



UDESC

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE DA ECOEFICIÊNCIA EM
UMA UNIDADE DE COGERAÇÃO
DE ENERGIA DE BIOMASSA
FLORESTAL**

GUSTAVO LUIS JARENKOW

LAGES, 2018

GUSTAVO LUIS JARENKOW

**ANÁLISE DA ECOEFICIÊNCIA EM UMA UNIDADE DE COGERAÇÃO DE
ENERGIA DE BIOMASSA FLORESTAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais, na área de concentração de Gestão, Monitoramento e Controle Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Flávio José Simioni

**LAGES
2018**

Ficha catalográfica elaborada pelo(a) autor(a), com
auxílio do programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CAV/UEDESC

Luis Jarenkow, Gustavo
ANÁLISE DA ECOEFICIÊNCIA EM UMA UNIDADE DE
COGERAÇÃO DE ENERGIA DE BIOMASSA FLORESTAL /
Gustavo Luis Jarenkow. - Lages , 2018.
94 p.

Orientador: Flávio José Simioni
Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado de
Santa Catarina, Centro de Ciências
Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em
Ciências Ambientais, Lages, 2018.

1. Ecoeficiência. 2. Biomassa Florestal. 3.
Usina de cogeração de energia. 4. Impactos
Ambientais. I. José Simioni, Flávio. II.
Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa
de Pós-Graduação. III. Título.

GUSTAVO LUIS JARENKOW

**ANÁLISE DA ECOEFICIÊNCIA EM UMA UNIDADE DE COGERAÇÃO DE
ENERGIA DE BIOMASSA FLORESTAL**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais, da Universidade do Estado de Santa Catarina.

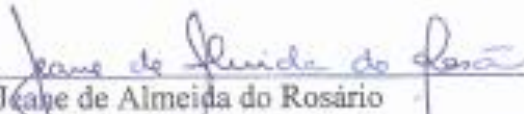
Banca examinadora:

Orientador:



Prof. Dr. Flávio José Simioni
Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC/CAV

Membros:



Prof. Dra. Jeanne de Almeida do Rosário
Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC/CAV



Dr. Edivan Cherubini
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Lages, 27 de fevereiro de 2018

À minha família, pelo amor, respeito, carinho e paciência, incondicionais.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Flávio José Simioni pela dedicação, paciência, amizade, pela confiança na realização deste trabalho e pela oportunidade de trabalhar no Laboratório de Gestão Ambiental (LabGEA).

À Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), pelo investimento na minha formação, com especial agradecimento ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e aos docentes do programa, pela dedicação ao ensino de qualidade. Estendo os agradecimentos também ao programa de bolsas da Fundação de Amparo a Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC) pela bolsa de estudos concedida durante o período de mestrado.

À professora Dr.^a Jeane de Almeida do Rosário e ao Dr. Edivan Cherubini por aceitarem o convite para a banca avaliadora.

À todos os amigos e companheiros do LabGEA (CAV/UDESC), que foram essenciais durante a pesquisa, pelas horas de ajuda, desabafos e descontrações, meu muito obrigado. Um ambiente agradável e amigável, o qual desejo muito sucesso.

À empresa Engie Brasil Energia, pela disponibilização dos dados da Unidade de Cogeração Lages (UCLA), em especial ao José Luiz dos Santos Dutra e ao Geovane Soares pelas disponibilidades em responder os questionamentos que surgiram ao longo do estudo.

À professora Daiana Petry Leite pelo auxílio e programação de *software* utilizado.

Aos amigos que estão comigo desde a graduação, bem como as amigas desenvolvidas ao longo do mestrado, foram de fundamental importância durante este tempo, e levarei sempre essas amigas para a vida.

E por fim, mas com toda a certeza os mais importantes, a minha família pela diária dedicação, carinho, atenção, incentivo e apoio em todos os momentos da minha vida, são o maior exemplo de amor e de força para a superação de todos os obstáculos.

A todos, meus sinceros agradecimentos!

RESUMO

Os recursos florestais foram sempre muito utilizados, ao longo da história da evolução humana, para aquecimento, cocção e abrigo. Atualmente, esses recursos estão sendo utilizados também para a geração de energia elétrica a partir da sua queima como matéria-prima, a qual é considerada uma energia limpa e de fonte renovável. Atualmente a preocupação das empresas e governos é com os impactos ambientais causados pela produção de matérias nos mais diversos setores, dentre eles, o setor de produção de energia, e uma ferramenta de gestão de impactos ambientais, é o estudo da ecoeficiência através de indicadores ambientais. A ecoeficiência é um termo criado em 1992, durante a convenção Rio92, a qual objetiva reduzir o consumo de recursos e energia, bem como os impactos ambientais através da redução na geração de efluentes, substâncias tóxicas e emissões atmosféricas, além de aumentar o valor do produto ou serviço. O presente trabalho tem como objetivo analisar a ecoeficiência da unidade de cogeração de energia da Engie Brasil Energia em Lages/SC, visando identificar e analisar os indicadores de ecoeficiência e suas relações com os impactos ambientais. Para este estudo, foi levantado e analisado o funcionamento e produção de energia pela usina de cogeração da Engie Brasil Energia, na cidade de Lages/SC. A partir de visitas técnicas realizadas no local, foi possível determinar os benefícios econômicos e os impactos ambientais da UCLA (Usina de Cogeração Lages), para que, posteriormente, fossem determinados e analisados os indicadores de ecoeficiência para cada um dos setores da usina. Como resultados foram gerados gráficos que apresentam o comportamento dos indicadores de ecoeficiência de janeiro de 2010 a junho de 2017, os quais demonstraram que ao longo do período de estudos, houveram melhorias significativas na qualidade dos indicadores, fazendo com que a UCLA venha se tornando uma usina mais ecoeficiente e preocupada com o desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: Ecoeficiência. Biomassa Florestal. Usina de Cogeração de Energia. Impactos Ambientais.

ABSTRACT

Forest resources have always been widely used throughout the history of human evolution for heating, cooking and sheltering. Currently, these resources are also being used for the generation of electricity from its burning as a raw material, which is considered a clean and renewable energy source. Currently the concern of companies and governments is with the environmental impacts caused by the production of materials in the most diverse sectors, among them, the energy production sector, and an environmental impact management tool, is the study of the eco-efficiency through environmental indicators. Eco-efficiency is a term created in 1992 during the Rio92 convention, which aims to reduce resource and energy consumption, reduce environmental impacts by reducing the generation of effluents, toxic substances and atmospheric emissions, as well as increasing the value of the product or service. The present work has the objective of analyzing the eco-efficiency of the energy cogeneration unit of Engie Brasil Energia in Lages/SC, aiming to identify and analyze the eco-efficiency indicators and their relation with environmental impacts. For this study, was collected and analyzed the operation and energy production by the cogeneration plant of Engie Brasil Energia, in the city of Lages/SC. Based on on-site technical visits, was possible to determine the economic benefits and environmental impacts of UCLA (Lages Cogeneration Plant), so that the eco-efficiency indicators for each of the plant's sectors were subsequently determined and analyzed. As results, graphs were generated that show the behavior of the eco-efficiency indicators from January 2010 to June 2017, which showed that during the study period, there were significant improvements in the quality of the indicators, making UCLA become a more eco-efficient and concerned with sustainable development.

Keywords: Eco-efficiency. Forest Biomass. Energy Cogeneration Plant. Environmental Impacts.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação da sequência de etapas e estratégia de coleta de dados.	45
Figura 2 - Esquematização do modelo de análise da ecoeficiência.	46
Figura 3 - Evolução trimestral do teor de umidade (%) da biomassa adquirida pela UCLA. ...	52
Figura 4 - Evolução trimestral do teor de cinzas (%) da biomassa adquirida pela UCLA.	53
Figura 5 - Evolução trimestral do poder calorífico superior (kcal/kg) da biomassa adquirida pela UCLA.	54
Figura 6 - Produção bruta de energia (kWh) ao longo do período de estudo.	56
Figura 7 - Modelo esquemático da etapa Pátio de Biomassa para a produção de energia elétrica da UCLA.	57
Figura 8 - Evolução do indicador de ecoeficiência “blend/entrada de biomassa (t/t)” no período 2010-2017.	59
Figura 9 - Evolução do indicador de ecoeficiência “blend/combustível (t/L)” no período 2010-2017.	60
Figura 10 - Evolução do indicador de ecoeficiência “blend/energia consumida (t/kWh)” no período 2010-2017.	61
Figura 11 - Evolução do indicador de ecoeficiência “blend/mdo (t/hora-homem)” no período 2010-2017.	62
Figura 12 - Modelo esquemático da etapa de Geração de Vapor para a produção de energia elétrica da UCLA.	64
Figura 13 - Evolução do indicador de ecoeficiência “vapor/blend (t/t)” no período 2010-2017.	65
Figura 14 - Evolução do indicador de ecoeficiência “vapor/água (t/m ³)” no período 2010-2017.	66
Figura 15 - Evolução do indicador de ecoeficiência “vapor/mdo (t/hora-homem)” no período 2010-2017.	67
Figura 16 - Evolução do indicador de ecoeficiência “vapor/energia consumida (t/kWh)” no período 2010-2017.	68
Figura 17 - Modelo esquemático da etapa Geração de Energia Elétrica da UCLA.	69
Figura 18 - Evolução do indicador de ecoeficiência “energia produzida/energia consumida (kWh/kWh)” no período 2010-2017.	70

Figura 19 - Evolução do indicador de ecoeficiência “energia produzida/entrada de biomassa (kWh/t)” no período 2010-2017.	71
Figura 20 - Evolução do indicador de ecoeficiência “energia produzida/blend (kWh/t)” no período 2010-2017.....	72
Figura 21 - Evolução do indicador de ecoeficiência “energia produzida/vapor (kWh/t)” no período 2010-2017.....	73
Figura 22 - Evolução do indicador de ecoeficiência “energia produzida/água (kWh/m ³)” no período 2010-2017.....	73
Figura 23 - Evolução do indicador de ecoeficiência “energia produzida/cinza (kWh/t)” no período 2010-2017.....	74
Figura 24 - Modelo esquemático do Sistema de Água para a produção de Energia Elétrica da UCLA.	77
Figura 25 - Evolução do indicador de ecoeficiência “água/energia consumida (m ³ /kWh)” no período 2010-2017.....	79
Figura 26 - Evolução do indicador de ecoeficiência “água/mdo (m ³ /hora-homem)” no período 2010-2017.....	79
Figura 27 - Modelo esquemático do Sistema de Cinzas para a produção de Energia Elétrica da UCLA.	81
Figura 28 - Evolução do indicador de ecoeficiência “cinza/energia consumida (t/kWh)” no período 2010-2017.....	83
Figura 29 - Evolução do indicador de ecoeficiência “cinza/mdo (t/hora-homem)” no período 2010-2017.....	84
Figura 30 - Evolução do indicador de ecoeficiência “cinza/água (t/m ³)” no período 2010-2017.	84
Figura 31 - Evolução do indicador de ecoeficiência “cinza/blend (t/t)” no período 2010-2017.	85
Figura 32 - Evolução do indicador de ecoeficiência “cinza/vapor (t/t)” no período 2010-2017.	86
Figura 33 - Evolução do indicador de ecoeficiência “cinza/energia produzida (t/kWh)” no período 2010-2017.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Conceitos de ecoeficiência para diferentes organizações mundiais.....	29
Tabela 2 - Exemplos de indicadores de ecoeficiência para micro e macro-escala levando em consideração o uso dos recursos e a influência ambiental.	31
Tabela 3 - Comparativo entre estudos brasileiros de ecoeficiência realizados durante os anos de 2006 e 2016 (Continua).....	37
Tabela 4 - Etapas da produção de energia elétrica por queima de biomassa florestal e seus respectivos indicadores de ecoeficiência.	47
Tabela 5 - Equações referentes aos indicadores da etapa Pátio de Biomassa da UCLA.....	63
Tabela 6 - Equações referentes aos indicadores da etapa Geração de Vapor da UCLA.	68
Tabela 7 - Equações referentes aos indicadores da etapa Geração de energia elétrica da UCLA.....	75
Tabela 8 - Equações referentes aos indicadores do sistema de água da UCLA.	80
Tabela 9- Equações referentes aos indicadores do sistema de cinza da UCLA.	87

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	OBJETIVOS.....	24
1.1.1	Objetivo Geral	24
1.1.2	Objetivos Específicos.....	24
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	24
2	REVISÃO TEÓRICA SOBRE ECOEFICIÊNCIA.....	25
2.1	BIOMASSA FLORESTAL PARA ENERGIA	25
2.2	ECOEFICIÊNCIA.....	26
2.3	SURGIMENTO DO CONCEITO DE ECOEFICIÊNCIA	27
2.4	IMPACTOS AMBIENTAIS	31
2.5	ANÁLISE DA ECOEFICIÊNCIA NO BRASIL.....	32
2.5.1	Estudos brasileiros sobre ecoeficiência.....	33
2.5.2	Análise comparativa entre os estudos brasileiros sobre ecoeficiência.....	36
2.6	QUALIDADE DA BIOMASSA	39
2.6.1	Teor de Umidade	40
2.6.2	Teor de Cinzas	40
2.6.3	Poder Calorífico.....	41
3	MATERIAL E MÉTODOS	43
3.1	DESCRIÇÃO DO OBJETO E LOCAL DE ESTUDO.....	43
3.2	ESTRATÉGIA DE COLETA DE DADOS	44
3.3	VARIÁVEIS DE ANÁLISE: DEFINIÇÃO DOS INDICADORES DE ECOEFICIÊNCIA.....	45
3.4	TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS	48
3.4.1	Para análise da qualidade da biomassa.....	48
3.4.2	Para análise da evolução dos indicadores de ecoeficiência.....	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51

4.1	QUALIDADE DA BIOMASSA FLORESTAL ADQUIRIDA PELA UCLA.....	51
4.1.1	Teor de Umidade	51
4.1.2	Teor de Cinzas	52
4.1.3	Poder Calorífico.....	53
4.2	ETAPAS DO PROCESSO PRODUTIVO E SEUS INDICADORES DE ECOEFICIÊNCIA.....	55
4.2.1	Etapa 1 - pátio de biomassa	56
4.2.1.1	<i>Indicadores de Ecoeficiência do Pátio de Biomassa</i>	58
4.3	ETAPA 2 – GERAÇÃO DE VAPOR.....	64
4.3.1	Indicadores de ecoeficiência da etapa 2 – Geração de Vapor	64
4.4	ETAPA 3 – GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	69
4.4.1	Indicadores de ecoeficiência finais da geração de energia.....	70
4.5	SISTEMAS AUXILIARES.....	76
4.5.1	Sistema de água	77
4.5.1.1	<i>Indicadores do Sistema de Água</i>	78
4.5.2	Sistema de Cinzas	81
4.5.2.1	<i>Indicadores do Sistema de Cinzas.....</i>	82
5	CONCLUSÃO	89
	REFERÊNCIAS	91

1 INTRODUÇÃO

Tradicionalmente o termo que ocupa um importante espaço dentro do cenário de desenvolvimento econômico é a eficiência. Um dos trabalhos pioneiros sobre eficiência na economia é o de Farrell (1957). Segundo o autor, quando a eficiência de uma firma é discutida, é comum dizer que o sucesso é obtido quando se produz a maior quantidade possível a partir dos insumos utilizados. Assim, o termo eficiência é utilizado para relacionar os benefícios obtidos pela venda de um serviço ou produto e os recursos que foram necessários para tal. De acordo com Tupy e Yamaguchi (1998), a eficiência é uma medida do desempenho da empresa, comparando os valores observados nessa relação ao ótimo de produção que poderia ser obtida.

A partir do entendimento de que os recursos necessários são finitos e da busca pelo desenvolvimento sustentável surgiu a necessidade de analisar a eficiência considerando também a escassez dos recursos naturais e a influência de sua utilização sobre o meio ambiente. Com isto, os indicadores de recursos (água, energia, biomassa, etc.) tiveram seu foco voltado para a influência ambiental. Assim, o termo ecoeficiência surgiu no início da década de 90, frente à necessidade de expressar, e se possível quantificar, a capacidade das instituições em obter retorno econômico usando os recursos naturais de maneira consciente.

Conforme o uso da ferramenta evolui, novos estudos e propostas de aperfeiçoamento têm sido realizados. Apesar de o conceito de ecoeficiência tradicionalmente utilizado ser o proposto pela World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) na Rio92, outras importantes organizações adaptaram o conceito. Da mesma maneira, estudos trazem propostas de organização de indicadores, visando otimizar a implementação da ferramenta, além de apresentar aspectos recentemente agregados à ecoeficiência, como a abordagem de ciclo de vida e aecoinovação (BSCD, 2013). Sendo assim, uma vez que promove tanto o crescimento econômico quanto a diminuição de impactos ambientais, a abordagem da ecoeficiência costuma ser bem aceita pelas organizações.

Devido a esta grande expansão na utilização do termo ecoeficiência nas últimas duas décadas, as definições associadas ao termo são utilizadas com enfoques distintos, como melhoria de indicadores ambientais (HERDER et al., 2012), diminuição dos impactos ambientais (LEWANDOWSKI e HEINZ, 2003) e eficiência energética (MARAVÉ et al., 2013). Ainda, uma onda de novos termos relacionados à produção sustentável tem ganhado espaço de maneira que, ao mesmo tempo em que se complementam uns aos outros, as suas

definições e interpretações individuais podem ser confundidas. A utilização de ferramentas que auxiliam as empresas a produzirem mais utilizando menos matérias-primas vem crescendo e dentre estas empresas, estão os mais variados ramos de produção, e um grande foco está na produção de energia elétrica.

A dependência de energia pela população faz com que ela detenha um papel central perante a economia mundial. Por isso, mudanças nos seus custos têm efeitos significativos no crescimento econômico, especialmente em países em desenvolvimento e importadores de petróleo (FAO, 2008). Fontes energéticas não renováveis, como os combustíveis fósseis, são ainda as mais utilizadas no mundo, porém, a busca por fontes alternativas e renováveis têm despertado cada vez mais o interesse em estudos e desenvolvimento de tecnologias que viabilizem a sua utilização.

Nesse contexto, insere-se o uso da biomassa. Dentre as diversas fontes de biomassa como matéria-prima para geração de energia, merece destaque a biomassa florestal. Mundialmente, o uso da madeira para energia é considerado como um fator crucial para a subsistência das populações, tanto em sua forma direta (lenha) quanto na forma do seu principal derivado energético, o carvão vegetal. A madeira é um combustível vital para o aquecimento e preparo de alimentos para bilhões de pessoas, em diversas regiões do planeta (BRITO et al., 2008), destacando-se ainda, seu maior uso nos países em desenvolvimento (BROWER e FALCÃO, 2004; MATSIKA et al., 2013).

A inovação tecnológica na indústria madeireira tem grande destaque em debates empresariais, pois visa uma maior eficiência na utilização da matéria-prima, atendimento das questões ambientais e competitividade setorial (SIMIONI et al., 2015). Na região de Lages/SC, estas questões são de grande importância, sabendo-se que a indústria madeireira está inserida em um complexo produtivo baseado em florestas plantadas de Pinus, cuja finalidade principal é a produção de celulose e papel, com excedente alimentando outras cadeias do complexo produtivo, como é o caso da geração de energia (SIMIONI e HOEFLICH, 2007).

O setor florestal da região de Lages/SC teve seu maior impulso logo após o fim da extração de Araucárias, esta teve início no começo do século XX até aproximadamente 1960 (HOFF e SIMIONI, 2004). A base florestal para as indústrias locais é a produção de madeira do gênero Pinus, a partir da qual se destacam as cadeias produtivas de celulose e papel, madeira sólida e energia (SIMIONI et al., 2012). Devido à identificação da disponibilidade de biomassa florestal na região (BRAND et al., 2001), foi instalada em 2004 a Unidade de

Cogeração Lages da Engie Brasil Energia, a qual começou a utilizar a biomassa florestal local para a geração de energia térmica e elétrica.

Após uma década da implantação da unidade cogeneradora em Lages, Simioni et al. (2015) consideram que podem ter ocorridos mudanças significativas na qualidade da biomassa e na eficiência do processo de produção de energia, sendo que estas podem estar associadas a aplicações de inovações tecnológicas no setor.

Segundo Geng (2012) os indicadores de ecoeficiência, são adotados para medir o desempenho ambiental relacionado ao desempenho econômico, especialmente para uso de água, energia e geração de resíduos. Nesta perspectiva, a ecoeficiência como conceito aparece como uma resposta à necessidade de indicadores de produtividade e eficiência, em processos de produção mais limpa (DIAZ-VILLAVICENCIO, DIDONET e DODD, 2017).

Sendo assim, foram formuladas duas principais questões norteadoras para serem respondidas nesta dissertação:

- a) Que conjunto de indicadores podem ser utilizados para análise da ecoeficiência em usinas de produção de energia de biomassa?
- b) Como os resultados dos indicadores de ecoeficiência tem evoluído ao longo do tempo?

Sabe-se que com o decorrer dos anos de implantação de uma indústria, seu sistema de produção tende a melhorar e inovar gradativamente. Sendo assim, como hipóteses a respeito das principais questões norteadoras descritas para este trabalho, pressupõe-se que:

- a) É necessária a construção de um modelo analítico para a análise da ecoeficiência, considerando a proposição de indicadores específicos para análise em usinas de cogeração de energia a partir de biomassa florestal.
- b) Houve melhoria nos indicadores de ecoeficiência ao longo do tempo, reduzindo os impactos ambientais da produção de energia.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo analisar a ecoeficiência da unidade de cogeração de energia da Engie Brasil Energia em Lages/SC, visando identificar e analisar os indicadores de ecoeficiência e suas relações com os impactos ambientais.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Caracterizar o sistema de produção de energia elétrica de uma unidade de cogeração de energia em Lages/SC;
- b) Analisar a evolução dos indicadores de ecoeficiência da unidade de cogeração de energia da Engie Brasil Energia de Lages/SC, considerando o período 2010 – 2017.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho está estruturado em cinco seções principais, sendo esta a primeira seção, que apresenta a introdução da dissertação, as principais questões norteadoras, as hipóteses, bem como os objetivos geral e específicos. Já a seção 2 apresenta uma revisão teórica sobre os principais temas abordados durante a realização deste trabalho, assim como, um levantamento sobre os principais estudos de ecoeficiência no Brasil.

A seção 3 aborda os materiais e métodos utilizados no estudo, com a proposição de uma lista de indicadores de ecoeficiência para uso em usinas de geração de energia a partir de biomassa florestal. Já a seção 4 traz os resultados e discussão dos indicadores de ecoeficiência considerados durante o estudo, bem como gráficos e tabelas que auxiliam na visualização destes resultados. E por fim, a seção 5 apresenta as conclusões que puderam ser observadas a partir dos resultados obtidos.

2 REVISÃO TEÓRICA SOBRE ECOEFICIÊNCIA

Neste capítulo serão abordadas as revisões teóricas para este trabalho, dentre elas, estão os levantamentos bibliográficos sobre: biomassa para energia, ecoeficiência, inovações tecnológicas, surgimento do conceito de ecoeficiência, análise da ecoeficiência no Brasil, assim como, uma análise comparativa entre os estudos sobre ecoeficiência realizados no Brasil.

2.1 BIOMASSA FLORESTAL PARA ENERGIA

A demanda mundial de energia, atualmente, é alta e a produção ainda deve aumentar para suprir a necessidade e é neste cenário que se inserem as fontes de energias limpas. Segundo Silva (2008), o interesse e o ressurgimento das energias renováveis deram-se a partir dos choques petrolíferos da década de 70, por um lado havia a necessidade de assegurar a diversidade e o fornecimento de energia, e, por outro lado, a obrigação de proteger o ambiente, cuja degradação é acentuada pelo uso de combustíveis fósseis.

Para Herder et al. (2012) o estudo da utilização de biomassa, a qual é uma fonte sustentável, para a geração de energia é importante, pois em um futuro próximo, espera-se que esta utilização de biomassa tenha uma maior participação em relação a hoje, e que o uso de petróleo, que é considerada uma fonte não sustentável, deve diminuir.

A biomassa é uma das fontes de energia renovável mais usada atualmente no mundo, sendo usado principalmente na forma sólida, mas também sob a forma de combustíveis líquidos e gasosos, sua utilização para a produção de energia aumentou consideravelmente nos últimos tempos. A biomassa é usada para atender a uma variedade de necessidades energéticas, inclusive para a geração de eletricidade, aquecimento de casas, abastecimento de veículos e fornecimento de calor em processos de instalações industriais (TOKLU, E., 2017)

Sendo assim, segundo Bridgwater (2006) há duas formas distintas de produzir energia a partir de biomassa, o primeiro grupo é aquele que utiliza biomassa como recurso energético primário, a partir da combustão direta, e o segundo fazem uso de combustíveis através de processos termoquímicos (pirólise, gaseificação ou liquefação).

No que se trata aos aspectos técnicos da qualidade da biomassa, considera-se que suas propriedades físicas e químicas podem ser alteradas de acordo com tratamento aplicado à mesma, considerando desde sua colheita até o uso final. Dentre as propriedades que mais são

alteradas estão: o teor de umidade (TU), teor de cinza (TC), poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico líquido (PCL). Logo, torna-se necessário controlar a variação destas características para a otimização do uso do material para geração de energia (FURTADO et al., 2012).

2.2 ECOEFICIÊNCIA

Na busca por um desenvolvimento sustentável, as empresas têm um papel muito relevante, pois são grandes consumidoras de matéria-prima para produção, incluindo os recursos não renováveis retirados da natureza, nesse sentido, as empresas devem adotar uma postura voltada para a ecoeficiência (COLARES e MATIAS, 2014).

A World Business Council For Sustainable Development (WBCSD) conceituou que a ecoeficiência é alcançada através da entrega de bens e serviços que satisfaçam as necessidades humanas e tragam qualidade de vida a preços competitivos, reduzindo progressivamente o impacto ecológico e a intensidade de recursos ao longo do ciclo de vida para um nível pelo menos em linha com capacidade de sustentação estimada da Terra (WBCSD, 2000).

Considerando isso, o WBCSD afirma que uma empresa se tornaria ecoeficiente por meio de práticas voltadas para (WBCSD, 2000):

- a. Redução da intensidade de materiais;
- b. Redução da intensidade de energia;
- c. Redução da dispersão de substâncias tóxicas;
- d. Aumento da reciclabilidade dos seus materiais;
- e. Maximização do uso de recursos renováveis;
- f. Extensão da durabilidade dos produtos;
- g. Aumento da intensidade dos serviços.

Segundo Vellani e Ribeiro (2009), a ecoeficiência significa integrar desempenho econômico e ecológico, para isso, os gastos incorridos nas atividades ambientais devem gerar benefício econômico-financeiro e a finalidade dessas ações deve ser atuar sobre os resíduos emitidos pela própria empresa durante o processamento de seus produtos e serviços. A eficiência energética consiste em obter o melhor desempenho na produção de um serviço com o menor gasto de energia. Como exemplo de ação, está a modernização de equipamentos e processos no sentido de reduzirem seu consumo (CELPE, 2013).

Porém, cabe salientar que, a eficiência energética não está só na modernização dos produtos à base de energia, mas na própria unidade cogeneradora. Segundo Paro (2011), há muitas formas de se medir a eficiência energética de um sistema de cogeração, cada uma delas explicada pela finalidade proposta para o sistema e pela precisão a que se pretende chegar. Dentre as principais formas de eficiência está a utilização de uma menor quantidade de biomassa para produzir mais energia, este tipo de aperfeiçoamento ocorre ao longo do tempo, com inovações tecnológicas e aprendizado da equipe que comanda a produção de energia.

2.3 SURGIMENTO DO CONCEITO DE ECOEFICIÊNCIA

A ideia de produção consciente surgiu nos anos de 1970, quando os primeiros esforços de empresas e instituições americanas, canadenses e europeias começaram a ser realizados buscando a prevenção à poluição (WCBSD, 2000; COTÉ, BOOTH e LOUIS, 2006). Em 1987, com a publicação do relatório ‘Nosso Futuro Comum’, o conceito de desenvolvimento sustentável ficou evidente levando a necessidade de um termo (ecoefficiência) que expressasse o desenvolvimento econômico com uso racional dos recursos e a capacidade de suporte dos ecossistemas (BSCD, 2013).

O termo ecoeficiência foi introduzido pelos cientistas Schaltegger e Sturm (1990), no entanto, foi na apresentação do conceito de ecoeficiência pela World Business Council for Sustainable Development – WBCSD, na conferência Rio92, que o mesmo se solidificou. O conceito utilizado pela organização foi definido no primeiro workshop sobre ecoeficiência realizado em 1993 com várias partes interessadas (WBCSD, 2000). De acordo com a WBCSD:

“A ecoeficiência é alcançada mediante o fornecimento de bens e serviços a preços competitivos, que satisfaçam as necessidades humanas e tragam qualidade de vida, ao mesmo tempo que reduz progressivamente o impacto ambiental e o consumo de recursos ao longo do ciclo de vida do produto ou serviço, a um nível no mínimo equivalente à capacidade de sustentação estimada da Terra” (BCSD, 2013, p. 7).

Analisando-se o conceito apresentado, pode-se verificar que a ecoeficiência objetiva reduzir o consumo de recursos e energia, reduzir os impactos ambientais através da redução na geração de efluentes, substâncias tóxicas e emissões atmosféricas, além de aumentar o valor do produto ou serviço, ou seja, fornecer o desejo do cliente (WCBSD, 2000). A WBCSD (2000) também argumenta que os governos podem implementar políticas de

incentivo ao crescimento econômico que incentivam iniciativas ecoeficientes, incluindo ações como a promoção de acordos e iniciativas voluntárias, a internalização de custos ambientais e a implementação de impostos sobre o uso de recursos e a poluição. Ainda, a WBCSD (2000, p. 15) apresenta sete elementos a serem utilizados por empresas para melhorar sua ecoeficiência, sendo esses: reduzir a intensidade de consumo de materiais, reduzir a intensidade de consumo de energia, assim como reduzir a dispersão de substâncias tóxicas, intensificar a reciclagem de materiais, maximizar o uso de recursos renováveis, prolongar a durabilidade dos produtos e agregar valores aos bens e serviços.

Ao longo dos anos, o termo ecoeficiência passou a ser utilizado por diferentes instituições, sendo que algumas adaptaram seu conceito, conforme apresentado na Tabela 1. É possível observar que algumas adaptações como a da Agência de Proteção Ambiental Americana (US EPA) e da Autoridade de Proteção Australiana (Australian EPA) dão enfoque ao fato de que a ecoeficiência busca não apenas manter o desenvolvimento econômico, mas também apresentar benefícios nesse setor através do uso eficiente de recursos, agregando valor à ferramenta. Também, a Agência de Oportunidades Atlântica Canadense (ACOA) traz a criação de produtos e serviços afim de obter o uso eficiente de recursos em sua definição, agregando o que pode ser entendido como aecoinovação. No geral, todas definições respeitam a ideia central de ‘produzir mais com menos’, conforme mencionado por Coté; Booth; Louis (2016).

A ecoeficiência foi estruturada buscando atingir os resultados desejados na sua aplicação na gestão ambiental, de maneira que surgiu a necessidade da construção de indicadores de ecoeficiência para avaliar o desempenho das empresas, instituições e economias estatais.

Tabela 1 - Conceitos de ecoeficiência para diferentes organizações mundiais.

ORGANIZAÇÃO	ECOEFIÊNCIA
Atlantic Canada Opportunities Agency (Agência de Oportunidades Atlântica Canadense) – ACOA	Criação de produtos e serviços de qualidade ao mesmo tempo em que reduz o uso de recursos, produção de resíduos e poluição na cadeia de valor.
Australia Environmental Protection Authority (Autoridade Australiana de Proteção Ambiental)	Ir além do uso de recursos e prevenção da poluição, através do aumento de valor dos produtos e serviços enquanto fornece necessidades competitivas dos negócios.
BASF Corporation (Corporação BASF)	Usar o mínimo de materiais e energia possível para a produção de produtos enquanto mantém as emissões tão baixas quanto possível e ajuda os consumidores a conservar recursos.
European Environment Agency (Agência Europeia de Ambiente) – EEA	Estratégia que permite que o uso da natureza para atividades econômicas afim de satisfazer o bem-estar humano permaneça dentro das capacidades produtivas e que as gerações futuras tenham acesso equitativo ao meio ambiente que as gerações atuais – criando mais bem-estar a partir da menor utilização de recursos naturais.
Environment Protection Agency (Agência de Proteção Ambiental Americana) – EPA	Habilidade de simultaneamente atingir os objetivos de produção e de custo com a qualidade e desempenho, reduzir impactos ambientais e conservar recursos naturais - incentiva as empresas à inovação e competitividade, permitindo que se tornem responsáveis do ponto de vista ambiental e mais lucrativas no âmbito econômico.
Environmental Finance Group – International Finance Corporation (Grupo de Finanças Ambientais – Corporação Internacional de Finanças)	Aumentar a sustentabilidade dos recursos através do uso de métodos mais eficientes.
Industry Canada (Canadá Industrias)	É a arte de fazer mais com menos, minimizando os custos e maximizando o valor.
Organization for Economic Cooperation and Development (Organização para Cooperação Econômica e Desenvolvimento) – OECD	A eficiência pela qual recursos ecológicos são utilizados para atingir as necessidades humanas.
Wrap – The Waste and Resources Action Programme	Maximizar a saída de produtos ou serviços a um determinado nível de materiais e energia – refere-se também ao uso eficiente de recursos.

Fonte: Adaptado de COTÉ; BOOTH; LOUIS (2006); BCSD (2013), 2017.

Visto a sua raiz na economia e no conceito de eficiência, a ecoeficiência é entendida como a combinação entre os benefícios econômicos e a influência ambiental dos produtos ou serviços, podendo assim ser avaliada pela equação (1) (HUYSMAN, S. et al., 2015; LAHOUEL, 2014; MICKWITZ, P. et al., 2005; UNESCAP, 2009):

$$\text{Ecoeficiência} = \text{Benefícios Econômicos} / \text{Influência Ambiental} \quad (1)$$

Deve-se considerar para avaliação da ecoeficiência a escala na qual a mesma será analisada, podendo ser micro, meso ou macro escala. Tradicionalmente, a micro-escala é amplamente utilizada, sendo a mesma voltada para os processos e produtos de uma firma. Já na macro-escala, abrange a economia de um setor industrial em nível regional, nacional ou mesmo global (UNESCAP, 2009). Pesquisas recentes apontam para a lacuna existente entre o uso da micro e macro escala, dessa maneira, uma escala intermediária, que pode ser chamada de meso-escala é alvo de estudos para análise da ecoeficiência, a qual ofereceria um link entre a análise da micro e macro-escala, abrangendo os atores envolvidos nos processos e produtos (HUYSMAN et al., 2015; LEVIDOW et al., 2016).

Considerando essa equação, a análise da ecoeficiência pode utilizar diferentes aspectos e impactos ambientais, variando ainda de acordo com o setor ou processo a ser analisado. Dessa maneira, diferentes indicadores têm sido construídos e que podem ser aplicados em estudos específicos. Como exemplo, Huysman et al. (2015) buscam organizá-los de acordo com a escala, o aspecto ou impacto ambiental, sem considerar, no entanto, um processo ou setor específico, oferecendo um esquema que pode ser aplicado e adaptado a diferentes estudos de ecoeficiência. A Tabela 2 ilustra modelos de indicadores ambientais de ecoeficiência para micro e macro-escala para diferentes usos dos recursos e influência ambiental na produção de um produto ou serviço. Como exemplo de micro-escala, relaciona-se o benefício econômico ou técnico com um aspecto ambiental (consumo de água) ou impacto ambiental (degradação dos recursos hídricos) no âmbito da firma, enquanto que para macro-escala relaciona-se o benefício econômico em escala nacional em relação aos aspectos ou impactos ambientais oriundos de todo um determinado setor.

Tabela 2 - Exemplos de indicadores de ecoeficiência para micro e macro-escala levando em consideração o uso dos recursos e a influência ambiental.

	Uso dos recursos	Influência ambiental
Micro-escala	Despesas de água (R\$/m ³)	Geração de efluente (R\$/m ³)
	Consumo de energia (R\$/J)	Emissão de CO ₂ (R\$/t)
	Uso de matérias-primas (R\$/t)	Geração de resíduos (R\$/t)
	Consumo de biomassa para geração de energia (MJ/t)	Cinzas geradas (MJ/t)
Macro-escala	Consumo de água (PIB/m ³)	Geração de efluente (PIB/m ³)
	Consumo de energia (PIB/J)	Emissão de CO ₂ (PIB/t)
	Uso da terra (PIB/km ²)	Emissão de CH ₄ (PIB/t)

Fonte: Elaboração dos autores, 2017.

Com a crescente utilização e o aperfeiçoamento da análise da ecoeficiência, são propostas atitudes para se atingir ou aumentar a ecoeficiência, como a otimização de processos que visem a prevenção da poluição e novos serviços, através dos quais podem ser encontradas novas maneiras de atingir as vontades dos clientes (WBCSD, 2000). Mais recentemente, um novo termo surgiu no âmbito da ecoeficiência - a ecoinovação, cuja ideia é a utilização de novos conhecimentos a fim de redesenhar processos e produtos, incorporando práticas inovadoras que combinam benefícios econômicos com uso responsável dos recursos (BCSD, 2013; LEVIDOW, 2016).

A aplicação de ferramentas, como a avaliação do ciclo de vida (ACV) e a Produção Mais Limpa (P+L) auxiliam as empresas a identificar os custos e consequências ambientais, as quais facilitam a tomada de decisão a fim de se obter processos ecoeficientes. Ainda, uma tendência é a criação de networks a fim de compartilhar informações e recursos, otimizando os ativos físicos (BCSD, 2013).

2.4 IMPACTOS AMBIENTAIS

Considera-se impacto ambiental qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam: a saúde, a segurança e o bem-estar da população; as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; a qualidade dos recursos ambientais (CONAMA, 1986).

Sendo assim, vários estudos apontam os impactos ambientais causados pela produção de energia a partir da queima de biomassa. Segundo Pugliese et al. (2017) durante a produção de energia, os principais impactos ambientais estão relacionados com a poluição de ar proveniente da queima do bagaço ou biomassa florestal para a geração de energia elétrica, além das cinzas geradas a partir da queima.

Pugliese et al. (2017) afirmam que os impactos apontados devido à produção industrial se devem principalmente aos efluentes e subprodutos gerados no processo e consumo de água, mas também devido aos resíduos da cogeração de energia elétrica. Com isto, os impactos ambientais das tecnologias de combustão de biomassa florestal podem ser avaliados utilizando a metodologia de avaliação do ciclo de vida (ACV). A ACV é aplicado para quantificar os impactos ambientais das cadeias de produção de bioenergia com base em recursos florestais (COSTA et al., 2018).

Segundo Zhang et al. (2018) ao mesmo tempo que fornece níveis elevados de energia, a biomassa lenhosa também libera emissões nas formas de CO₂, NO₂, SO₂ e cinzas, causando graves impactos ambientais. A produção de eletricidade a partir da biomassa tem potencial para contribuir significativamente para a sua produção com menor impacto ambiental do que os recursos não renováveis (COSTA et al., 2018).

2.5 ANÁLISE DA ECOEFICIÊNCIA NO BRASIL

O Conselho Empresarial para o Desenvolvimento Sustentável Brasileiro (CEDSB), que representa a atuação do WBCSD no Brasil, é um dos responsáveis pela implementação da ecoeficiência no país. Criado em 1997, o CEDSB possui sete câmaras técnicas criadas para colocar em prática as ações do conselho. A atual Câmara Técnica da Responsabilidade Corporativa (CTRESP) foi criada em 1997 com o nome de Câmara de Ecoeficiência e orienta as práticas de sustentabilidade empresarial através de indicadores e relatórios.

O relatório de 10 anos de atuação do CEDSB apresenta as ações através das quais buscou-se de maneira proativa integrar os princípios do desenvolvimento sustentável no Brasil. Tais ações compreendem visitas de reconhecimento a empreendimentos ecoeficientes, promoção de encontros nacionais e latino americanos onde a ecoeficiência foi um dos principais assuntos em pauta, além de ter coordenado, através da CTRESP a implantação da Rede Brasileira de Produção Mais Limpa (RBP+L) em parceria com o SEBRAE. O guia da RBP+L apresenta uma metodologia de implementação da Produção Mais Limpa (P+L) em

empresas buscando torná-las ecoeficientes. Através da publicação do guia e da RBP+L foi possível a criação de 28 núcleos de P+L no país.

Nesse contexto, foram selecionados estudos dos últimos dez anos relacionados à implementação e análise da ecoeficiência, com intuito de levantar os principais setores estudados, suas regiões de aplicação, a escala e os indicadores utilizados.

2.5.1 Estudos brasileiros sobre ecoeficiência

O levantamento bibliográfico sobre a ecoeficiência no Brasil foi realizado através da plataforma de pesquisa de Periódicos da Capes. A pesquisa sobre os estudos de ecoeficiência no Brasil teve como critério os artigos publicados entre os anos de 2006 e 2016, e as palavras-chave utilizadas foram “Ecoeficiência”, “Ecoeficiência no Brasil” e “Eco-efficiency in Brazil”, sendo que, para cada uma das palavras-chave foram encontrados, respectivamente, 160, 69 e 74 artigos no banco de periódicos da capes. E com isto, foram selecionados 14 artigos que apresentavam estudos de casos brasileiros e estes então utilizados para o estudo em questão.

Vellani (2008) fez uma pesquisa relacionando as práticas ecoeficientes com os passivos ambientais, tendo a finalidade de responder à questão: como a ciência contábil pode organizar os gastos ambientais para possibilitar a divulgação de passivos ambientais relacionados com a ecoeficiência do negócio? O autor conclui que há uma lógica (sendo aquela que identifica todos os esforços das empresas envolvidos com a proteção dos ecossistemas, evidenciando aqueles que aumentam a ecoeficiência) capaz de informar qual é a parte do passivo ambiental relacionado com a ecoeficiência. Além de que, os gastos ambientais que contribuem para a sustentabilidade empresarial são aqueles incorridos em ações ecológicas atuantes sobre os resíduos emitidos pela própria empresa durante o processamento de seus produtos e serviços.

Ainda em 2008, Carvalho e Gomes (2008) estudaram a ecoeficiência na produção de cera de carnaúba no município de Campo Maior, Piauí. O estado do Piauí é um dos maiores produtores deste tipo de cera no Brasil, sendo assim, o objetivo geral do estudo foi analisar os elementos e indicadores de ecoeficiência, com informações e dados feitos por pesquisa direta. Os resultados mostraram que a produção industrial deste tipo de cera impacta o meio ambiente, devido seu uso intenso de água, lenha e óleo diesel como fonte energética, consumo

de produtos químicos e emissão de poluentes. Entretanto, atende importantes elementos de ecoeficiência como a reutilização de materiais e o consumo de materiais renováveis.

Rossi e Barata (2009) fizeram um estudo sobre as barreiras à implementação de P+L como prática de ecoeficiência em pequenas e médias empresas no estado do Rio de Janeiro. Neste trabalho, foi proposta uma estratégia de ação para permitir medidas facilitadoras para adoção da P+L no estado do Rio de Janeiro, sendo as medidas propostas os investimentos em software para referência e assistência técnica e hardware como políticas específicas.

Esgomim e Souza (2010) analisaram a implementação e os resultados de um programa de ecoeficiência numa empresa do setor bancário, objetivando verificar como a ecoeficiência pode aumentar o desempenho econômico e ambiental neste setor. Trata-se de um estudo exploratório, em que as coletas de dados foram feitas através de pesquisa bibliográfica, documental e observações. Seus resultados foram economicamente significativos, evidenciando reduções do consumo de energia, água, papel, entre outros insumos.

Oggioni, Riccardi e Toninelli (2011) estudaram o Brasil (juntamente com alguns outros países), a respeito da ecoeficiência na produção mundial de cimento. Concluíram que é um país sem regulação ambiental forte ou obrigatória e, comparativamente com outros países de mesmas características, o Brasil apresentou os piores desempenhos durante o período considerado, com uma tendência negativa.

Vieira e Barbosa (2011) identificaram as práticas tradicionais e de ecoeficiência no processo produtivo da indústria de calçados no Brasil. Demonstraram que as práticas associadas com a ecoeficiência ainda estão muito defasadas neste setor, porém, as instituições de classes, fábricas de componentes e insumos e designers, apostam na incorporação gradual da ecoeficiência neste segmento.

Leal, Garcia e D'Agosto (2012) determinaram a ecoeficiência para diferentes tipos de transporte de bioetanol a partir de uma revisão de estudos e dados. Ao final, apontaram os principais indicadores que envolvem a ecoeficiência neste setor, de maneira a oferecer suporte para o governo implementar políticas e melhorar os principais meios de transporte de bioetanol no país. Na mesma linha de foco de estudos voltados a ecoeficiência de combustíveis, Wells e Faro (2011) averiguaram se biocombustíveis derivados de cana de açúcar continuarão a ser ambientalmente sustentáveis quando utilizados para exportação. O artigo conclui que a exportação pode trazer consequências nocivas imprevistas, significando

que tanto a política como a teoria precisam ser mais precisas sobre as limitações de tempo e espaço no transporte sustentável.

Devido a deficiência de regras para gerir os resíduos da saúde, Soares et al. (2013) realizaram um estudo para definir qual a técnica de desinfecção de resíduos da saúde é a mais ecoeficiente, utilizando como ferramenta a ACV e a análise de custos. Dentre as técnicas testadas, micro-ondas, autoclave e cal, a técnica de desinfecção por micro-ondas apresentou a melhor performance ecoeficiente.

Pacheco, Chaves e Nicoli (2013) pesquisaram sobre a integração lavoura, pecuária e florestas (ILPF) no cerrado brasileiro, levando em consideração a ecoeficiência da produção agrícola. Os resultados demonstraram que os sistemas integrados de ILPF são economicamente e tecnicamente viáveis no cerrado, produzindo alimentos de alto valor biológico. Além disso, a pastagem cultivada proporciona outros benefícios ambientais importantes, como a cobertura do solo a longo prazo, a fixação de carbono, o aumento do teor de matéria orgânica do solo e a redução na emissão de gases de efeito estufa.

Camoto, Mariano e Rebelatto (2014) avaliaram a eficiência dos setores industriais brasileiros entre 1996 e 2009, considerando o consumo de energia e as respectivas contribuições para os aspectos econômicos e sociais do país. Os resultados deste estudo indicaram que o setor têxtil é o setor industrial mais eficiente no Brasil, de acordo com as variáveis utilizadas, seguido pelos setores de alimentos e bebidas, químicos, mineração, papel e celulose, não metálicos e metalúrgicos.

Guabiroba et al. (2014) estudaram a ecoeficiência como medida auxiliar para a definição de consórcios públicos inter-regionais responsáveis pela coleta de resíduos domésticos recicláveis. Este estudo serve como ferramenta para auxiliar na tomada de decisões de prefeituras e governos na implementação da coleta de lixo. Os autores levaram em consideração a ecoeficiência no processo, pois argumentam que se considerados apenas os aspectos econômicos, pode haver o risco de aumentar os impactos ambientais causados por esse serviço.

Colares e Matias (2014) levantaram a ecoeficiência de médias e grandes empresas no estado de Minas Gerais, através de uma pesquisa bibliográfica e aplicação de questionários. Buscaram responder a seguinte pergunta: as empresas mineiras de médio e grande porte estão adotando práticas de gestão ambiental que estimulem resultados ecoeficientes? Como resultado, puderam perceber que a maioria das empresas mineiras está utilizando uma série de

elementos que, em médio prazo, devem levá-las a uma situação na qual ações responsáveis sob a ótica socioambiental se traduzirão também em resultados financeiros efetivos. Concluíram também que a preocupação das empresas em ter um plano de gerenciamento de resíduos (presente em 72% das empresas entrevistadas) já é um indicativo de que estão convergindo para a ecoeficiência empresarial, já que conseguem acrescentar mais valor consumindo menos recursos ou gerando menos resíduos.

Para demonstrar a viabilidade de práticas ecoeficientes entre as pequenas empresas e microempresas como uma ferramenta de vantagem competitiva, Alves e Medeiros (2015) elaboraram um estudo, onde analisaram os indicadores de ecoeficiência de uma pequena empresa do setor automotivo. Com isto, puderam demonstrar que após a implementação das melhorias nas práticas ambientais, houve significativo aumento no desempenho financeiro, ambiental e social da empresa, além de envolver os trabalhadores e o proprietário.

2.5.2 Análise comparativa entre os estudos brasileiros sobre ecoeficiência

A Tabela 3 demonstra uma análise comparativa entre os estudos apresentados na seção anterior. Foi possível observar que a maioria dos artigos foi produzida nas regiões sudeste e nordeste, com focos voltados para essas regiões e, em alguns casos, abrangendo todo o país.

Através da análise da Tabela 3 é possível observar uma grande heterogeneidade de setores, possivelmente devido a relação entre o setor e a economia do local onde o estudo foi produzido. Em relação a escala em que estes setores foram analisados, os estudos dividiram-se principalmente entre micro e macro-escala, analisando respectivamente, firmas ou um setor nacional. Alguns estudos apresentaram um enfoque em meso-escala, considerando diversas empresas de um mesmo estado.

Ainda, os indicadores utilizados apresentam para alguns estudos cunho quantitativo, ou seja, apresentam o balanço de valores referentes ao aspecto econômico e à influência ambiental do aspecto ou serviço. Em outros, observou-se o uso de indicadores qualitativos, ou seja, apenas descrevem se houve melhoria ou não do processo ou serviço. De maneira geral os estudos indicam um avanço em termos de ecoeficiência nos setores estudados.

Tabela 3 - Comparativo entre estudos brasileiros de ecoeficiência realizados durante os anos de 2006 e 2016 (Continua)

ARTIGO	SETOR	ESCALA	NATUREZA	INDICADORES
Vellani (2008)	Contabilidade	Micro-escala	Qualitativo	Reciclagem, educação ambiental, preservação de área nativa, jardinagem, ETE
Carvalho e Gomes (2008)	Cerífero	Micro-escala	Quantitativo	Quantidade de cera, lucro líquido, consumo de energia, emissões de GEE, consumo de materiais, resíduos sólidos, consumo de embalagem, consumo de água
Rossi e Barata (2009)	Múltiplos setores	Meso-escala	Qualitativo	P+L
Esgomim e Souza (2010)	Financeiro	Macro-escala	Qualitativo e Quantitativo	Redução do consumo de água e energia, equipamentos, tóner, papel, resíduos e emissões
Oggioni, Riccardi e Toninelli (2011)	Cimenteiro	Macro-escala	Quantitativo	Concentração de poluentes
Vieira e Barbosa (2011)	Calçadista	Macro-escala	Qualitativo	Logística, diferenciação de produtos por nicho de mercado, automação (software), adição de materiais de escala manométrica
Wells e Faro (2011)	Combustível	Macro-escala	Qualitativo	Preço e quantidade
Leal, Garcia e D'Agosto (2012)	Transportes	Macro-escala	Quantitativo	Valor monetário, segurança, consumo de energia, poluição atmosférica e poluição da água e do solo
Soares et al. (2013)	Saúde	Micro-escala	Quantitativo	Matérias primas e energia, efluentes e emissões atmosféricas

Fonte: Elaboração dos autores, 2017.

Tabela 3 - Comparativo entre estudos brasileiros de ecoeficiência realizados durante os anos de 2006 e 2016 (Conclusão)

Pacheco, Chaves e Nicoli (2013)	Agrícola	Micro-escala	Quantitativo	Uso da terra, agrotóxicos, quantidade produzida
Camio, Mariano e Rebelatto (2014)	Múltiplos setores	Macro-escala	Quantitativo	Produto interno bruto setorial, despesas com pessoal, contratados, emissões de CO ₂ e consumo de energia
Guabiroba et al. (2014)	Coleta de resíduos sólidos	Meso-escala	Qualitativo e quantitativo	Distâncias, quantidade coletada, emissões atmosféricas, desempenho financeiro
Colares e Matias (2014)	Bens e serviços	Meso-escala	Qualitativo	Quantidade de produtos manipulados, práticas de gestão ambiental, razões para elaboração do EIA/RIMA e conhecimento das legislações ambientais
Alves e Medeiros (2015)	Serviço automotivo	Micro-escala	Qualitativo e quantitativo	Consumo de água e energia, alocação de papel e óleo usado, disposição final de baterias e peças sucateadas

Fonte: Elaboração dos autores, 2017.

Foi possível perceber além do uso de indicadores, o uso de ferramentas auxiliares como apoio para análise da ecoeficiência, tais como a ACV e a *Data Envelopment Analysis* (DEA). Essas ferramentas contribuem para obtenção e análises de dados da ecoeficiência.

Através da análise realizada foi possível também observar algumas lacunas e limitações para a ecoeficiência no Brasil. Em seu estudo Rossi e Barata (2009) identificaram como barreiras relevantes à implementação da P+L como prática da ecoeficiência: política inadequada de auto regulação da indústria, dificuldade de acesso à financiamentos, pouca pressão e conscientização pública, falta de treinamento técnico no local de trabalho e a priorização da expansão da produção.

No contexto internacional, o Brasil encontra-se entre os países que não possuem legislações ambientais eficientes apresentando os piores desempenhos de ecoeficiência (OGGIONI et al., 2011). Ligado a esta carência da legislação, pode-se citar a falta de disponibilidade de dados mais específicos, limitando o aprofundamento dos estudos

(ESGOMIN e SOUZA, 2010). Vieira e Barbosa (2011) também citam como limitação a falta de poder aquisitivo por parte do consumidor na escolha por produtos sustentáveis.

Uma das principais limitações, que ainda prevalece, é a ideia de que atitudes relacionadas a ações ambientais apenas adicionam custos as empresas, de maneira que estes muitas vezes não são bem vistos por empreendedores ou acionistas. Esgolmin e Souza (2010) também observaram resistência na mudança de hábitos por parte dos colaboradores. Nesse sentido, o investimento em treinamentos e conscientização é importante, conforme evidenciado por Teixeira, Jabbour e Jabbour (2012) em um estudo que analisa a relação entre a gestão ambiental e o treinamento ambiental realizado nas organizações. Os autores observaram que as organizações que apresentam maior investimento no treinamento de seus funcionários e diretores são as mesmas cuja gestão ambiental encontra-se em patamares de prevenção e pró-atividade, tendo como uma de suas características a ecoeficiência.

2.6 QUALIDADE DA BIOMASSA

A principal preocupação para a produção de energia a partir da queima de biomassa florestal é a densidade de energia da biomassa, que é tipicamente menor do que a dos combustíveis fósseis, como carvões, e o poder calorífico da biomassa, que é intimamente afetado pelo teor de umidade, podendo atingir níveis muito altos, especialmente no caso da biomassa verde e materiais de resíduos. Além disso, os métodos experimentais para estimar o poder calorífico de um combustível geralmente são demorados, além de caros e têm maiores possibilidades de erros experimentais (ÖZYUGURAN e YAMAN, 2017).

Para Onochie (2017) os pellets de biomassa ou os resíduos florestais devem ser usados de forma eficiente e racional como combustível para combustão em caldeiras, e devem ser caracterizados para determinar parâmetros como o teor de umidade, poder calorífico, teor de cinzas, densidade, matéria volátil, carbono fixo, entre outros. O resultado dessas determinações indica os atributos positivos e negativos da biomassa. Entre os atributos positivos, pode-se citar o baixo teor de umidade, alta densidade, propagação da flama, baixo teor de cinzas, baixo teor de enxofre, alta quantidade de carbono e valor de aquecimento substancial.

Segundo Brand et al. (2012) quando se trata dos aspectos técnicos da qualidade da biomassa, deve-se considerar que suas propriedades físicas e químicas são alteradas pelo tratamento aplicado à mesma, desde a colheita até o uso final. Logo, torna-se necessário

controlar a variação destas características para a otimização do uso do material para geração de energia.

2.6.1 Teor de Umidade

Antes que a biomassa possa ser enviada para a planta para conversão ou geração de energia, as questões de armazenamento e transporte de matérias-primas devem ser levadas em consideração. As questões de onde armazenar e como transportar estão intimamente relacionadas às características físicas da biomassa, como o teor de umidade. Esta propriedade está inter-relacionada e vinculada à estrutura e à forma física da biomassa. O teor de umidade é a quantidade de água contida na biomassa, sendo assim, uma das limitações da biomassa bruta é o alto teor de umidade, o que justifica então a existência de um menor poder calorífico (PING et al., 2016).

Segundo Gonçalves et al. (2009), na geração de energia a partir da queima de biomassa, deve-se levar em consideração o controle do teor de umidade uma vez que, quanto menor o teor de umidade maior será a produção de calor por unidade de massa, visto que a presença de água representa poder calorífico negativo, pois parte da energia liberada é gasta na vaporização da água e se o teor de umidade for muito variável, poderá dificultar o processo de combustão.

2.6.2 Teor de Cinzas

Uma das questões mais importantes da combustão de biomassa é a problemática relacionada ao conteúdo de cinzas de biomassa. O baixo ponto de fusão dos compostos de cinzas pode criar complicações nas câmaras de combustão, como escória, aglomeração e formação de clínquer (GARCÍA-MARAVÉ, 2014). Os problemas operacionais foram frequentemente relatados em câmaras de combustão, fornos e caldeiras como consequência do conteúdo de cinzas de biomassa. Isso é problemático para o conforto do usuário, bem como para o desempenho em relação à eficiência da combustão e às emissões (MASIÁ et al., 2007).

O teor de cinzas corresponde à porcentagem de material inerte, que não produz calor, sendo assim, é desejável que após a queima da matéria-prima haja a menor quantidade de cinzas (GONÇALVES et al., 2009). Segundo Furtado et al. (2010) este teor representa a fração inerte da amostra, ou seja, parte da constituição da madeira e parte proveniente de material contaminante, tais como terra e pedra, constituintes principalmente na casca. Quando

este apresenta valores elevados, há uma redução do PCS, o qual possui uma relação direta com a composição química da matéria-prima queimada.

A quantidade e a qualidade da cinza produzida durante o processo de combustão da biomassa são fortemente influenciadas pelas propriedades da biomassa e da tecnologia de combustão, incluindo as características do forno, a temperatura do processo e os sistemas de extração de cinzas (GARCÍA-MARAVÉ et al., 2014).

2.6.3 Poder Calorífico

Segundo Brand et al. (2014), o poder calorífico é a quantidade de calor total (energia térmica) que é liberado durante a combustão completa de uma unidade de massa ou de volume de combustível (kcal/kg ou kJ/kg; kcal/m³ ou kJ/m³). Assim, o valor obtido é teórico, pois a determinação é feita em recipiente hermeticamente fechado, onde é depositada a amostra, com 0% de umidade. Após o encerramento do recipiente, é realizada uma descarga de oxigênio, com 99% de pureza, seguida de uma descarga elétrica, que promove a ignição do combustível que está sendo testado.

A utilização de biocombustíveis requer o conhecimento de suas propriedades térmicas, sendo o poder calorífico talvez o mais importante (CHRISTOFOROU et al., 2014). Segundo Furtado et al (2010), o poder calorífico superior (PCS) indica o potencial de produção de energia por unidade de massa; a densidade, expressa a quantidade de material por unidade de volume, portanto, quanto maior, mais concentrada está a energia e, assim, tem-se uma biomassa com maior potencial energético em um mesmo volume. Os valores caloríficos são diretamente proporcionais ao conteúdo de carbono e inversamente proporcionais ao teor de cinzas (EVERARD et al., 2012).

O poder calorífico inferior (PCI), ao contrário do PCS, é a quantidade de energia disponível, quando não se considera o calor latente de condensação da umidade presente nos produtos de combustão, tanto o PCS quanto o PCI são calculados em base seca, ou seja, com 0% de umidade. O poder PCI, no entanto, somente pode ser utilizado diretamente se o combustível não apresentar umidade livre, além da sua água de constituição. Quando o combustível tiver umidade livre, deve-se utilizar o poder calorífico inferior na base úmida ou poder calorífico líquido. Nesse caso, além da energia perdida para a liberação do hidrogênio de constituição, é descontada também a energia para evaporar a água livre do combustível (BRAND et al., 2014).

Özyuguran e Yaman (2017) afirmam que o carbono fixo atua como um gerador de calor principal durante a queima. A quantidade de carbono fixo contida em pellets é maior do que a contida nos resíduos brutos, que, obviamente, tem uma grande influência sobre o poder calorífico. Ou seja, pellets são mais sustentáveis para geração de energia do que os resíduos brutos.

3 METATERIAL E MÉTODOS

A metodologia de pesquisa adotada para o desenvolvimento deste trabalho é de caráter descritivo e quantitativo, bem como, com levantamento bibliográfico, partindo-se de conceitos já estruturados para chegar à proposta de indicadores de ecoeficiência.

3.1 DESCRIÇÃO DO OBJETO E LOCAL DE ESTUDO

A análise da ecoeficiência teve como objeto de estudo a unidade de cogeração de energia de Lages (UCLA) da Engie Brasil Energia. A Engie é uma empresa francesa que atua na implantação e operação de usinas geradoras de eletricidade, sendo também agente ativo na atividade de comercialização de energia. Maior geradora privada de energia do Brasil, suas usinas se encontram instaladas nas cinco regiões do país, tendo capacidade instalada própria de 7.070 MW, equivalente a cerca de 6,9% do total no Brasil (ENGIE, 2017).

A UCLA tem como objetivo a produção de energia elétrica a partir da queima de biomassa florestal proveniente da região, com capacidade máxima de 28MWh de energia e com uma extração máxima de 25 toneladas por hora de vapor utilizando resíduos de madeira e toretes como combustível. A unidade começou a operar em 2004, após estudos (HOFF e SIMIONI, 2004; BRAND, 2001), que demonstraram a viabilidade de implantação da indústria devido a quantidade de matéria-prima disponível. Matéria esta, que estava estocada a céu aberto em diversos locais da região, ou seja, sem destinação adequada.

A empresa está localizada na cidade de Lages/SC, a 27°48'57" S e 50°19'33"O, com uma altitude de 916m, área de 2.644,313km² e população estimada para 2016 de 158.620 habitantes, o que gera uma densidade demográfica de 60,28 hab/km², e pertence a região serrana de Santa Catarina. O município de Lages destaca-se pela sua grande produção de florestas plantadas para utilização na indústria madeireira e de papel e celulose. Segundo IBGE (2015), no ano de 2014, o município possuía 34.700 hectares de florestas plantadas, dos quais 1.200ha com eucalipto e 33.500ha com *pinus*.

A economia lageana é basicamente sustentada pela pecuária, agricultura, indústria madeireira (com destaque na produção de papel e celulose) e turismo rural. A cidade pertence a microrregião conhecida como Campos de Lages, fazendo limite com os municípios de São Joaquim, Paineira, Bocaina do Sul, Otacílio Costa, Palmeira, Correia Pinto, São José do Cerrito,

Campo Belo do Sul e Capão Alto. O município contou com um PIB per capita de R\$30.172,82 para o ano de 2015 (IBGE, 2016).

Segundo a Associação Catarinense de Empresas Florestais (ACR, 2015) em 2016 Santa Catarina detinha o total de 660,7 mil hectares com florestas plantadas, sendo considerado o 6º estado com maior área plantada no Brasil sendo que a grande maioria (82%, ou equivalente a 541,2 mil ha) é com *Pinus*, 17% (112,9 mil ha) com *Eucalyptus* e apenas 1% (6,6 mil ha) com outros grupos de espécies. Os plantios com *Pinus* e *Eucalyptus* no estado estão concentrados principalmente na Região Serrana, com destaque para os municípios de Santa Cecília, Lages e Otacílio Costa, que juntos detém cerca de 100 mil hectares plantados, principalmente com *Pinus*.

3.2 ESTRATÉGIA DE COLETA DE DADOS

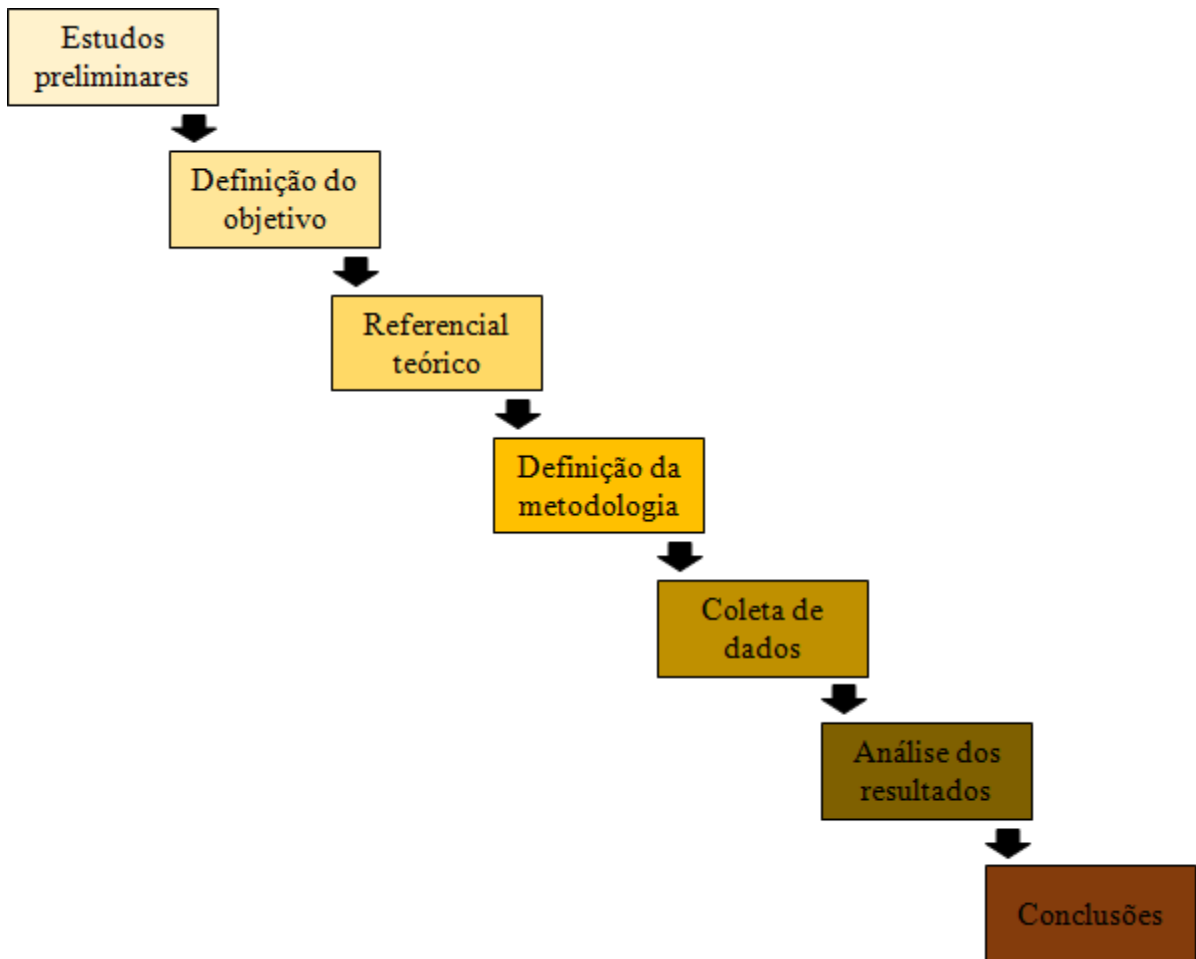
Os estudos preliminares tiveram início no ano de 2016, quando houveram os primeiros contatos com a UCLA. Após este primeiro contato, foram definidos os objetivos do trabalho e foi realizado um levantamento teórico a respeito do termo ecoeficiência. Com uma base teórica bem estruturada, foi possível gerar um artigo de revisão, sobre a ecoeficiência no Brasil intitulado como: “Análise da ecoeficiência no Brasil: uma revisão”.

Após estas etapas, foi definida a metodologia a ser utilizada no projeto com foco nas estratégias de coleta dos dados para a realização da pesquisa. Foram realizadas diversas visitas à empresa, objetivando conhecer cada uma das etapas da unidade, desde a chegada da matéria-prima no pátio de biomassa até a geração final de energia da empresa para a rede de distribuição. Esta etapa resultou no atendimento ao primeiro objetivo específico, que era “caracterizar o sistema de produção de energia elétrica de uma unidade de cogeração de energia de Lages/SC”.

Os dados para a obtenção dos indicadores de ecoeficiência foram disponibilizados pela empresa, através de consulta ao próprio banco de dados, onde são armazenadas todas as informações de entradas e saídas de produtos e matérias primas utilizadas durante o processo produtivo. Os dados foram organizados em planilhas eletrônicas objetivando a obtenção dos indicadores de ecoeficiência e para a representação gráfica de sua evolução. Para tanto, optou-se por analisar o período 2010 – 2017 e, assim, atender o terceiro objetivo específico: “analisar a evolução dos indicadores de ecoeficiência da unidade de cogeração de energia da Engie Brasil Energia de Lages/SC”.

A Figura 1 demonstra a ordem da estratégia de coleta de dados e realização do trabalho. A denominação das fases foi definida seguindo o critério da ordem sequencial das atividades desenvolvidas na pesquisa. Esta divisão tem por finalidade a melhor estruturação e demonstração dos procedimentos metodológicos adotados.

Figura 1 - Representação da seqüência de etapas e estratégia de coleta de dados.



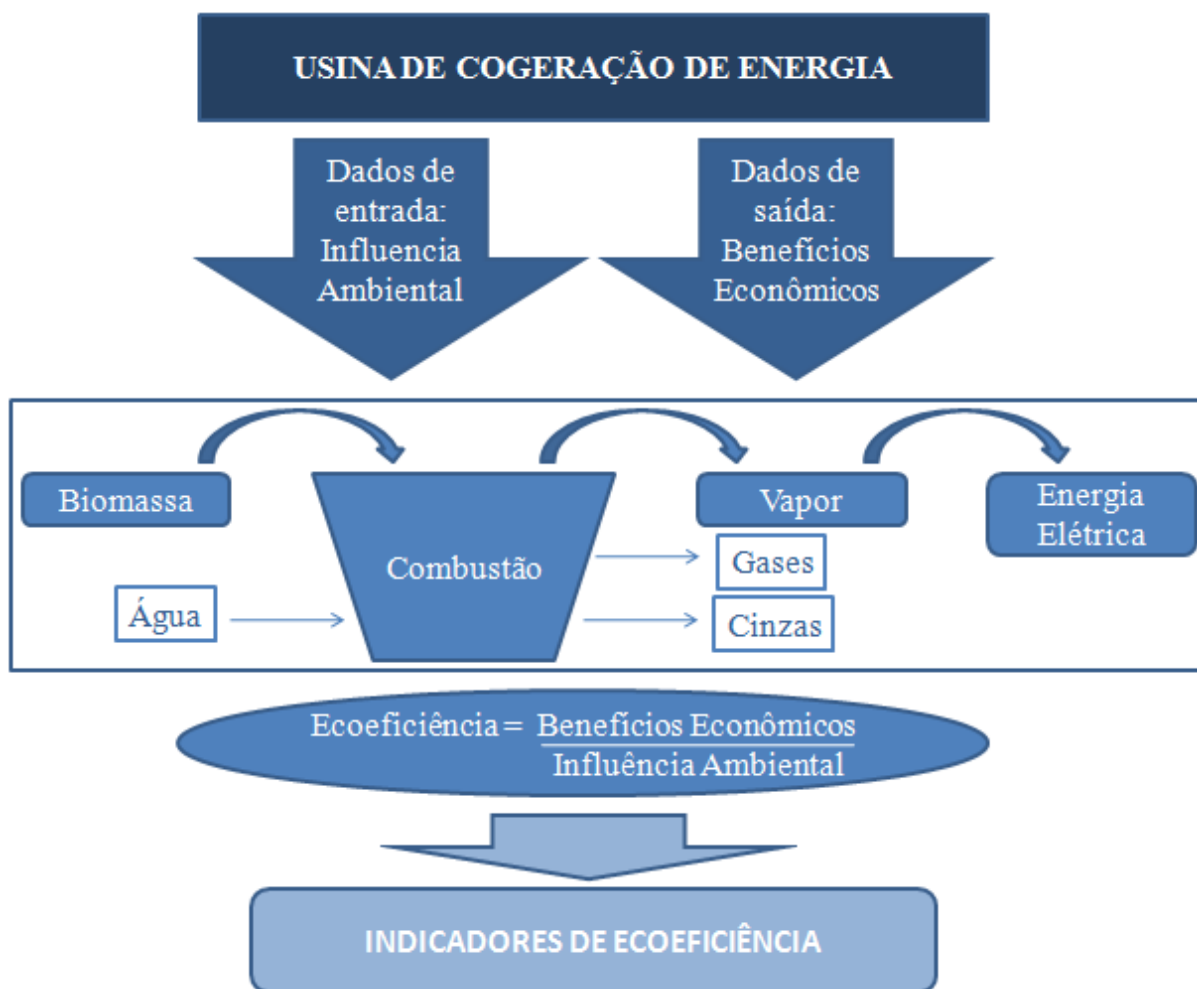
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

3.3 VARIÁVEIS DE ANÁLISE: DEFINIÇÃO DOS INDICADORES DE ECOEFICIÊNCIA

Para obtenção e análise dos indicadores de ecoeficiência, foram elaboradas subdivisões que se referem a cada uma das etapas do processo de cogeração de energia. Para

cada uma das etapas determinadas foram caracterizadas as principais entradas e saídas de produtos de influência ambiental do processo, para que pudessem ser gerados os indicadores de ecoeficiência para a unidade de cogeração de energia.

Figura 2 - Esquemática do modelo de análise da ecoeficiência.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Para a elaboração de cada um dos indicadores, foram confrontadas as entradas e saídas de cada etapa, levando em consideração a equação 1 (pág. 21), onde as saídas são consideradas benefícios econômicos e as entradas são as influências ambientais do processo, assim, foi possível caracterizar a indústria a partir dos indicadores individuais de cada etapa. A Figura 2 demonstra como foi sintetizado e definido o conjunto de indicadores para análise da ecoeficiência de uma usina de geração de energia a partir de biomassa florestal, de modo a cumprir o segundo objetivo específico proposto: “Propor um modelo para análise da ecoeficiência em unidades de produção de energia de biomassa florestal”.

Tabela 4 - Etapas da produção de energia elétrica por queima de biomassa florestal e seus respectivos indicadores de ecoeficiência.

Etapa de produção de Energia	Produto final utilizados na construção do Indicador de Ecoeficiência	Indicadores de Ecoeficiência utilizados e suas respectivas unidades de medida
Pátio de Biomassa	Produção de Blend em relação aos recursos utilizados	<ul style="list-style-type: none"> • blend/biomassa (t/t) • blend/mdo (t/hora-homem) • blend/combustível (t/L) • blend/energia consumida (t/kWh)
Geração de Vapor	Produção de Vapor em relação aos recursos utilizados	<ul style="list-style-type: none"> • vapor/blend (t/t) • vapor/água (t/m³) • vapor/mdo (t/hora-homem) • vapor/energia consumida (t/kWh)
Geração de Energia Elétrica	Produção de Energia em relação aos recursos utilizados	<ul style="list-style-type: none"> • energia produzida/energia consumida (kWh/kWh) • energia produzida/entrada de biomassa (kWh/t) • energia produzida/blend (kWh/t) • energia produzida/vapor (kWh/t) • energia produzida/água (kWh/m³) • energia produzida/cinza (kWh/t)
Sistema de Água	Produção de Água em relação aos recursos utilizados	<ul style="list-style-type: none"> • água/energia consumida(m³/kWh) • água/mdo (m³/hora-homem)
Sistema de Cinzas	Produção de Cinzas em relação aos recursos utilizados	<ul style="list-style-type: none"> • cinza/energia consumida (t/kWh) • cinza/mdo (t/hora-homem) • cinza/água (t/m³) • cinza/blend (t/t) • cinza/vapor (t/t) • cinza/energia produzida (t/kWh)

Fonte: Elaboração do autor, 2017.

As etapas consideradas para este estudo foram: 1) pátio de biomassa; 2) geração de vapor; e 3) geração de energia elétrica. Também foram considerados dois sistemas auxiliares: o sistema de água e o sistema de cinzas. Para cada uma destas etapas foram elaborados fluxogramas para melhor apresentar a descrição do processo produtivo, como também a representação das entradas e saídas através de tabelas e seus respectivos indicadores de

ecoeficiência estudados. As variáveis de entrada do processo foram: biomassa, energia, mão de obra, combustível, água, reagentes e cinzas. Já o blend, vapor, gases, cinzas, energia e água foram as variáveis de saída. A Tabela 4 sintetiza as etapas de produção de energia com seus respectivos produtos finais e indicadores de ecoeficiência propostos.

Para o estudo dos sistemas auxiliares foram utilizados os dados para caracterizar o sistema de água e o sistema de cinzas, porém, pela equação 1 eles não seriam considerados benefícios econômicos, a água seria um insumo e a cinza um rejeito da produção. Entretanto foram considerados nesta dissertação para melhorar o entendimento dos impactos ambientais causados pela produção e pela importância dos dois sistemas para o processo produtivo.

3.4 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

3.4.1 Para análise da qualidade da biomassa

Com os dados de poder calorífico, teor de umidade e teor de cinzas, foram criados os gráficos de qualidade da biomassa. Inicialmente, foram filtrados e excluídos os dados com valores faltantes, após foram elaborados gráficos para cada uma das análises para que pudessem ser identificados excluídos os dados atípicos, chamados de *outliers*.

3.4.2 Para análise da evolução dos indicadores de ecoeficiência

Para cada gráfico de indicador elaborado, foram plotados os valores brutos, a média móvel (MMi5) para 5 meses e a linha de tendência. A média móvel é formada através do cálculo de valores médios de um estudo ao longo de um determinado número de períodos (tempo). A média móvel permite reduzir o ruído da série e facilita a identificação do comportamento da série, facilitando a análise da série temporal (SICSÚ e DANA, 2013). O cálculo da média móvel é dado pela equação (2):

$$MMi(5) = \text{Média } [y(i-2), y(i-1), y(i), y(i+1), y(i+2)] \quad (2)$$

A partir da média móvel foi possível plotar a regressão linear segmentada, que consiste em dois ou mais segmentos ou trechos que mudam sua inclinação no valor limiar

(X') (GUJARATI e PORTER, 2011). A equação (3) expressa a regressão linear segmentada utilizada para cada um dos gráficos.

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1.X + \beta_2.(X - X').D + u \quad (3)$$

Onde:

\hat{y} = Benefício econômico;

β_0 = Ponto de intersecção da reta no eixo y;

X = Influência ambiental (corresponde ao denominador da equação (1), por exemplo energia consumida e mdo);

X' = Valor limiar que indica o ponto de inflexão da linha de tendência;

$D = 0$ se $X < X'$ e 1 se $X > X'$;

u = Erro.

Assim, β_1 dá o coeficiente angular da linha de regressão no segmento um e $\beta_1 + \beta_2$, o coeficiente angular do segmento dois da regressão linear segmentada.

Para cada valor de coeficiente, foi determinada sua significância, para isto, foram utilizados “*” para nível de significância $p \leq 0,01$ e ^{NS} para valores não significativos. Ainda na análise estatística, foram determinados os valores de R^2 e F para cada uma das equações, que demonstram a qualidade de ajustamento das equações.

Para a tabulação e determinação da regressão linear segmentada foi utilizado o software Microsoft Excel. A partir desta tabulação, foi utilizado o software Matlab 2017, o qual gerou os gráficos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

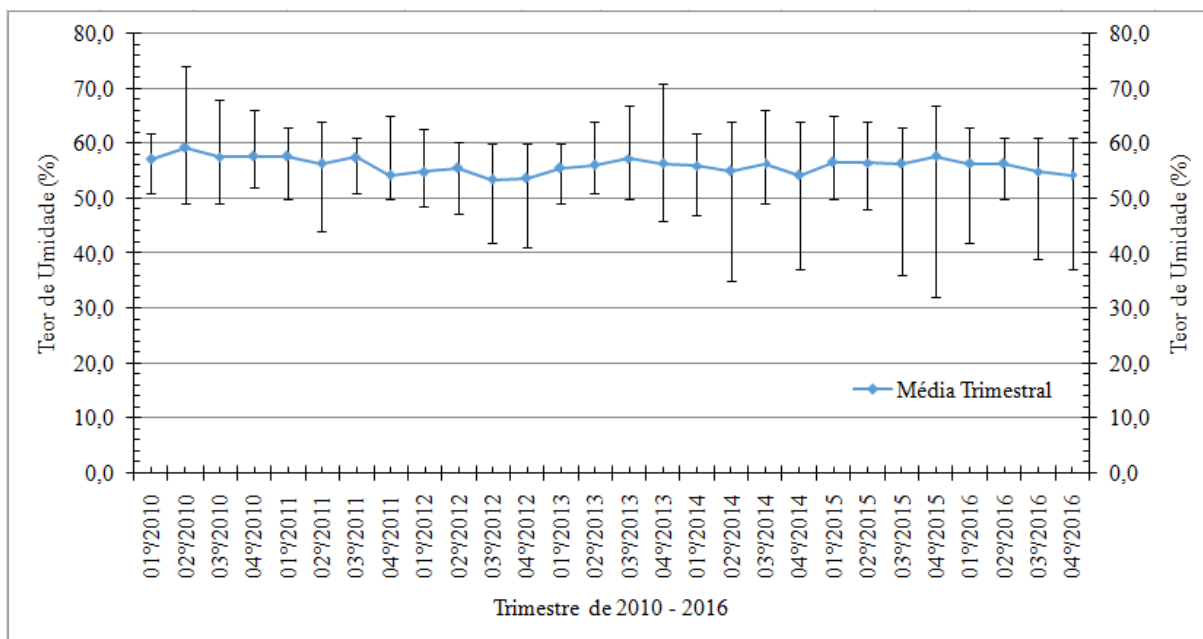
Esta seção está dividida em cinco subitens, o primeiro é referente a qualidade da biomassa utilizado pela UCLA durante os anos de 2010 e 2016, os três próximos subitens representam cada uma das etapas da cogeração de energia, que são o pátio de biomassa, a geração de vapor e a geração de energia elétrica. O quinto subitem representa os sistemas auxiliares da indústria, que são o sistema de água e o sistema de cinzas. Para cada etapa do processo, foram levantadas as principais entradas e saídas (matéria e produtos) e com isto, gerados os indicadores de ecoeficiência, assim como, foram representadas esquematicamente a sequência de cada uma das etapas do processo de produção.

4.1 QUALIDADE DA BIOMASSA FLORESTAL ADQUIRIDA PELA UCLA

4.1.1 Teor de Umidade

A Figura 3 representa a evolução do teor de umidade ao longo do período de estudo, a qual influencia diretamente a produção de energia, isto ocorre porque o calor precisa inicialmente “secar” a matéria-prima para então, posteriormente, gerar energia. Sendo assim, quanto menor o teor de umidade, maior será a produção de energia. Na representação, pode-se perceber que ao longo do tempo o teor de umidade oscila em torno de 55%, ora com mais variabilidade e ora com menos, sendo que, segundo Brutti e Simioni (2006), o valor máximo desejável para teor de umidade na utilização em caldeiras é de 60%.

Figura 3 - Evolução trimestral do teor de umidade (%) da biomassa adquirida pela UCLA.



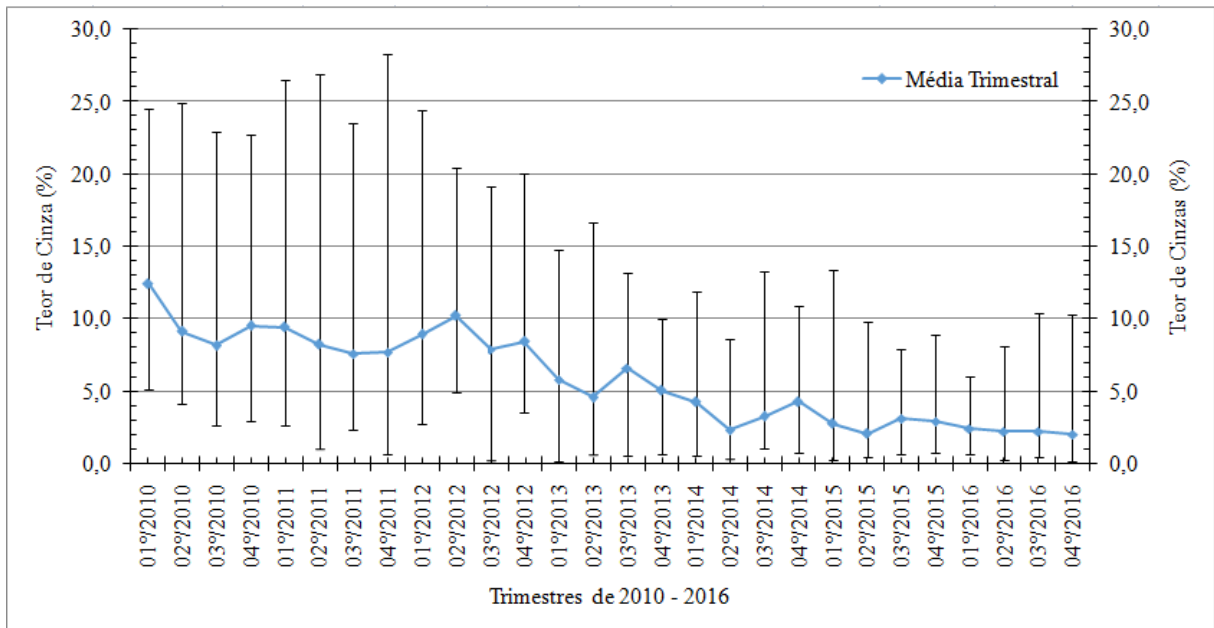
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

4.1.2 Teor de Cinzas

As cinzas geradas na produção de energia são consideradas um problema para a indústria, isto porque é um material sem valor de mercado, sendo assim, quanto menor a produção de cinza, melhor é a qualidade da biomassa e menores são os problemas de descarte deste material. Com isto, a Figura 4 evidencia que a produção de cinzas diminuiu muito com o passar dos anos, podendo ter contribuído na melhoria da eficiência energética da usina. Nota-se uma queda de aproximadamente 83% no teor médio de cinzas da biomassa entre os anos de 2010 e 2016, assim como uma significativa redução da variabilidade do material.

Segundo informações da usina, a caldeira foi projetada para operar com valor de 2% de teor de cinzas, o qual, percebe-se que está sendo atingindo nos últimos trimestres do estudo. Quanto menor o teor de cinzas do material utilizados, melhor será a qualidade do mix, valores altos de teor de cinzas podem causar depósitos de cinzas sobre a grelha ou nas paredes da superfície do queimador, podendo diminuir a eficiência do queimador (DEBONI, 2017).

Figura 4 - Evolução trimestral do teor de cinzas (%) da biomassa adquirida pela UCLA.

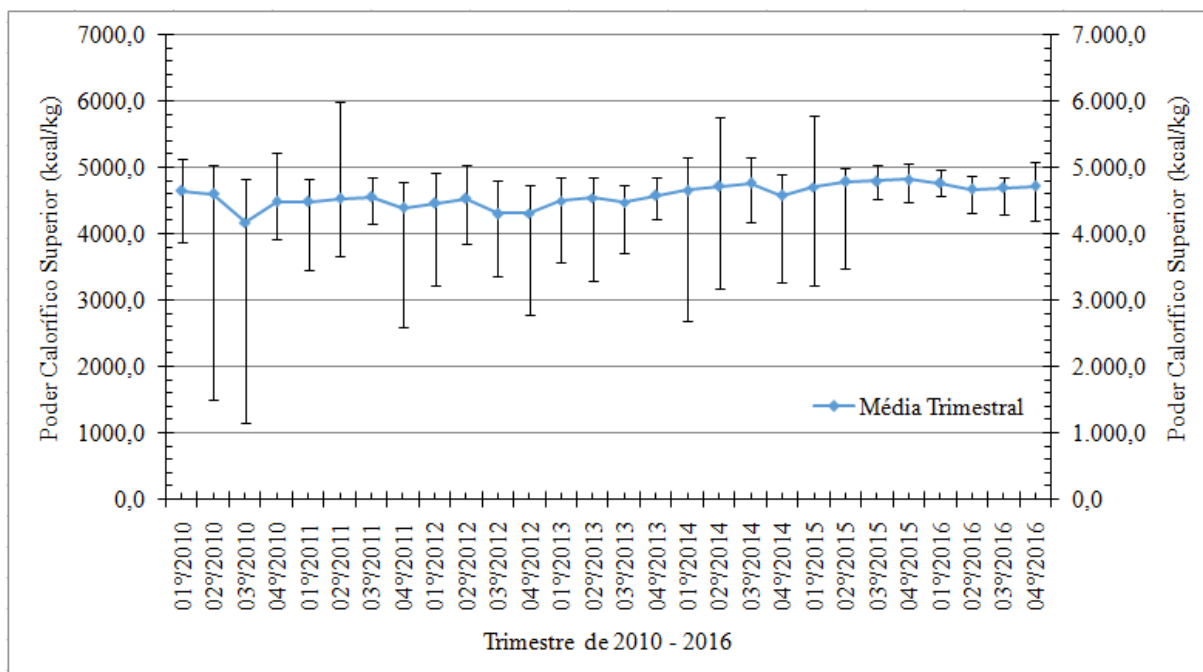


Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

4.1.3 Poder Calorífico

Considerando tais aspectos, é conveniente analisar a qualidade da biomassa florestal adquirida pela UCLA no período de análise. Assim, a Figura 5 abaixo representa a evolução gráfica do poder calorífico superior durante o período de estudo da ecoeficiência da usina (2010 – 2016). Essa representação foi realizada para poder explicar posteriormente o comportamento dos indicadores de ecoeficiência.

Figura 5 - Evolução trimestral do poder calorífico superior (kcal/kg) da biomassa adquirida pela UCLA.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Percebe-se que o poder calorífico teve uma pequena melhora em seus valores de máximos e mínimos nos últimos anos, mantendo-se sem grandes picos, diferente dos valores apresentados nos primeiros trimestres de estudo. A melhora nos valores de poder calorífico influencia diretamente os indicadores deste estudo, demonstrando que há um maior potencial de geração de energia, podendo ser utilizado uma menor quantidade de matéria-prima.

Saidur et al. (2011) demonstraram que o PCS para madeira (entre diferentes espécies) ficaria em torno de 4239,96 kcal/kg, valor este próximo ao estabelecido por Woch et al (2015) para resíduos de colheita florestal de aproximadamente 4474,19 kcal/kg. Pelos valores de PCS utilizados pela UCLA, o valor médio é de 4602,51 kcal/kg, ou seja, acima dos encontrados na literatura.

Segundo Furtado (2010) a casca possui alta disponibilidade de oferta, porém, quando pura, apresenta qualidade inferior, já o cavaco possui as melhores características, entretanto tem outra destinação, sendo assim, o mix é uma opção de combustível para a cogeração em situações de baixa disponibilidade do material puro.

Um estudo realizado por Deboni (2017), sobre a qualidade da biomassa florestal utilizado pela UCLA, demonstrou que há uma baixa variabilidade de umidade nos materiais,

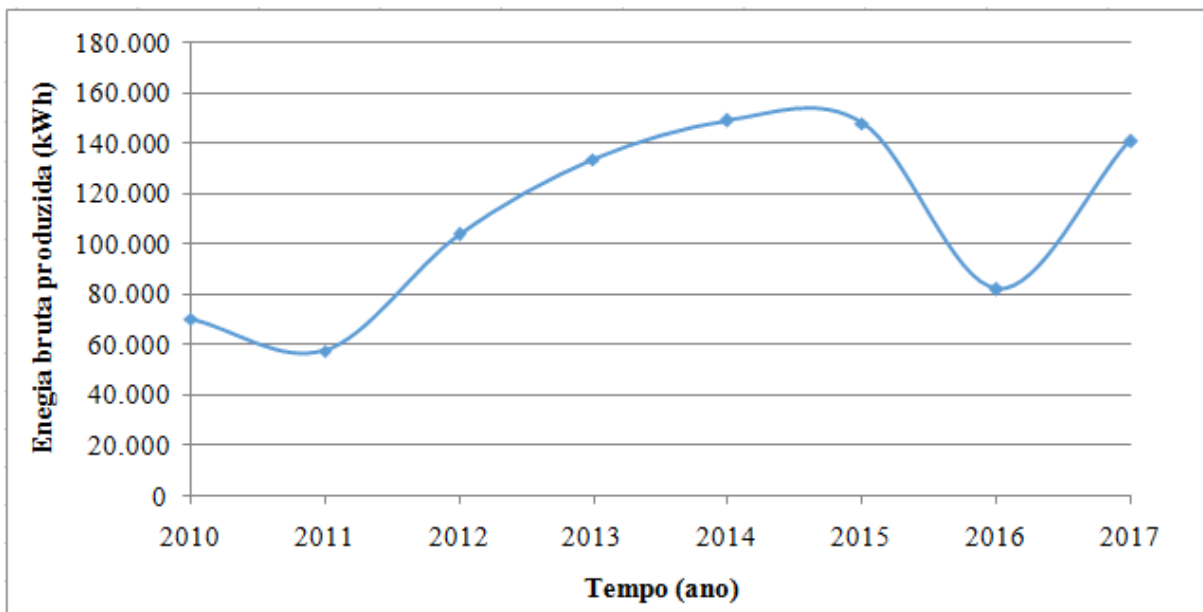
enquanto os teores de cinzas apresentaram-se bastante elevados e com alta variação. Já o poder calorífico da biomassa teve um aumento a partir de 2011 que se justifica pela melhoria da qualidade da biomassa florestal fornecida, devido a redução dos teores de umidade e, sobretudo das cinzas.

4.2 ETAPAS DO PROCESSO PRODUTIVO E SEUS INDICADORES DE ECOEFICIÊNCIA

Neste item serão apresentadas as esquematizações de cada uma das etapas (Pátio de Biomassa, Geração de Vapor e Geração de Energia) do processo produtivo, bem como, os sistemas auxiliares (sistema de água e sistema de cinza) da Engie Brasil Energia. Assim como, serão apresentados os indicadores de ecoeficiência referentes a cada uma das etapas e sistemas.

Inicialmente, é interessante observar o comportamento da produção de energia bruta entre os anos de 2010 e 2017 (Figura 6). Pode-se perceber que a tendência é de aumento na produção com o passar do tempo, porém, em 2016 houve uma queda significativa na produção, com posterior recuperação. Isto ocorreu devido a fatores climáticos como a quantidade de chuva neste ano. Sabe-se que a maior produção de energia atualmente no Brasil é advinda de usinas hidroelétricas, sendo assim, quanto maior a disponibilidade de água, maior será a produção de energia hidrelétrica, tendo como resultado uma baixa na produção de energias de outras fontes alternativas.

Figura 6 - Produção bruta de energia (kWh) ao longo do período de estudo.

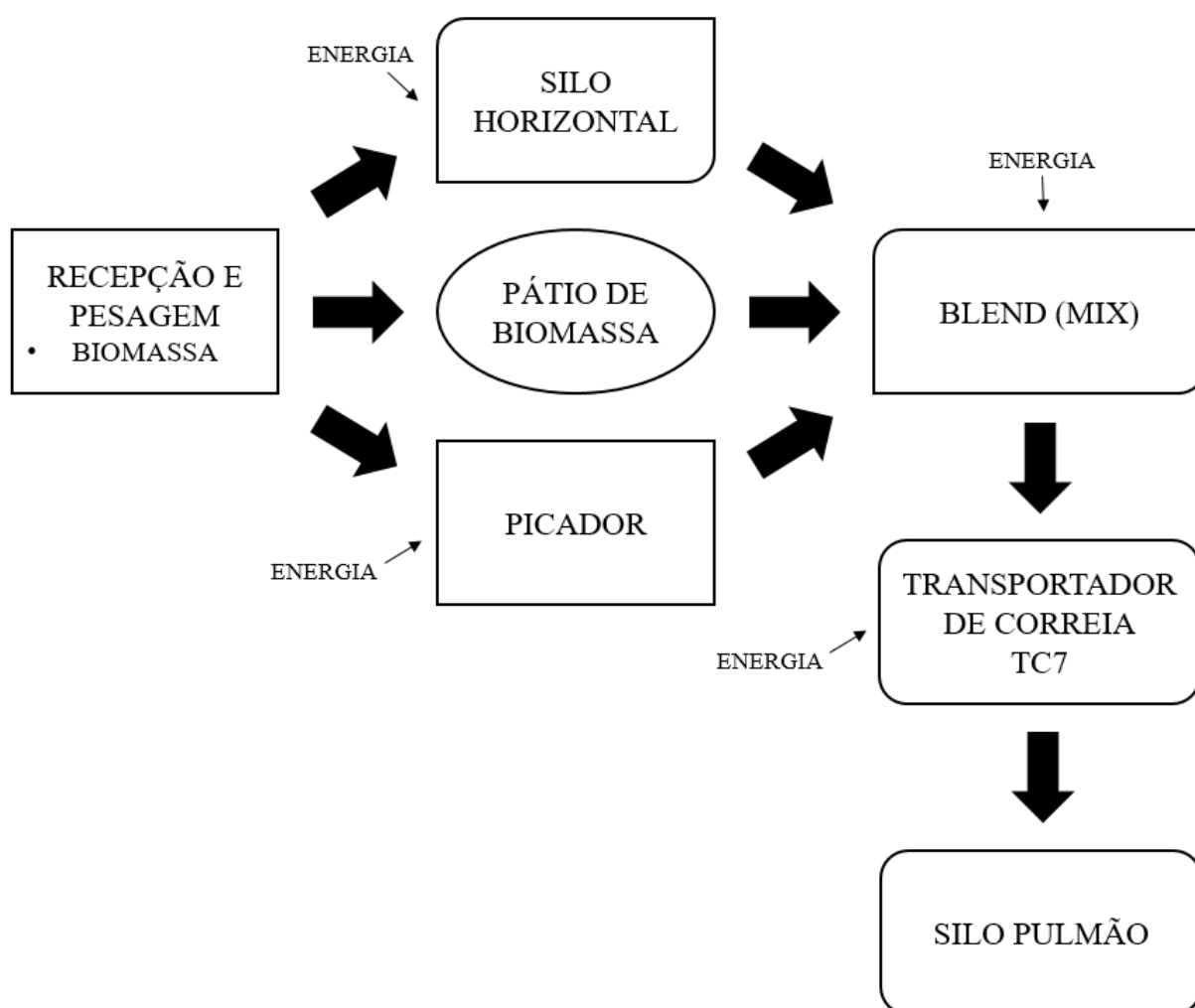


Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

4.2.1 Etapa 1 - pátio de biomassa

O pátio de biomassa é a primeira etapa de uma usina de produção que utiliza biomassa florestal para a produção de energia. Nesta consiste a utilização de equipamentos para recepção, movimentação, classificação e armazenagem de biomassa em forma de cavaco, serragem e casca. O modelo de pátio de biomassa está representado na Figura 7.

Figura 7 - Modelo esquemático da etapa Pátio de Biomassa para a produção de energia elétrica da UCLA.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Com base na Figura 7, identifica-se que há saída de blend e os insumos utilizados são biomassa, energia consumida, mdo e combustível, os quais serão formadores dos indicadores de ecoeficiência e serão analisados a seguir.

A biomassa florestal é fornecida por indústrias madeireiras da região de Lages, na forma de cavaco, serragem e outros resíduos da transformação madeireira, além de toras finas e outros materiais inteiros (p. e. costaneiras) que precisam passar pelo picador. Ao sair dos produtores, é transportada por caminhões até a Unidade de Cogeração Lages (UCLA). Ao chegar na unidade, é feita a pesagem dos caminhões junto à recepção. Após, a biomassa pode ser enviada para três destinos distintos: pátio de biomassa, silo horizontal ou picador.

O pátio de biomassa é um local a céu aberto, que estoca a biomassa em grandes pilhas, e com o auxílio de duas máquinas carregadeiras, esta biomassa é conduzida para o

transportador de correia, o qual destina para as próximas etapas. Já o silo horizontal é um pátio de estocagem seco e coberto, permitindo que a biomassa permaneça seca em dias de chuva, por exemplo. O picador é utilizado para a homogeneização e fragmentação da biomassa, onde as toras finas e outros materiais inteiros são transformadas em cavacos. Este processo é realizado para aumentar a superfície de contato da biomassa, fazendo com que a combustão se torne mais rápida e eficiente.

A partir daí a biomassa é enviada a um misturador para homogeneização e obtenção do blend (mix), antes de ser enviada para combustão. Após, com o auxílio de um transportador de correia (TC7), o blend é enviado para o silo pulmão, que armazena a biomassa por um curto intervalo de tempo antes de ser queimada na caldeira.

No caso específico da biomassa florestal, a oferta de determinado tipo de matéria-prima e seu preço podem determinar a realização da estocagem, independentemente da época do ano. Um exemplo usual disso é a estocagem da madeira na forma de toras, oriundas de desbastes, em determinadas épocas do ano, onde estão sendo realizados desbastes de forma intensiva, pode haver no mercado grande disponibilização de toras com pequenos diâmetros. Estas, por sua vez, não serão completamente absorvidas pelas indústrias de celulose e papel ou de painéis, fazendo seu valor de mercado diminuir. Assim, esse material passa a ser utilizado no mercado de energia, propiciando a necessidade de estocagem, para regular o consumo pela planta geradora de energia (BRAND et al., 2012).

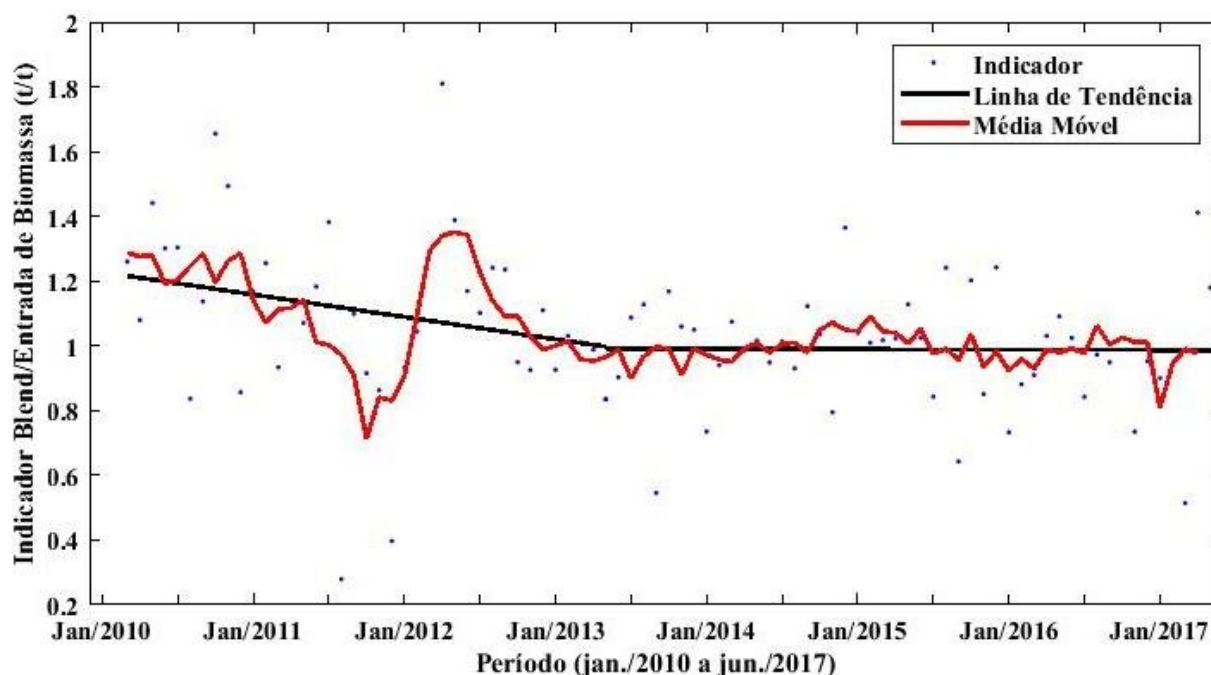
4.2.1.1 Indicadores de Ecoeficiência do Pátio de Biomassa

Para o Pátio de Biomassa da indústria, foi possível determinar os indicadores de “blend/entrada de biomassa (t/t)” (Figura 8), “blend/combustível (t/L)” (Figura 9), “blend/energia consumida (t/kWh)” (Figura 10) e “blend/mdo (t/hora-homem)” (Figura 11), além das equações referentes a cada um dos indicadores, que estão dispostas na Tabela 5.

A Figura 8 representa o indicador de ecoeficiência “blend/entrada de biomassa (t/t)”, e pode-se perceber que houve um declínio da linha de tendência entre os anos de 2010 e 2013. Porém, a partir do segundo trimestre de 2013, a média móvel demonstra que houveram pequenas oscilações nos próximos anos, mas a linha de tendência comprova que estas oscilações mantiveram um padrão estável até o ano de 2017. Este indicador leva em consideração a quantidade de blend gerada e consumida (em toneladas), pela quantidade de biomassa que chega na usina (em toneladas) e é estocada. A tendência de linearidade

observada a partir de 2013 tem como fator principal uma regularidade do volume de biomassa estocada, ou seja, a UCLA mantém relativamente constante a quantidade de matéria-prima estocada ao longo do tempo. Oscilações no estoque de biomassa são decorrentes tanto de variações de mercado da biomassa como também da demanda de energia.

Figura 8 - Evolução do indicador de ecoeficiência “blend/entrada de biomassa (t/t)” no período 2010-2017.

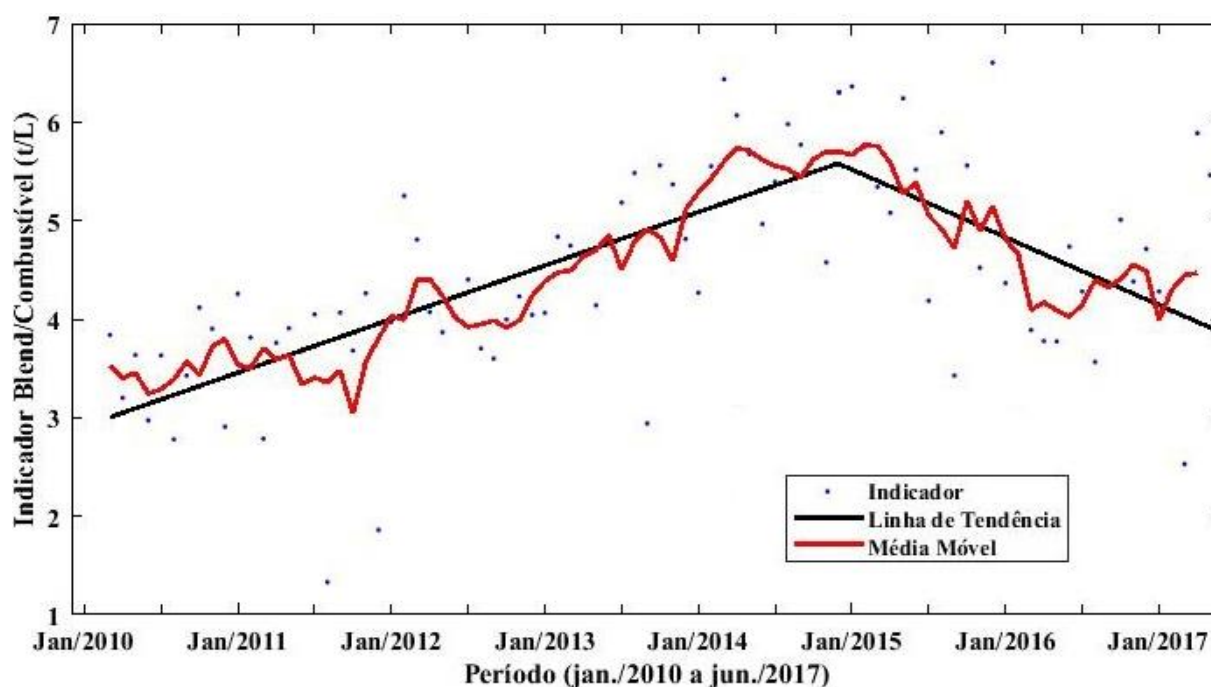


Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

A Figura 9 demonstra que o indicador “blend/combustível (t/L)” está em constante crescimento até o início de 2015, refletindo em significativa melhoria na qualidade deste indicador. A partir do segundo trimestre de 2015 há uma pequena tendência de queda na qualidade do indicador, porém, mesmo com esta pequena mudança de tendência, houve uma melhora de aproximadamente 29% na qualidade do indicador quando comparado ao início do período analisado. A melhor relação chegou a 5,8 t/L em 2014 e 2015, ou seja, uma melhoria no indicador de cerca de 66%.

A principal influência no comportamento deste indicador é a forma de estocagem da matéria-prima ao chegar à UCLA, diminuindo as distâncias de deslocamento das máquinas carregadeiras no pátio de armazenamento de biomassa. O combustível é utilizado por máquinas carregadeiras, que realizam o transporte da matéria-prima entre a estocagem e a correia transportadora, a qual abastece a usina.

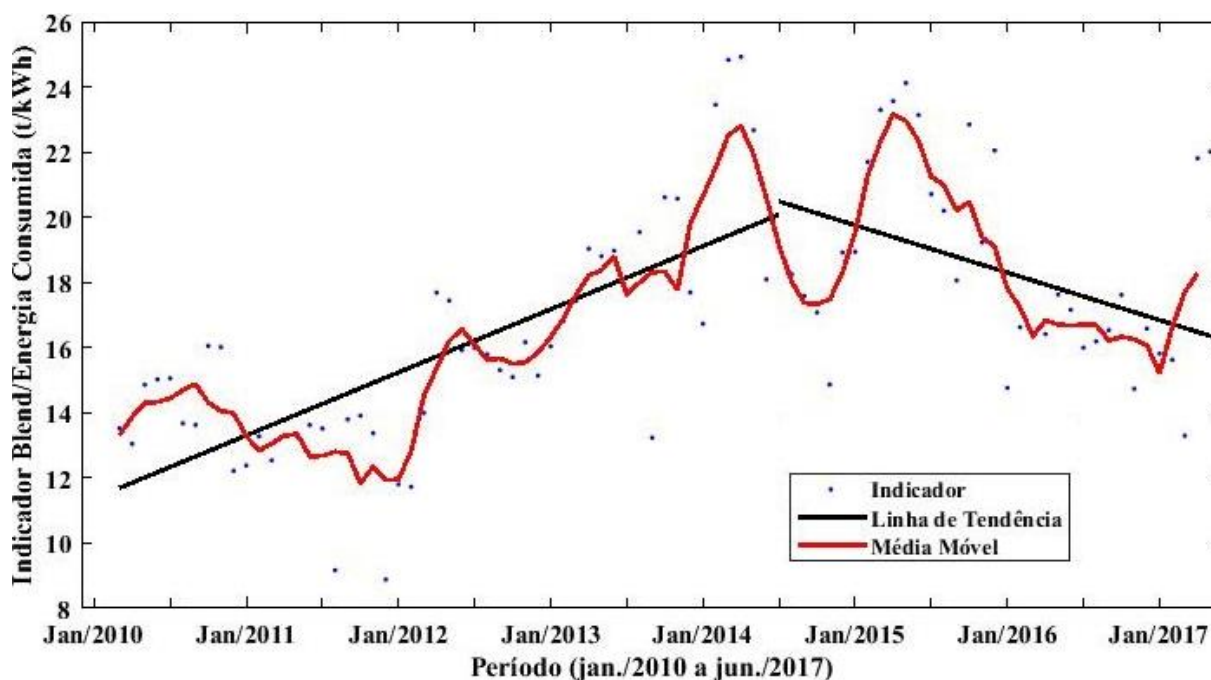
Figura 9 - Evolução do indicador de ecoeficiência “blend/combustível (t/L)” no período 2010-2017.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Para a Figura 10 tem-se a representação do indicador “blend/energia consumida (t/kWh)”. Pode-se perceber que entre os anos de 2010 a 2014 há uma tendência de melhoria do indicador, porém, a partir da metade de 2014 há uma pequena queda nos valores do indicador. Nota-se que há uma melhora no indicador de ecoeficiência de aproximadamente 29% entre os anos de 2010 e 2017, com um aumento de 64% nos anos de 2014 e 2015. Esta mudança de comportamento não afeta significativamente a qualidade do indicador, pois quando comparado aos seus primeiros valores, nota-se que ele está melhor. O comportamento deste indicador tem sua ocorrência principalmente devido a evolução na utilização dos equipamentos, fazendo com que os mesmos tenham uma maior eficiência.

Figura 10 - Evolução do indicador de ecoeficiência “blend/energia consumida (t/kWh)” no período 2010-2017.

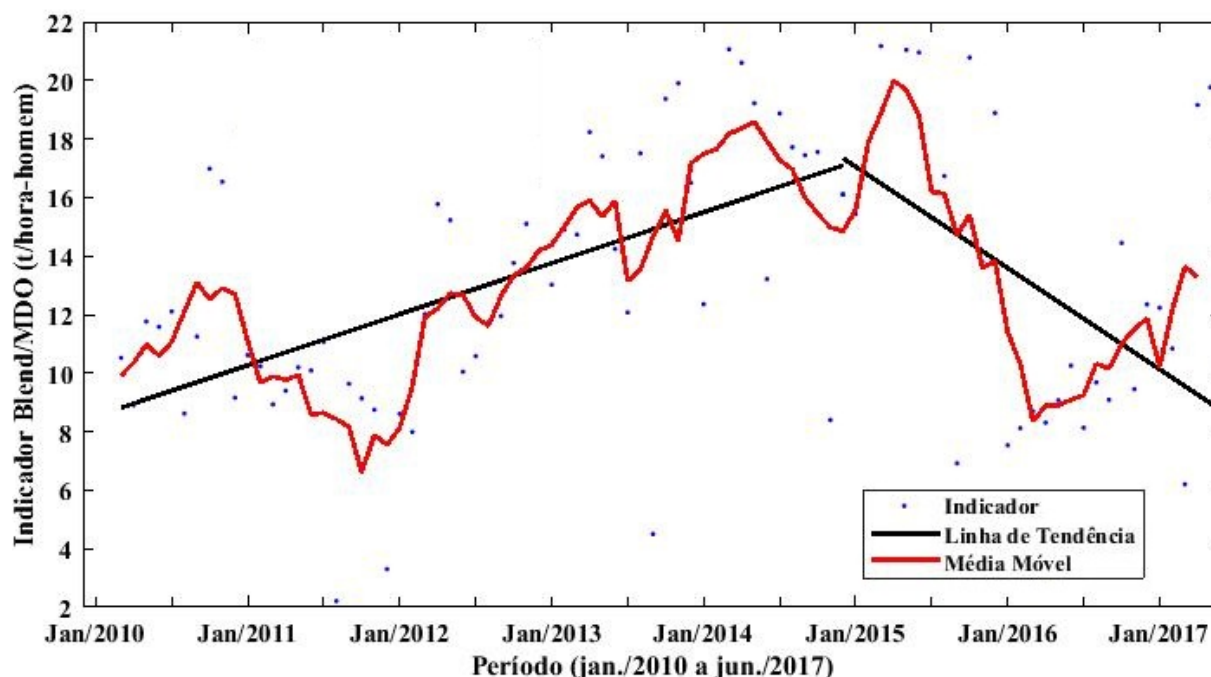


Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

A Figura 11 apresenta o gráfico referente aos dados do indicador “blend/mdo (t/hora-homem)”, ao analisar a linha de tendência, observa-se que há uma melhoria gradativa entre os anos de 2010 e 2014. Já a partir de 2015 há uma inversão de tendência, demonstrado pela linha de tendência e pela média móvel. No início do estudo os valores do indicador de ecoeficiência eram de aproximadamente 10 t/hora-homem, e ao final do estudo era de 13 t/hora-homem, um aumento de 30%, com um pico de 100% de melhora em 2015. O comportamento deste indicador está diretamente relacionado à reorganização e capacitação dos funcionários ao longo do tempo, bem como o aperfeiçoamento na utilização das máquinas utilizadas pelos colaboradores da UCLA.

Segundo Alves e Medeiros (2015) um aspecto importante na implementação e avaliação de práticas ecoeficientes é o envolvimento da equipe de colaboradores e dos proprietários e são práticas que tem resultados positivos e duradouros, conforme verificado pela análise estatística. Isso evidencia que as práticas ecoeficientes podem oferecer benefícios de baixo custo ambiental para as empresas.

Figura 11 - Evolução do indicador de ecoeficiência “blend/mdo (t/hora-homem)” no período 2010-2017.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

A Tabela 5 apresenta todas as equações dos indicadores de ecoeficiência da etapa 1, cujos coeficientes apresentados tiveram significância estatística ($p \leq 0,01$), assim como os valores do teste F, sendo que todos os gráficos tiveram mudança de tendência ao longo do tempo de estudo. Nota-se também, que apenas para o indicador “blend/entrada de biomassa” teve o valor de R^2 baixo (33,0%), indicando que a entrada de biomassa explica 33% da formação do blend, dada as variações do volume estocado. Já o R^2 dos demais indicadores ficaram com valores relativamente altos, indicando um alto grau de correlação entre as variáveis.

Para este setor, pode-se destacar que as maiores influências na variação dos indicadores são as variações nos estoques de biomassa, que dependem fundamentalmente de dois fatores: 1) da quantidade de biomassa adquirida em função da disponibilidade do mercado, podendo ser maior ou menor em função das oscilações de preço e oferta de biomassa na região; e 2) da demanda de energia elétrica pelo mercado consumidor brasileiro, ou seja, quanto maior a necessidade de produção de energias alternativas (acionamento das termelétricas pelo Operador nacional do Sistema Elétrico – NOS, devido à escassez hídrica), maior será a produção de energia pela UCLA. Nota-se que de 2015 a 2016 houve queda na produção de energia pela UCLA que, por sua vez, impactou na queda dos indicadores “blend/combustível”, “blend/energia consumida” e “blend/mdo”.

Além disto, pode-se destacar também a melhoria na forma de utilização das máquinas empregadas no pátio, bem como um maior aprendizado na forma de usar as máquinas e equipamentos pelos colaboradores.

Tabela 5 - Equações referentes aos indicadores da etapa Pátio de Biomassa da UCLA.

Indicadores(\hat{y}/x)	Equação	R²	F	X'
Blend / Entrada de Biomassa	$\hat{y} = 1,2195^* - 0,0056^* x + 0,0055^* (X-X').D$	0,3300	20,44*	41
Blend / Combustível	$\hat{y} = 3,0012^* + 0,0432^* x - 0,1078^* (X-X').D$	0,8482	231,97*	60
Blend / Energia Consumida	$\hat{y} = 11,5188^* + 0,1619^* x - 0,2923^* (X-X').D$	0,6732	85,50*	55
Blend / mdo	$\hat{y} = 8,7115^* + 0,1432^* x - 0,4631^* (X-X').D$	0,5642	53,73*	60

Nota: NS = Não significativo; * = Significância $\leq 0,01$; X' = Quebra da linha de tendência.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

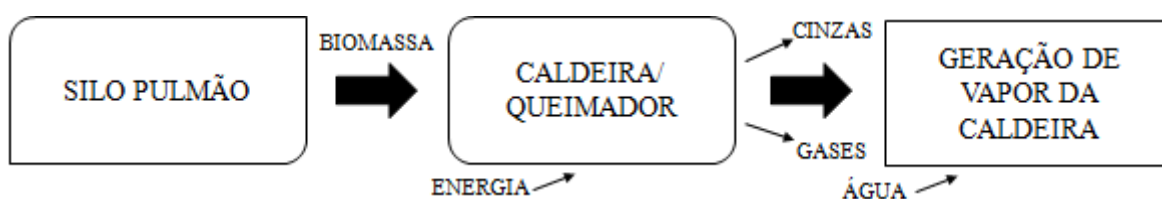
Para Alves e Medeiros (2015) um aspecto importante na implementação de práticas ambientais é o envolvimento da equipe durante a implementação de práticas ecoeficientes. Estas tem resultados positivos e duradouros, além de oferecerem benefícios ambientais de baixo custo para micro e pequenas empresas. Referente a estocagem da matéria-prima no pátio de biomassa Brand (2017) realizou um estudo e concluiu que a estocagem das toras e dos galhos deve ser realizada separadamente, devido ao comportamento diferenciado da secagem da biomassa em função das dimensões e forma da mesma, o mesmo ocorre para a estocagem da serragem.

Ainda referente a estocagem da biomassa, Brand et al. (2010) realizou um estudo referente ao tempo de estocagem da biomassa para a queima e geração de energia elétrica, este demonstrou que o tempo de estocagem tem influência sobre o teor de umidade e poder calorífico líquido, sendo que o tempo ideal de estocagem varia entre dois a quatro meses, dependendo da espécie e forma da biomassa e época do ano em que foi realizada a estocagem.

4.3 ETAPA 2 – GERAÇÃO DE VAPOR

Após a estocagem no silo pulmão, a biomassa é então enviada para a caldeira/queimador. No queimador, a biomassa entra em combustão, fazendo com que a água da caldeira entre em ebulição, ou seja, passagem do estado líquido para o estado de vapor (Figura 12).

Figura 12 - Modelo esquemático da etapa de Geração de Vapor para a produção de energia elétrica da UCLA.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Pela Figura 12 pode-se observar que há saída de vapor e os insumos utilizados são blend, água, mão de obra e energia consumida, os quais serão formadores dos indicadores de ecoeficiência e serão analisados a seguir. No queimador, são gerados gases e cinzas do processo. Os gases são eliminados pela chaminé da unidade e as cinzas passam por um lavador de gases (processo que será descrito no item 4.5.2).

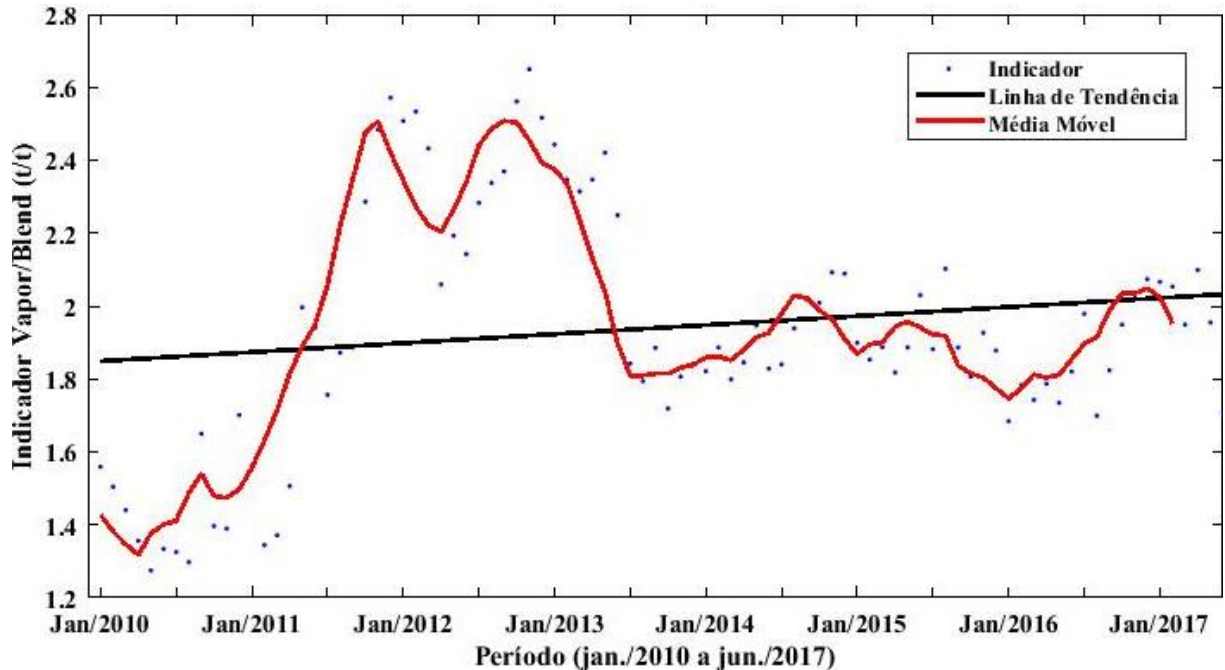
4.3.1 Indicadores de ecoeficiência da etapa 2 – Geração de Vapor

Na geração de vapor da indústria, foram determinados os indicadores de “vapor/blend (t/t)” (Figura 13), “vapor/água (t/m³)” (Figura 14), “vapor/mdo(t/hora-homem)” (Figura 15) e “vapor/energia consumida (t/kWh)” (Figura 16), além das equações referentes a cada um dos indicadores, dispostas na Tabela 6.

A Figura 13 representa o indicador “vapor/blend (t/t)”, pode-se perceber pela linha de tendência que o indicador apresentou uma melhoria contínua, com um aumento significativo durante os anos de 2011 e 2012, de 78,5% quando comparado aos primeiros meses de 2010. Porém, a partir de 2013 houve uma estabilidade no indicador, mantendo-se em um crescimento constante até 2017, e quando comparado a 2010, esse aumento é de aproximadamente 57%. O que influencia diretamente este indicador é a qualidade de matéria-

prima adquirida pela UCLA, pois quanto melhor a matéria-prima recebida e queimada pela usina, conseqüentemente maior será sua produção de vapor.

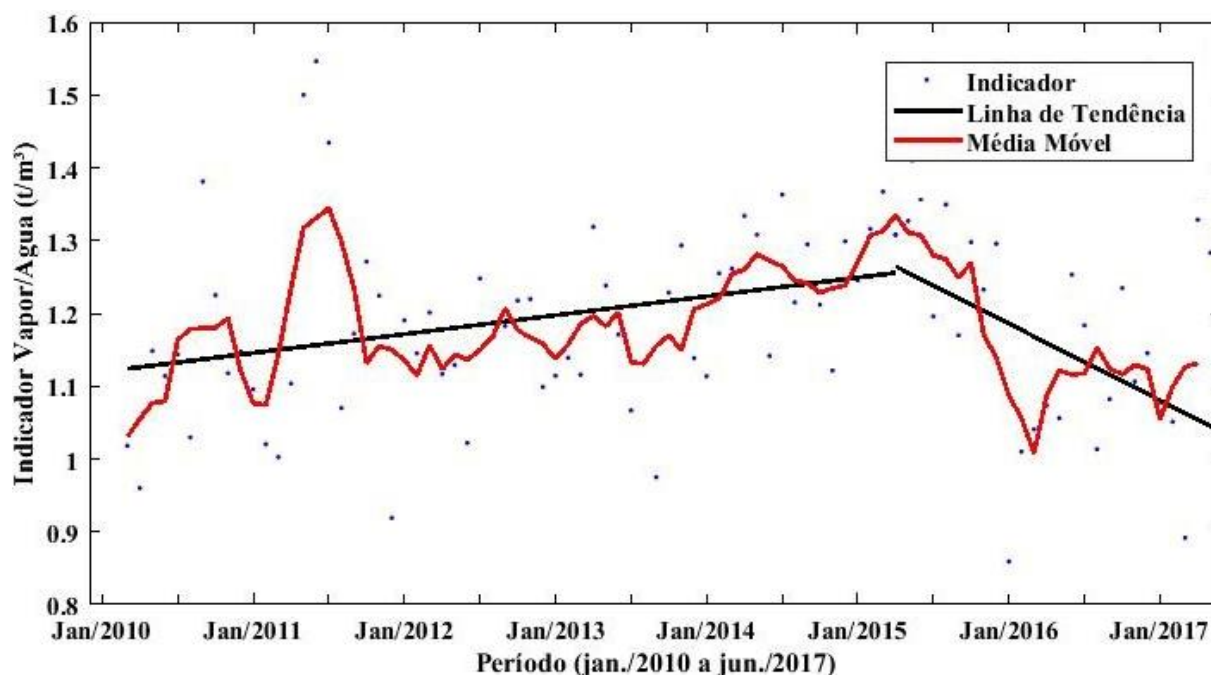
Figura 13 - Evolução do indicador de ecoeficiência “vapor/blend (t/t)” no período 2010-2017.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Para o indicador “vapor/água (t/m³)”, representado graficamente pela Figura 14, observa-se que se manteve relativamente estável ao longo do tempo de operação da usina de cogeração. A partir da média móvel, percebe-se que até 2015 houveram pequenas melhoras na qualidade do indicador, havendo uma pequena queda em sua qualidade entre a metade de 2015 e 2017. A tendência estável deste gráfico pode ter ocorrido devido a existência de um padrão obrigatório na quantidade de água necessária para a geração vapor e seu resfriamento após a geração de energia (em torno de 1,1 e 1,3 t/m³), ou seja, se aumentar ou diminuir a quantidade de água utilizada, conseqüentemente haverá um aumento ou diminuição na quantidade de vapor gerado.

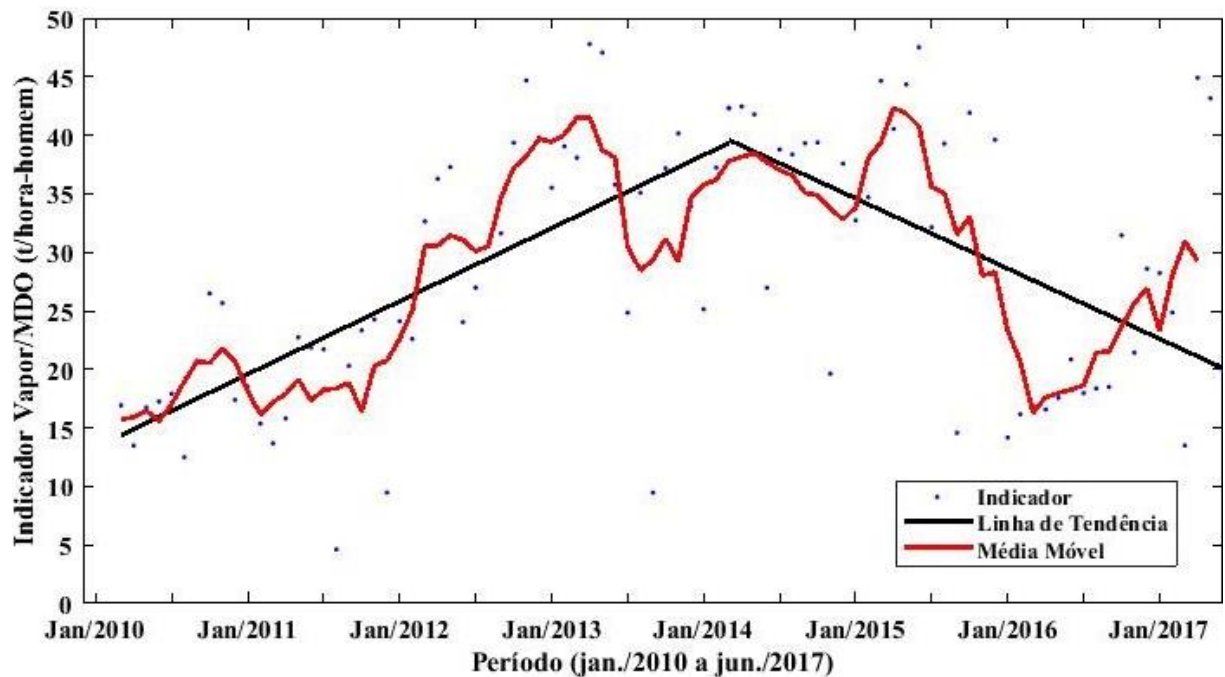
Figura 14 - Evolução do indicador de ecoeficiência “vapor/água (t/m³)” no período 2010-2017.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

O terceiro indicador deste setor é o “vapor/mdo (t/hora-homem)” e está demonstrado graficamente pela Figura 15, onde há duas tendências ao longo do período de estudo. A primeira tendência é entre os anos de 2010 e 2014, onde o indicador melhora pouco a pouco, já a segunda tendência está entre os anos de 2014 e 2017, onde houve uma forte diminuição nos valores do indicador, porém, recuperando-se no final. Houve uma melhoria de 87,5% na ecoeficiência entre os anos de 2010 e 2017, com uma melhora de 162,5% nos anos de 2013 e 2015 quando comparado com 2010. Esta mudança de tendência e a melhoria do indicador pode ter ocorrido devido a capacitação dos colaboradores, melhorando consequentemente a operação dos equipamentos da usina.

Figura 15 - Evolução do indicador de ecoeficiência “vapor/mdo (t/hora-homem)” no período 2010-2017.

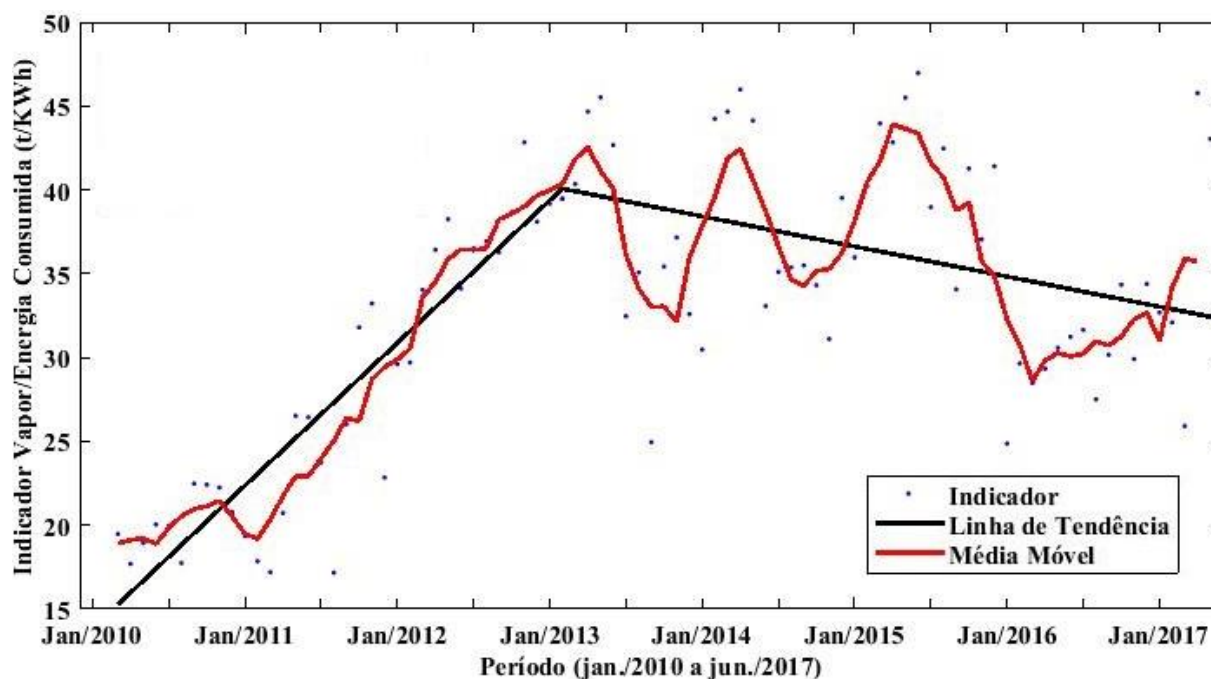


Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

A Figura 16 representa o gráfico do indicador de “vapor/energia consumida (t/kWh)” ao longo do tempo, este, tem uma grande tendência de melhora entre os anos de 2010 e 2012, a partir de 2013 o indicador começa a oscilar e tem uma leve queda em sua eficiência. No início de 2010 o valor do indicador era de 19 t/kWh, enquanto em 2017 é de aproximadamente 36 t/kWh, um aumento de 89,5% na qualidade da ecoeficiência, chegando a ter um aumento de 126% entre os anos de 2013 e 2015. O principal fator que pode influenciar este indicador é um melhor aproveitamento da energia consumida, possibilitando a maior geração de vapor.

A Tabela 6 apresenta as equações referentes a cada um dos indicadores de ecoeficiência construídos para a etapa de geração de vapor. Percebe-se que todos os valores tiveram seu grau de significância ($p \leq 0,01$), bem como, todos os indicadores tiveram mudança de comportamento, ou seja, houve mudança de tendência ao longo do tempo de estudo. Esta mudança na tendência está associada a queda na produção de energia no ano de 2016, conforme apresentado pela Figura 6. Pelos valores de R^2 pode-se perceber que o indicador “vapor/água” está baixo (36,70%), já os demais indicadores tiveram seus valores maiores que 65,12%, enquanto F demonstra que todos os valores das equações são significativos e os valores de quebra da linha de tendência são 25, 64, 51 e 38.

Figura 16 - Evolução do indicador de ecoeficiência “vapor/energia consumida (t/kWh)” no período 2010-2017.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Tabela 6 - Equações referentes aos indicadores da etapa Geração de Vapor da UCLA.

Indicadores (\hat{y}/x)	Equação	R ²	F	X'
Vapor/ Blend	$\hat{y} = 1,1414^* + 0,0458^* x - 0,0545^* (X-X').D$	0,7120	102,60*	25
Vapor/ Água	$\hat{y} = 1,1257^* + 0,0020^* x - 0,0110^* (X-X').D$	0,3670	24,05*	64
Vapor/ mdo	$\hat{y} = 14,2280^* + 0,4987^* x - 1,0440^* (X-X').D$	0,6512	77,49*	51
Vapor/ Energia Consumida	$\hat{y} = 15,1286^* + 0,6657^* x - 0,8356^* (X-X').D$	0,8073	173,89*	38

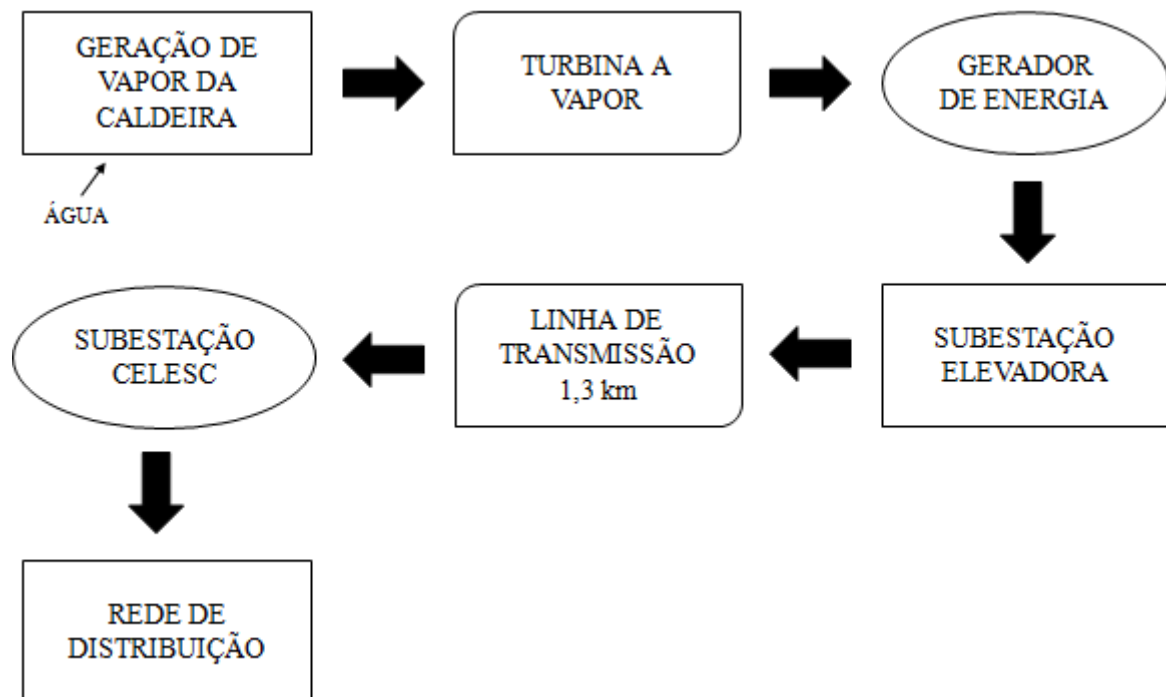
Nota: NS = Não significativo; * = Significância $\leq 0,01$; X' = Quebra da linha de tendência.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

4.4 ETAPA 3 – GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A Figura 17 representa o processo de geração final de energia elétrica através do turbogerador. Ao entrar na caldeira a água já passou pelos devidos processos de desmineralização e está em seu estado líquido, sendo assim, é aquecida e passa para o estado de vapor, o qual é enviado para a turbina a vapor, que trabalha em torno de um eixo central e está interligada a um gerador de eletricidade. Após passar pela turbina, o vapor de água é enviado a um condensador e resfriador, voltando ao seu estado líquido e retornando ao processo.

Figura 17 - Modelo esquemático da etapa Geração de Energia Elétrica da UCLA.



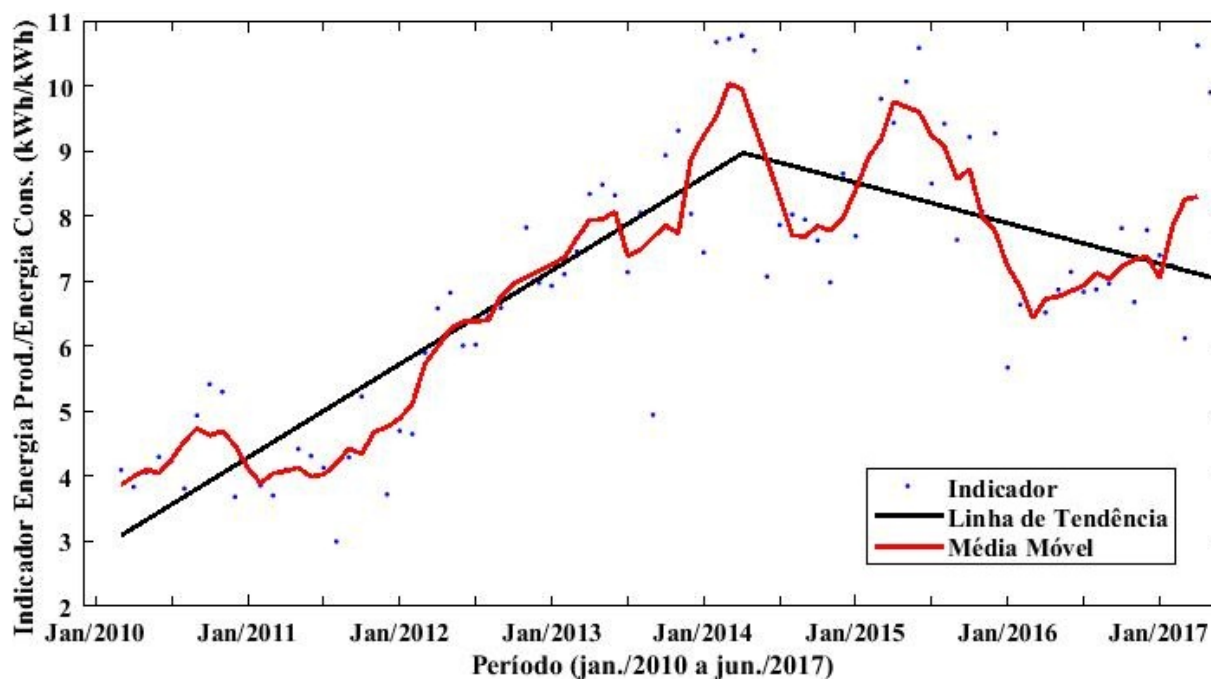
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Em análise a Figura 17, observa-se que há saída de energia elétrica e as entradas são energia consumida, entrada de biomassa, blend, vapor, água e cinza, os quais serão formadores dos indicadores de ecoeficiência e serão analisados a seguir. Nesta etapa final do processo, após passar pelas etapas anteriores, a energia gerada é enviada a uma subestação, que através de um transformador estabiliza a energia de 13,8kv para 138kv e a envia para a uma linha de transmissão de 1,3 km até uma subestação da Celesc, a qual faz o direcionamento e distribuição da energia para as redes.

4.4.1 Indicadores de ecoeficiência finais da geração de energia

A geração de energia elétrica da indústria é marcada pelos indicadores de “energia produzida/energia consumida (kWh/kWh)” (Figura 18), “energia produzida/entrada de biomassa (kWh/t)” (Figura 19), “energia produzida/blend (kWh/t)” (Figura 20), “energia produzida/vapor (kWh/t)” (Figura 21), “energia produzida/água (kWh/m³)” (Figura 22) e “energia produzida/cinza (kWh/t)” (Figura 23). Já as equações referentes a cada um dos indicadores estão dispostas na Tabela 7. O setor de Geração de Energia é a última etapa da produção de energia, para este setor foi observado o indicador “energia produzida/energia consumida (kWh/kWh)” pela usina durante o processo, este, está expresso graficamente pela Figura 18. Como pode ser observado, de 2010 até meados de 2014 o indicador tinha uma tendência positiva, porém a partir de 2014 houve uma leve mudança na tendência até 2017. Pode-se perceber que o valor inicial do indicador era de aproximadamente 4 kWh/kWh, já no final era de 8 kWh/kWh, uma melhora de 100%, já em 2014 houve uma melhora de 150%, chegando ao valor de 10 kWh/kWh. O fator de principal influência neste indicador é a melhoria no consumo de energia elétrica pelos equipamentos deste setor.

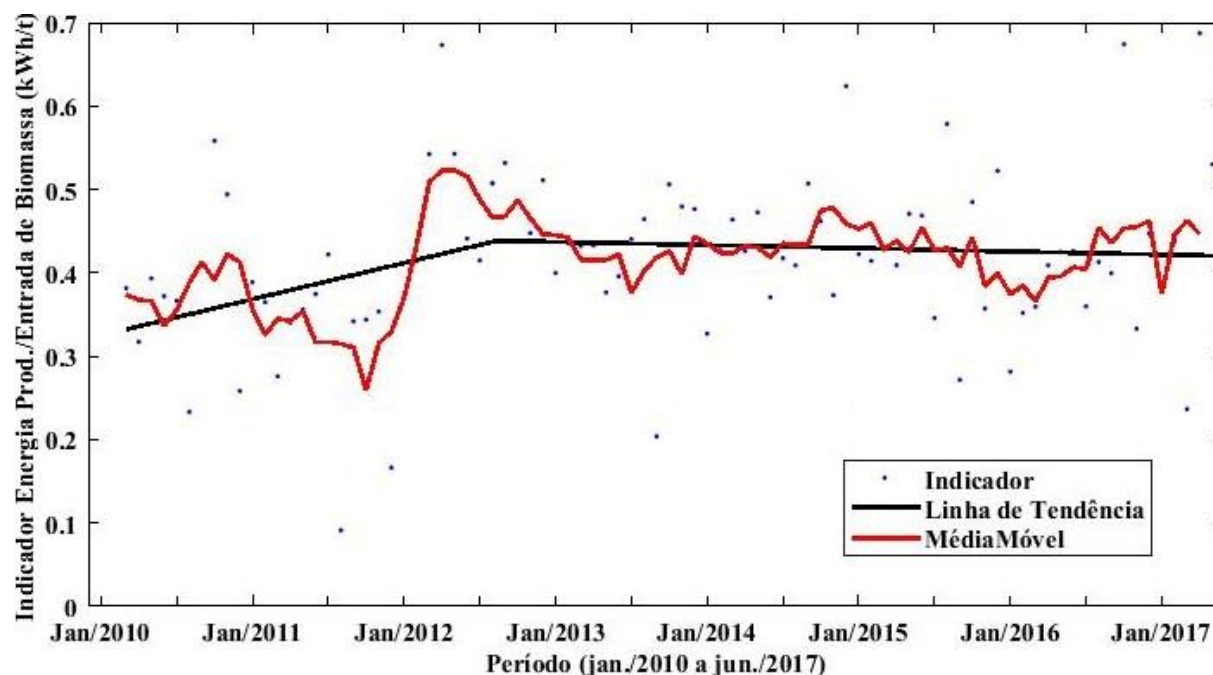
Figura 18 - Evolução do indicador de ecoeficiência “energia produzida/energia consumida (kWh/kWh)” no período 2010-2017.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

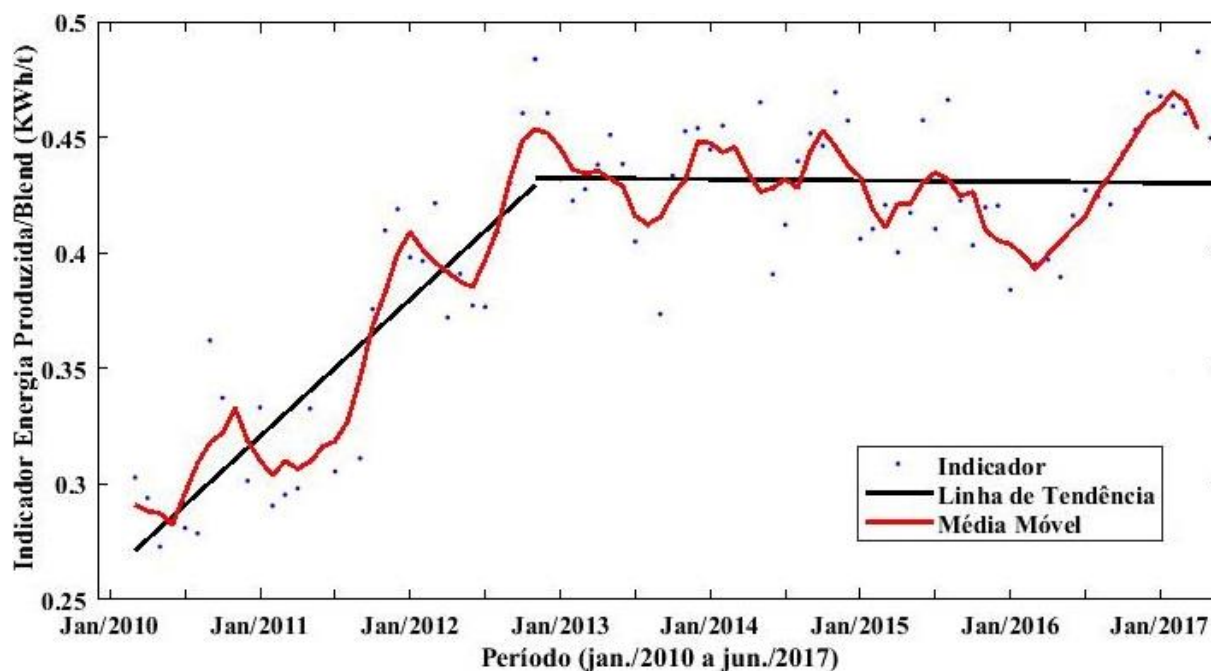
Já as Figuras 19 e 20 representam os indicadores da energia produzida e levando em consideração os principais fatores do pátio de biomassa, que são a quantidade de biomassa que entrou na UCLA e a quantidade de blend utilizado na geração de energia. Os indicadores então formados foram de “energia produzida/entrada de biomassa (kWh/t)” e “energia produzida/blend (kWh/t)”. Para ambos os indicadores percebe-se que houve uma melhoria de seus valores entre os anos de 2010 a final de 2012, já a partir de 2013, houve uma uniformidade nos dados fazendo com que a linha de tendência permaneça constante, com um valor aproximado de 0,4 kWh/t durante todo o período de estudo, para ambos os indicadores de ecoeficiência. Sendo assim, pode-se considerar que a melhora destes dois indicadores se deve, fundamentalmente, pela melhoria da qualidade da matéria-prima adquirida, sobretudo pela queda no teor de umidade e de cinzas, refletindo em aumento do poder calorífico do combustível (Figuras 3, 4, e 5).

Figura 19 - Evolução do indicador de ecoeficiência “energia produzida/entrada de biomassa (kWh/t)” no período 2010-2017.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 20 - Evolução do indicador de ecoeficiência “energia produzida/blend (kWh/t)” no período 2010-2017.

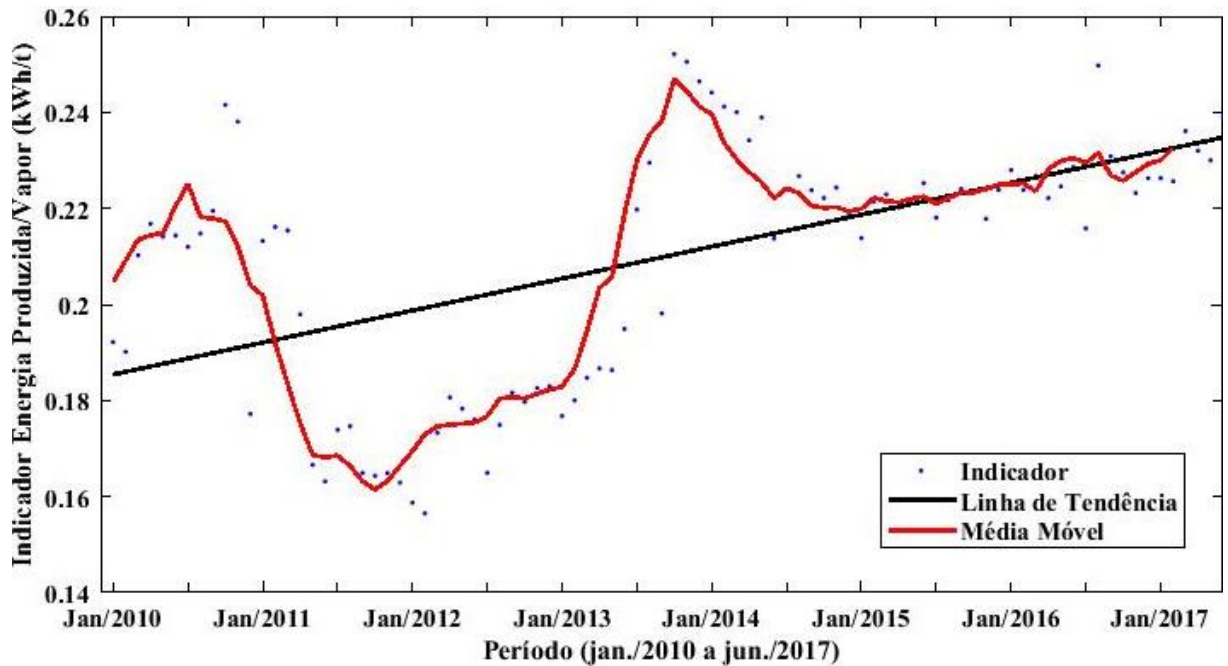


Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

O indicador representado pela Figura 21 remete a etapa de geração de vapor, sendo constituído pela “energia produzida/vapor (kWh/t)”. Percebe-se que houveram grandes oscilações ao longo do tempo, porém, segundo a linha de tendência o indicador sempre se manteve em uma melhoria contínua, com uma eficiência de 21% na qualidade do indicador de ecoeficiência durante o período de estudo. O principal fator que influencia este indicador é a quantidade de vapor gerado, ou seja, quanto maior a quantidade de vapor gerado, maior será a quantidade de energia produzida, gerando assim uma melhoria da ecoeficiência da UCLA.

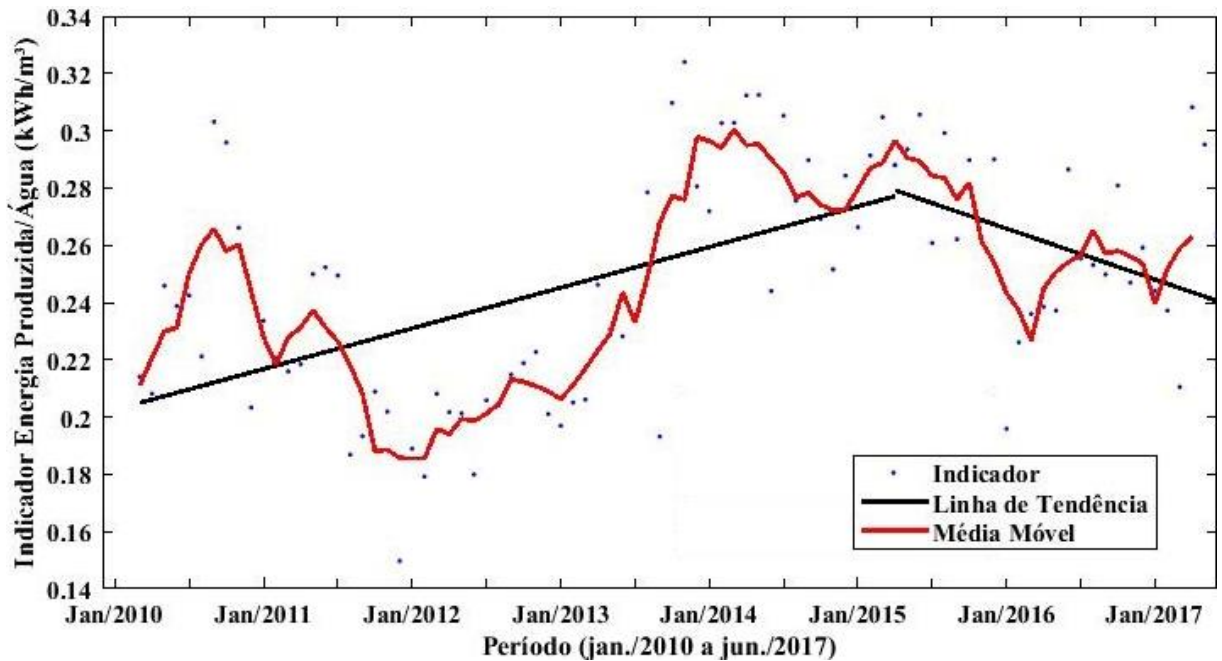
A Figura 22 refere-se ao indicador de “energia produzida/água (kWh/m³)”, a qual até início de 2015 teve uma melhora gradativa de seus valores, já a partir de 2015, houve uma pequena queda nos valores do indicador, porém, durante o estudo houve aumentos de até 36% na qualidade do indicador, e uma diferença de 18% entre o início e fim do estudo. O principal fator influente na melhoria do indicador é a diminuição no consumo de água pela usina, demonstrando assim, que a empresa está se tornando ecoeficiente ao longo do tempo, tendo apresentado melhores valores nos últimos anos quando comparado com os primeiros anos do estudo.

Figura 21 - Evolução do indicador de ecoeficiência “energia produzida/vapor (kWh/t)” no período 2010-2017.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 22 - Evolução do indicador de ecoeficiência “energia produzida/água (kWh/m³)” no período 2010-2017.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

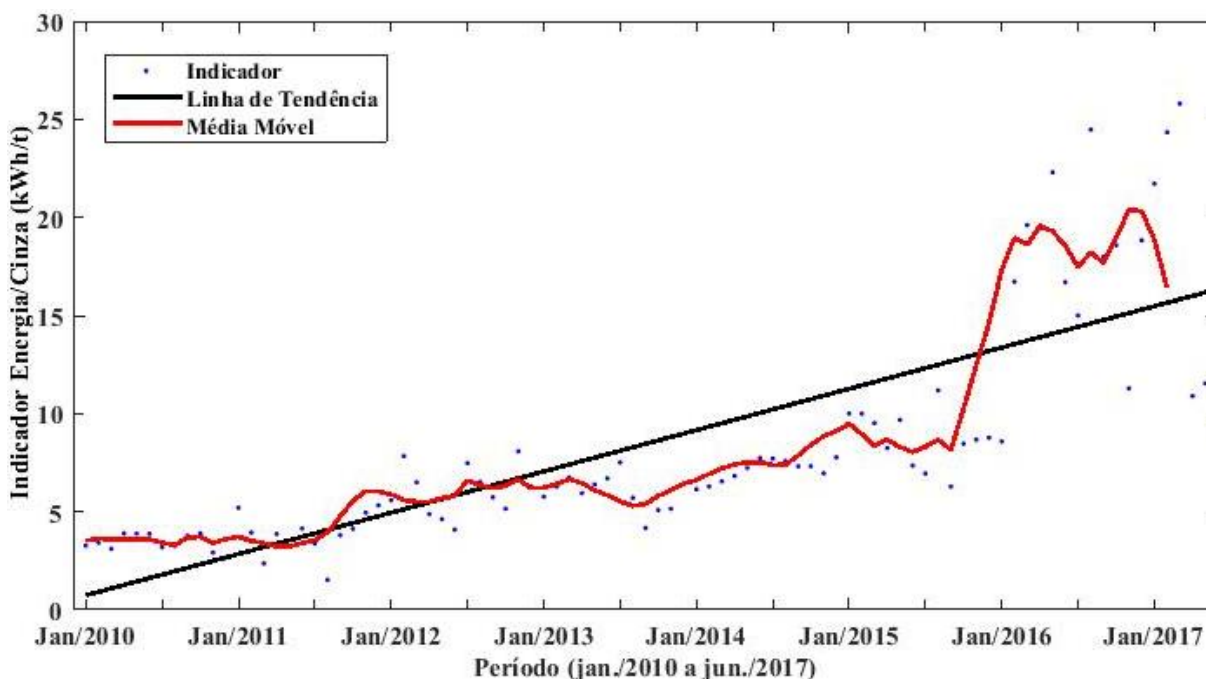
A Figura 23 representa o indicador “energia produzida/cinza (kWh/t)”, que demonstra maior ecoeficiência ao longo do período estudado, demonstrando um aumento de

aproximadamente 300% na ecoeficiência. A melhoria deste indicador deve-se a dois importantes fatores: 1) a redução do teor de cinzas da biomassa utilizada como combustível (Figura 5); e 2) a maior eficiência de combustão pela caldeira, em grande parte devido a melhor qualidade da biomassa.

Brand e Giesel (2017) em um estudo sobre a influência da secagem da biomassa na eficiência de caldeira de cogeração energética, demonstraram que o uso da biomassa com menor teor de umidade não promove variação significativa na produção de vapor, mas contribui para o aumento de sua eficiência energética.

A preocupação das empresas em ter um plano de gerenciamento de resíduos já é um indicativo de que estão convergindo para a ecoeficiência empresarial, já que conseguem acrescentar mais valor consumindo menos recursos ou gerando menos resíduos (COLARES e MATIAS, 2014).

Figura 23 - Evolução do indicador de ecoeficiência “energia produzida/cinza (kWh/t)” no período 2010-2017.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

A Tabela 7 traz as equações referentes a cada um dos indicadores de ecoeficiência desta etapa. Dentre todos os valores apresentados apenas um é considerado não significativo, este, na equação do indicador “energia produzida/cinza”, já os demais ficaram dentro do valor para o nível de significância ($p \leq 0,01$). Dentre os seis indicadores estudados, apenas dois não

tiveram mudança de tendência (“energia produzida/vapor” e “energia produzida/cinza”), sendo que, três tiveram seus valores de R² baixos (“energia produzida/entrada de biomassa”, “energia produzida/vapor” e “energia produzida/água”). Todos os valores de F demonstraram que as equações são significativas, e os valores de quebra de tendência são de 52, 32, 35 e 64.

Tabela 7 - Equações referentes aos indicadores da etapa Geração de energia elétrica da UCLA.

Indicadores (\hat{y}/x)	Equação	R²	F	X'
Energia Produzida/ Energia Consumida	$\hat{y} = 3,0696^* + 0,1140^* x - 0,1712^* (X-X').D$	0,8472	230,03*	52
Energia Produzida/ Entrada de Biomassa	$\hat{y} = 0,3317^* + 0,0033^* x - 0,0037^* (X-X').D$	0,2956	17,42*	32
Energia Produzida/ Blend	$\hat{y} = 0,2691^* + 0,0047^* x - 0,0048^* (X-X').D$	0,8780	298,50*	35
Energia Produzida/ Vapor	$\hat{y} = 0,1849^* + 0,0006^* x$	0,3342	42,16*	--
Energia produzida/ Água	$\hat{y} = 0,2047^* + 0,0011^* x - 0,0027^* (X-X').D$	0,3878	26,29*	64
Energia Produzida/ Cinza	$\hat{y} = 0,5666^{NS} + 0,1754^* x$	0,7433	243,20*	--

Nota: NS = Não significativo; * = Significância $\leq 0,01$; X' = Quebra da linha de tendência.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Geng et al. (2012) reconhecem que os indicadores podem ser usados para melhoria do desempenho ambiental em vários níveis, identificação de áreas problemáticas, análises de custo-benefício entre muitas outras aplicações.

Neste setor, ficou evidente que existem vários fatores que influenciam os indicadores, como a quantidade de energia e água consumidos, a entrada de biomassa, a quantidade de blend utilizado, a quantidade de vapor produzido e a quantidade de cinzas produzida. Estes são os fatores de maior influência durante todo o processo de cogeração de energia, pois todos estão diretamente ligados a produção final de energia elétrica.

Para que uma empresa seja ecoeficiente, ela deve se adequar a diversos parâmetros e adaptar-se a algumas práticas. Sendo assim, percebe-se que houveram diminuição na utilização de água e energia elétrica, diminuição na produção de resíduos (cinzas), bem como qualificação e melhoria no quadro de colaboradores da empresa, fatores esses que auxiliam diretamente as práticas ecoeficientes. Vale ressaltar que a análise da ecoeficiência está diretamente relacionada com a diminuição dos impactos ambientais, comprovando através dos gráficos de cada um dos indicadores que se estes estão melhorando, conseqüentemente há uma diminuição nos impactos ambientais causados pela produção de energia elétrica pela queima de biomassa florestal.

Para Lahouel (2016) a ecoeficiência está intimamente relacionada com a eficiência ambiental e os resultados de sua pesquisa mostram que o tamanho da empresa, expresso em termos de volume de negócios e número de funcionários, está inversamente relacionado aos valores de ecoeficiência, diferente dos resultados deste trabalho, onde percebe-se que, quanto maior a quantidade de energia gerada, mais ecoeficiente é a UCLA.

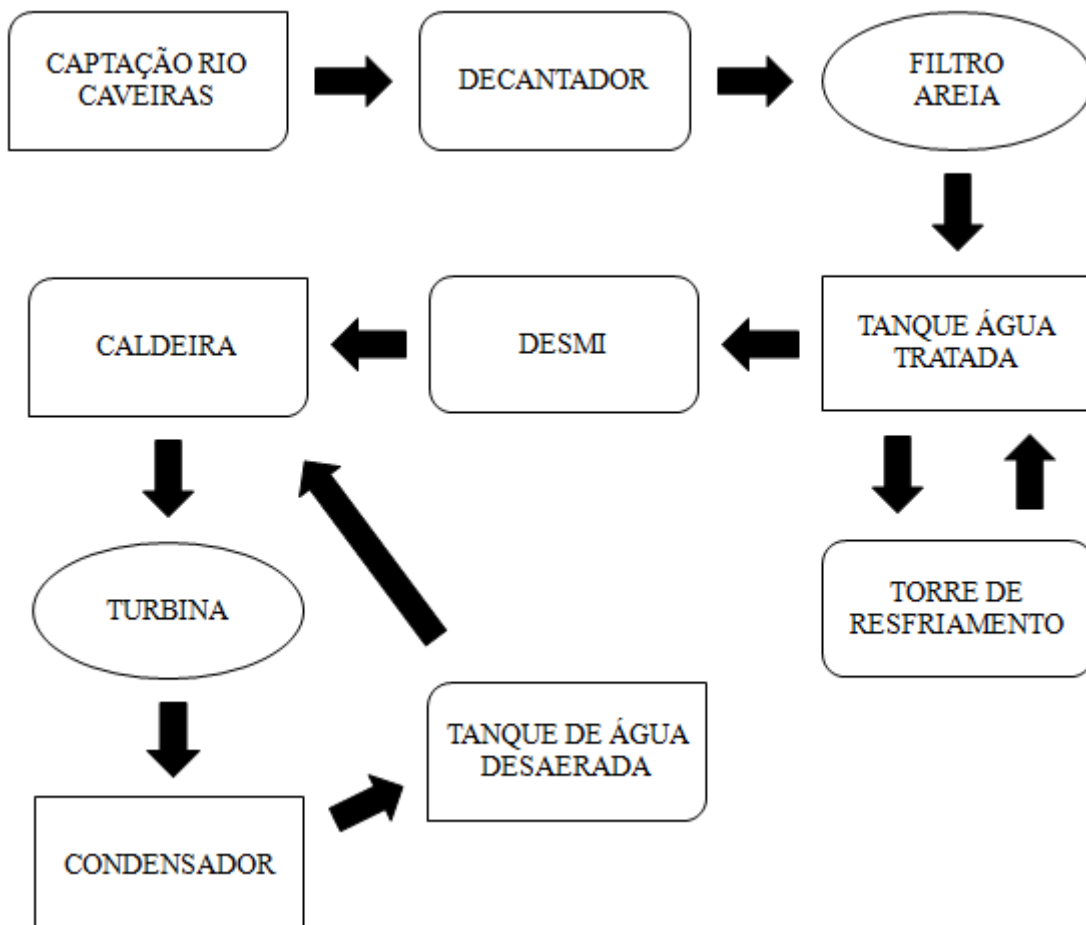
4.5 SISTEMAS AUXILIARES

Para o estudo dos sistemas auxiliares foram utilizados os dados para caracterizar o sistema de água e o sistema de cinzas, porém, pela equação 1 eles não seriam considerados benefícios econômicos, a água seria um insumo e a cinza um rejeito da produção. Entretanto foram considerados nesta dissertação para melhorar o entendimento dos impactos ambientais causados pela produção e pela importância dos dois sistemas para o processo produtivo.

4.5.1 Sistema de água

A água utilizada na UCLA tem parte de sua captação do Rio Caveiras e parte de um poço de captação na indústria. A distância entre a UCLA e a captação do Rio Caveiras é de 08 km. A Figura 24 ilustra o sistema de água no processo de geração de energia pela UCLA.

Figura 24 - Modelo esquemático do Sistema de Água para a produção de Energia Elétrica da UCLA.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Em análise a Figura 24, identifica-se que há saída de água e que os insumos utilizados são energia consumida e mão de obra, os quais formarão os indicadores de ecoeficiência a serem analisados a seguir.

Ao chegar à indústria, a água passa por um decantador e por um filtro de areia, logo após é enviada a um tanque de água tratada. Em seguida, a água tratada pode ter dois destinos diferentes, cerca de 80% é utilizada para fazer o resfriamento do processo, ou seja, é enviada a

torre de resfriamento e cerca de 20% é enviada a um tratamento mais completo para que possa ser utilizada na caldeira.

Este tratamento, antes de ser enviado à caldeira é chamado de desmi (ou seja, desmineralização da água). Este processo consiste em a água passar por três diferentes processos para que ao final possa estar sem minerais. Posteriormente, esta água desmineralizada é enviada para a caldeira, onde entra em ebulição, passando pela turbina, condensador e estocada em um tanque de água desaerada. Toda água utilizada no processo, tanto no resfriamento, quanto na caldeira, retorna ao processo, ou seja, a unidade opera em circuito fechado.

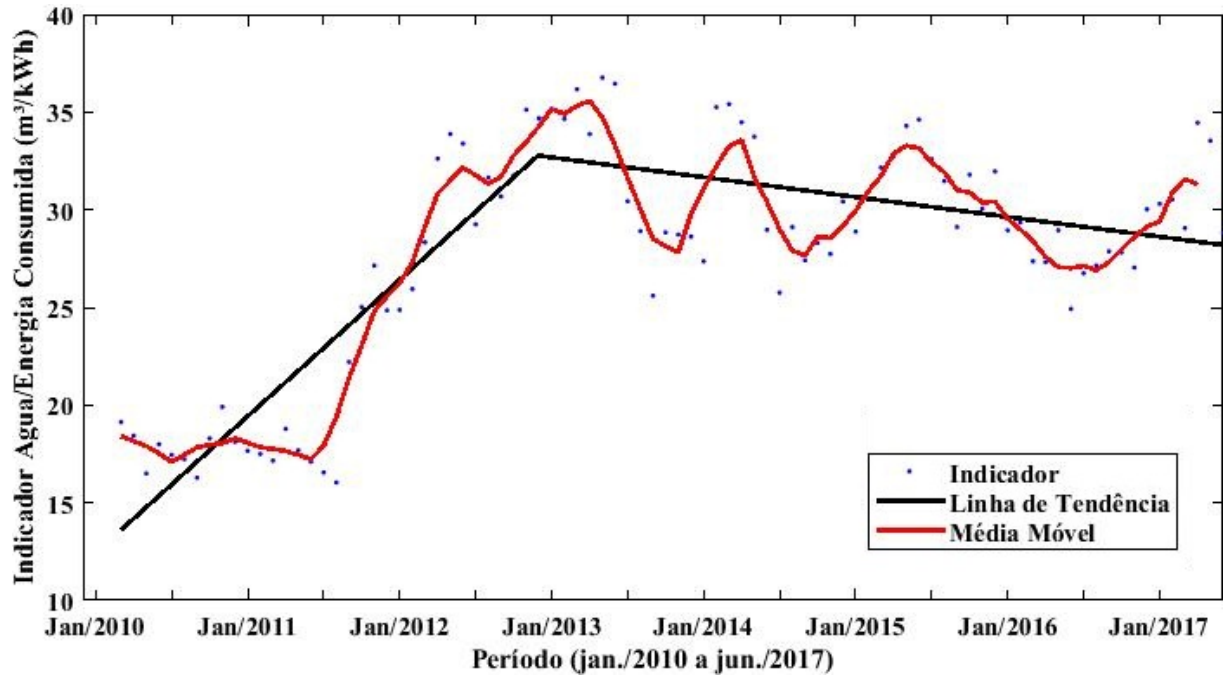
4.5.1.1 Indicadores do Sistema de Água

Para o Sistema de água utilizado pela indústria, foi possível determinar os indicadores de “água/energia consumida (m^3/kWh)” e “água/mdo ($\text{m}^3/\text{hora-homem}$)”, representados respectivamente pelas Figuras 25 e 26, e as equações referentes a cada um dos indicadores estão dispostas na Tabela 8.

O primeiro indicador deste setor é o de “água/energia consumida (m^3/kWh)” o qual está destacado graficamente pela Figura 25, onde pode-se observar que houve uma melhora do indicador entre os anos de 2010 e 2012, porém, a partir de 2013 o comportamento do gráfico começa a mudar e com esta mudança, a qualidade do indicador decresce, porém com grandes oscilações. Entretanto, o indicador finaliza com mais de $30 \text{ m}^3/\text{kWh}$, representando uma ecoeficiência cerca de 78% superior ao início do período analisado, sendo que em 2013 teve um pico máximo de $35 \text{ m}^3/\text{kWh}$, o que representa cerca de 95% a mais comparado ao início.

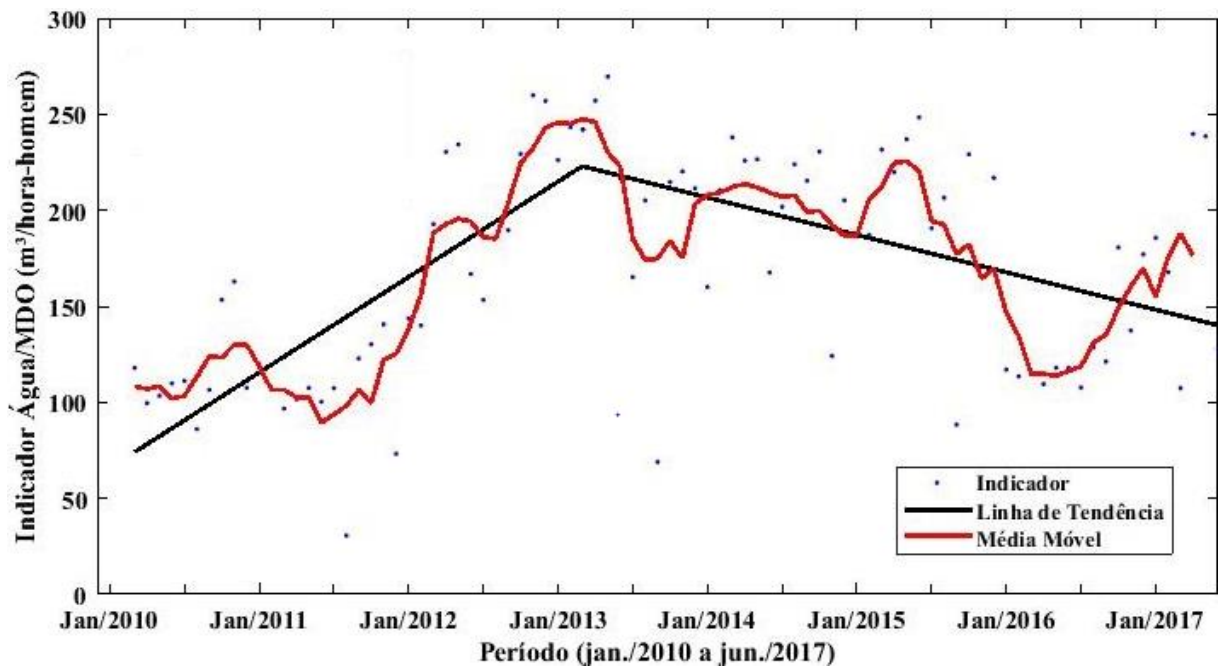
Como segundo indicador, tem-se a “água/mdo ($\text{m}^3/\text{hora-homem}$)”, o qual está expresso graficamente pela Figura 26, onde pode-se observar que entre os anos de 2010 e 2012 os valores aumentam gradativamente, já a partir de 2013, estes valores começam a diminuir, também com grandes oscilações. Os fatores influenciadores na melhoria deste indicador são a qualificação dos colaboradores e o aperfeiçoamento na utilização das máquinas e equipamentos da usina. Porém, em 2017 o indicador apresenta mais de $170 \text{ m}^3/\text{hora-homem}$, representando uma ecoeficiência cerca de 63,7% superior ao início do período analisado, sendo que em 2013 teve um pico máximo de $250 \text{ m}^3/\text{hora-homem}$, o que representa cerca de 127% a mais comparado ao início.

Figura 25 - Evolução do indicador de ecoeficiência “água/energia consumida (m^3/kWh)” no período 2010-2017.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 26 - Evolução do indicador de ecoeficiência “água/mdo ($\text{m}^3/\text{hora-homem}$)” no período 2010-2017.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

A Tabela 8 apresenta as equações referentes a cada um dos indicadores do sistema de água, e pode-se observar que todos os valores ficaram com nível de significância ($p \leq 0,01$). Para ambos indicadores, os valores de R^2 são considerados bons, os valores de F demonstraram que as equações são significativas para cada um dos indicadores e os valores de quebra de tendência são 36 e 39.

Tabela 8 - Equações referentes aos indicadores do sistema de água da UCLA.

Indicadores (\hat{y}/x)	Equação	R²	F	X'
Água/ Energia consumida	$\hat{y} = 13,5324* + 0,5414* x - 0,6385* (X-X').D$	0,8334	207,59*	36
Água/ mdo	$\hat{y} = 74,3772* + 3,8115*x - 5,5385* (X-X').D$	0,6608	80,84*	39

Nota: NS = Não significativo; * = Significância $\leq 0,01$; X' = Quebra da linha de tendência.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

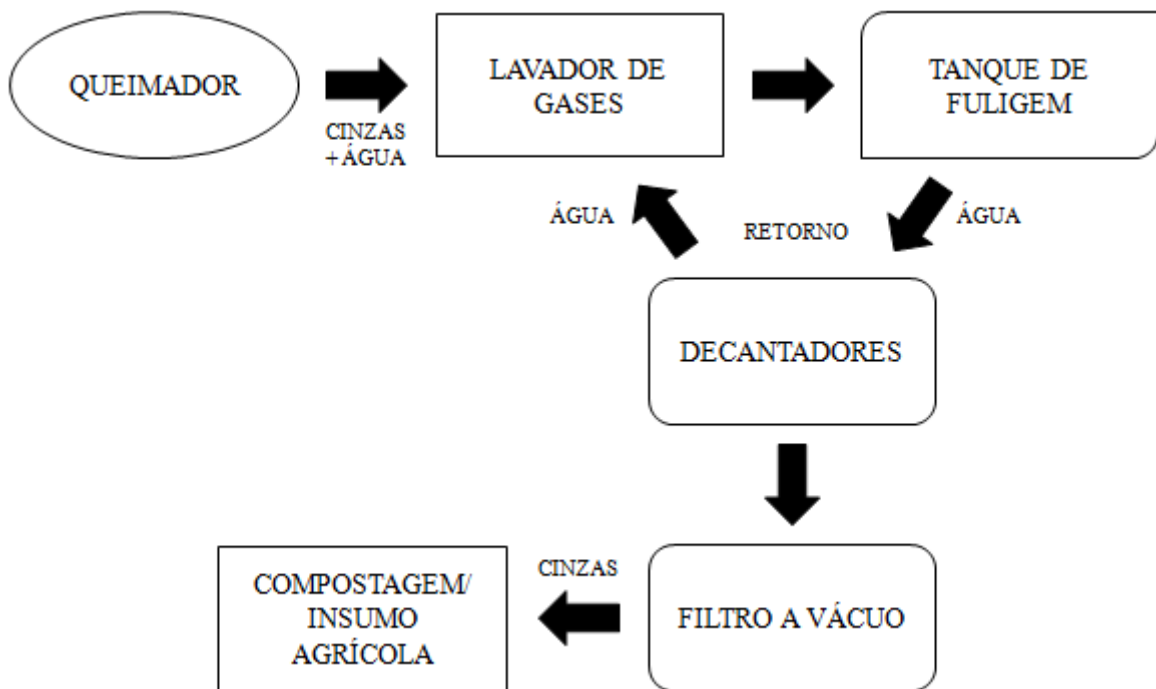
Como pode ser observado, ambos os indicadores avaliados neste setor tiveram melhorias consideráveis até o ano de 2013, tornando-se indicadores positivos no estudo de ecoeficiência da UCLA. Dentre as razões para haver estas tendências no indicador, estão a melhoria na utilização da energia consumida, bem como um aprendizado e melhorias por parte do quadro de colaboradores, estes fatores influenciaram diretamente na redução de consumo desses fatores de produção.

Segundo Rosi e Barata (2009) para que uma empresa que deseja trabalhar dentro de um conceito de ecoeficiência, ou seja, que quer produzir “mais e melhor com menos recursos”, deve considerar a gestão ambiental como um compromisso para conservar o meio ambiente e limitar as descargas de poluentes, além de proporcionar maior segurança no trabalho. Sendo assim, considera-se que a UCLA encaixa-se neste conceito, pois tem sua gestão ambiental, além de ter as certificações de NBR ISO 9001, NBR ISO 14001 e BS OHSAS 18001. E, como demonstrado pelos gráficos, todos os indicadores de ecoeficiência do sistema de água tiveram melhoras significativas ao longo do período de estudo.

4.5.2 Sistema de Cinzas

Após a combustão da biomassa, gases são liberados e cinzas são geradas, estas cinzas passam então por diversos processos para que ao final possam ser descartadas corretamente no ambiente. A Figura 27 abaixo demonstra o sistema de cinzas da UCLA.

Figura 27 - Modelo esquemático do Sistema de Cinzas para a produção de Energia Elétrica da UCLA.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Em suma, a partir da análise da Figura 27, percebe-se que há saída de cinza e que os insumos utilizados são energia consumida, mdo e água, os quais serão utilizados para a geração dos indicadores de ecoeficiência a serem analisados a seguir.

Ao sair do queimador, as cinzas são enviadas a um sistema de lavador de gases, onde entram em contato com a água para que não sejam emitidos pela chaminé. Após passar pelo lavador de gases, a água juntamente com as cinzas é enviada a um tanque de fuligem, onde inicia o processo de tratamento. Este, consiste na passagem por decantadores, os quais fazem a separação de boa parte da água e das cinzas. Parte da água já tratada volta para o lavador de gases e a outra parte juntamente com a cinza é enviada para um filtro a vácuo. Este filtro tem como finalidade a separação do restante de água que ainda está misturada com as cinzas. Ao

final, toda água é reutilizada pela indústria e a cinza é enviada para compostagem e insumo agrícola.

4.5.2.1 Indicadores do Sistema de Cinzas

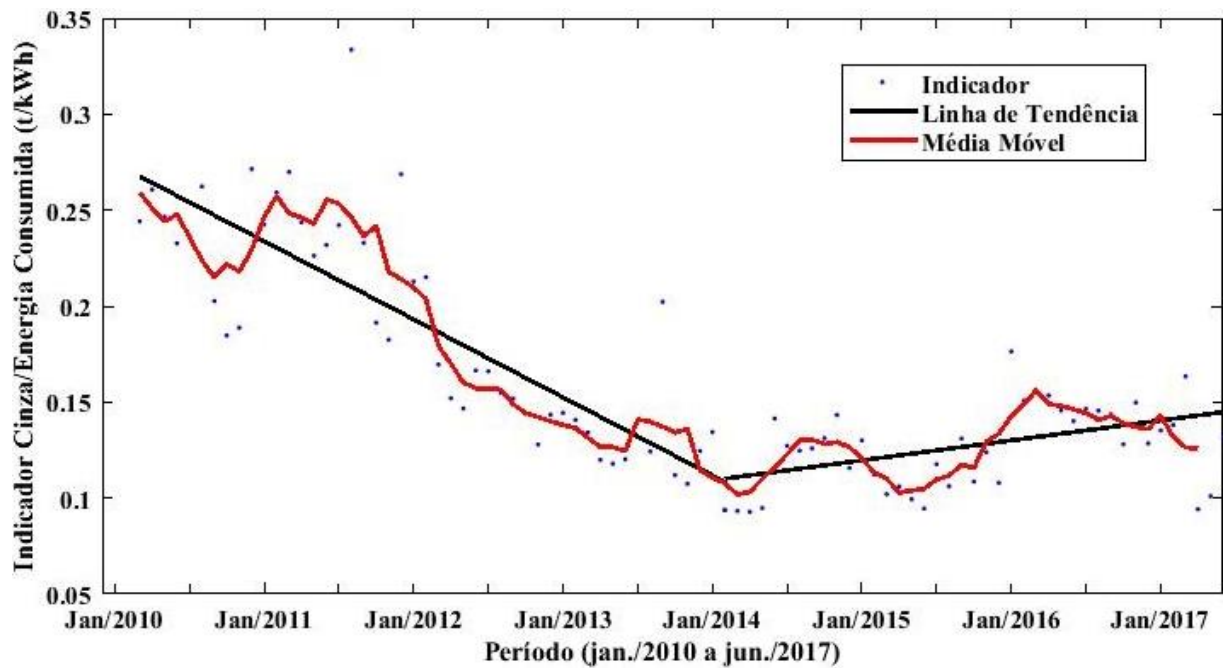
Já para o sistema de cinzas da indústria, foi possível determinar os indicadores de “cinza/energia consumida (t/kWh)”, “cinza/mdo (t/hora-homem)”, “cinza/água (t/m³)”, “cinza/blend (t/t)”, “cinza/vapor (t/t)” e “cinza/energia produzida (t/kWh)” representados respectivamente pelas Figuras 27, 28 e 29, e as equações referentes a cada um dos indicadores estão dispostas na Tabela 9.

Segundo Vassilev et al. (2013) as cinzas de biomassa são resíduo sólido resultante da combustão da biomassa. É uma mistura inorgânica-orgânica complexa com composição polietileno, heterogênea e variável, contendo fases sólidas, líquidas e gasosas intimamente associadas com diferentes origens.

Segundo Nunes et al. (2016) a composição das cinzas da biomassa é dominada por SiO₂ e CaO, e contém menores quantidades de óxidos de Mg, Al, K e P. Existem inúmeras possibilidades de utilização para os diferentes tipos de cinzas de biomassa: principalmente, produção de materiais de construção, modificação subalterna do solo e fertilização, e ocasionalmente, síntese e produção de minerais, cerâmicas e outros materiais valiosos e novos (VASSILEV et al., 2013).

Pelo gráfico apresentado na Figura 28, o qual demonstra a evolução do indicador “cinza/energia consumida (t/kWh)” nota-se que entre os anos de 2010 e 2013 a qualidade do indicador melhora constantemente, porém, este padrão muda a partir de 2014, onde começa a estabilizar e levemente piorar, entretanto, os valores dos últimos anos permanecem melhores do que os valores iniciais. Pode-se ressaltar que iniciou com cerca de 0,26 t/kWh passando para 0,125 t/kWh, ou seja, uma redução de 52% na geração de cinzas por energia consumida. Os comportamentos demonstrados por este indicador podem ter ocorrido devido a uma melhoria na qualidade da matéria-prima utilizada pela usina (Figura 5), isto é, a matéria-prima utilizada tem menor quantidade de material inerte, como terra, cascalhos e areia, os quais não são aproveitados para a geração de energia.

Figura 28 - Evolução do indicador de ecoeficiência “cinza/energia consumida (t/kWh)” no período 2010-2017.

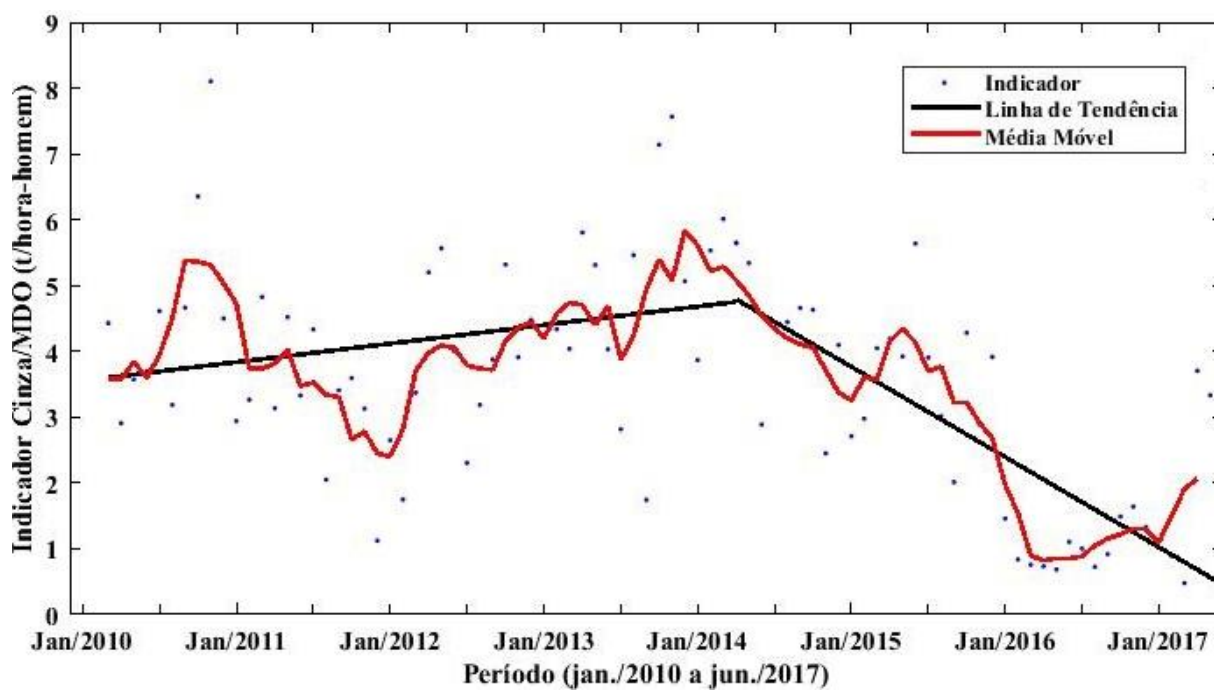


Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

O indicador de “cinza/mdo (t/hora-homem)” está representado pela Figura 29, a qual demonstra que houve uma tendência de aumento no indicador até 2014, porém, a partir da metade de 2014 em diante os valores começam a diminuir, demonstrando uma melhora significativa no indicador. Os valores deste indicador estavam em cerca de 3,6 t/hora-homem em 2010, enquanto em 2017 finalizaram com cerca de 1 t/hora-homem, uma melhora de aproximadamente 72%. Este indicador está diretamente ligado à diminuição na produção de cinzas e a diminuição no quadro de colaboradores da usina ao longo do período de estudo.

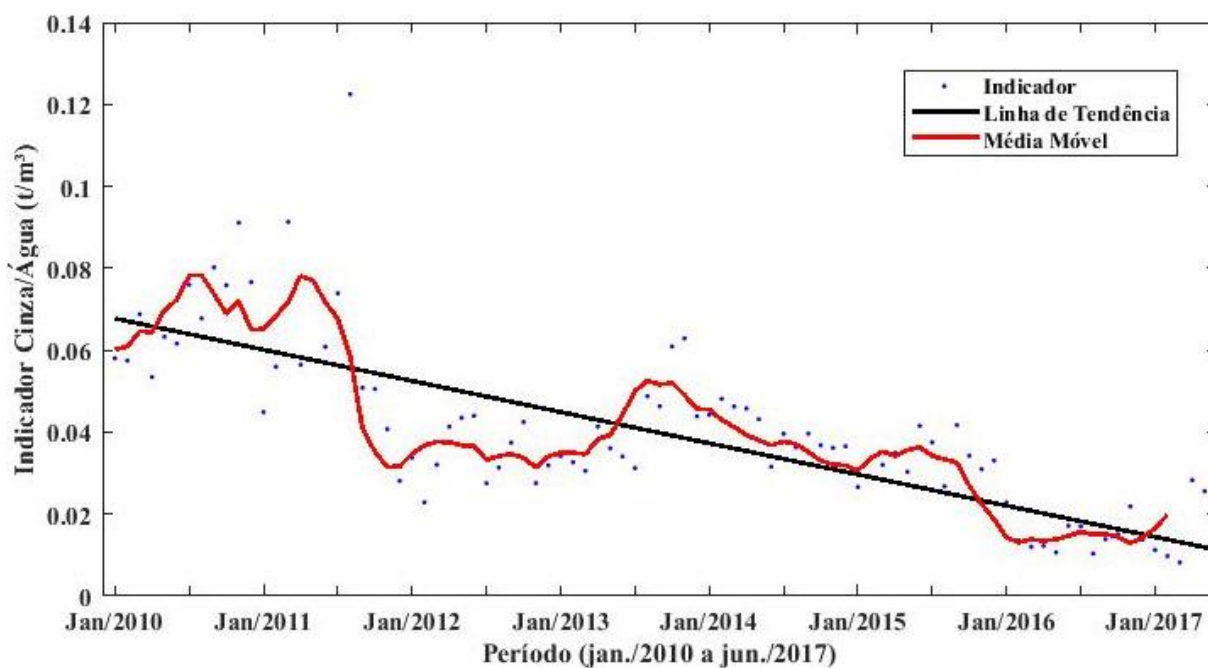
A Figura 30 representa o gráfico do indicador “cinza/água (t/m³)”, o qual demonstra que houve uma melhora contínua do indicador ao longo do tempo, demonstrando que houve redução na produção de cinzas por metro cúbico de água utilizado. Em 2010 o valor do indicador era de 0,06 t/m³ e em 2017 era de 0,02 t/m³, essa redução representa uma melhora na qualidade do indicador em cerca de 67%.

Figura 29 - Evolução do indicador de ecoeficiência “cinza/mdo (t/hora-homem)” no período 2010-2017.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

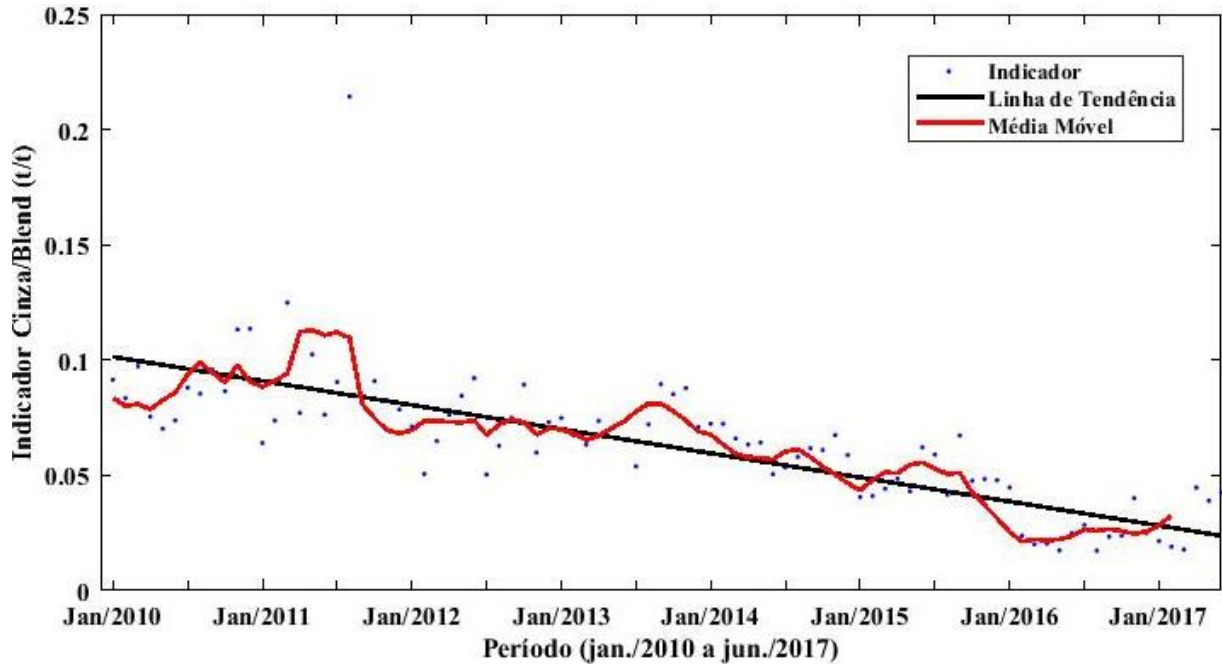
Figura 30 - Evolução do indicador de ecoeficiência “cinza/água (t/m³)” no período 2010-2017.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

O indicador “cinza/blend (t/t)” está representado graficamente pela Figura 31, o qual melhorou significativamente durante o período de estudo, iniciando em 2010 com 0,09 t/t enquanto em 2017 apresentou valores de aproximadamente 0,03 t/t, uma diminuição de 67%.

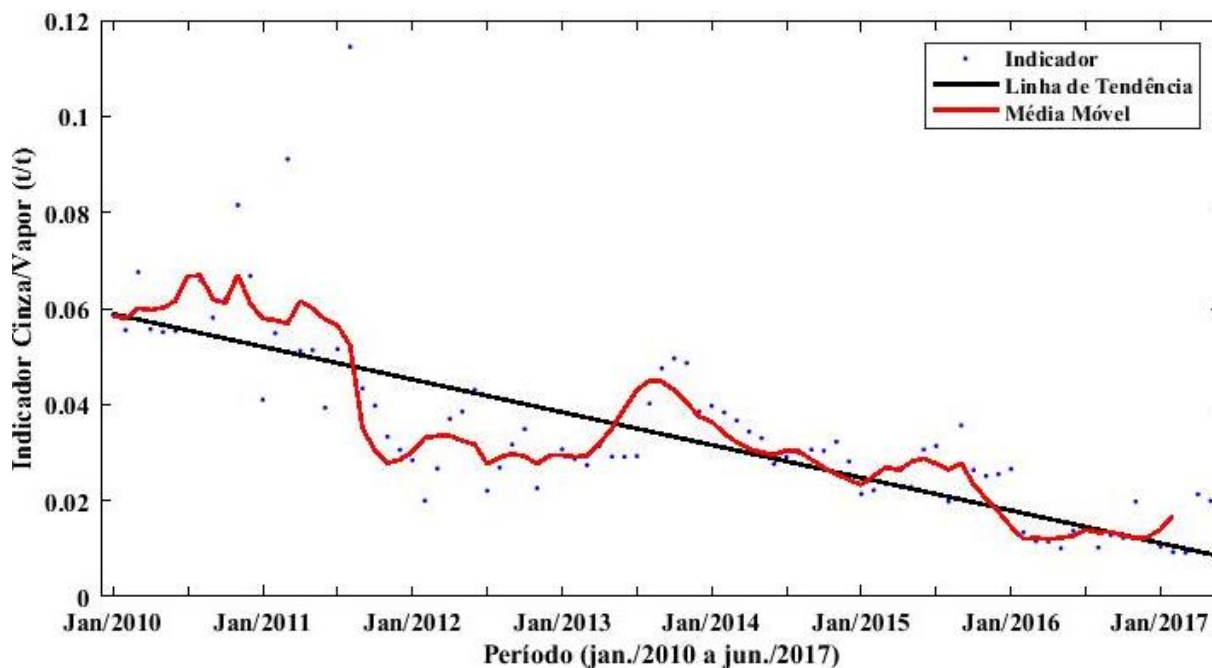
Figura 31 - Evolução do indicador de ecoeficiência “cinza/blend (t/t)” no período 2010-2017.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

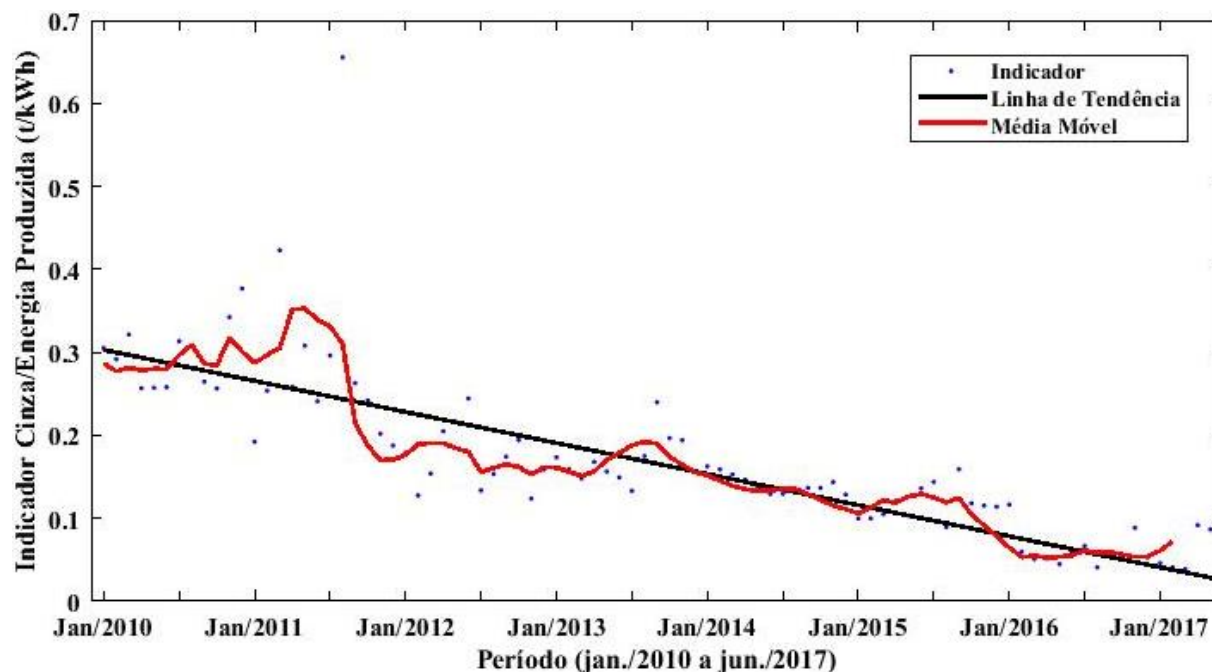
A Figura 32 apresenta a evolução do indicador “cinza/vapor (t/t)” o qual melhorou constantemente de 2010 para 2017, passando de 0,06 t/t para 0,02 t/t, o que representa uma diferença de 67% na qualidade da ecoeficiência deste indicador. Situação semelhante ocorreu com o indicador “cinza/energia produzida (t/kWh)” (Figura 33), que no início de 2010 tinha valores aproximados de 0,3 t/kWh, e em 2017 esses valores passaram para aproximadamente 0,01 t/kWh.

Figura 32 - Evolução do indicador de ecoeficiência “cinza/vapor (t/t)” no período 2010-2017.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 33 - Evolução do indicador de ecoeficiência “cinza/energia produzida (t/kWh)” no período 2010-2017.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Os gráficos relacionados com a produção de cinzas tiveram melhorias significativas nos valores de ecoeficiência ao longo do período estudado, estas mudanças estão diretamente relacionadas à diminuição na produção de cinzas, apresentado pela Figura 4. Houve uma

queda de aproximadamente 83% no teor de cinzas ao longo do período estudado, diferença que influencia os demais indicadores estudados.

A Tabela 9 apresenta as equações referentes a cada um dos indicadores estudados neste sistema, sendo que, todos os valores observados foram estatisticamente significativos ($p \leq 0,01$). Sendo que apenas os indicadores de “cinza/energia consumida” e “cinza/mdo” tiveram mudança de tendência ao longo do tempo ($X' = 50$ e 52), já os demais indicadores não tiveram mudança de tendência. Os valores de R^2 para todas as equações são altos, o que é bom para o estudo e os valores de F são significativos para todas as equações.

Tabela 9 - Equações referentes aos indicadores do sistema de cinza da UCLA.

Indicadores (\hat{y}/x)	Equação	R²	F	X'
Cinza/Energia Consumida	$\hat{y} = 0,2685^* - 0,0032^* x + 0,0043^* (X-X').D$	0,8843	317,33*	50
Cinzas/ mdo	$\hat{y} = 3,6401^* + 0,0200^* x - 0,1391^* (X-X').D$	0,6962	95,12*	52
Cinzas/ Água	$\hat{y} = 0,0684^* - 0,0006^* x$	0,7208	216,82*	--
Cinza/ Blend	$\hat{y} = 0,1023^* - 0,0009^* x$	0,8127	364,54*	--
Cinza/ Vapor	$\hat{y} = 0,0594^* - 0,0006^* x$	0,7715	283,66*	--
Cinza/Energia produzida	$\hat{y} = 0,3061^* - 0,0031^* x$	0,8496	474,41*	--

Nota: NS = Não significativo; * = Significância $\leq 0,01$; X' = Quebra da linha de tendência.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Neste setor, pode-se perceber que as maiores influências estão diretamente ligadas a quantidade de água consumidos pela empresa, a qualidade da biomassa utilizada, a mão de obra utilizada, o consumo de energia pela UCLA, bem como a demanda de energia exigida pelo mercado consumidor.

No sistema de cinzas, houve melhoras significativas em todos os indicadores analisados, essas melhoras estão diretamente ligadas a melhoria na qualidade da biomassa, e consecutivamente a redução do teor de cinzas do material utilizado, o que está demonstrado pela Figura 4, na qual pode-se perceber que houveram melhoras significativas no teor de

cinzas durante os anos de estudo. Outro fator que influencia este setor é a eficiência de queima da caldeira, pois quanto melhor a eficiência da caldeira, menor será a quantidade de cinzas gerada.

No estudo de Colares e Matias (2014) verificou-se que, entre as práticas utilizadas pelas empresas, há um grande foco para ações voltadas para o gerenciamento de resíduos, sendo possível captar indicadores de empresas e demonstrar que estão caminhando para o processo de ecoeficiência empresarial. Confirmando assim, que há uma grande preocupação com a destinação final dos resíduos gerados, o mesmo que ocorre na usina de cogeração, que tenta gerar a menor quantidade possível de resíduo para não haver futuros problemas com descarte.

As cinzas geradas pela unidade são devidamente separadas e encaminhadas a produtores rurais, que à utilizam como fertilizante em plantações. Para Pandey e Singh (2010) um método seria utilizar as cinzas em solos degradados de forma a alcançar uma fertilidade melhorada do solo e minimizar o acúmulo de metais tóxicos em plantas abaixo dos níveis críticos para a saúde humana. Ahmaruzzaman (2010) estudou a aplicação de cinzas voláteis na fabricação de cimento, e concluiu que ajuda na remoção de compostos orgânicos, metais pesados, corantes e síntese de zeólitos, ajudando muito na redução da poluição ambiental.

Alves et al. (2017) afirma que quando aplicado cinzas no solo, o pH, índice SMP, fósforo (P), potássio(K) e cálcio (Ca) apresentaram aumentos, os elementos Mn e Al diminuíram e os metais pesados não diferiram significativamente entre as áreas onde foi aplicado e a que não foi aplicado a cinza. As cinzas nestas condições favoreceram a qualidade do solo e a grande maioria dos produtores ficaram satisfeitos com sua utilização e voltariam a usar em outras ocasiões.

Na maioria das figuras apresentadas para cada indicador, percebe-se que há uma melhoria contínua em sua ecoeficiência, com mudanças em seu comportamento geralmente entre os anos de 2015 e 2016. Estas mudanças de comportamento estão diretamente relacionadas à queda na produção de energia no ano de 2016, conforme Figura 6. De maneira geral, a maior produção de energia propicia melhoria nos indicadores de ecoeficiência.

5 CONCLUSÃO

O estudo da ecoeficiência mostrou-se um método bastante importante na busca pelo desenvolvimento sustentável, levando em consideração que é um estudo que demonstra o comportamento de diversos indicadores ambientais ao longo de um determinado período de tempo. Para este estudo, optou-se por realizar a análise dos indicadores considerando as principais etapas do processo de cogeração de energia a partir de biomassa florestal, levantando em consideração as entradas e saídas de cada uma destas etapas.

Como resposta para as questões norteadoras formuladas para este trabalho, pode-se citar que:

- a) Foram criados indicadores de blend, vapor e energia pelos insumos de cada processo. De modo complementar pode ser utilizado outros indicadores relacionados à água e cinzas.
- b) A evolução dos indicadores em todos os casos foi positiva, ou seja, todos os indicadores melhoraram ao longo do período estudado (2010 – 2017).

E com relação às duas hipóteses formuladas para este estudo, considera-se que pode ser construído um modelo analítico para análise de ecoeficiência para usinas de cogeração de energia, considerando as principais entradas de matéria-prima em cada uma das etapas, bem como as principais saídas. Já com relação aos indicadores de ecoeficiência pode-se citar que houveram melhorias com o passar dos anos, o que reduz os impactos ambientais na produção de energia elétrica. Sendo assim, o estudo atendeu positivamente os objetivos propostos, caracterizando o sistema de produção de energia elétrica de uma unidade de cogeração de energia em Lages/SC; propondo um modelo de indicadores de ecoeficiência; e analisando a evolução dos indicadores ao longo do tempo de estudo (2010 – 2017).

Com relação à etapa do Pátio de Biomassa, percebe-se que todos os indicadores avaliados passaram a melhorar ao longo do período de estudo, ou mantiveram-se estáveis, sem nenhuma piora. O que pode ter ocasionado isto, é a melhora na estocagem da biomassa, formação do blend e transporte da matéria-prima para a caldeira de forma mais eficiente.

Na etapa de geração de vapor, todos os indicadores apresentaram melhoras consideráveis ao longo do tempo. A mudança na qualidade destes indicadores pode ter ocorrido devido a melhora na qualidade da biomassa, com menor teor de umidade e maior poder calorífico, demonstrado graficamente pelas Figuras 3 e 5.

Para a etapa de geração de energia, os indicadores melhoraram ao longo do tempo, sendo que, um dos indicadores mais relevantes desta etapa é “energia produzida/energia consumida”, o qual apresentou um aumento de 100% na ecoeficiência. Esta melhora pode ser considerada devido ao aprendizado dos colaboradores da usina ao longo do tempo.

No sistema de água, todos os indicadores melhoraram ao longo do tempo, o que este diretamente ligado a uma menor quantidade de água consumida para uma maior produção de energia elétrica. O teor de cinzas teve ótimos resultados ao longo do tempo, conforme demonstrado pela Figura 4, o que, conseqüentemente, colaborou para a melhoria na qualidade dos indicadores de ecoeficiência do sistema de cinzas.

Sendo assim, pode-se observar que o estudo tem grande relevância, evidenciando que a UCLA produz uma energia limpa e sustentável, com baixa agressão ao meio ambiente, e com o passar dos anos tem reduzido os impactos ambientais, tornando-se mais ecoeficiente.

Como sugestão para estudos futuros:

- Testar a aplicação de melhorias na gestão ambiental da empresa, focando nos indicadores de ecoeficiência deste estudo.
- Fazer um estudo de ecoeficiência nos fornecedores de matéria-prima da UCLA.

REFERÊNCIAS

- ACR. **Anuário estatístico de base florestal para os estado de Santa Catarina 2016 (ano base 2015)**. Lages/SC, 2016.
- AHMARUZZAMAN, M. A review on the utilization of fly ash. **Progress in Energy and Combustion Science**. v. 36, p. 327-363, 2010.
- ALVES, J. L. S.; MEDEIROS, D. D. de. Eco-efficiency in micro-enterprises and small firms: a case study in the automotive services sector. **Journal of Cleaner Production**, v. 108, p. 595-602, 2015.
- ALVES, M. V. et al. Comportamento químico do solo e satisfação dos produtores rurais após o uso de cinza. **Revista Scientia Agraria**. Curitiba, PR. v. 18, n. 1, p. 76-82, 2017.
- BRAND, M. A. et al. Influence os storage time on the quality of biomass for energy production in humid subtropical regions. **Revista Cerne**, Lavras. v. 16, n. 4, p. 531-537, 2010.
- BRAND, M. A. et al. Influência da época de estocagem na qualidade da biomassa florestal para a geração de energia. **Revista Floresta**, Curitiba, PR. v. 42, n. 2, p. 369-380, 2012.
- BRAND, M. A. et al. Influência das dimensões da biomassa estocada de pinus taeda l. E eucalyptus dunnii maiden na qualidade do combustível para geração de energia. **Revista Árvore**. Viçosa, MG, v.38, n.1, p.175-183, 2014.
- BRAND, M. A. Potencial de uso da biomassa florestal da caatinga, sob manejo sustentável, para geração de energia. **Ciência Florestal**. Santa Maria, RS. v. 27, n. 1, p. 117-127, 2017.
- BRAND, M. A.; COSTA, V. J. Geração de energia: o futuro da biomassa florestal. In: BRAND, M. A. et al. Caracterização da produção e uso dos resíduos madeiráveis gerados na industria de base florestal da região serrana catarinense. Relatório de Pesquisa, Lages: UNIPLAC, dez. 2001.
- BRAND, M. A.; Giesel, G. Influência da secagem da biomassa na eficiência de caldeira de cogeração energética. **Revista Energia na Agricultura**. v. 32, n. 17, p. 132 - 140, 2017.
- BRASIL. **Resolução CONAMA n°001**, de 23 de janeiro de 1986. Estabelece as definições, as responsabilidades, os critérios básicos e as diretrizes gerais para uso e implementação da Avaliação de Impacto Ambiental como um dos instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente Publicado no D. O . U de 17 de fevereiro de 1986.
- BRITO, J. O. et al. Agroenergia: Florestas Energéticas. In: ALBUQUERQUE, A. C. S.; SILVA, A. G. (Ed.) **Agricultura tropical: quatro décadas de inovação tecnológicas, institucionais e políticas**. Brasília: Embrapa Informações Tecnológicas, 2008, v. 1, 1340p.
- BRIDGEWATER, T. Biomass for energy. **Journal of the science of food and agriculture**, v. 86, p. 1755-1768, 2006.

BROWER, R.; FALCÃO, M. P. Wood fuel consumption in Maputo, Mozambique. **Biomass and Bioenergy**. v. 27, n. 3, p. 233-245, 2004.

BRUTTI, R. C.; SIMIONI, F. J. Caracterização e controle do abastecimento de biomassa em uma usina de cogeração de energia. Relatório de pesquisa, Lages: Uniplac, 2006.

CAMIOTO, F. de C.; MARIANO, E. B.; REBELATTO, D. A. do N. Efficiency in Brazil's industrial sectors in terms of energy and sustainable development. **Environmental Science & Policy**. v. 37, p.50-60. 2014.

CARVALHO, F. P. A. de; GOMES, J. M. A. Eco-eficiência na Produção de Cera de Carnaúba no Município de Campo Maior, Piauí, 2004. **RER**, Piracicaba, SP. v. 46, n. 02, p. 421-453, 2008.

CELPE. **O que é eficiência energética?** Recife, 2013. Disponível em: <<http://www.celpe.com.br/Pages/Efici%C3%Aancia%20Energ%C3%A9tica/o-que-e-ef-energetica.aspx>>. Acesso em: 22 maio 2016.

CHRISTOFOROU, E. A.; FOKAIDES, P. A.; KYRIAKIDES, I. Monte Carlo parametric modeling for predicting biomass calorific value. **J Therm Anal Calorim**, Budapest, Hungary. v. 118, p. 1789-1796, 2014.

COLARES, A. C. V.; MATIAS, M. A. Análise das práticas de gestão ambiental de empresas sediadas no estado de minas gerais - Brasil na ótica da ecoeficiência. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade – GeAS**. v. 3, n. 3, p. 48-64, 2014.

COSTA, T. P. da. et al. Environmental impacts of forest biomass-to-energy conversion technologies: Grate furnace vs. fluidised bed furnace. **Journal of Cleaner Production**. v. 171. p. 153-162, 2018.

CONSELHO EMPRESARIAL PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **Manual do Formando: A ecoeficiência na vida das empresas**. Portugal, 2013.

CONSELHO EMPRESARIAL BRASILEIRO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **CEBDS 10 anos**. Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://cebds.org/publicacoes/cebds-10-anos/#.WNphrjsrKUK>> Acesso em: 11 nov. 2016.

CONSELHO EMPRESARIAL BRASILEIRO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **Guia da Produção Mais Limpa: Faça você mesmo**. Rede de Produção mais limpa. Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://cebds.org/wp-content/uploads/2016/09/Guia-Pra%CC%81tico-de-PmaisL.pdf>> Acesso em: 23 nov. 2016.

COLARES, A. C. V.; MATIAS, M. A. Análise das práticas de gestão ambiental de empresas sediadas no estado de Minas Gerais – Brasil na ótica da ecoeficiência. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**. v. 3, n. 3, p. 48-64, 2014.

CÔTÉ, R.; BOOTH, A.; LOUIS, B. Eco-efficiency and SMEs in Nova Scotia, Canada. **Journal of Cleaner Production**. v. 14, n. 6, p. 542-550, 2006.

DEBONI, Tamires. L. **Qualidade da biomassa florestal utilizada para geração de energia por uma unidade cogeneradora em Lages-SC**. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2017.

DIAZ-VILLAVICENCIO, G. J.; DIDONET, S.; DODD, A. Perspectives on innovation management of ecuadorian companies - empirical evidence. **International Journal of Innovation Management**. v. 20, n. 6, 2016.

ENGIE. **A Companhia**. Disponível em:

<<http://www.engieenergia.com.br/wps/portal/internet/a-companhia>> Acesso em: 21 de janeiro de 2018.

ESGOLMIM, L. M.; SOUZA, M. T. S. Análise da implementação e resultados de um programa de ecoeficiência numa empresa do setor bancário. **Revista de Administração, Contabilidade e Economia da FUNDACE**. Ribeirão Preto, SP. v. 1, n. 1, 2010.

EVERARD, C. D.; McDONNELL, K. P.; FAGAN, C. C. Prediction of biomass gross calorific values using visible and near infrared spectroscopy. **Biomass and Bioenergy**. v. 45, p. 203-211, 2012.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Forest and Energy**, Roma, 2008.

FARRELL, M. J. The measurement of productive efficiency. **Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)**. v. 120, n. 3, p. 253-290, 1957.

FURTADO, T. S. et al. Variáveis do processo de briquetagem e qualidade de briquetes de biomassa florestal. **Pesquisa Florestal Brasileira**. Colombo. v. 30, n. 62, p. 101-106, 2010.

FURTADO, T. S. et al. Mapeamento da frequência de uso e características da biomassa florestal utilizada para geração de energia em Lages, SC. **Ciência Florestal**. v. 22, n. 4, p. 795-802, 2012.

GARCÍA-MARAVÉ, A. et al. Effects of mineral contamination on the ash content of olive tree residual biomass. **Biosystems Engineering**. v. 118, p. 167-173, 2014.

GENG, Y. et al. Towards a national circular economy indicator system in China: an evaluation and critical analysis. **Journal of Cleaner Production**. v. 23, n. 1, p. 216-224, 2012.

GONÇALVES, J. E.; SARTORI, M. M. P. e LEÃO, A. L. Energia de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, PB. v.13, n.5, p.657-661, 2009.

GUABIROBA, R. C. da S. et al. Eco-efficiency as an auxiliary measure for the definition of interregional public consortia responsible for the collection of recyclable domestic waste. **Journal of Cleaner Production**. v. 68, p. 36-45, 2014.

GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C. **Econometria Básica**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011. 924 p.

HERDER, M. den. et al. Sustainability Impact Assessment on the Production and Use of Different Wood and Fossil Fuels Employed for Energy Production in North Karelia, Finland. **Energies**. v. 5, p. 4870-4891, 2012.

HOFF, D. N.; SIMIONI, F. J. **O setor de base florestal na Serra Catarinense**. Lages: Editora Uniplac, 2004. 254p.

HUYSMAN, S. et al. Toward a systematized framework for resource efficiency indicators. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 95, p. 68-76, 2015.

IBGE. **Lages**. Brasília, 2016. Disponível em <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/lages/panorama>>. Acesso em: 25 de janeiro de 2017.

LAHOUEL, B. B. Eco-efficiency analysis of French firms: a data envelopment analysis approach. **Environmental Economics and Policy Studies**. v. 18, p. 1-22, 2015.

LEAL Jr., I. C.; GARCIA, P. A. de A.; D'AGOSTO, M. de A. A data envelopment analysis approach to choose transport modes based on eco-efficiency. **Journal Environmental Development Sustainable**. v. 14, p. 767-781, 2012.

LEVIDOW, L. et al.. Process eco-innovation: assessing meso-level eco-efficiency in industrial water-service systems. **Journal of Cleaner Production**. v. 110, p. 54-65, 2016.

LEWANDOWSKI, I.; HEINZ, A. Delayed harvest of miscanthus - influences on biomass quantity and quality and environmental impacts of energy production. **European Journal of Agronomy**. v. 19, p. 45-63, 2003.

MARAVER, D. et al. Assessment of CCHP systems based on biomass combustion for small-scale applications through a review of the technology and analysis of energy efficiency parameters. **Applied Energy**. v. 102, p. 1303-1313, 2013.

MASIÁ, A. A. T. et al. Characterising ash of biomass and waste. **Fuel Processing Technology**. v. 88, p. 1071-1081, 2007.

MATSIKA, R. et al. Double jeopardy: the dichotomy of fuel wood use in rural South Africa. **Energy Policy**. v. 52, p. 716-725, 2013.

MICKWITZ, P. et al.. Regional eco-efficiency indicators—a participatory approach. **Journal of Cleaner Production**. v. 14, n. 18, p. 1603-1611, 2006.

NUNES, L. J. R.; MATIAS, J. C. O.; CATALÃO, J. P. S. Biomass combustionsystems:Areviewonthephysicalandchemicalpropertiesoftheashes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 53, p. 235-242, 2016.

OGGIONI, G.; RICCARDI, R.; TONINELLI, R. Eco-efficiency of the world cement industry: a data envelopment analysis. **Energy Policy**. v. 39, p. 2842-2854, 2011.

ONOCHIE, U. P. et al. Proximate and ultimate analysis of fuel pellets from oil palm residues. **Nigerian Journal of Technology**. v. 36, n. 3, p. 987-990, 2017.

ÖZYUGURAN, A. YAMAN, S. Prediction of Calorific Value of Biomass from Proximate Analysis. **Energy Procedia**. v. 107, p. 130-136, 2017.

PACHECO, A. R.; CHAVES, R. de Q.; NICOLI, C. M. L. **Integration of Crops, Livestock, and Forestry: A System of Production for the Brazilian Cerrados**. 2013.

PANDEY, V. C.; SINGH, N. Impact of fly ash incorporation in soil systems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. v. 136, p. 16-27, 2010.

PARO, A. da C. **Uma metodologia para gestão da eficiência energética de centrais de cogeração de biomassa: aplicação ao bagaço de cana**. 2011. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, SP, 2011.

PING, T. J. et al. Enhanced Biomass Characteristics Index in palm biomass calorific value estimation. **Applied Thermal Engineering**. v. 105, p. 941 – 949, 2016.

PUGLIESE, L.; LOURENCETTI, C.; RIBEIRO, M. L. Impactos ambientais na produção do etanol brasileiro: do campo à indústria. **Revista Brasileira Multidisciplinar**. v. 20, n. 1, p. 143-165, 2017.

ROSSI, M. T. B.; BARATA, M. M. L. Barreiras à Implementação de Produção Mais Limpa Como Prática de Ecoeficiência em Pequenas e Médias Empresas no Estado do Rio de Janeiro. 2º International Workshop Advances in Cleaner Production. São Paulo, Brasil. 20-22 de maio de 2009.

SAIDUR, R. Et al. A review on biomass as a fuel for boilers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 2262-2289, 2011.

SCHALTEGGER, S.; STURM, A. Ökologische Rationalität: Ansatzpunkte zur Ausgestaltung von ökologieorientierten Managementinstrumenten. **Die Unternehmung**. v. 44, n. 4, p. 273-290, 1990.

SICSÚ, A. L.; DANA, S. **Estatística aplicada: Análise exploratória de dados**. São Paulo: Saraiva, 2012. 160 p.

SIMIONI, F. J. et al. Fatores indutores à inovação tecnológica da indústria madeireira da região de Lages/SC. **RAI: Revista de Administração e Inovação**. v. 12, p. 248-270, 2015.

SIMIONI, F. J.; BINOTTO, E.; HOFF, D. N. A inovação tecnológica na perspectiva dos gestores da indústria madeireira da região de Lages, SC. **Revista Árvore**. v. 36, p. 981-987, 2012.

SIMIONI, F. J.; HOEFLICH, V. A. **Análise diagnóstica e prospectiva da cadeia produtiva de energia de biomassa de origem florestal**. Documentos. Embrapa Florestas. v. CD, p. 1-102, 2007.

SOARES, S. R. et al. Applications of life cycle assessment and cost analysis in health care waste management. **Waste Management**, v. 33, p. 175-183. 2013.

TEIXEIRA, A. A.; JABBOUR, C. J. C.; JABBOUR, A. B. L. de S. Relationship between green management and environmental training in companies located in Brazil: A theoretical framework and case studies. **International Journal Production Economics**. v. 140, p. 318-329. 2012.

TOKLU, E. Biomass energy potential and utilization in Turkey. **Renewable Energy**. v. 107, p. 235-244, 2017.

TUPY, O.; YAMAGUCHI, L. C. T. Eficiência e produtividade: conceitos e medição. **Agricultura em São Paulo**. v. 45, p. 39-51, 1998.

UNITED NATIONS ESCAP - UNESCAP. **Eco-efficiency Indicators: Measuring resource-use Efficiency and the impact of economic activities on the environment**. United Nations ESCAP/Greening of Economic Growth Series, 2009.

VASSILEV, S. V., et al. An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase–mineral and chemical composition and classification. **Fuel**. v. 105, p. 40-73, 2013.

VASSILEV, S. V., et al. An overview of the composition and application of biomass ash. Part 2. Potential utilisation, technological and ecological advantages and challenges. **Fuel**. v. 105, p. 19-39, 2013.

VELLANI, C. L. Passivo ambiental e a ecoeficiência. **FACEF Pesquisa**. v.11. n.3. p.381-392, 2008.

VELLANI, C. L.; RIBEIRO, M. de S. Sistema contábil para gestão da ecoeficiência empresarial. **Revista Contabilidade e Finanças**. v. 20, n. 49, p. 25 – 43, 2009.

VIEIRA, E. A.; BARBOSA, A. de S. Práticas tradicionais e de ecoeficiência na indústria de calçados do Brasil. **Revista Eletrônica: Tempo – Técnica – Território**. v. 2, n.1, p. 31-50, 2011.

WELLS, P.; FARO, T. Eco-efficiency, self-sufficiency and sustainability in transport: The limits for Brazilian sugar cane ethanol policy. **Natural Resources Forum**. v. 35, p.21-31. 2011.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT – WBCSD (2000) *Ecoefficiency: Creating More Value With Less impact*. Geneva, Switzerland: WBCSD.

WOCH, F. et al. Residual Woody Waste Biomass as an Energy Source – Case Study. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 24, n. 1, p. 355-358, 2015.

ZHANG, Y. et al. Assessing the potential environmental impact of woody biomass using quantitative universal exergy. **Journal of Cleaner Production**. v. 176, p. 693-703, 2018.