana-de-açúcar	9	1	3
	Palha da cana	8	2	
Produtos	E2G	8	2	11
	E1G	9	1	
	Açúcar de mesa	9	1	
	CO ₂	9	1	
	Biometano	8	2	
	Energia	9	1	
	Ácido succínico	7	3	
Processos	Extração do caldo da cana	9	1	30
	Pré-tratamento da palha	7	3	
	Combustão da lignina	7	3	
	Combustão do bagaço	9	1	
	Cristalização do açúcar	9	1	
	Pré-hidrólise da biomassa lignocelulósica (explosão a vapor)	7	3	
	Hidrólise enzimática da celulose (bagaço)	8	2	
	Hidrólise enzimática da celulose (palha)	8	2	
	Fermentação aeróbica do açúcar (C ₆)	9	1	
	Destilação do	9	1	

etanol		
Biodigestão da vinhaça e torta de filtro	6	4
Captura de CO ₂ (secagem e compressão)	5	5
Fermentação anaeróbica do açúcar C5 (produção de ácido succínico)	9	1
Separação do ácido succínico	8	2
BCI (Total)		53

A Tabela 17 apresenta um aumento já esperado para o BCI da Biorrefinaria V2. Isto porque a Biorrefinaria V2 é a biorrefinaria que engloba todos os modelos de biorrefinarias anteriores, com maior número de integração e, conseqüentemente, com maior número de processos e plataformas, acarretando em acréscimo de complexidade em três das quatro características: plataformas, produtos e processos.

Nota-se que a produção de biogás, ácido succínico e a captura do dióxido de carbono afetam significativamente o BCI, pois além de elevarem a quantidade de processos, plataformas e processos, possuem nível tecnológico baixo. Contudo, a configuração de produção de biogás que serve como substrato para produção de ácido succínico, gerando também biometano, mostrou-se vantajosa para ambos os processos. Ou seja, na Biorrefinaria D1, o ácido succínico provocou um aumento de 14 unidades no BCI: 3 unidades na plataformas com o uso do açúcar C5, 3 unidades nos produtos e 8 unidades nos processos (Tabela 15). Porém, com o aproveitamento do biogás ao invés do CO₂, o peso da produção de ácido succínico para o BCI da V2 foi de apenas 13 unidades, uma unidade a menos, por não necessitar de captura de dióxido de carbono. A produção de biometano também foi beneficiada por esta integração reduzindo em duas unidades sua complexidade, descartando a etapa de melhoramento do biogás com TRL igual a 8.

Entende-se então que a integração entre processos atenuou a elevação do número de produtos formados e o baixo nível tecnológico. Todavia, esse resultado deve ser observado com ressalvas, pois a utilização do biogás na produção de ácido succínico é recente e existem poucas informações a seu respeito. Portanto, o TRL de fermentação do

açúcar C5 a ácido succínico utilizando biogás deveria ser inferior ao TRL da produção de ácido succínico utilizando dióxido de carbono puro, mas neste trabalho ambos os processos receberam o mesmo TRL, dado que não foi encontrado na literatura o valor de TRL específico.

VI. 4 – Síntese dos resultados

Neste capítulo foi possível observar que a complexidade é crescente conforme o grau de evolução das biorrefinarias. Os dados que levam a esta observação podem ser revisitados pela Tabela 18 a seguir.

Tabela 18: Complexidade das biorrefinarias estudadas

Biorrefinarias	Nº de plataformas	Nº de processos	Nº de produtos	Nº de matérias-primas	FCI ₁	FCI ₂	FCI ₃	FCI ₄	BCI
A1	2	5	3	1	2	1	3	5	11
A2	3	8	4	1	5	1	5	12	23
A3	3	10	4	2	5	3	5	16	29
D1	4	13	5	2	8	3	8	26	45
V1	4	13	6	2	9	3	9	29	46
V2	5	14	7	2	9	3	12	30	53

A Tabela 18 mostra que ocorreram dois grandes crescimentos da complexidade: na evolução da Biorrefinaria A1 para Biorrefinaria A2 e da Biorrefinaria A3 para a Biorrefinaria D1. O primeiro aumento foi ocasionado em grande parte pela característica Processos, pois o processamento do bagaço à E2G gerou um acréscimo de pouco mais que o dobro de complexidade no FCI desta característica. Além disso, o estado tecnológico da produção de E2G contribuiu para o crescimento da complexidade. As possíveis causas para a complexidade observada no processo de produção de etanol utilizando material ligno-celulósico são: a necessidade do pré-tratamento para remoção da lignina; o fato de enzimas convencionais não serem capazes de hidrolisar a celulose; e a dificuldade de fermentar as pentoses oriundas da hidrólise da hemicelulose (DANTAS, 2013).

O segundo aumento ocorreu devido à produção de ácido succínico. Os fatores que mais contribuíram para este comportamento foram o aumento no número de processos e o nível tecnológico atual no processamento do ácido succínico. As causas do baixo nível tecnológico

são a dificuldade de recuperação desse ácido e a baixa produtividade da fermentação.

No entanto, quando se observa na Figura 17 todo o comportamento de crescimento da complexidade entre as Biorrefinarias A2 até A3 e de A3 até V2, nota-se que a proporção de aumento da complexidade de uma biorrefinaria para outra foi pequena. Esta redução só é possível quando se pode aproveitar a estrutura existente na biorrefinaria anterior, gerando um maior número de produtos, mas evitando aumentar o número de processos. Esse resultado sugere que favorecer uma evolução gradual das biorrefinarias do tipo A1 ao invés de focar na direta implementação de uma biorrefinaria do tipo A3, por exemplo, seria estratégico para o desenvolvimento de uma biorrefinaria totalmente integrada com produtos variados. Outra maneira de tratar esta observação seria considerando cada modificação feita de um modelo de biorrefinaria para outro como uma inovação incremental. Inovações incrementais em uma biorrefinaria seriam mais propícias ao sucesso do que a implementação de uma biorrefinaria com inovações disruptivas¹², pois seriam beneficiadas por:

- *Evolução da curva de aprendizado*

À medida em que as atividades de processamento são efetuadas demanda-se menos esforço para o enfrentamento das barreiras da inovação e informações, seja pela familiaridade adquirida com os meios de produção, seja pela adaptação às ferramentas utilizadas ou pela descoberta de “atalhos” para realização da tarefa (ANZANELLO *et al.*, 2007).

Este ponto pode ser ilustrado pelo que ocorreu na Biorrefinaria A3. Esta biorrefinaria possui a mesma estrutura da Biorrefinaria A2, porém com o processamento da palha. Apesar de se observar uma dificuldade tecnológica maior para a palha da cana o conhecimento adquirido no processamento do bagaço encurta o tempo de melhoramento tecnológico no uso da palha

- *Flexibilidade na produção*

A possibilidade de processar mais de uma matéria-prima com uma mesma linha de processamento gerando diferentes produtos, ou de

¹² Uma inovação radical ou disruptiva é baseada em uma novidade tecnológica ou mercadológica, levando à criação de um novo mercado, podendo ou não acarretar na descontinuidade (*disruption*) do mercado existente. Inovação incremental poderia ser definida como a inovação que incorpora melhoramentos (características técnicas, utilizações, custos) a produtos e processos pré-existentes (BESSANT *et al.*, 1994).

uma única matéria-prima gerar vários produtos, permite que se escolham quais serão os produtos produzidos.

Como o que ocorre com o bagaço, por exemplo, o qual pode ser direcionado para cogeração de energia ou para produção de biocombustíveis e bioprodutos ou para todas essas opções.

Em relação à flexibilidade de produção, pode se dizer que a escolha dos produtos que serão produzidos dependerá de vários fatores, tais como as variações dos custos e da oferta de matérias primas, da demanda do produto, lucratividade do produto e outros. O caso do açúcar de mesa com o etanol ilustra bem esta discussão, pois a elevação do preço do açúcar de mesa pode direcionar a maior parte da cana para este produto e resultar em redução da oferta de etanol. Apesar de não ser considerada no cálculo do BCI esta discussão pode criar outro tipo de complexidade referente à melhor configuração a ser escolhida para a biorrefinaria. Quanto maior o número de opções, mais complexa é a decisão e maior o grau de incerteza a respeito da configuração final, conforme comentado no Capítulo III.

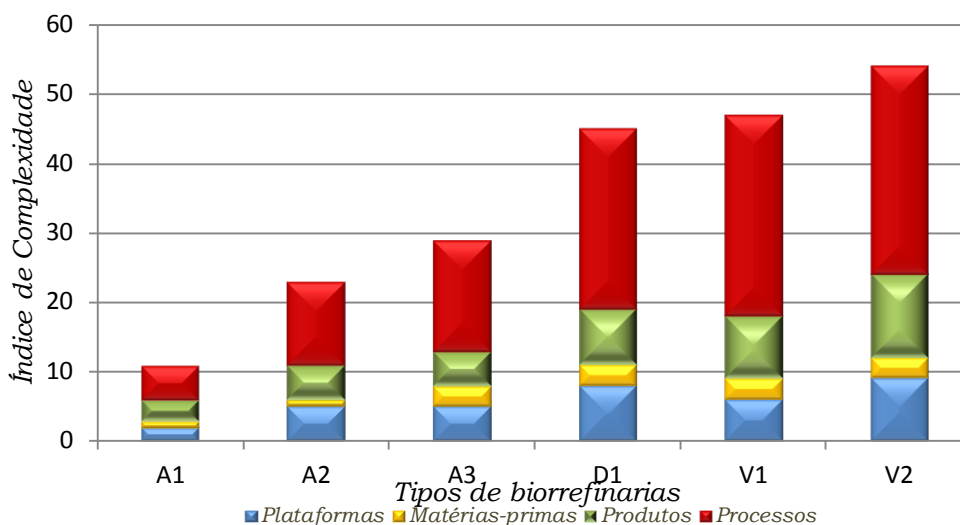


Figura 17: Gráfico complexidade das biorrefinarias estudadas

O fator logístico, tanto a jusante quanto a montante, também foi desconsiderado na complexidade, porém é um fator determinante na escolha da matéria-prima e produtos e, portanto, um dos critérios que devem ser atendidos na obtenção da configuração ótima de biorrefinaria. Uma das maiores barreiras para o uso da palha como matéria-prima, por exemplo, seria o custo que o seu transporte exerceria no preço do produto final. Apesar de seu peso ser menor que o da cana, seu volume é grande, dificultando seu transporte (SANTOS, 2016).

Outro exemplo que ilustra bem a importância da logística na complexidade da biorrefinaria é no escoamento do etanol depois de

produzido. A logística de distribuição do etanol passa por pontos de distribuição distantes e não triviais (SANTOS, 2016). Isto provoca a concentração da produção em poucos produtores de grande porte, que podem arcar com os custos logísticos, reduzindo a concorrência. Existe também o problema da sazonalidade na produção de etanol que provoca variações no seu preço. Para minimizar esse problema seria preciso armazenar o etanol, outro fator logístico. Porém, o armazenamento no setor sucroalcooleiro ainda é um gargalo do setor (SANTOS, 2016).

Estas variáveis logísticas não foram contabilizadas no cálculo do BCI, pois se estas fossem contabilizadas poderiam elevar a diferença de complexidade entre as biorrefinarias A2 e A3, evidenciando os motivos pelos quais a palha, mesmo sendo quimicamente semelhante ao bagaço, não ter maior adoção nas biorrefinarias. Ainda, questões logísticas evidenciariam as razões para que, mesmo devido à atratividade do setor sucroalcooleiro, biorrefinarias mais avançadas, que fornecem produtos para o setor químico, são vistas como oportunidades com alto grau de risco (SANTOS, 2016).

A natureza dos mercados explorados pela biorrefinaria é também de grande importância e está relacionado às estratégias de comercialização. Muitos produtos derivados de uma mesma biorrefinaria se dirigem a mercados distintos. Estes mercados por vezes se mostram desconhecidos para o setor sucroalcooleiro, o que pode criar dificuldades iniciais para construção de parcerias. Mesmo para o mercado do etanol, mercado tradicional, existem dificuldades relacionadas à concorrência direta com a gasolina e com sua baixa eficiência frente aos combustíveis fósseis, que poderia ser amenizada com boas parcerias com empresas automobilísticas, visando uma melhor adaptação dos motores (SANTOS, 2016).

Políticas públicas de incentivo a tecnologias de uso da biomassa, bioprodutos ou bioenergia também são importantes no contexto das biorrefinarias e consequentemente na complexidade delas. São importantes porque interferem no comportamento do mercado. Políticas que garantam a demanda por determinado produto, tais como a obrigatoriedade da mistura de 27% de etanol na gasolina, podem representar uma oportunidade para alguns investidores, elevando a oferta de etanol, e incerteza para outros investidores, por considerarem arriscado depender de políticas do governo.

Todos os fatores mercadológicos comentados anteriormente pesam fortemente sobre a matéria-prima e sobre o produto, evidenciando seus possíveis efeitos sobre a complexidade. Todavia, a análise apenas

tecnológica sobre estas características minimiza seus pesos na composição da complexidade. Pode-se observar pelo gráfico da Figura 17 que a matéria-prima possui participação praticamente constante e de pequeno impacto no BCI. Os produtos ainda possuem maior participação em relação às matérias-primas, mas ainda é baixa quando comparada às características de processos e plataformas. Em biorrefinarias que utilizam a palha, por exemplo, a técnica do BCI não considerou a complexidade de sua oferta, já que muitos agricultores ainda praticam o cultivo manual que necessita que a palha seja queimada, pois os equipamentos de colheita possuem deslocamento logístico complexo e não podem ser utilizados em pequenas propriedades (SANTOS, 2016). Em termos tecnológicos o resultado observado no BCI poderia ser admitido, porém em termos mercadológicos essas características podem ter impactos de peso maior devido a fatores logísticos, de preço, demanda e oferta que atuam nestas características.

De posse dessas observações, entende-se que são necessárias modificações na técnica do BCI para inserir um novo componente referente à contabilização do peso mercadológico que incide sobre as características da matéria-prima e produtos, conforme ilustrado nas Equações (IX), (X) e (XI). O peso mercadológico seria representado pelo MRL, *Market Readiness Level*, comentado no capítulo III

$$BCI = BCI_{MRL} + \sum_{i=1}^4 FCI_i \quad (IX)$$

$$BCI_{MRL} = \sum_{i=2}^3 FCI_{i_{MRL}} \quad (X)$$

$$FCI_{i_{MRL}} = 10 - MRL_i \quad (XI)$$

Onde:

i = Característica da biorrefinaria segundo a classificação de biorrefinarias de Cherubini *et al.*, (2009);

$$i = \{1, 2, 3, 4\};$$

1 = Plataforma;

2 = Matéria-prima;

3 = Produtos;

4 = Processos.

FCI_i = Índice de complexidade característica.

BCI_{iMRL} = Índice de Complexidade das Biorrefinarias determinado por fatores mercadológicos.

FCI_{iMRL} = Índice de complexidade característica determinado por fatores mercadológicos.

Ainda sobre o BCI, Jungmeier *et al.*, (2014) mencionam a possibilidade do uso do TRL como peso para os produtos e matérias-primas acarretarem uma dupla contagem do peso tecnológico dessas duas características na complexidade, visto que o nível tecnológico das matérias-primas e dos produtos é contabilizado também no cálculo da complexidade característica dos processos. Os autores propuseram então a substituição do TRL pelo MRL nestas características. Entretanto, a metodologia de obtenção dos resultados do presente trabalho, assim como os próprios resultados, demonstra que para ocorrer uma “dupla contagem” todos os TRL atribuídos a cada processo deveriam ser determinados para cada material processado, porém o TRL da maioria dos processos foi atribuído de maneira genérica sem considerar o comportamento ou a eficiência desses processos para cada tipo de biomassa. Um dos poucos casos em que a diferenciação do TRL de processos por biomassa ocorre foi na etapa de hidrólise enzimática da celulose nas Biorrefinarias A3, D1, V1 e V2. Este processo se diferenciou devido ao tipo de biomassa: palha e bagaço.

Também é necessário avaliar como a atribuição do TRL é realizada. A Tabela 2 do Capítulo III mostra o estado da tecnologia correspondente ao valor do TRL, mas é uma atribuição subjetiva que pode variar de acordo com o ponto de vista do agente avaliador. É possível avaliar cada item da Tabela 2 considerando os processos aos quais uma matéria-prima ou um produto será submetido. Especificamente para os produtos é possível considerar seu nível tecnológica analisando seu processo de obtenção ou analisando o desempenho tecnológico na sua aplicação final. Quase todos os trabalhos consultados para uso do TRL não esclareceram os fatores nos quais basearam suas atribuições de TRL, apenas

forneeceram a Tabela 2. A incerteza sobre o que se pode compreender sobre o nível tecnológico pelo TRL remete a uma possibilidade real de subestimação ou superestimação da complexidade de uma biorrefinaria.

Os resultados apresentados neste capítulo também levantam questões sobre a possível existência de interações entre as características de uma biorrefinaria e seu efeito na complexidade. Por exemplo, utilizar o bagaço na obtenção do etanol é diferente de utilizar o caldo da cana para a produção do mesmo produto. O uso do bagaço exerce aumento de processos e impacta o custo do produto final. Essa diferença foi contabilizada no BCI, porém a ação na complexidade do uso do bagaço na cogeração de energia e na produção do E1G é desconhecida. A métrica do BCI não detecta o efeito da interação entre uma característica e as demais. Todavia, devido a incertezas sobre a relevância das interações entre as características na composição da complexidade de uma biorrefinaria, torna-se relevante sua inserção no cálculo da complexidade para que, através dos resultados obtidos, seja possível determinar a real influência das interações entre as características.

Por fim, vale ressaltar o elevado BCI das Biorrefinarias D1, V1 e V2. Conforme observado da Figura 17, a complexidade destas biorrefinarias foi praticamente três vezes maior que uma biorrefinaria do tipo básico (A1) e a característica de maior contribuição foi “processos”, o que nos fornece uma dimensão da dificuldade de uma biorrefinaria com processos integrados. Entretanto, em uma configuração em que uma biorrefinaria fosse estruturada como um complexo industrial, cada ator seria responsável por partes menores do processamento. Esta repartição de processos reduziria a complexidade para cada ator. Por exemplo, se a biorrefinaria V2 fosse um complexo industrial com a atuação de três empresas: uma que produzisse etanol e gás carbônico, outra que produzisse biogás e metano e outra que produzisse ácido succínico. Desta maneira, apenas a complexidade de uma biorrefinaria que produzisse todos estes produtos de maneira integrada seria dividida na proporção do número de processos que cada empresa seria responsável. Porém, vale destacar que, ao dividir a complexidade entre vários atores, outro fator abstrato poderia surgir e compor a complexidade, a interação entre os atores. Este tipo de característica não é contabilizado na métrica do BCI, pois se trata de uma métrica que considera apenas quatro fatores dentro do sistema (plataformas, matérias-primas, produtos e processos).

No Capítulo VII a seguir, serão expostas as conclusões decorrentes dos resultados apresentados neste capítulo.

Capítulo VII – Conclusões

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões finais a respeito dos resultados. Também são apresentadas sugestões de trabalhos futuros como forma de direcionar pesquisas posteriores.

VII. 1 – Conclusões

Este trabalho buscou dissertar a respeito da complexidade envolvida na estruturação de biorrefinarias a base de cana-de-açúcar, configuradas de acordo com três enfoques distintos: aproveitamento máximo de biomassa, maior diversificação de produtos, utilização e valorização de resíduos. Isto foi feito considerando primeiramente que a complexidade de uma biorrefinaria é determinada pela quantidade de características existentes, matérias-primas, plataformas, produtos e processos, e pelo nível tecnológico destas características. Sendo assim, a métrica de complexidade BCI, proposta por Jungmeier *et al.*, (2014), foi utilizada para analisar qualitativamente e quantitativamente a complexidade dos modelos de biorrefinarias desenvolvidos nesta dissertação.

No Capítulo II foi discutida a natureza emergente das biorrefinarias, visto que existem várias definições para descrevê-las e pela existência de opiniões divergentes sobre suas similaridades com a refinaria de petróleo. Neste trabalho optou-se por definir uma biorrefinaria como uma estrutura na qual ocorre o processamento **sustentável** de biomassa em um espectro de **produtos comercializáveis** e de energia. A necessidade de combinar biomassas, produtos e processos de modo a obter um processamento sustentável gera complexidades devido à combinação de fatores tais como a natureza da biomassa e o número de mercados diferentes possíveis de serem explorados dependendo do produto produzido.

O conceito de complexidade foi debatido no Capítulo III. Para o caso específico das biorrefinarias entende-se complexidade como uma função da soma de número de plataformas, produtos, processos e matérias-primas, considerando um fator de peso e ignorando possíveis interações entre essas características. Esse fator de peso é o TRL e está relacionado ao nível tecnológico de cada característica. Esta forma de tratar a complexidade de uma biorrefinaria é expressa pela métrica do BCI, apresentada no trabalho de Jungmeier *et al.*, (2014). Entretanto,

comparações com outras definições e métricas de complexidades e observações feitas pelos autores do BCI levantam a hipótese de uma abrangência maior da complexidade de uma biorrefinaria, considerando interações entre as características de uma biorrefinaria; a existência de outros fatores na composição das complexidades, tais como fatores mercadológicos da matéria-prima e produtos, atribuindo um peso mercadológico a essas características (MRL no lugar do TRL); e considerando a possibilidade da interferência do próprio avaliador na composição da complexidade, atribuindo, por exemplo, pesos tecnológicos de acordo com seu nível de domínio da tecnologia.

A análise da complexidade de biorrefinarias de cana-de-açúcar pela técnica do BCI demonstrou que ocorre aumento da complexidade com a progressão das biorrefinarias, ou seja, a complexidade aumenta na medida em que ocorre maior aproveitamento da biomassa, valorização dos resíduos e diversificação dos produtos. Todavia, variações na configuração da biorrefinaria podem reduzir este aumento, se considerado apenas a complexidade causada por fatores tecnológicos. Além disso, configurações de biorrefinarias particionadas em pequenas micro-biorrefinarias distintas, que dominariam uma parte do processo, permitiriam que a complexidade total oriunda de fatores tecnológicos, que seria administrada por apenas um ator em uma biorrefinaria integrada, fosse dividida por vários atores em um sistema de várias micro-biorrefinarias.

Biorrefinarias mais avançadas possuem complexidade elevada que podem inibir investimentos, mas quando o desenvolvimento de uma biorrefinaria ocorre de forma gradual, como modificações semelhantes a inovações incrementais, o acréscimo da complexidade também acontece gradativamente. Desta forma, evita-se a barreira causada pelo elevado grau de complexidade.

Por fim, pode-se concluir que o resultado fornecido pela métrica do BCI é uma estimativa da complexidade de uma determinada biorrefinaria, mas certamente difere da complexidade real, pois não contabiliza fatores externos ao sistema (mercadológicos, logísticos, etc), que influenciam a viabilidade de uma biorrefinaria. Além disso, considerando o interior de uma biorrefinaria, o BCI desconsidera possíveis interações, mesmo interações de caráter técnico, que podem ocorrer entre processos em uma mesma biorrefinaria, uma simplificação que pode subestimar a complexidade real.

Como trabalhos futuros têm-se as seguintes sugestões:

- *Análise dos fatores relacionados com a complexidade*

São fatores que não foram considerados na métrica sugerida pelo Jungmeier *et al.*, (2014), tais como: logística, oferta, demanda relação com fornecedores entre outros. Explorar esses fatores e principalmente suas contribuições e a relevância para a complexidade como forma de melhorar a métrica do BCI.

- *Análise da métrica do BCI*

Analisar a eficácia da métrica do BCI através da análise dos fatores considerados e comprovação ou não de sua relação linear com a complexidade. Avaliar também a aplicação de outras métricas de modo a alcançar a métrica ideal.

- *Aprimoramento do TRL*

Além de necessárias modificações constantes no TRL, pois o TRL varia com o desenvolvimento tecnológico das tecnologias avaliadas, sugere-se a ampliação da faixa do TRL. Isto porque o TRL significa tecnologia pronta para ser aplicada comercialmente, mas não esclarece se esta tecnologia já foi implementada comercialmente, nem o tempo que esta tecnologia está no mercado. Logo uma tecnologia que nunca foi comercializada, mas que está apta à comercialização é igualada a uma tecnologia madura com longo tempo de comercialização no mercado, possibilitando que dificuldades tecnológicas sejam omitidas. Como consequência, a análise limitada do TRL pode causar distorções na análise da complexidade de biorrefinarias.

Entende-se que a ampliação do TRL não acarretará em uma modificação na Equação que determina a Complexidade característica (FC), no sentido de adapta-lá a uma nova faixa de TRL. Isto porque um TRL 10, por exemplo, gera um FC nulo que pode ser aceito no BCI, pois este valor representa apenas a uma análise tecnológica da complexidade.

- *Determinação do MRL*

Determinar sua faixa de variação, o método utilizado para avaliar o nível mercadológico e, sobretudo, determinar o que se compreende como MRL.

- *Estudo da relação da complexidade com o risco técnico-econômico de uma biorrefinaria*

A complexidade envolve incertezas que geram risco. Estes por sua vez desencadeiam impactos econômicos. O estudo dessas

relações pode auxiliar no desenvolvimento de modelos matemáticos que forneçam essas informações. Isto facilitaria a tomada de decisões estratégicas.

Referências

- ADÉLIA, U. S. **Fabricação de açúcar.** Disponível em: <<http://site.usinasantaadelia.com.br/conteudo/fabricacao-de-acucar>>. Acesso em: 23/7/2015.
- ALCARDE, A. R. **Árvore do Conhecimento da Cana-de-Açúcar.** Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_108_22122006154841.html#>. Acesso em: 6/6/2016.
- ANTUNES, A.; GUSMÃO, A.; HOEFLE, D.; et al. Sucroquímica. **Química verde no Brasil: 2010 - 2030.** p.175–218, 2010. Brasília-DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos.
- ANZANELLO, M. J.; FOGLIATTO, F. S. **Curvas de aprendizado: estado da arte e perspectivas de pesquisa.** Gestão & Produção, v. 14, n. 1, p. 109–123, 2007.
- ARAÚJO, M. R. DE; OROSKI, F. A.; ALVES, F. C.; MARTINS, J. V. B. **Desenvolvimento de plataformas tecnológicas: o caso das plataformas químicas.** ALTEC. Anais... . p.20, 2015. Brasil-Porto Alegre-RS.
- BASTOS, V. D. **Biorrefinarias, biocombustíveis e química renovável: revolução tecnológica e financiamento.** Brasil, 2012.
- BATISTA, F. **GranBio paralisa temporariamente usina de etanol celulósico em Alagoas.** Valor Econômico, 5. Apr. 2016. Disponível em: <<http://www.valor.com.br/agro/4511878/granbio-paralisa-temporariamente-usina-de-etanol-celulosico-em-alagoas>>. .
- BENNETT, S. J.; PEARSON, P. J. G. **From petrochemical complexes to biorefineries? The past and prospective co-evolution of liquid fuels and chemicals production in the UK.** Chemical Engineering Research and Design, v. 87, n. 9, p. 1120–1139, 2009.
- BESSANT, J.; CAFFYN, S.; GILBERT, J.; HARDING, R.; WEBB, S. **Rediscovering Continuous Improvement.** Technovation, v. 14, n. 1, p. 17–29, 1994.
- BONASSA, G.; SCHNEIDER, L. T.; FRIGO, K. D. D. A.; et al. **Subprodutos Gerados na Produção de Bioetanol Bagaço Torta de Filtro água de Lavagem e Palhagem.** Revista Brasileira de Energias Renováveis, , n. 4, p. 144–166, 2015. Brasil.
- BORGES, E. R. **Desenvolvimento de um processo biotecnológico para a produção de ácido succínico por *actinobacillus succinogenes*,** 2011. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Tese de doutorado.
- BOZELL, J. J.; PETERSEN, G. R. **Technology development for the production of biobased products from biorefinery carbohydrates—the US Department of Energy’s “Top 10” revisited.** Green Chemistry, v. 12,

n. 4, p. 539, 2010.

BRAHA, D.; MAIMON, O. **The measurement of a design structural and functional complexity**. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans, v. 28, n. 4, p. 527–535, 1998.

BRUNDTLAND, G. H. **Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development**. 1987.

CALADO, R. D.; CALARGE, F. A. **Conceitos do projeto axiomático e desdobramento de metas: aplicação em uma empresa de setor de serviços**. SIMPOI 2009. Anais... . p.1–11, 2009.

CANA, N. **Como é feito o processamento da cana-de-açúcar nas usinas**. Disponível em: <<https://www.novacana.com/usina/como-e-feito-processamento-cana-de-acucar/>>. .

CARVALHO, D. F. **Complexo Industrial , Inovações Tecnológicas e Desenvolvimento Regional: uma abordagem analítica como suporte ao planejamento do desenvolvimento industrial**. 1997.

CHENG, K.-K.; ZHAO, X.-B.; ZENG, J.; ZHANG, J.-A. **Biotechnological production of succinic acid: current state and perspectives**. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, v. 6, n. 3, p. 246–256, 2012.

CHERUBINI, F.; JUNGMEIER, G.; WELLISCH, M.; et al. **Toward a common classification approach for biorefinery systems**. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, v. 3, p. 534–546, 2009.

CNA. **Balanço 2015 perspectivas 2016**. Brasil, 2015.

CORTEZ, L.; MAGALHAES, P.; HAPPI, J. **Principais subprodutos da agroindústria canavieira e sua valorização**. Revista Brasileira de Energia, v. 2, p. 1–17, 1992.

COUTINHO, P.; BOMTEMPO, J. V. **Roadmap tecnológico em matérias-primas renováveis: uma base para a construção de políticas e estratégias no brasil**. Quim. Nova, v. 34, n. 5, p. 910–916, 2011. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422011000500032>. .

COYLE, P. E. **The Missing Middle**. Journal of Economic Perspectives, 2011. Slide presentation, National Defense Industrial Association Science & Engineering Technology Division Executive Breakfast. Disponível em: <<http://pubs.aeaweb.org/doi/abs/10.1257/jep.28.3.89>>. .

CRUZ, A. C.; PEREIRA, F. DOS S.; COSTA, L. M. DA; SILVA, M. F. DE O. E. **Química verde na ótica dos agentes de mercado**. BNDES setorial, v. 39, n. Mdic, p. 5–54, 2014.

CUNHA, A. M.; BICHARA, J. DA S.; MONSUETO, S. E.; LÉLIS, M. T. C. **Impactos Da Ascensão Da China Sobre a Economia Brasileira: Comércio E Convergência Cíclica**. Revista Economia Contemporânea, v. 15, n. 3, p. 406–440, 2011. Disponível em: <<http://crawl.prod.proquest.com.s3.amazonaws.com/fpcache/33ce587556fb3cb218faa77016>>. .

b7a286.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAJF7V7KNV2KKY2NUQ&Expires=1455392523&Signature=gtCzZ7ZriJmdBJipcqtVFiKnSQ=>.

DANTAS, G. DE A. **Alternativas de investimento do setor sucroenergético brasileiro para aproveitamento de bagaço e de palha.** COPPE-UFRJ, 2013. UFRJ. Tese de Doutorado

E4TECH; RE-CORD; WUR. **From the Sugar Platform to biofuels and biochemicals.** Londres, UK, 2015.

EARTO. **The TRL Scale as a Research & Innovation Policy Tool.** EARTO Recommendations, 2014. Disponível em: <http://www.earto.eu/fileadmin/content/03_Publications/The_TRL_Scale_as_a_R_I_Policy_Tool_-_EARTO_Recommendations_-_Final.pdf>.

EL-HAIK, B.; YANG, K. **The component of complexity in engineering design.** IIE Transactions, v. 31, n. February, p. 925–934, 1999.

EMBRAPA AGROENERGIA. **Biorrefinarias.** Brasil, 2011.

EPE. **Nota técnica DEA xx/15 cenário econômico 2050.** Brasil, 2015.

FAREL, R.; BEKHRADI, A. **Energy Efficiency of Industrial Systems: a Design Research Perspective.** The ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference. Anais... . p.1–9, 2014. New York - USA.

FATIH DEMIRBAS, M. **Biorefineries for biofuel upgrading: A critical review.** Applied Energy, v. 86, p. S151–S161, 2009. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.04.043>>..

FERNANDO, S.; ADHIKARI, S.; CHANDRAPAL, C.; MURALI, N. **Biorefineries: Current Status, Challenges, and Future Direction.** Energy Fuels, v. 20, n. 3, p. 1727–1737, 2006. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1021/ef060097w>>..

FERREIRA, V. F.; ROCHA, D. R. DA; SILVA, F. DE C. DA. **Potencialidades e oportunidades na química da sacarose e outros açúcares.** Química Nova, v. 32, n. 3, p. 623–638, 2009.

FIGUEIREDO, E. M. DE O. **Processos de desidratação do álcool,** 2010. Universidade Federal de Uberlândia.

FORSTER-CARNEIRO, T.; BERNI, M. D.; DORILEO, I. L.; ROSTAGNO, M. A. **Biorefinery study of availability of agriculture residues and wastes for integrated biorefineries in Brazil.** Resources, Conservation and Recycling, v. 77, p. 78–88, 2013. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.05.007>>..

GARCIA, J. R.; LIMA, D. A. L. L.; VIEIRA, A. C. P. **A nova configuração da estrutura produtiva do setor sucroenergético brasileiro: panorama e perspectivas.** Revista de Economia Contemporânea, v. 19, p. 162–184, 2015. Brasil.

GRANATO, E. F. **Geração de energia através da biodigestão anaeróbica da vinhaça,** 2003. Universidade Estadual Paulista. Disponível em:

<http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/90820/granato_ef_me_bauru.pdf?sequence=1>.

GUNNARSSON, I. B.; ALVARADO-MORALES, M.; ANGELIDAKI, I. **Utilization of CO₂ fixating bacterium *Actinobacillus succinogenes* 130Z for simultaneous biogas upgrading and biosuccinic acid production.** Environmental Science and Technology, v. 48, n. 20, p. 12464–12468, 2014.

HAMERSKI, F. **Estudo De Variáveis No Processo De Carbonatação Do Caldo De Cana-De-Açúcar**, 2009. Universidade Federal Do Paraná.

HASENAUER, R.; WEBER, C.; FILO, P. **Managing Technology Push through Marketing Testbeds: The Case of the hitech Center in Vienna**, Austria. , p. 99–126, 2015.

ISENMANN, A. F. **Operações unitárias na indústria química**. 2º ed. 2013.

JOÃO BAPTISTA CHIEPPE JÚNIOR. **Gestão de resíduos perigosos**, 2011. Brasil - Santa Maria: Inhumas IFG. Disponível em: <<http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84&sub2ref=938>>.

JONG, E. DE; HIGSON, A.; WALSH, P.; WELLISCH, M. **Bio-based Chemicals Value Added Products from Biorefineries**. 2012.

JONG, E. DE; JUNGMEIER, G. **Biorefinery Concepts in Comparison to Petrochemical Refineries**. Elsevier B.V., 2015.

JUNGMEIER, G.; REE, R. VAN; JØRGENSEN, H.; et al. **The Biorefinery Complexity Index**. Austria, 2014.

JUNIOR, A. E. S. **Produção de metano a partir de vinhaça e melaço em reatores uasb termofílicos, em dois estágios**, 2013. Universidade Estadual Paulista.

KAMM, B.; KAMM, M. **Principles of biorefineries**. Applied Microbiology and Biotechnology, 2004.

KEMPER, J. **Biomass energy with carbon capture and storage (BECCS or Bio-CCS)**. CCS Learders Forum. **Anais...** . p.324–334, 2016. London: Imperial College London.

KHESHGI, H. S.; PRINCE, R. C. **Sequestration of fermentation CO₂ from ethanol production**. Energy, v. 30, n. 10, p. 1865–1871, 2005.

KUGLARZ, M.; ALVARADO-MORALES, M.; KARAKASHEV, D.; ANGELIDAKI, I. **Integrated production of cellulosic bioethanol and succinic acid from industrial hemp in a biorefinery concept**. Bioresource Technology, v. 200, p. 639–647, 2016. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.10.081>>..

LAIME, E. M. O.; FERNANDES, P. D.; OLIVEIRA, D. C. D. S.; FREIRE, E. D. A. **Possibilidades tecnológicas para a destinação da vinhaça: uma revisão**. Revista Trópica - Ciências Agrárias e Biológicas, v. 5, n. 3, p. 16–29, 2011.

LI, J.; JIANG, M.; CHEN, K.; et al. **Enhanced production of succinic acid by *Actinobacillus succinogenes* with reductive carbon source**. *Process Biochemistry*, v. 45, n. 6, p. 980–985, 2010. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procbio.2010.03.001>>. .

MAITY, S. K. **Opportunities, recent trends, and challenges of integrated biorefinery: Part I**. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, p. 1–19, 2014. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.092>>.

MANOCHIO, C. **Integração energética da produção de biogás em biorrefinarias de cana-de-açúcar integradas de 1ª e 2ª geração**, 2015. Universidade Federal de Alfenas– Campus Poços de Caldas.

MCLAREN, D. **Negatones – an initial assessment of the potential for negative emission techniques to contribute safely and fairly to meeting carbon budgets in the 21st century researched and written for friends of the earth by**. LONDON, 2011.

MEZAROA, S.; MENEGUETTI, C. C.; GTROFF, A. M. **Processos de produção do açúcar de cana e os possíveis reaproveitamentos dos subprodutos e resíduos resultantes do sistema**. *Resumos IV Encontro de Engenharia de Produção Agroindustrial (FENILCAM)*, v. 1, p. 1–10, 2010.

MORAES, B. S.; ZAIAT, M.; BONOMI, A. **Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 44, p. 888–903, 2015. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.023>>.

MUSSATTO, S. I.; MONCADA, J.; ROBERTO, I. C.; CARDONA, C. A. **Techno-economic analysis for brewer's spent grains use on a biorefinery concept: The Brazilian case**. *Bioresource Technology*, v. 148, p. 302–310, 2013. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.08.046>>. .

NEVES, C. E. B.; NEVES, F. M. **O que há de complexo no mundo complexo? Niklas Luhmann e a Teoria dos Sistemas Sociais**. *Sociologias*, v. 15, n. 8, p. 182–207, 2006.

NOGUEIRA, L.; SEABRA, J.; BEST, G.; LEAL, M.; POPPE, M. **Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro-RJ, 2008.

NOGUEIRA, M. A. F. DE S.; GARCIA, M. DA S. **Gestão dos resíduos do setor industrial sucroenergético: estudo de caso de uma usina no município de Rio Brilhante**, Mato Grosso do Sul. *Revista do Centro do Ciências Naturais e Exatas*, p. 3275–3283, Dec. 2013. Brasil. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5902/2236117010444>>. .

NYKO, D.; VALENTE, M. S.; DUNHAM, F. B.; et al. **Planos de fomento estruturado podem ser mecanismos mais eficientes de política industrial? Uma discussão à luz da experiência do PAISS e seus**

resultados. BNDES Setorial, v. 38, p. 55–78, 2013.

OLIVEIRA, L. K. DE. **Geopolítica Energética dos países Emergentes. I Seminário Internacional de Ciência Política da UFRGS.** Anais... . v. 2050, p.35, 2015. Rio Grande do Sul.

OROSKI, F. D. A. **Modelos de negócio e transição de sistemas tecnológicos: o caso dos bioplásticos**, 2013. Universidade Federal Do Rio De Janeiro. Tese de Doutorado

PATERAKI, C.; PATSALOU, M.; VLYSIDIS, A.; et al. **Actinobacillus succinogenes: Advances on succinic acid production and prospects for development of integrated biorefineries.** Biochemical Engineering Journal, v. 112, p. 285–303, 2016. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.bej.2016.04.005>>. .

PAUL R. STUART; EL-HALWAGI, M. M. **Integrated Biorefineries: design, analysis and optimization.** CRC Press ed. EUA, 2014.

PECK, P.; BENNETT, S. J.; BISSETT-AMESS, R.; LENHART, J.; MOZAFFARIAN, H. **Examining understanding, acceptance, and support for the biorefinery concept among EU policy-makers.** Biofuels, Bioproducts and Biorefining, v. 3, p. 361–383, 2009.

PILLING, S. Físico-Química Experimental II. , 2015. **Nota de aula Físico Química Experimental II**, Brasil - São José dos Campos/SP: Universidade do vale do paraíba.

PIMENTEL, A. R. **Uma abordagem para projeto de software orientado a objetos baseado na teoria de projeto axiomático**, 2007. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

RAMALHO, J. F. G. P.; SOBRINHO, N. M. B. D. A. **Metais Pesados Em Solos Cultivados Com Cana-de-açúcar Pelo Uso de Resíduos Agroindustriais.** Floresta e Ambiente, v. 8, n. 1, p. 120–129, 2001.

ROCHA, I.; HEIN, N.; KROENKE, A. Grau de entropia da informação em indicadores econômico-financeiros das empresas do setor econômico materiais básicos participantes dos níveis de governança corporativa da bm&fbovespa no período de 2005 a 2009. XLIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Anais... . p.15–19, 2011. Brasil - Ubatuba/SP. Disponível em: <<http://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2011/pdf/87407.pdf>>.

RODRIGUES, J. **Do engenho à biorrefinaria. A usina de açúcar como empreendimento industrial para a geração de produtos bioquímicos e biocombustíveis.** Quim. Nova, v. 34, n. 7, p. 1242–1254, 2011. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/qn/v34n7/v34n7a24.pdf>>. Acesso em: 11/9/2013.

RODRIGUES, L. P.; MONTEIRO, F. **A teoria dos sistemas sociais em Niklas Luhmann.** Revista Sociedade e Estado, v. 28, n. 3, p. 715–719, 2013. Porto Alegre- RGS. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0102-69922013000300013&lng=en&nrm=

iso&tlng=pt>. .

SALOMON, K. R. **Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade**, 2007. Universidade Federal de Itajubá. Tese de doutorado

SAMMONS, N. E.; YUAN, W.; EDEN, M. R.; AKSOY, B.; CULLINAN, H. T. Optimal biorefinery product allocation by combining process and economic modeling. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 86, n. 7, p. 800–808, 2008.

SANTANA, N. B. **Crescimento econômico, desenvolvimento sustentável e inovação tecnológica: uma análise de eficiência por envoltória de dados para os países do BRICS**, 2012. Universidade de São Paulo. Tese de doutorado.

SANTOS, D. D. S. DOS. **Produção de etanol de segunda geração por zymomonas mobilis naturalmente ocorrente e recombinante, empregando biomassa lignocelulósica**, 2012. Universidade de Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://tpqb.eq.ufrj.br/download/etanol-de-2a-geracao-por-zymomonas-mobilis.pdf>>. Tese de doutorado.

SANTOS, F. A.; QUEIRÓZ, J. H. DE; COLODETTE, J. L.; et al. **Potencial Da Palha de Cana de Açúcar Para Produção de Etanol**. Química Nova, v. 35, n. 5, p. 1004–1010, 2012.

SANTOS, G. R. DOS. **Quarenta anos de etanol em larga escala no Brasil: desafios, crises e perspectivas**. Brasília, 2016.

SANTOS, R. E. R. DOS. **Análise da viabilidade energética e econômica da produção de etanol em microdestilarias**, 2011. Universidade Federal De Itajubá. Dissertação de mestrado

SCHUTZ, F.; ETANOL, P. D. E.; PEQUENA, E. M.; UM, E.; DA, E. **Produção de etanol em pequena escala: um estudo da viabilidade econômica a partir das experiências de cândido godói e de ijuí(rs) para o ano de 2012**, 2013.

SILVA, L. C. A.; CORRÊA, F. C.; ABREU, P. S.; NETO, G. G. D.; DEDINI, F. G. **Aplicação da metodologia de projeto axiomático em sistemas de controle**. Nono Simpósio de Mecânica Computacional. Anais... . p.1–8, 2010. Brasil.

SILVEIRA, C. J. G.; ANNA, L. M. M. S.; CASTRO, A. M. DE; et al. **Processo para produção de gases energéticos a partir de correntes obtidas de materiais lignocelulósicos**, 2012. Brasil: INPI. Disponível em: <<http://www.google.com/patents/WO2012003556A1?cl=pt>>. .

SOUZA, S. P.; ÁVILA, M. T. DE; PACCA, S. **Life cycle assessment of sugarcane ethanol and palm oil biodiesel joint production**. Biomass and Bioenergy, v. 44, p. 70–79, 2012.

SUH, N. P. **Designing-in of Quality Through Axiomatic Design**. IEEE Transactions on Reliability, v. 44, n. 2, p. 256–264, 1995.

SUMMERS, J. D.; SHAH, J. J. **Mechanical Engineering Design Complexity Metrics: Size, Coupling, and Solvability**. Journal of Mechanical Design, v. 132, n. 2, p. 1–12, 2010. Disponível em: <<http://mechanicaldesign.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1472626>>.

TIDD, J.; BESSANT, J.; PAVITT, K. **Gestão da inovação**. 3º edition ed. Bookman Editora, 2008.

TIENGO, R. **Etanol 2G mobiliza iniciativas para uso sustentável de resíduos da cana**. Disponível em: <<http://g1.globo.com/sp/ribeirao-preto-franca/agrishow/2015/noticia/2015/04/etanol-2g-mobiliza-iniciativas-para-uso-sustentavel-de-residuos-da-cana.html>>. Acesso em: 25/7/2016.

TORRES, A. C. **Transição de sistemas tecnológicos: o desafio da inclusão das matérias-primas renováveis na indústria química brasileira**, 2009.

WANG, Q.; TUNZELMANN, N. VON. **Complexity and the functions of the firm: breadth and depth**. Research Policy, v. 29, n. 7–8, p. 805–818, 2000. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048733300001062>>.

WEBER, C. **What is “complexity”?** International Conference on Engineering Design. Anais... . p.1–12, 2005. MELBOURNE, Austrália.

WELLISCH, M.; JUNGMEIER, G.; KARBOWSKI, A.; PATEL, M. K.; ROGULSKA, M. **Biorefinery systems – potential contributors to sustainable innovation**. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, v. 4, p. 275–286, 2010.

ZHANG, S.; YANG, H.; SINGH, L. **The components of complexity in engineering design**. IIE Transactions, v. 31, n. October, p. 925–934, 1999.

Apêndice

Apêndice.1- Processos envolvidos no setor sucroalcooleiro

Etapas preliminares

A cana-de-açúcar necessita de etapas preliminares de tratamento e preparação para o processo industrial de geração de álcool etílico e açúcar. As etapas preliminares são: pesagem, análise química, mesa alimentadora e desintegração (Figura 18).

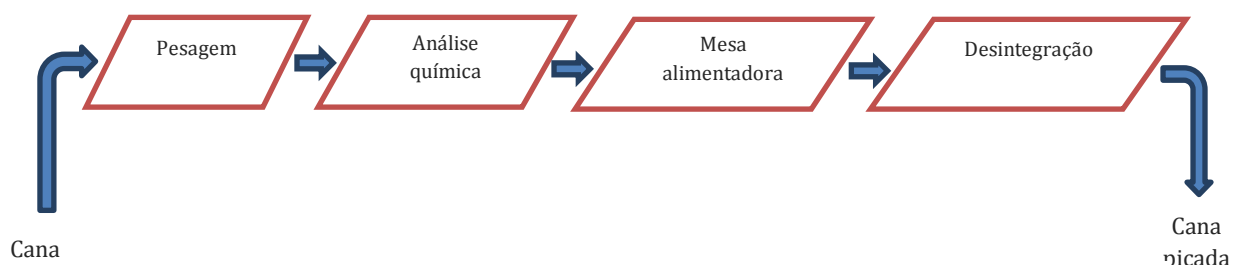


Figura 18: Ilustração das etapas de preparação da cana-de-açúcar

A primeira etapa é a de pesagem da cana-de-açúcar, realizada com a cana ainda dentro dos caminhões de transporte. Depois da pesagem, uma amostra da cana é direcionada para análises químicas (etapa de análise química) através de uma sonda. Essas análises visam à determinação da quantidade de sólidos solúveis totais.

Para o caso da cana os sólidos solúveis totais são, em maior proporção, a sacarose, açúcar resultante da união de uma molécula de frutose com uma de glicose. A sacarose será usada nas etapas posteriores para geração do etanol e do açúcar de mesa (HAMERSKI, 2009).

Na etapa de análise química, também são feitas análises para determinação de impurezas minerais na cana. Essas análises são importantes para acusar uma possível falha na colheita (colheitadeira com erro no corte, capturando muita terra) ou qualquer outro tipo de erro (CANA, 2011).

Em seguida, a cana passa para a mesa alimentadora. Nesta etapa pode ocorrer a lavagem da cana, porém este procedimento não é realizado em todas as usinas (HAMERSKI, 2009). A cana colhida inteira (corte manual) é normalmente lavada para diminuir as impurezas que afetam negativamente o processamento da cana na própria mesa de recepção da cana. No caso de cana picada (corte mecanizado), a cana não pode ser

lavada, pois as perdas de sacarose seriam muito elevadas. Por isso algumas usinas estão começando a utilizar o sistema de limpeza a seco, baseado em jatos de ar sobre a cana (CANA, 2011)

A etapa subsequente é a de preparo da cana para moagem. Nesta última etapa preliminar (etapa desintegração), a cana é picada e desintegrada para que as células da mesma sejam rompidas. Esse processo mecânico aumenta a capacidade de extração do caldo da cana na fase da moagem (HAMERSKI, 2009). Além disso, a cana passa por uma esteira com eletroímãs para retirada de possíveis metais que possam danificar a moenda na etapa de extração (CANA, 2011).

Etapa de extração do caldo de cana

A cana então segue para etapa de extração do caldo da cana. Existem dois métodos de extração: por moagem ou por difusão (HAMERSKI, 2009). O segundo não tem aderência relevante no Brasil e, portanto, não foi escolhida para compor a Biorrefinaria A1 e não será detalhada neste trabalho.

A moagem é um processo de extração do caldo que consiste em fazer a cana passar entre rolos com uma pressão pré-estabelecida aplicada a eles. A moenda deve extrair o caldo e produzir bagaço com um grau de umidade que permita sua utilização como combustível nas caldeiras (NOVA CANA, 2015). A quantidade de bagaço produzida varia de 240 kg a 280kg por tonelada de cana moída. Essa quantidade geralmente é suficiente para gerar energia necessária em todo o processamento de cana e ainda gerar uma sobra que varia, na maioria dos casos, entre zero e 10% (NOVA CANA, 2015). O processo é ilustrado na Figura 19.

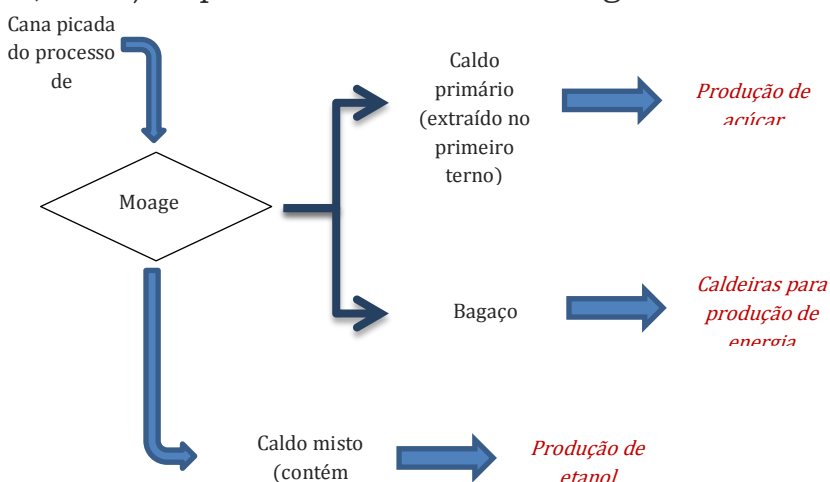


Figura 19: Etapa de extração do caldo da cana

A moenda, equipamento que promove a moagem da cana, é normalmente formada por quatro a sete ternos (três rolos dispostos em triângulos) em série. O objetivo é que a cana seja comprimida no mínimo duas vezes em cada disposição de rolos ou ternos. No entanto, somente a pressão não expelle mais do que 90% do caldo contido nas fibras. Isto porque, após a passagem pelo primeiro destes ternos, a proporção de caldo em relação à fibra cai de aproximadamente 7% para algo entre 2 a 2,5% de caldo, dificultando a extração do caldo residual. É necessário então fazer a embebição do bagaço para recuperar maior volume de caldo. Este processo consiste apenas em saturar o bagaço com água ou caldo para que, passando novamente pelo terno da moenda, uma maior quantidade de caldo residual possa ser expelida. A embebição pode ser simples, composta e com recirculação¹³, sendo o tipo composta o mais usado. Neste caso a água é injetada na camada de cana entre os dois últimos ternos e o caldo de cada terno é injetado antes do terno anterior até o segundo terno. Normalmente o caldo extraído no primeiro terno é enviado para a fábrica de açúcar, por possuir maior quantidade de açúcar, e o restante do caldo é direcionado para a destilaria. A eficiência de extração de açúcares varia de 94,0% a 97,5% e a umidade final do bagaço é em torno de 50% (CANA, 2011; HAMERSKI, 2009).

Atualmente, na maioria das usinas, o vapor sai das caldeiras na pressão de 22bar e temperatura de 300°C; nessas condições, o vapor é expandido em turbinas de contrapressão de até 2,5bar, turbinas estas que acionam os principais equipamentos mecânicos da usina (picadores, desfibradores, moendas, exaustores e bombas de água de alimentação das caldeiras), bem como os geradores de energia elétrica por onde a energia elétrica é fornecida para os vários setores da indústria. O vapor a 2,5bar, denominado de vapor de escape, é ajustado para a condição de saturação e enviado para o processo, fornecendo toda a energia térmica necessária na produção de açúcar e etanol (NOVA CANA, 2015).

Etapa de tratamento do caldo de cana

Esta etapa engloba sub-etapas: tratamento físico e tratamento químico. A etapa de tratamento físico refere-se ao peneiramento e a etapa de tratamento químico refere-se à clarificação.

¹³Na embebição simples apenas água é aplicada no bagaço de cada terno a partir do segundo terno. Já na embebição com recirculação, simples ou composta, uma parte do caldo também é re-injetado nos ternos para aumentar o grau de embebição e minimizar a diluição.

A primeira etapa é o peneiramento. O caldo, tanto o misto quanto o primário, atravessa peneiras. Resíduos grosseiros, como pedaços de bagaço e terra, ficam retidos nas peneiras. O peneiramento é um procedimento importante antes da fase de clarificação, pois os resíduos retirados nesta etapa poderiam promover frequentes entupimentos de bombas, propiciando incrustações em canalizações e em tubulações dos corpos aquecedores e evaporadores (HAMERSKI, 2009).

Depois do peneiramento o caldo segue para a pesagem. A pesagem do caldo é a operação básica de todo o controle do processo de fabricação e, portanto, não é contabilizada como uma etapa da extração. Seu objetivo é basicamente verificar se o processo fornece o melhor resultado prático, analisando os valores de peso do caldo que indicam a grandeza das perdas que ocorrem na fábrica (HAMERSKI, 2009).

O caldo peneirado ainda necessita passar por uma redução de impurezas para ter uma qualidade adequada ao processamento do açúcar e do etanol. Portanto, ele segue para um tratamento químico chamado clarificação, cujo objetivo é remover as impurezas insolúveis que não foram eliminadas na fase anterior e as impurezas coloidais e solúveis; este processo visa à coagulação, floculação e precipitação destas impurezas que são eliminadas por sedimentação. É necessário ainda fazer a correção do pH para evitar inversão e decomposição da sacarose (NOVA CANA, 2015; HAMERSKI, 2009).

São três os processos que compõem a clarificação: calagem, fosfatação e sulfitação. Sendo a última obrigatório apenas na fabricação do açúcar para inibir reações que causam formação de cor, coagulação de coloides solúveis, formação do precipitado CaSO_3 (sulfito de cálcio) e para diminuir a viscosidade do caldo e do xarope, massas cozidas e méis, facilitando as operações de evaporação e cozimento (NOVA CANA, 2015; HAMERSKI, 2009). Os resíduos gerados desses tratamentos são decantados, filtrados e enviados para lavoura para serem usados como adubo, pois possuem alta concentração de fosfato.

A calagem ou defecação consiste na adição de cal hidratada (leite-de-cal) suficiente para neutralizar os ácidos orgânicos presentes no caldo. Já a fosfatação é feita junto com a calagem e consiste na adição de ácido fosfórico. A fosfatação auxilia na remoção de materiais corantes e de parte dos coloides do caldo (HAMERSKI, 2009; MEZARROBA et al., 2010).

Por fim, a sulfitação consiste no uso de anidrido sulfuroso como auxílio na redução do pH, na diminuição da viscosidade do caldo, na

formação de complexos com açúcares redutores, na preservação do caldo contra alguns microrganismos e na prevenção do amarelamento do açúcar (cristal branco) durante o armazenamento (HAMERSKI, 2009; MEZAROBÁ et al., 2010).

Existe um quarto processo chamado carbonatação que consiste no uso do anidrido carbônico. É um método usado na produção de açúcar de beterraba e muito pouco citado para açúcar de cana. Nesse processo há precipitação de carbonato de cálcio, que englobará as matérias primas corantes e as gomas, tornando-se um complemento da clarificação (MEZAROBÁ et al., 2010).

Após passar pela clarificação, o caldo deverá seguir para um tratamento térmico. Esse tratamento consiste em uma pasteurização com aquecimento e resfriamento imediato como forma de esterilização do caldo (NOVA CANA, 2015). Todo processo de tratamento do caldo é ilustrado na Figura 20.

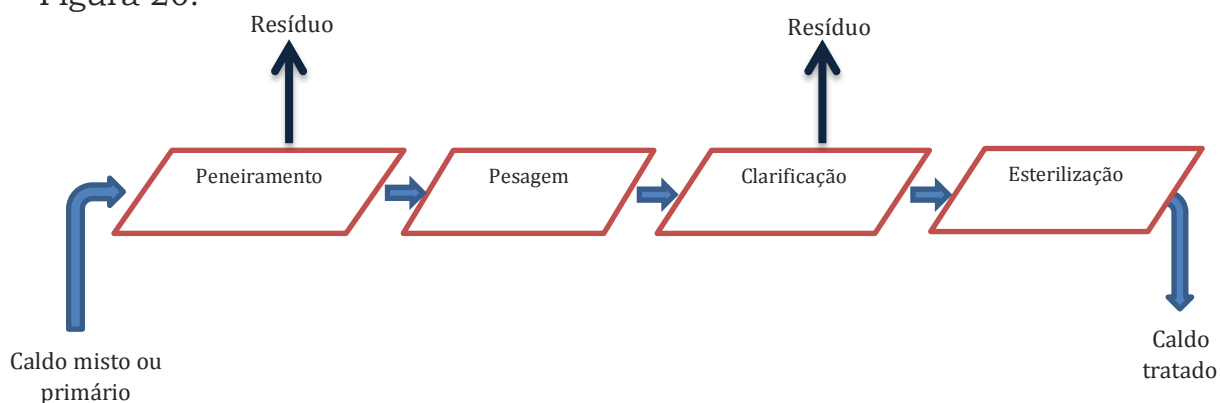


Figura 20: Etapa de tratamento do caldo

Produção de açúcar

O caldo primário da cana tratado é direcionado para a produção de cana. O caldo tratado é transparente, de cor levemente amarelada que contem basicamente água, sais minerais e açúcares. Para obtenção do açúcar é preciso então que parte da água seja retirada do caldo. Esse processo é feito na etapa de evaporação que consiste na retirada de pelo menos 75% da água presente nesse caldo clarificado para transformá-lo em um xarope concentrado com aproximadamente 65° Bx¹⁴ (porcentagem de sólidos solúveis) (ADÉLIA, 2010).

¹⁴**Brix** (símbolo °Bx) é uma escala numérica que mede a quantidade de sólidos solúveis em uma solução de sacarose. Um grau Brix (1°Bx) é igual a 1g de açúcar por 100 g de solução, ou 1% de açúcar (PILLING, 2015).

O xarope passa para a etapa de cozimento. Esta etapa visa à cristalização e recuperação de 80% a 85% da sacarose presente no xarope. O sistema utilizado transforma o xarope em massa que posteriormente será centrifugada (ADÉLIA, 2010).

Após o cozimento a massa passa por um processo de separação física (centrifugação). O açúcar é centrifugado e lavado com água quente e vapor simultaneamente, tendo como subproduto o mel ou melaço que poderá ser utilizado no processo de fabricação de etanol (ADÉLIA, 2010).

Ao final o açúcar é encaminhado aos secadores para a secagem e posteriormente peneirado. Na sequência é envasado em *big-bags* e armazenado para comercialização.

Uma simplificação do processo de produção do açúcar a partir do caldo de cana tratado é representada na Figura 21.

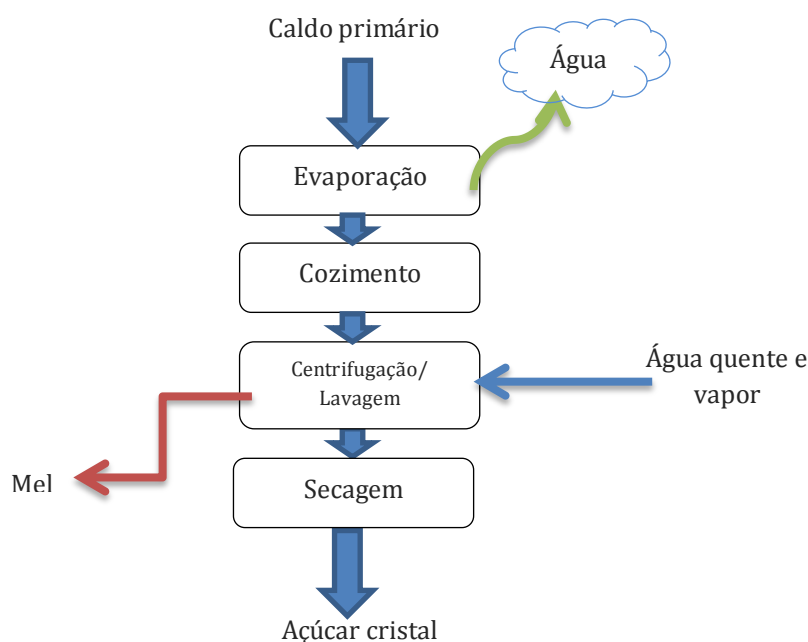


Figura 21: Produção de açúcar

Produção de etanol

Para produção de etanol o caldo misto, após estar completamente puro, é levado às dornas (tanques) no qual é misturado a ele um fermento com leveduras¹⁵ passando a ser chamado de mosto. Esses micro-

¹⁵ Outros micro-organismos podem ser aplicados para fermentação de sacarose. Um exemplo disso são os estudos feitos com bactérias *Zymomonas mobilis* na produção de etanol a partir da cana-de-açúcar

organismos atuam no açúcar presente no caldo. Enzimas contidas na própria levedura quebram a sacarose em frutose e glicose. Em seguida, as leveduras quebram as moléculas de glicose produzindo etanol e gás carbônico (CANA, 2011).

O processo fermentativo deve ser realizado em tanques esterilizados, com decantação e como uma posterior recuperação do fermento para que possa ser utilizado em outras sucessivas fermentações. Nesta parte ainda ocorre o tratamento do caldo com ácido sulfúrico para evitar a contaminação por outros micro-organismos. A adição de nutrientes, como o sulfato de amônia e ureia, também deve ser considerada para manutenção e metabolismo da levedura que realizará o processo fermentativo (SANTOS, 2011).

Além disso, o processo de fermentação produz como resultado o vinho, chamado também de vinho fermentado, que possui leveduras, açúcar não fermentado e cerca de 10% de etanol. O índice dos açúcares no mosto, nesta fase, pode variar de 14 a 22 Bx e, caso haja necessidade, pode-se usar água para o ajuste do Bx (CANA, 2011).

Estando o etanol misturado ao vinho fermentado o próximo passo é separá-lo da mistura. Nesse processo chamado destilação o líquido é colocado em colunas de destilação nas quais ele é aquecido até evaporação do álcool. Na evaporação, seguida da condensação (transformação em líquido), é separado o vinho do etanol. Com isso obtém-se o álcool hidratado, usado como etanol combustível, com grau alcoólico em cerca de 100% (CANA, 2011).

Com o álcool hidratado preparado, basta retirar o restante de água contido nele para se gerar o álcool anidro. Essa é a etapa da desidratação, na qual podem ser utilizadas diversas técnicas como peneiração molecular e pervaporação. A mais aplicada é a destilação azeotrópica, método mais antigo de separação de misturas binárias azeotrópicas normalmente através do uso de um hidrocarboneto como agente desidratante.

A destilação azeotrópica é definida a partir do princípio de que a presença de um determinado solvente volátil na mistura azeotrópica (água+álcool) forma um novo azeótropo ternário, mais volátil que a mistura inicial, cuja composição é seletivamente mais rica em água que álcool com respeito à mistura original. Para produzir etanol anidro o equilíbrio de destilação deve ser alterado por um terceiro elemento químico. Vários compostos como o benzeno, n-pentano, cicloexano, hexano, n-heptano, isooctano, acetona, éter etílico ou polímeros podem

ser usados como agentes desidratantes para produzir etanol anidro. Destes, o benzeno e o cicloexano eram os mais extensivamente utilizados, mas, em função da proibição do uso do benzeno por se tratar de um composto carcinogênico, embora ainda seja usado em alguns países, usa-se mais o cicloexano (FIGUEIREDO, 2010).

Um resumo do processo de produção do etanol está ilustrado na Figura 22.

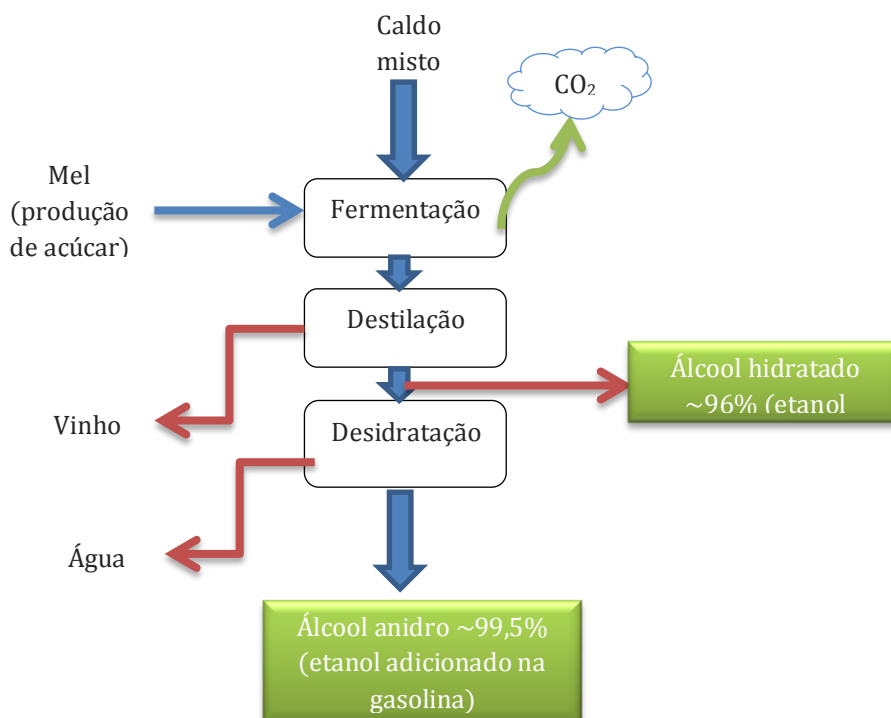


Figura 22: Produção do etanol

Etapas de processamento da palha e do bagaço da cana-de-açúcar

Pré tratamento

O pré-tratamento aplicado é do tipo físico-químico utilizando explosão a vapor. Também chamado “auto-hidrólise”, o processo consiste na compressão e descompressão rápida do material a temperatura elevada (SANTOS, 2012).

Sua operação consiste na impregnação do material lignocelulósico em água num sistema sob alta pressão (7 a 50atm) e temperatura (150 a 190°C). Em seguida, a pressão é aliviada instantaneamente e essa

variação brusca de pressão provoca uma explosão que resulta na ruptura das ligações estruturais do material. É formada então uma mistura sólido-líquida na qual a fração sólida se trata do complexo lignocelulósico desorganizado – também chamado de celulignina – e a líquida é a fase “auto hidrolisada”, composta de xilose, xiloligosacarídeos e ácidos acético e urônico (SANTOS, 2012).

Hidrólise enzimática

O bagaço e a palha da cana-de-açúcar, após o pré-tratamento de deslignificação, é suspenso em água (aproximadamente a 5% de sólidos em suspensão). Um preparado de enzima celulase é incorporado ao meio, em reatores, para conversão de celulose em ART (NOVA CANA, 2015).

Apêndice 2 – Valores de TRL (segundo JUNGMEIER *et al.*, (2014))

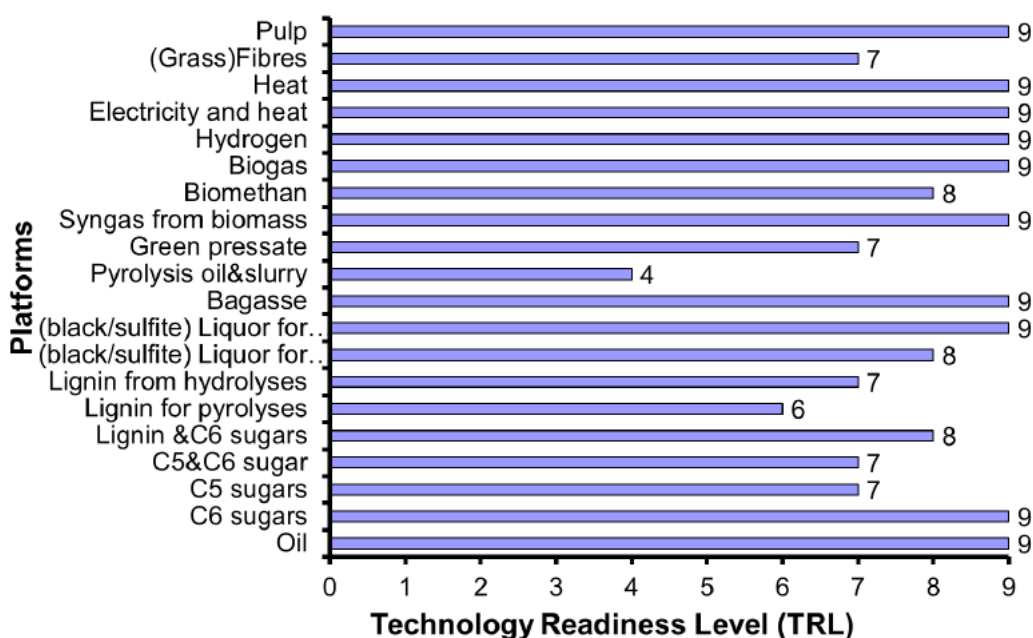
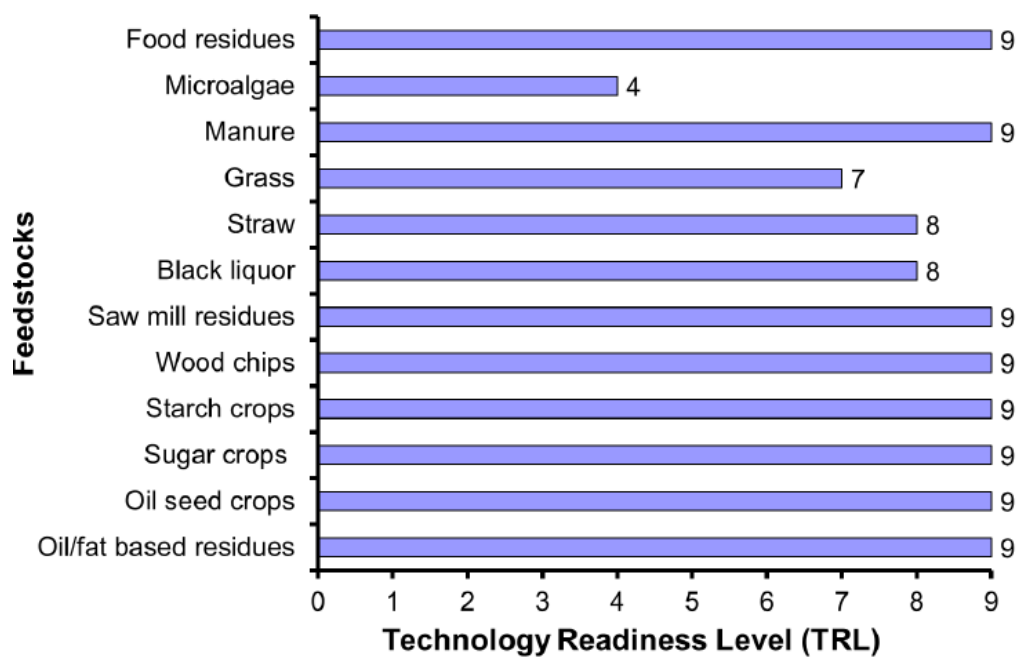


Figura 23: TRL para plataformas



In some countries (e.g. Denmark) straw is already a commercial feedstock, the TRL = 9

Figura 24: TRL para matérias-primas

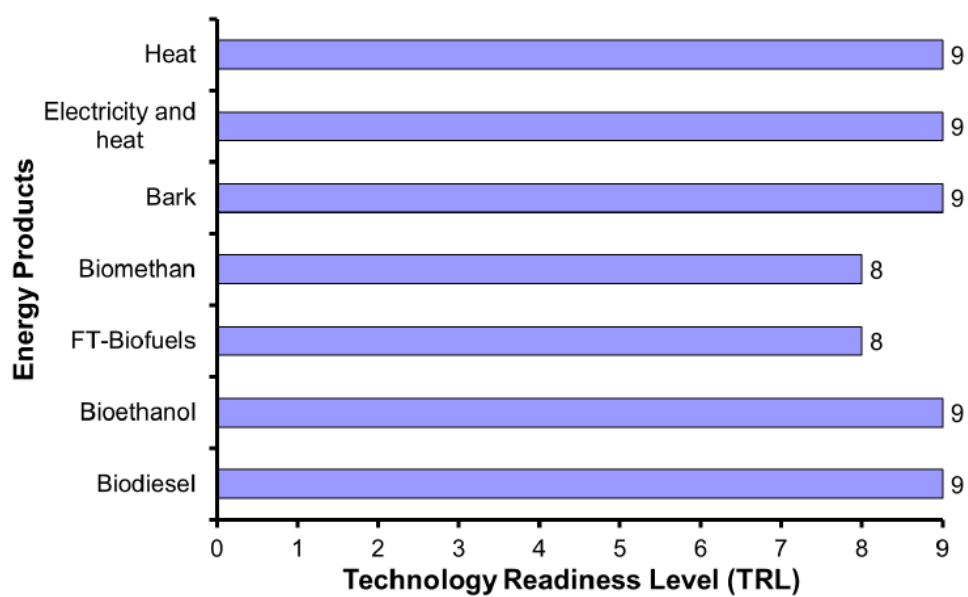


Figura 25: TRL para produtos energéticos

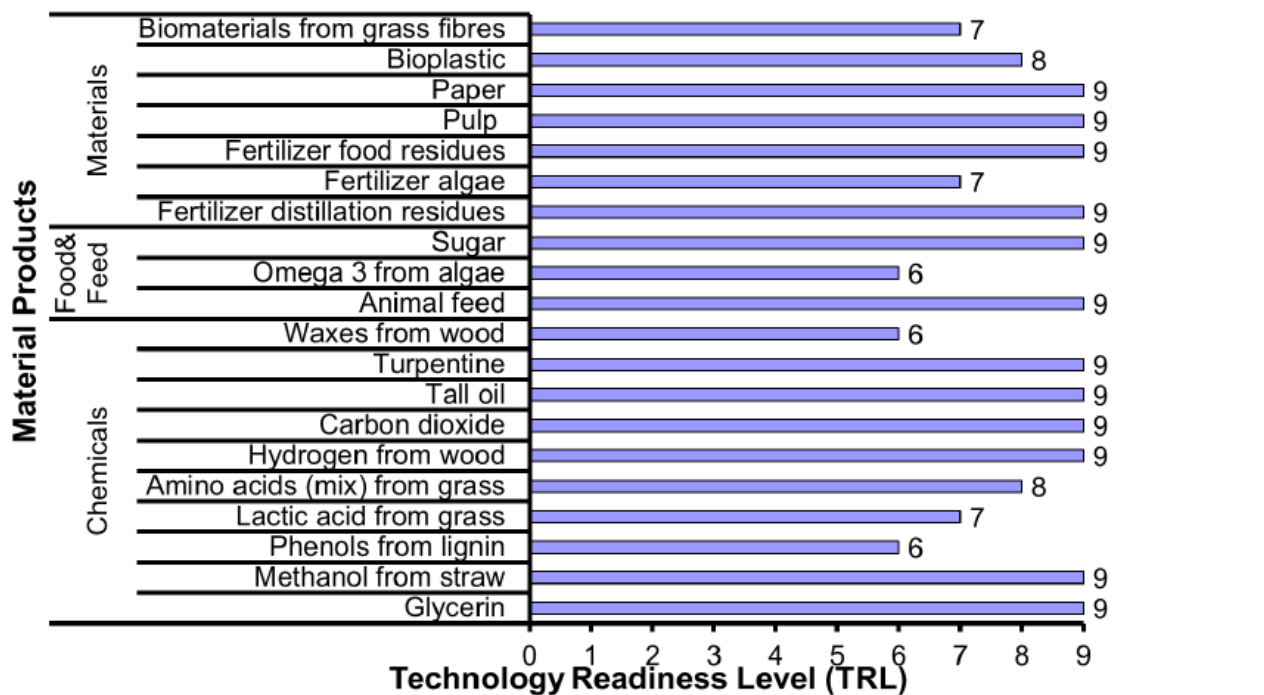


Figura 26: TRL para produtos

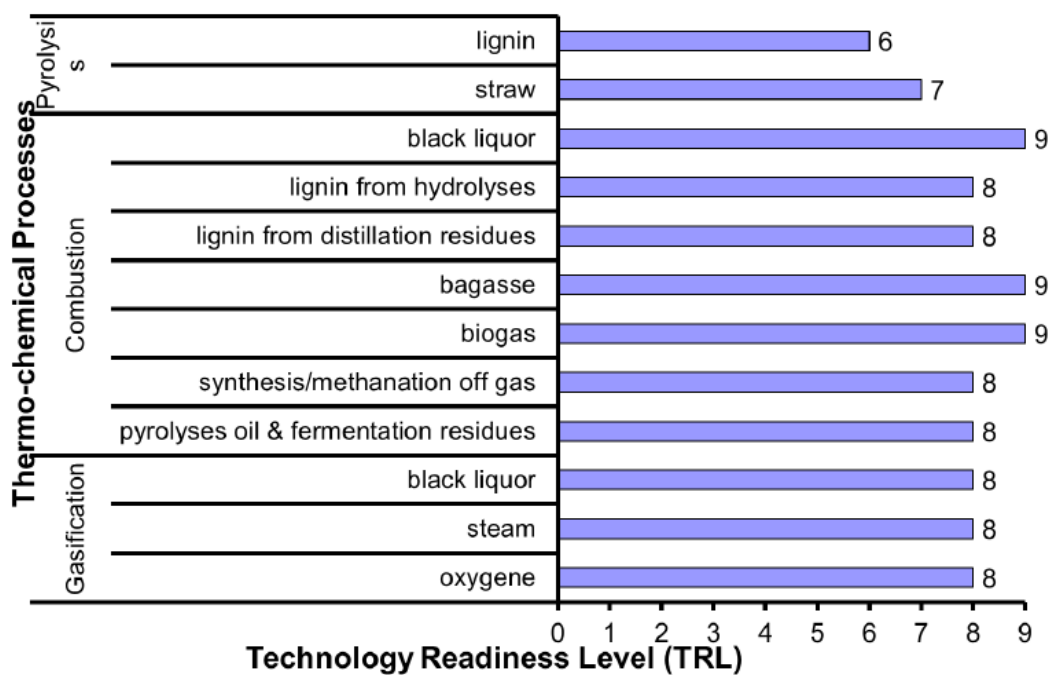


Figura 27: TRL para processos termoquímicos

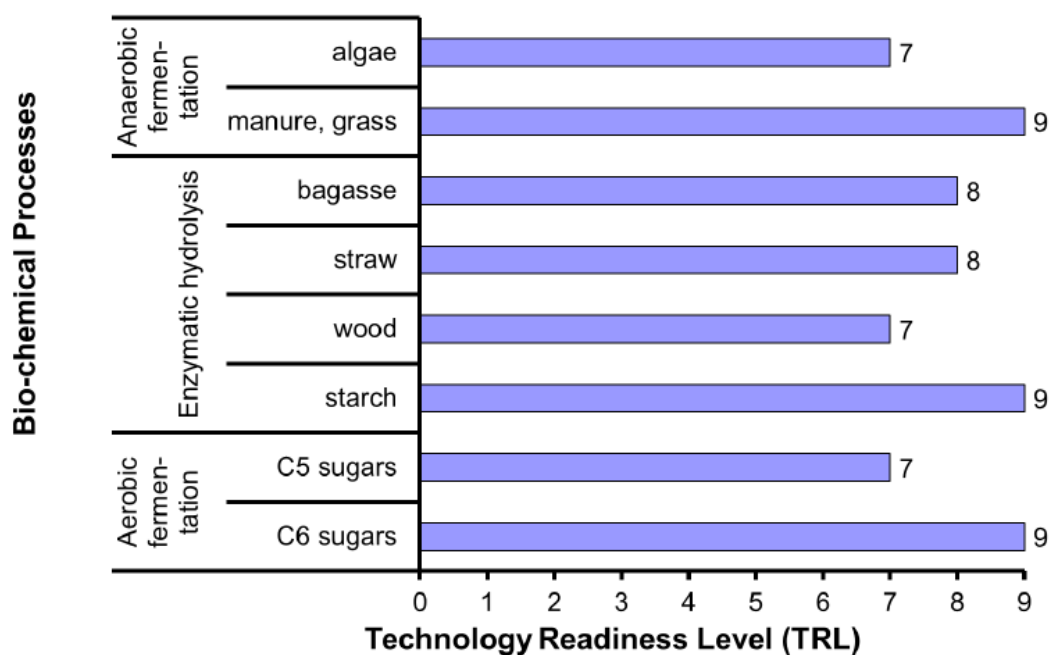


Figura 28: TRL para processos bioquímicos

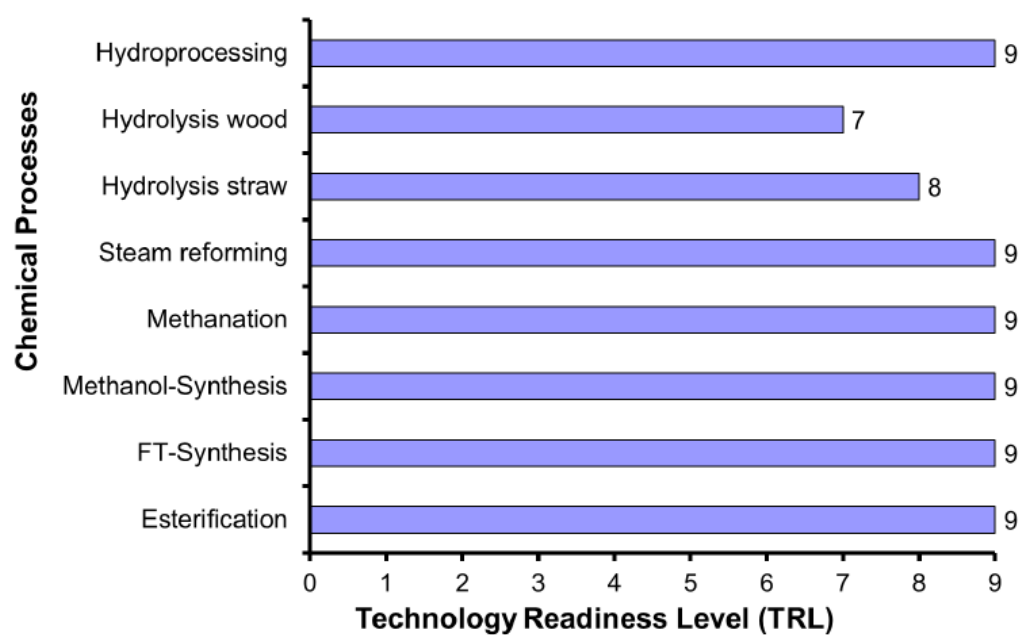


Figura 29: TRL de processos químicos

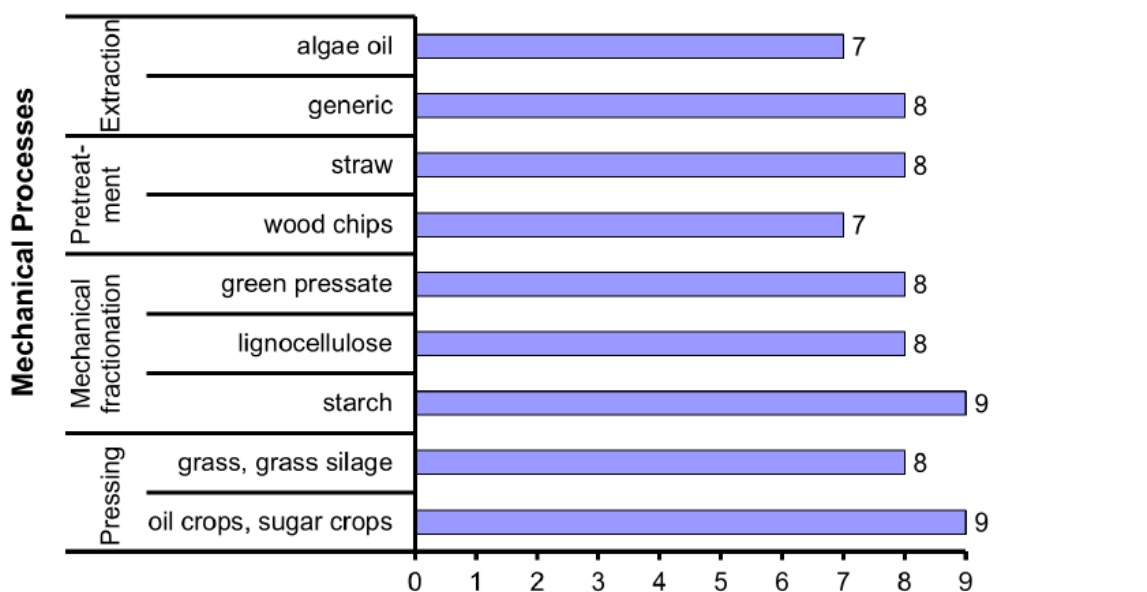


Figura 30: TRL de processos mecânicos I

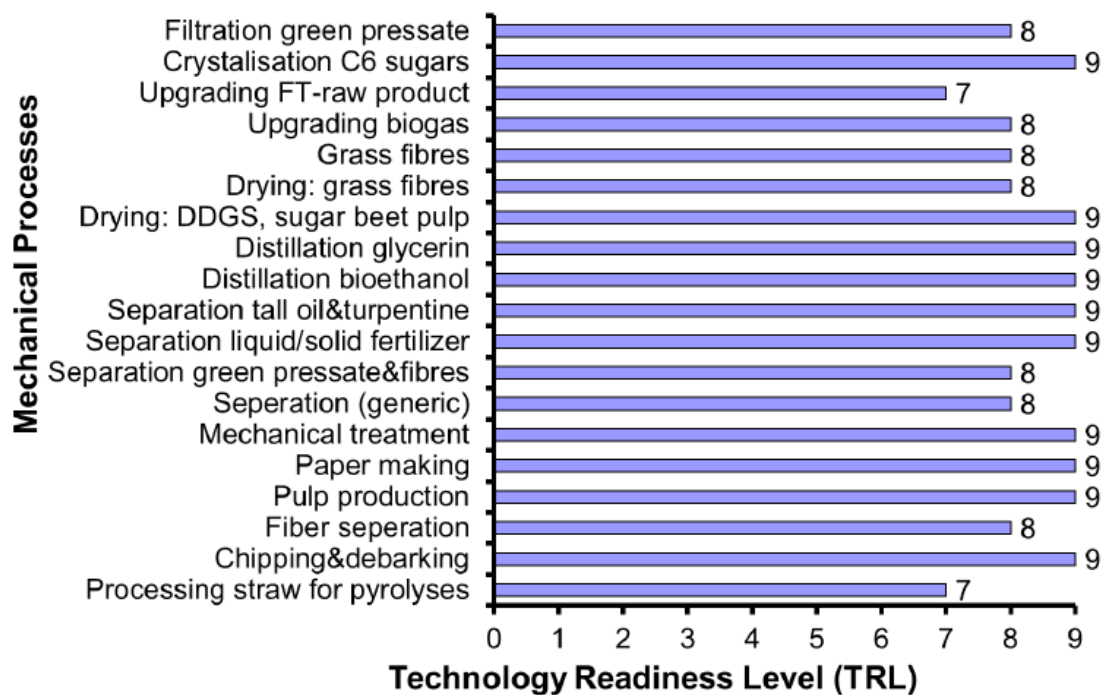


Figura 31: TRL de processos mecânicos II