

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ANDRÉ VINICIUS DE CASTILHO
LUCAS DE SOUZA NOGUEIRA**

**ESTUDO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DA
BIOMASSA PROVENIENTE DA INDÚSTRIA AGROPECUÁRIA NAS
MESORREGIÕES PARANAENSES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2018

ANDRÉ VINICIUS DE CASTILHO

LUCAS DE SOUZA NOGUEIRA

**ESTUDO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DA
BIOMASSA PROVENIENTE DA INDÚSTRIA AGROPECUÁRIA NAS
MESORREGIÕES PARANAENSES**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Luiz Amilton Peplow, M. Eng.

CURITIBA

2018

André Vinicius de Castilho
Lucas de Souza Nogueira

**Estudo do potencial de geração de energia elétrica a partir da biomassa
proveniente da indústria agropecuária nas mesorregiões paranaenses**

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 14 de junho de 2018.

Prof. Antonio Carlos Pinho, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemarlen Gehrke Castagna, Mestre
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

BANCA EXAMINADORA

Luiz Amilton Peplow, Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

Álvaro Augusto Waldrigues de Almeida, Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Roberto Cesar Betini, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Walter Dênis Cruz Sanchez, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

Às pessoas que amamos, pelo apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que nos deu sabedoria e força para alcançarmos nossos objetivos.

Aos nossos familiares e às pessoas que amamos, que estiveram presentes nos momentos difíceis durante o desenvolvimento desse trabalho.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, que nos proporcionou inúmeros momentos memoráveis, construção de amizades e formação ética, pessoal e profissional.

Ao Departamento Acadêmico de Eletrotécnica pela colaboração e disposição.

Ao curso de Engenharia Elétrica, na pessoa do coordenador Antônio Carlos Pinho, pelo apoio recebido.

Pessoalmente para mim, Lucas, agradeço aos meus pais Mirian e Horácio pelo infinito apoio para concluir a graduação, à minha noiva Izabela, pelo amor e compreensão, aos meus irmãos Juliano e André pelo apoio, às minhas tias Odete e Débora, pelas orações e ao meu amigo André Castilho, pela conclusão desse trabalho.

Eu, André, sou eternamente grato pelo apoio e incentivo de minha mãe Vilma, de minha futura esposa Isabelle e de todos os meus amigos. Também agradeço em especial ao amigo Lucas Nogueira pelo esforço, dedicação e empenho na realização desta obra.

*Há uma força motriz mais poderosa que o vapor, a
eletricidade e a energia atômica: a vontade.*

Albert Einstein

RESUMO

CASTILHO, A. V.; NOGUEIRA, L. S. Estudo do potencial de geração de energia elétrica a partir da biomassa proveniente da indústria agropecuária nas mesorregiões paranaenses. 90f. Trabalho de Conclusão de Curso – Campus Curitiba, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

O presente trabalho de conclusão de curso apresenta a biomassa proveniente da indústria agropecuária paranaense como uma fonte alternativa para geração de energia elétrica no estado. Aplicando a metodologia de conversão de energia química em elétrica, descrita por Coelho, Monteiro e Karniol (2012) em dados históricos de produção agropecuária paranaense, obtém-se a curva temporal do potencial de geração de energia elétrica das mesorregiões do Paraná. Concluiu-se que o Paraná possui um grande potencial energético referente aos resíduos agropecuários, principalmente relacionado à produção de cana-de-açúcar, milho, soja e aos rebanhos de suínos, bovinos e galináceos, com um potencial anual estimado em 121 TWh, sendo 115 TWh referente à biomassa vegetal e 6 TWh à biomassa animal. Destaca-se que atualmente o consumo de energia elétrica no Brasil é da ordem de 500 TWh, e no Paraná de 30 TWh, o que evidencia a expressividade do potencial elétrico paranaense referente à biomassa agropecuária.

Palavras-Chave: Biomassa. Mesorregião. Potencial de geração. Culturas agropecuárias. Paraná.

ABSTRACT

CASTILHO, A. V.; NOGUEIRA, L. S. Study of the electric energy generation potential from farming industry biomass on Paraná's mesoregions. 90f. Trabalho de Conclusão de Curso – Campus Curitiba, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

This course final paper features biomass from Paraná's farming industry as an alternative to energy generation on Paraná's State. Applying a methodology to convert chemical energy (existent on animal and vegetal waste) to electrical energy, described by Coelho, Monteiro and Karniol (2012), in historical Paraná's farming industry production data, it was obtained the electrical generation power curve of Paraná's mesoregions. The course final paper has concluded that Paraná has a substantial potential in power generation coherent to farming industry's biomass, mainly relative to sugar cane, corn and soy production, as well as swine, bovine and chicken herds, with an annual power generation estimated in 121 TWh, being 115 TWh relative to vegetable biomass and 6 TWh to animal biomass. It is worth highlighting that currently the Brazil's electric energy consumption is around 500 TWh, and 30 TWh in the State of Paraná, evidencing the expressiveness of the farming industry biomass's electric power generation.

Keywords: Biomass. Mesoregion. Power Generation. Farming cultures. Paraná.

CONVERSÃO DE UNIDADES

De	Para	Fator de conversão
ha	m ²	10.000
Tep	MWh	11,63
MJ	kWh	0,277
cal	J	4,184
kcal	MWh	1,163x10 ⁻⁶
bar	atm	0,987

LISTA DE ABREVIACOES

ANEEL	-	Agência Nacional de Energia Elétrica
APA	-	rea de Proteção Ambiental
BEN	-	Balanço Energético Nacional
CCEE	-	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
COPEL	-	Companhia Paranaense de Energia
DCA	-	Divisão de Conjuntura Agropecuária
DERAL	-	Departamento de Economia Rural
DIBAP	-	Diretoria de Biodiversidade e áreas Protegidas
GD	-	Geração Distribuída
IPARDES	-	Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social
MMA	-	Ministério do Meio Ambiente
MME	-	Ministério de Minas e Energia
OIE	-	Oferta Interna de Energia
OIEE	-	Oferta Interna de Energia Elétrica
PCI	-	Poder Calorífico Inferior
PNE	-	Plano Nacional de Energia
SEAB	-	Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento
SIN	-	Sistema Interligado Nacional

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Cálculo de potência elétrica para os resíduos de origem vegetal	42
Equação 2 – Cálculo de potência elétrica para os resíduos de origem animal	45
Equação 3 – Cálculo de potência elétrica para o esterco ovino	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Participação das matrizes energéticas para composição da Matriz Energética Nacional em 2010 e projeção para 2020.....	16
Figura 2 – Participação das matrizes energéticas para composição da Matriz Elétrica Nacional em 2010 e projeção para 2020.....	17
Figura 3 – Produção e participação na produção agrícola paranaense dos tipos de culturas cultivadas no estado referente ao ano de 2015, em milhões de toneladas.	19
Figura 4 – Número total de cabeças e relativas ao total paranaense para os principais rebanhos paranaenses em 2017, em milhões de cabeças.	20
Figura 5 – Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa	34
Figura 6 – Mesorregiões geográficas paranaenses	38
Figura 7 – Potencial elétrico das principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica noroeste paranaense entre os anos de 2006 e 2016.....	48
Figura 8 – Potencial elétrico das principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica centro ocidental paranaense entre os anos de 2006 e 2016.....	50
Figura 9 – Potencial elétrico das principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica norte central paranaense entre os anos de 2006 e 2016	52
Figura 10 – Potencial elétrico das principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica norte pioneiro paranaense entre os anos de 2006 e 2016.....	53
Figura 11 – Potencial elétrico das principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica centro oriental paranaense entre os anos de 2006 e 2016	55
Figura 12 – Potencial elétrico das principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica oeste paranaense entre os anos de 2006 e 2016	57
Figura 13 – Potencial elétrico das principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica sudoeste paranaense entre os anos de 2006 e 2016.....	59
Figura 14 – Potencial elétrico das principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica centro-sul paranaense entre os anos de 2006 e 2016	61
Figura 15 – Potencial elétrico das principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica sudeste paranaense entre os anos de 2006 e 2016.....	62
Figura 16 – Potencial elétrico das principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica metropolitana de Curitiba entre os anos de 2006 e 2016.....	64
Figura 17 – Distribuição do potencial de geração de energia elétrica total referente às culturas agropecuárias do estado do Paraná.....	66
Figura 18 – Distribuição do potencial de geração de energia elétrica referente ao rebanho de bovinos	67
Figura 19 - Distribuição do potencial de geração de energia elétrica referente à cultura de cana-de-açúcar.....	68
Figura 20 – Distribuição do potencial de geração de energia elétrica referente à cultura de galináceos	68
Figura 21 – Distribuição do potencial de geração de energia elétrica referente à cultura de milho	69
Figura 22 – Distribuição do potencial de geração de energia elétrica referente à cultura de soja	70
Figura 23 – Distribuição do potencial de geração de energia elétrica referente ao rebanho de suínos ..	71
Figura 24 - Distribuição de potencial de geração de energia elétrica referente à cultura de trigo.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE) brasileira para os anos de 2015 e 2016.....	23
Tabela 2 – Unidades consumidoras com micro e mini geração distribuída, por estado brasileiro, registradas até julho de 2017	32
Tabela 3 - Dados geográficos, demográficos e políticos das mesorregiões paranaenses	37
Tabela 4 – Principais culturas agrícolas paranaenses em números totais e relativas à produção total do estado referentes ao ano de 2016.	39
Tabela 5 – Principais culturas pecuárias paranaenses em números totais e relativos à produção total do estado referente ao ano de 2016.....	39
Tabela 6 – Principais culturas agrícolas de cada mesorregião do Paraná referente aos anos de 2006 a 2016.	43
Tabela 7 – Dados energéticos das culturas agrícolas paranaenses	44
Tabela 8 – Dados energéticos dos rebanhos pecuários paranaenses	46
Tabela 9 – Valores de média relativa, média absoluta, coeficiente de crescimento do potencial elétrico e potência útil para projetos referente às principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica noroeste paranaense entre os anos de 2006 e 2016.	49
Tabela 10 – Valores de média relativa, média absoluta, coeficiente de crescimento do potencial elétrico e potência útil para projetos referente às principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica centro ocidental paranaense entre os anos de 2006 e 2016.....	51
Tabela 11 – Valores de média relativa, média absoluta, coeficiente de crescimento do potencial elétrico e potência útil para projetos referente às principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica norte central paranaense entre os anos de 2006 e 2016.	53
Tabela 12 – Valores de média relativa, média absoluta, coeficiente de crescimento do potencial elétrico e potência útil para projetos referente às principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica norte pioneiro paranaense entre os anos de 2006 e 2016.	54
Tabela 13 – Valores de média relativa, média absoluta, coeficiente de crescimento do potencial elétrico e potência útil para projetos referente às principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica centro oriental paranaense entre os anos de 2006 e 2016.	55
Tabela 14 – Valores de média relativa, média absoluta, coeficiente de crescimento do potencial elétrico e potência útil para projetos referente às principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica oeste paranaense entre os anos de 2006 e 2016.	58
Tabela 15 – Valores de média relativa, média absoluta, coeficiente de crescimento do potencial elétrico e potência útil para projetos referente às principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica sudoeste paranaense entre os anos de 2006 e 2016.....	59
Tabela 16 – Valores de média relativa, média absoluta, coeficiente de crescimento do potencial elétrico e potência útil para projetos referente às principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica centro-sul paranaense entre os anos de 2006 e 2016.	61
Tabela 17 – Valores de média relativa, média absoluta, coeficiente de crescimento do potencial elétrico e potência útil para projetos referente às principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica sudeste paranaense entre os anos de 2006 e 2016.....	63
Tabela 18 – Valores de média relativa, média absoluta, coeficiente de crescimento do potencial elétrico e potência útil para projetos referente às principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica metropolitana de Curitiba entre os anos de 2006 e 2016.	64
Tabela 19 – Resumo dos potenciais estáveis de geração de energia elétrica provenientes da agricultura e da pecuária nas e a potência útil para projetos das mesorregiões paranaenses	65

UNIDADES DE MEDIDA

bar	-	bar
cal	-	caloria
ha	-	hectare
kg	-	quilograma
l	-	litro
tep	-	tonelada equivalente de petróleo
T	-	tonelada
W	-	Watts
Wh	-	Watt-hora

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	27
2.1.	ASPECTOS CONCEITUAIS	27
2.2.	CONTEXTO HISTÓRICO	28
2.3.	CLASSIFICAÇÃO DA BIOMASSA	30
2.4.	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	30
2.4.1.	Micro e mini geração distribuída	31
2.5.	GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO BIOMASSA COMO INSUMO ENERGÉTICO	33
2.5.1.	Biodigestão	36
2.6.	GEOGRAFIA E AGROPECUÁRIA PARANAENSE	37
2.6.1.	Perfil agropecuário paranaense	38
3	METODOLOGIA.....	41
3.1.	RESÍDUOS VEGETAIS	41
3.1.1.	Dados energéticos das culturas	44
3.2.	RESÍDUOS LÍQUIDOS ANIMAIS.....	44
3.2.1.	Dados energéticos das culturas	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
5	CONCLUSÕES.....	73
	REFERÊNCIAS.....	75
	ANEXOS.....	82
	ANEXO 1 – RELAÇÃO DOS MUNICÍPIOS PARANAENSES ORDENADOS SEGUNDO AS MESORREGIÕES E AS MICRORREGIÕES GEOGRÁFICAS DO IBGE	82

1 INTRODUÇÃO

As duas crises do petróleo na década de 70 forçaram os países a reestruturarem suas matrizes energéticas, iniciando a busca da substituição deste e seus derivados por fontes alternativas de energia (BAJAY e BERNI, 2006). Opções como a energia solar, fotovoltaica, eólica, energia das marés e biomassa têm ganhado mais espaço no mercado de energia com intuito de complementar a geração em momentos de crise elétrica, principalmente em períodos de seca no caso do Brasil.

Os leilões de energia, por exemplo, são artifícios que expõem a busca do mercado por novos fornecedores de energia. Como informado pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), em abril de 2018 ocorreu a realização de um leilão de energia que movimentou 6,74 bilhões de reais em contratos, com um total de trinta e nove usinas, das quais vinte e nove são solares, quatro hidrelétricas, quatro eólicas e duas termoelétricas movidas à biomassa (CCEE, 2018).

Isso mostra não só o destaque das fontes alternativas de energia como também a importância do estudo das mesmas, principalmente em países como o Brasil com largo potencial eólico, solar e de biomassa. Esta, principalmente, se mostra como uma opção barata, de fácil acesso e de baixos impactos ambientais.

1.1 TEMA

A utilização da biomassa e outras fontes renováveis nas matrizes energética e elétrica brasileira apresentam projeções positivas há alguns anos. Para o Ministério de Minas e Energia (MME), em 2010 havia uma expectativa de diminuição percentual da participação de derivados de petróleo e carvão vegetal, e um aumento de derivados da cana-de-açúcar e outros renováveis na matriz energética brasileira (MME, 2011), conforme Figura 1.

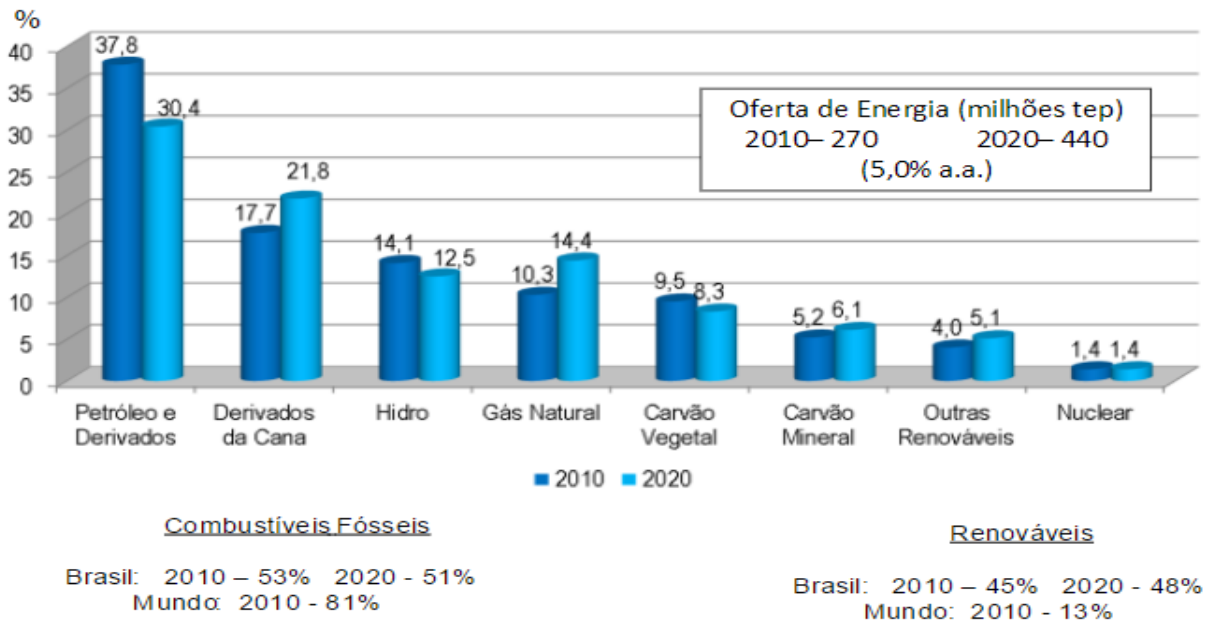


Figura 1 – Participação das matrizes energéticas para composição da Matriz Energética Nacional em 2010 e projeção para 2020.

Fonte: MME, 2011.

Em 2010, 37,8% da matriz energética nacional baseava-se na utilização de petróleo e derivados e 9,5% de carvão vegetal, enquanto que derivados da cana e outras renováveis detinham 17,7% e 4,0%, respectivamente. Para 2020 esses números passariam para 30,4%, 8,3%, 21,8% e 5,1%. Considerando um aumento da oferta de energia de 270 para 440 Mtep¹, tais números representam um crescimento de mais de 48 Mtep na utilização de derivados da cana-de-açúcar (de 47,8 Mtep em 2010 para 95,9 Mtep em 2020), com uma taxa de 7,22% a.a., e aumento de 11,6 Mtep para outras renováveis (7,59% a.a.). Ressalta-se ainda que em 2010, apenas 0,4% da matriz elétrica brasileira era composta por geração eólica, e 5,1% por biomassa.

A Figura 2 mostra uma projeção para 2020 na matriz elétrica brasileira, na qual também se observa um aumento significativo na participação de fontes alternativas e diminuição percentual de hidroelétricas e derivados do petróleo (MME, 2011).

¹ tep – utilizada na comparação do poder calorífero de diferentes formas de energia com o petróleo. Uma tep corresponde à energia que se pode obter a partir de uma tonelada de petróleo padrão, sendo equivalente à 11,63 MWh (ANEEL, 2008).

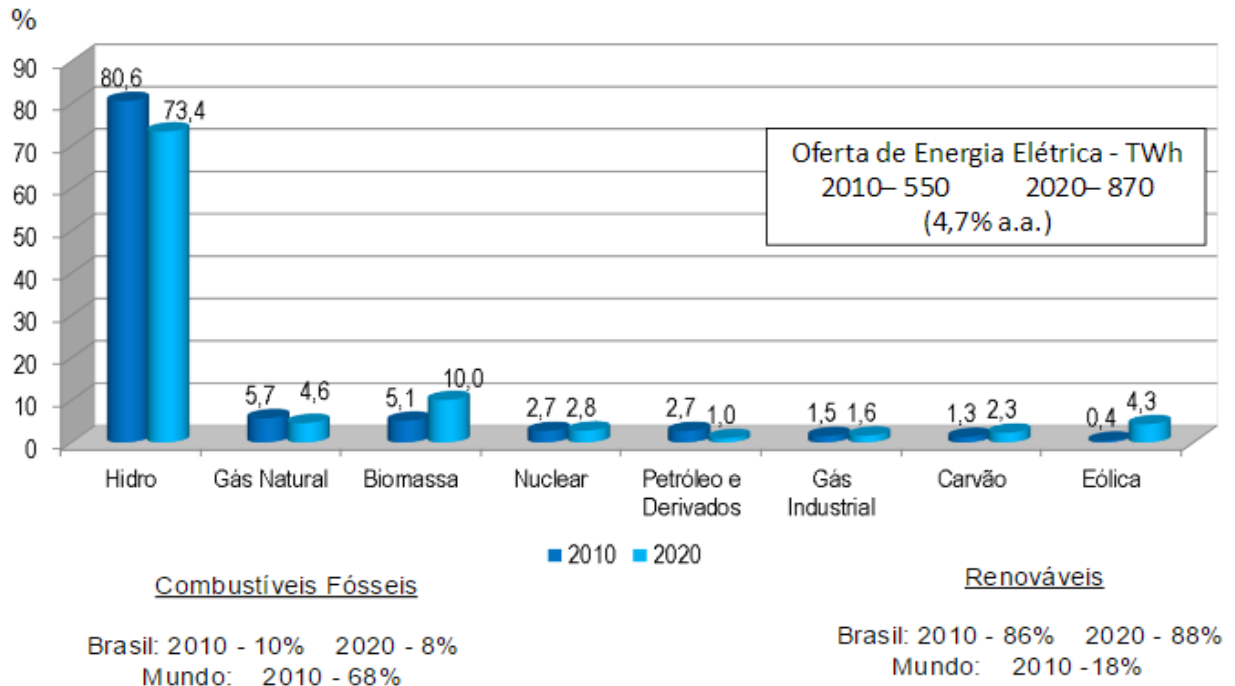


Figura 2 – Participação das matrizes energéticas para composição da Matriz Elétrica Nacional em 2010 e projeção para 2020.

Fonte: MME, 2011.

Em 2010, 80,6% da matriz elétrica nacional baseava-se na geração hidráulica e 2,7% utilizando petróleo e derivados, enquanto que gás natural e biomassa somavam 10,8%, respectivamente. Para 2020 esses números passariam para 73,4%, 1,0% e 14,6%. Considerando um aumento da oferta de energia elétrica de 550 TWh para 870 TWh, tais números representam um aumento de mais de 67 TWh de geração de energia elétrica por meio da queima de biomassa ou gás natural (de 59,4 TWh em 2010 para 127,0 TWh em 2020), com uma taxa de crescimento de 7,90% a.a. Tal projeção se mostrou bastante coerente em relação à participação da biomassa na matriz elétrica brasileira quando comparada com os dados de 2017, que totaliza 9% da matriz (ANEELa, 2017).

Observa-se também que a maior contribuição na geração de energia elétrica brasileira é hidráulica. Apesar de fornecer energia limpa, a desverticalização da geração tem se mostrado necessária por fatores como problemas ambientais decorrentes da construção das barragens e para maior confiabilidade do sistema, já que, em um momento próximo, o sistema hidráulico nacional chegará em seu ponto de saturação (GOMBATA, 2016).

Em 2016, a Oferta Interna de Energia (OIE) no Brasil foi de 288.319 Mtep, sendo mais de 125.000 Mtep referentes às energias renováveis (equivalente a 43,5% do total), com

um aumento tanto percentual quanto absoluto em relação ao ano de 2015 (123.668 Mtep referentes a fontes renováveis, equivalente a 41,3% da OIE) (MME, 2017), o que faz do Brasil um dos países com a matriz energética mais limpa do mundo, uma vez que, em países desenvolvidos, tal índice gira em torno de 10% (MME, 2016).

À vista disto, se torna importante a pesquisa em fontes alternativas de energia a fim de incentivar investimentos para desverticalização do sistema elétrico nacional, o qual está baseado no modelo de geração hidroelétrico, cujos principais fatores desfavoráveis são a dependência de variáveis climáticas, principalmente em usinas a fio d'água, o impacto ambiental e o custo da construção das barragens.

1.1.1 Delimitação do tema

No cenário da busca por uma matriz elétrica com participação mais ampla de fontes alternativas de energia e aprimoramento do sistema elétrico em áreas de acesso precário à energia elétrica, fato comum em áreas rurais, destacam-se as termoelétricas movidas à biomassa.

O estado do Paraná é caracterizado por forte silvicultura, agricultura baseada em cana-de-açúcar, milho e soja, e pecuária em bovinos e suínos, sendo estas, culturas de grande potencial energético. A Figura 3 e Figura 4 ilustram a ordem de grandeza da agropecuária paranaense, sendo representações gráficas desenvolvidas pelos autores a partir de dados fornecidos em planilhas pela Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento (SEAB) e pelo Departamento de Economia Rural (DERAL) em relatórios anuais da área colhida, produção, rendimento, participação e colocação agrícola do Paraná em relação ao Brasil e do número bruto da pecuária paranaense (SEAB, 2016) e (SEAB, 2017).

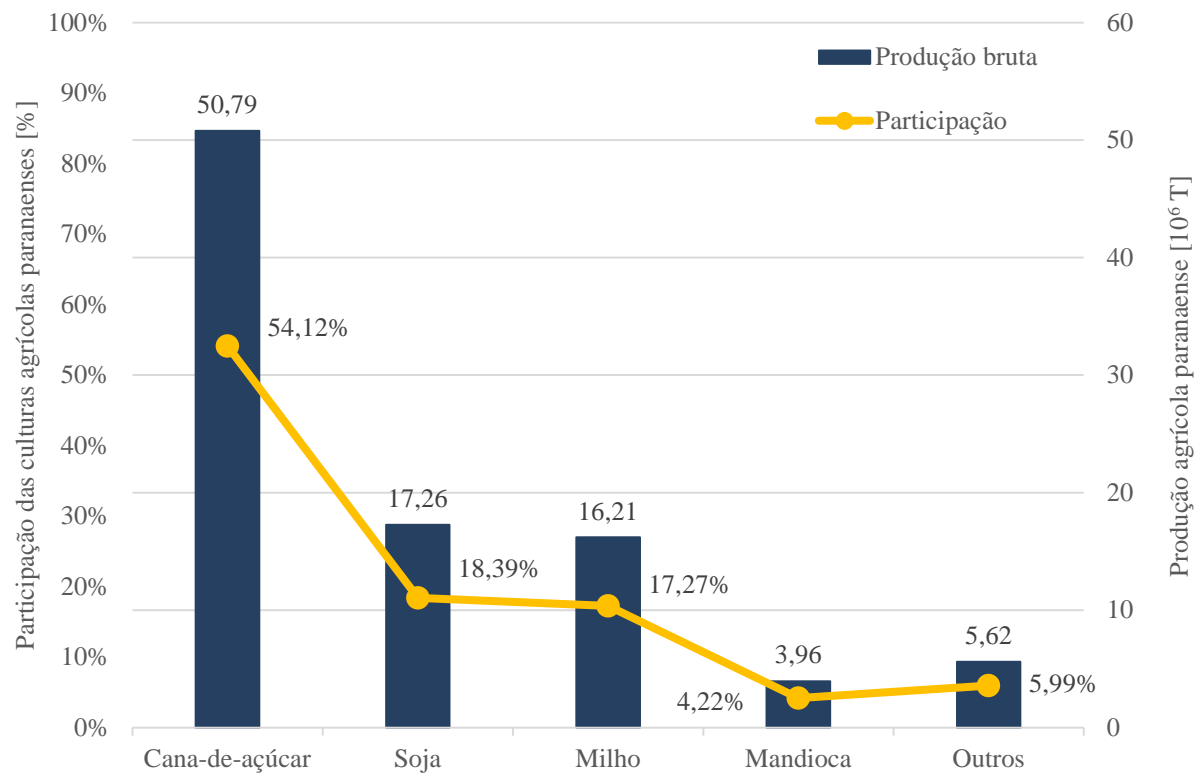


Figura 3 – Produção e participação na produção agrícola paranaense dos tipos de culturas cultivadas no estado referente ao ano de 2015, em milhões de toneladas.

Fonte: Os autores, com dados divulgados pela SEAB (SEAB, 2016).

Como demonstrado na Figura 3, em 2015 a produção de cana-de-açúcar no estado do Paraná ultrapassou a marca de 50 milhões de toneladas, representando mais de 54% da agricultura do estado. Em seguida vêm a soja e o milho, com mais de 16 milhões de toneladas cada e representando mais de 35% da produção total do estado.

Ressalta-se que o resíduo da cana-de-açúcar, ou seja, o bagaço gerado nas usinas de etanol e álcool é de grande poder energético, apresentando uma perspectiva interessante para geração de energia elétrica, e tem representatividade considerável na cogeração de energia e na Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE) brasileira.

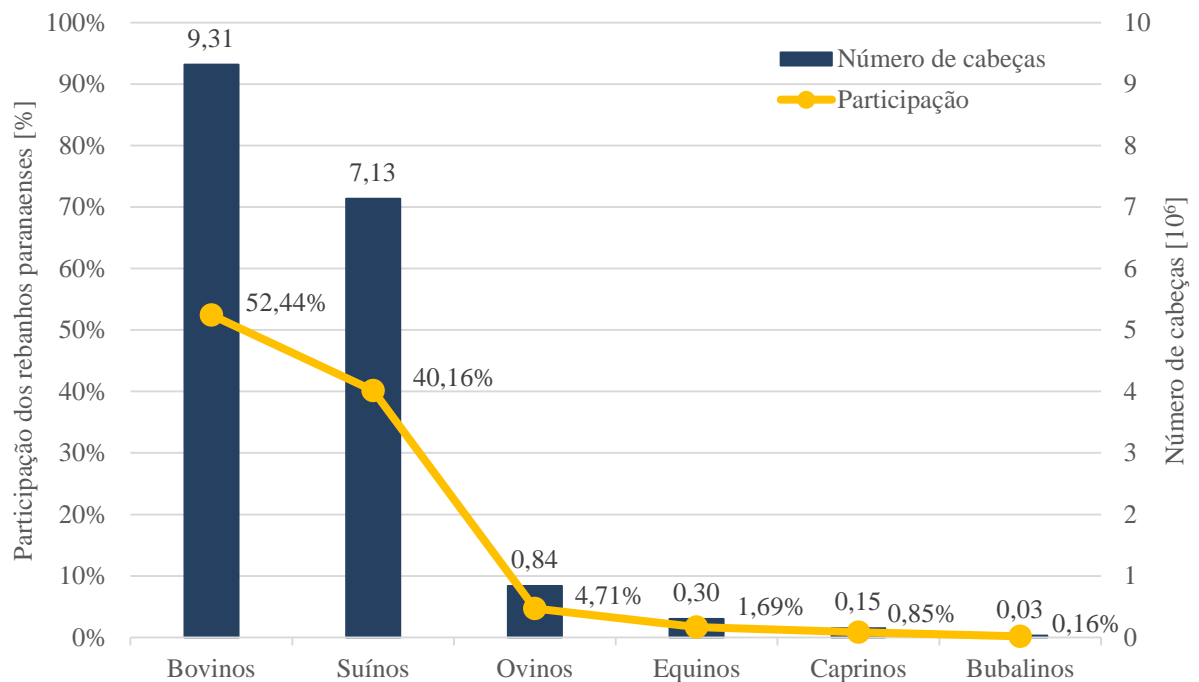


Figura 4 – Número total de cabeças e relativas ao total paranaense para os principais rebanhos paranaenses em 2017, em milhões de cabeças.

Fonte: Os autores, com dados divulgados pela SEAB (SEAB, 2017).

Em 2017 o rebanho total de bovinos, suínos, ovinos, equinos, caprinos e bubalinos no Paraná era de 17,8 milhões de cabeças. Desse total, 9,3 milhões (52,4%) são representados por bovinos e 7,1 milhões (40,2%) por suínos, totalizando quase 93% dos rebanhos paranaenses, como demonstrado na Figura 4. Para o cálculo de potencial de geração é considerada também a cultura de galináceos do estado.

Tal riqueza agropecuária acarreta certamente em um grande potencial energético, uma vez que os resíduos utilizados na geração de energia elétrica são diretamente proporcionais com a produção das culturas². Assim, nesse trabalho estima-se a capacidade de geração de energia elétrica em termoelétricas de baixo rendimento movidas à biomassa proveniente da indústria agropecuária paranaense. Ressalta-se que o uso de resíduos da indústria madeireira, como *pellets* e briquetes, não será abordado neste estudo. Todavia, é um nicho interessante para estudos futuros, uma vez que são tipos de biomassa com alto poder de energético.

² A metodologia de conversão energética utiliza como parâmetros a produção, a quantidade de resíduos gerados por unidade de produção e o poder calorífico de cada insumo, e será explicada mais detalhadamente no capítulo 3.

1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

O Brasil é um país de amplo potencial hidráulico, com abundância de rios de grande porte, sendo referência mundial em geração de energia em usinas hidroelétricas. (EPE, 2018). Contudo, boa parte deste potencial se concentra na bacia amazônica (ANEEL, 2005), caracterizada por rios de planícies, que são considerados impróprios para esse modelo de geração, uma vez que necessitam de grandes barragens e extensas áreas de inundação, o que implica em consideráveis impactos ambientais e sociais, como destruição da fauna e flora da região, destruição de recantos naturais e deslocamento de populações ribeirinhas, dentre outros (FIORAVANTI, 2009).

Essa discussão implica diretamente em dificuldades de expansão do sistema hidroelétrico nacional, pois rios viáveis à construção de hidrelétricas estão próximos do ponto de saturação.

Semelhantemente ao modelo hidráulico, a geração em usinas termoeletricas também tem grande participação na matriz elétrica brasileira, com cerca de 16,8% (ANEELa, 2017), mesmo sendo um modelo de baixa eficiência e de alto custo econômico e ambiental.

Por motivos como os explicitados anteriormente, o modelo de geração por biomassa vem ganhando maior espaço no quadro nacional e já é a terceira maior produção de energia elétrica, representando quase 9%, sendo a maior parte pela queima do bagaço de cana-de-açúcar (ANEELa, 2017). A possibilidade de obter energia limpa³, com matéria prima abundante e economicamente viável chama atenção de pesquisadores e do mercado de energia. Conforme citado por Tiepolo, Canciglieri Junior e Urbanetz Junior (2014, p. 79-90), somente no Paraná foi estimado um potencial de produção de energia elétrica de 12 TWh/ano, obtido da biomassa residual de animais a partir do biogás gerado.

No entanto, alguns fatores são relevantes para sistemas alternativos, principalmente relacionados à qualidade de energia. A geração constante é um desafio devido à demanda de matéria orgânica requerida no processo, em que o fornecimento da biomassa deve ser constante, o que implica em estoques suficientemente grandes para que o gerador não deixe de operar.

Assim, destaca-se como problema desta pesquisa a necessidade de identificar quais os tipos de biomassa decorrentes das culturas agropecuária são presentes no estado, a fim de

³ Energia elétrica cuja geração tenha um baixo impacto ambiental, normalmente associada a fontes renováveis de energia.

estimar o potencial elétrico proveniente da queima dos resíduos da agroindústria paranaense e apresentar tal modelo como alternativa de geração de energia elétrica no Paraná.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Estimar o potencial de geração de energia elétrica com base em fontes de biomassa agropecuária nas mesorregiões paranaenses.

1.3.2 Objetivos Específicos

Identificar conceitos referentes à geração de energia elétrica com a utilização de biomassa agropecuária.

Identificar as características geográficas e produtivas do Paraná, identificando as mesorregiões e coletando dados históricos de dez anos de produção agropecuária das mesmas.

Calcular o potencial de geração de energia elétrica a partir dos diversos tipos de biomassa presentes nas mesorregiões paranaenses com base nos dados históricos de produção agropecuária, aplicando-se a metodologia de conversão de energia química em energia elétrica, proposta por Coelho, Monteiro e Karniol (2012).

1.4 JUSTIFICATIVA

Em 2016, 75% da matriz elétrica brasileira era composta por fontes renováveis de energia, sendo 60%, aproximadamente, referente a usinas hidrelétricas, e 13,8% proveniente da queima de combustíveis fósseis (ANEELa, 2017). Mesmo sendo referência mundial em termos de energia limpa, surgem indagações relacionadas à dependência da geração hidráulica e utilização das termoeletricas para suprir o fornecimento de energia em períodos de secas, sendo

que o país, de forma geral, possui grande potencial em fontes alternativas de energia. Também indaga-se a respeito da precariedade do sistema elétrico em áreas rurais do país, que se torna um limitante para o aumento de produtividade no campo, inclusive no estado do Paraná.

O presente estudo apresenta a biomassa constituída de resíduos da indústria agropecuária como fonte de potencial energético, sendo um modelo viável de geração para o estado e alternativa a modelos clássicos de geração, podendo contribuir para a melhora do fornecimento de eletricidade tanto em áreas rurais como em urbanas do estado.

Nesse sentido, é necessário entender os processos de conversão energética da biomassa para geração de energia elétrica e identificar os potenciais de geração das principais culturas presentes nas mesorregiões paranaenses. Como têm crescido os estudos relacionados à viabilidade de implantação de sistemas de Geração Distribuída (GD), faz-se necessário prospectar os insumos energéticos com perspectiva de aumento de contribuição para a geração de energia elétrica.

A Tabela 1 (MME, 2017) apresenta a OIEE brasileira em 2015 e 2016. Observa-se que houve um grande crescimento da participação de fontes renováveis de energia, apresentando os modelos de geração solar, eólica e bagaço de cana, com crescimento de 44,7%, 54,9% e 3,1%, respectivamente.

Tabela 1 – Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE) brasileira para os anos de 2015 e 2016

ESPECIFICAÇÃO	GWh		2016/2015 [%]	Estrutura [%]	
	2015	2016		2015	2016
HIDRÁULICA	359.743	380.911	5,9	58,4	61,5
BAGAÇO DE CANA	34.163	35.236	3,1	5,5	5,7
EÓLICA	21.626	33.489	54,9	3,5	5,4
SOLAR	59	85	44,7	0,01	0,014
OUTRAS RENOVÁVEIS	14.864	15.805	4,8	2,4	2,6
ÓLEO DIESEL	25.662	12.103	-52,8	4,2	2,0
GÁS NATURAL	79.490	56.485	-28,9	12,9	9,1
CARVÃO	19.096	17.001	-9,8	3,1	2,7
NUCLEAR	14.734	15.864	7,7	2,4	2,6
OUTRAS NÃO-RENOVÁVEIS	12.049	11.920	0,8	2	1,9
IMPORTAÇÃO	34.422	40.795	18,5	5,6	6,6
TOTAL	615.650	619.693	0,7	100	100
Dos quais renováveis	465.087	506.320	8,9	75,5	81,7

Fonte: MME, 2017

Esses dados exaltam o aumento da demanda de energia elétrica do país, com crescimento de 0,7% da OIEE de 2016 em relação a 2015. Embora o crescimento total seja relativamente pequeno, houve uma redução de 24,7% da participação de fontes não renováveis (de 150.563 GWh em 2015 para 113.373 GWh em 2016) e crescimento de 8,9% das renováveis, além de grande crescimento na geração eólica e solar.

Como no Paraná a geração eólica é pouco expressiva e sem grandes investimentos de ampliação (PORTAL BRASIL, 2017), uma alternativa para o desenvolvimento da geração elétrica em áreas precárias do estado é a utilização de biomassa, uma vez que o Paraná é um estado com grande produção agropecuária, como mostram as Figuras 3 e 4. Sendo assim, estima-se que o potencial de geração do estado seja suficiente para suprir boa parte da energia hoje fornecida pelas termoeletricas de ciclo simples, que queimam óleo diesel e carvão e são mais poluentes. Somente em 2016, este modelo somou quase 30 GWh (MME, 2017).

Dessa forma, a execução deste trabalho contribui para explorar o potencial de geração de energia elétrica no Paraná por meio do fornecimento de biomassa disponível no estado, identificando zonas produtoras de culturas agropecuárias, a fim de se conhecer as melhores alternativas à produção de energia em cada mesorregião, o que pode contribuir com políticas públicas de incentivo à GD, fornecendo ao Estado uma diretriz a financiamentos e investimentos na produção de energia por meio da queima de resíduos orgânicos.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Inicialmente elaborou-se um estudo do aspecto conceitual e histórico do tema, identificando definições e o processo de descoberta e início do uso da biomassa para geração de energia elétrica. É feita a contextualização do assunto por meio de uma revisão bibliográfica, trazendo os principais trabalhos que tratam a respeito da produção de energia utilizando resíduos vegetais e animais como fonte energética e qual o status atual do problema.

Em sequência são estudados conceitos técnicos importantes para o entendimento do trabalho, como definições e classificações de biomassa, definições de GD e micro e mini geração e os principais processos de conversão de energia que utilizam a biomassa. Por fim, são estudadas algumas características do Paraná, tais como as divisões geográficas do estado,

população, grau de urbanização, consumo de energia elétrica e quais principais culturas agropecuárias do estado.

Posteriormente apresenta-se a metodologia utilizada para conversão de produção agropecuária em energia elétrica, apresentada por Coelho, Monteiro e Karniol (2012), a qual consiste em, a partir do volume total produzido de determinada cultura, calcular a quantidade de resíduos úteis para a geração de energia e, por fim, converter energia química presente nos dejetos em energia elétrica. Assim, utilizando-se os dados da produção, obter-se-á o potencial de geração de energia em Watts.

Por fim é calculado o potencial de geração de energia elétrica dos últimos dez anos das mesorregiões, aplicando a metodologia descrita em dados históricos. A análise dos resultados possibilita informar quais culturas apresentaram padrões mais estáveis, com maior potencial de geração e com perspectiva de crescimento.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho é composto por cinco capítulos. O capítulo 1 compreende a introdução ao tema, juntamente com os objetivos definidos, o problema a ser resolvido, a justificativa e o procedimento metodológico que é utilizado para o desenvolvimento do trabalho.

O capítulo 2 é formado pela revisão de literatura, informando os principais trabalhos já desenvolvidos na área de estudo abordada e contextualizando o problema proposto. São apresentados conceitos técnicos para o entendimento do trabalho, trazendo explicações sobre a definição e classificação da biomassa, GD e o processo de geração de energia elétrica utilizando a biomassa como insumo energético. Ainda neste capítulo são estudadas características geográficas paranaenses, tais como as divisões do estado em mesorregiões, realizando uma breve análise das principais culturas agrícolas e pecuárias paranaenses, por meio de dados fornecidos por órgãos governamentais.

O capítulo 3 descreve a metodologia utilizada para conversão de energia, onde são informadas características energéticas das culturas agropecuárias estudadas, como também definem-se algumas premissas de eficiência de processamento da biomassa para o cálculo de potencial de energia elétrica.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos por meio da análise dos dados

agropecuários paranaenses utilizando-se a metodologia adotada, a partir da qual é apresentada a curva de potencial elétrico existente em cada mesorregião do Paraná, com base nos valores dos últimos 10 anos, como também a distribuição do potencial de geração de energia elétrica no estado.

Por fim, no capítulo 5 é feita a conclusão do trabalho, abrangendo os principais resultados obtidos e pontos de discussão levantados, além da proposição de trabalhos futuros a fim de continuar o estudo pleiteado nesta monografia.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é apresentada a revisão de pesquisas a respeito do uso de biomassa como matriz energética e matriz elétrica, bem como algumas classificações da biomassa, os principais processos de conversão energética desta, como também a explicação de alguns conceitos técnicos importantes para o entendimento do trabalho e, por fim, é feita uma análise geográfica e energética do estado do Paraná.

2.1. ASPECTOS CONCEITUAIS

O Ministério do Meio Ambiente (MMA) define biomassa como sendo todo recurso renovável que provêm de matéria orgânica, de origem animal ou vegetal, que tem por objetivo principal a produção de energia (MMA, 2012).

O Brasil é um dos poucos países com capacidade de ampliar suas alternativas energéticas, razão de seu vasto território e recursos naturais. No seminário sobre energias renováveis promovido pelo MMA e Embrapa no ano de 2012, o chefe de transferência de tecnologia e pesquisador da Embrapa Agroenergia, Dr. José Manuel Cabral, ressaltou que a biomassa tem uma participação importante no Balanço Energético Nacional (BEN) do Brasil (MMA, 2012).

A preocupação em desacelerar a degradação do meio ambiente teve início na década de 1960 com o “Relatório do Clube de Roma”, redigido com a participação de representantes dos países industrializados com a proposta de crescimento zero (GOUDARD, FOGLIATTI e FILIPPO, 2004), e posteriormente com a conferência de Estocolmo, em 1972. Nestas foi levantado que, caso as tendências de crescimento industrial, produção de alimento e extração de recursos naturais se mantivessem, os limites de crescimento da Terra seriam atingidos em aproximadamente um século. Assim foram propostas novas políticas de industrialização, principalmente aos países desenvolvidos, “com objetivo de frear a degradação do planeta, atacando diretamente a filosofia do crescimento contínuo da sociedade industrial” (BRÜSEKE *et al*, 1994).

Como consequência do aumento da preocupação de sustentabilidade, iniciou-se a busca por fontes renováveis de energia. No final do século XX a ANEEL já expunha a

importância da biomassa como fonte renovável à geração de energia elétrica em decorrência do desgaste de fontes não renováveis, como o carvão mineral, e a tendência ao aumento dos apelos ambientais (ANEEL, 1996).

Garcia e Bartolomé (2010) destacam em seu artigo o desenvolvimento de energias renováveis para suprir a demanda de energia em áreas rurais, considerando as dimensões sociais que podem ser tomadas com essas novas tecnologias.

Por fim, Evans, Strezov e Evans (2010), mencionam a importância do desenvolvimento de fontes de energia renováveis a partir da biomassa como aliada da sustentabilidade, inclusão social e ao desenvolvimento de energias limpas e geração de créditos de carbono. Países centrais como Estados Unidos, Alemanha, Reino Unido e Japão vêm dando grande importância à biomassa para a geração de energia elétrica, uma vez que é uma alternativa barata, limpa e de fácil acesso.

2.2. CONTEXTO HISTÓRICO

A utilização de biomassa como combustível para geração de energia vem sendo objeto de estudo em diversos países, inclusive no Brasil. Embora seja difícil obter condições de igual competitividade com os combustíveis fósseis para sistemas de médio e grande porte, para pequenas populações dispersas, como ambientes rurais ou localidades isoladas, a queima de resíduos como bagaço de cana e esterco de rebanhos suínos, bovinos e de galináceos se torna uma alternativa economicamente interessante, uma vez que as condições para extensão da rede elétrica tradicional e a logística de transporte de combustível são muitas vezes difíceis para essas localidades (GALDINO *et al*, 2000).

Nogueira (1986) faz uma breve síntese da história e evolução do biogás, demonstrando que o processo de produção é uma tecnologia antiga, contudo, ainda atual. Teve início em meados do século XVIII quando Alessandro Volta⁴ descobriu o metano no gás do pântano.

Em 1806, na Inglaterra, Humprey Davy identificou um gás rico em carbono e dióxido de carbono, resultante da decomposição de dejetos animais em lugares úmidos. [...] Ao que parece, apenas em 1857, em Bombaim, Índia, foi construída a primeira

⁴ Físico italiano conhecido especialmente pela invenção da primeira bateria elétrica.

instalação operacional destinada a produzir gás combustível, para um hospital de hansenianos. Nessa mesma época, pesquisadores como Fisher e Schrader, na Alemanha e Grayon, na França, entre outros, estabeleceram as bases teóricas e experimentais da biodigestão anaeróbia. Posteriormente, em 1890, Donald Cameron projetou uma fossa séptica para a cidade de Exeter, Inglaterra, sendo o gás produzido utilizado para iluminação pública. Uma importante contribuição para o tratamento anaeróbio de esgotos residenciais foi feita por Darl Imhoff, na Alemanha, que, por volta de 1920, desenvolveu um tanque biodigestor, o tanque Imhoff, bastante difundido na época (NOGUEIRA, 1986, p.1-2).

O primeiro digestor a batelada⁵ foi, segundo Seixas *et al* (1980, p. 6-7), "posto em funcionamento regular em Bombaim, em 1900. Durante e depois da Segunda Grande Guerra, alemães e italianos, entre os povos mais atingidos pela devastação da guerra, desenvolveram técnicas para obter biogás de dejetos e restos de culturas".

Inegavelmente, a pesquisa e desenvolvimento de biodigestores desenvolveram-se muito na Índia, onde, em 1939, o Instituto Indiano de Pesquisa Agrícola, em Kanpur, desenvolveu a primeira usina de gás de esterco. Segundo Nogueira (1986), o sucesso obtido animou os indianos a continuarem as pesquisas, formando o Gobar Gás Institute (1950), comandado por Ram Bux Singh. Tais pesquisas resultaram em grande difusão da metodologia de biodigestores como forma de tratar os dejetos animais, obter biogás e ainda conservar o efeito fertilizante do produto final (biofertilizante).

Sganzerla (1983), Magalhães (1986) e Barrera (1993) destacam a crise do petróleo de 1973 como alavanca aos investimentos em insumos energéticos renováveis, sendo fator fundamental ao surgimento da indústria do etanol proveniente da cana-de-açúcar e o incentivo à GD, tendo como objetivo minimizar a dependência de energia elétrica da área rural.

Tiepolo, Junior e Junior (2014) ressaltam que o Paraná possui grande potencial de geração de energia por meio de fontes renováveis de energia, com irradiação anual média 52% maior que a média anual alemã, e estimando uma geração anual por biomassa de 30,16 TWh, energia maior que a demanda anual do estado, que em 2016 foi de aproximadamente 28,4 TWh (IPARDESa, 2017), mas que este potencial ainda seria parcial, visto que nem todos os resíduos foram utilizados nesta estimativa.

Com o aumento dos incentivos à geração distribuída, Souza (2014) destaca a biomassa como uma das fontes mais economicamente atrativas para áreas rurais, para a GD

⁵ Digestor o qual recebe carga total de biomassa e somente é esvaziado após a total conversão da biomassa em biofertilizante e biogás.

por meio da instalação de biodigestores. Entre os métodos de geração de energia elétrica em micro e mini centrais, a utilização de biomassa como fonte energética se destaca por, entre outros fatores, ser uma forma de geração de baixa complexidade e com diversos tipos de matéria-prima.

2.3. CLASSIFICAÇÃO DA BIOMASSA

A biomassa pode ser classificada em três categorias: biomassa sólida; biomassa líquida; biomassa gasosa (GRAMACHO et al, 2013).

- **Biomassa sólida:** caracterizada por resíduos de culturas fixas, como plantas frutíferas, e temporárias, como lavouras de cana-de-açúcar, soja e amendoim e também resíduos animais, como fezes de suínos, bovinos e caprinos. Sofre variações ao longo do ano por estar intimamente relacionada com a colheita das culturas e estações do ano;
- **Biomassa líquida:** caracterizada por biocombustíveis líquidos, que podem ser extraídos tanto de oleaginosas como da fermentação de culturas agrícolas. No Brasil, os dois biocombustíveis mais comuns são o etanol, proveniente da cana-de-açúcar, e o biodiesel com óleos extraídos da soja;
- **Biomassa gasosa:** caracterizada por gases com alto poder calorífico, normalmente o metano (CH_4), e tem como principais origens resíduos agropecuários e urbanos. A biomassa gasosa, também chamada de biogás, pode ser tratada como um insumo intermediário, por ser proveniente quase que em sua totalidade, da decomposição ou queima da biomassa sólida;

2.4. GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A Geração Distribuída - GD pode ser caracterizada pela instalação de geradores de pequeno porte, normalmente a partir de fontes renováveis, localizados próximos aos centros de consumo de energia elétrica (ANEEL, 2016), com o uso integrado ou isolado de recursos modulares de pequeno porte por concessionárias, consumidores e terceiros em aplicações que beneficiam o sistema elétrico e os consumidores específicos, sendo uma alternativa às áreas

com acesso precário à energia elétrica, como áreas rurais (AZEVEDO e BARBOSA FILHO, 2013).

Para Rodriguez (2002), a GD é bastante vantajosa ao setor elétrico, principalmente utilizando-se fontes renováveis de energia por permitir a diminuição das perdas associadas ao transporte de energia elétrica.

Tal modelo de geração pode proporcionar vantagens e desvantagens ao sistema elétrico, como a postergação de investimentos em expansão nos sistemas de distribuição e transmissão, baixos impactos ambientais, melhoria nos níveis de tensão da rede nos períodos de maior consumo de energia além da possibilidade de usá-la para correção do fator de potência, como também a diversificação da matriz energética, porém, ao mesmo tempo, contribuem para o aumento da complexidade de operação da rede e aumento de problemas de qualidade de energia como harmônicos, aumentando a necessidade de alteração dos procedimentos das distribuidoras para operar, controlar e proteger suas redes (ANEEL, 2016).

Azevedo e Barbosa Filho (2013) levantam outras vantagens da GD relacionadas ao trabalho desenvolvido:

- Aumento da confiabilidade do suprimento de energia elétrica aos consumidores em áreas isoladas;
- Eletricidade gerada com menor custo para o consumidor;
- Desenvolvimento social e econômico local devido ao uso de recursos próprios da região;

2.4.1. Micro e mini geração distribuída

Pode-se definir micro e mini geração distribuída como sistemas de produção de energia elétrica constituídos de pequenas centrais geradoras que utilizam fontes renováveis de energia elétrica ou cogeração qualificada, conectadas à rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (ANEEL, 2016).

No Brasil, a Aneel classifica como microgeração distribuída, centrais geradoras com potência instalada menor ou igual a 75 kW, e minigeração distribuída, centrais geradoras com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW, para fonte hídrica, ou 5 MW para as demais fontes.

A Tabela 2 é um resumo, por estado brasileiro, da potência instalada registrada de micro e mini centrais de GD até julho de 2017. Os dados são obtidos de relatórios mensais fornecidos pela ANEEL, do resumo estadual de unidades consumidoras com geração distribuída (ANEELb, 2017).

Tabela 2 – Unidades consumidoras com micro e mini geração distribuída, por estado brasileiro, registradas até julho de 2017

Região	UF	Quantidade	Potência Instalada [kW]	Potência total instalada na região [kW]	Relativo ao total [%]	Relativo ao total na região [%]
Norte	AC	6	27,52	4.701,13	0,02	2,82
	AM	7	54,86			
	PA	77	340,51			
	RO	34	3.785,80			
	RR					
	TO	77	492,44			
Nordeste	AL	61	935,61	36.533,82	0,56	21,93
	BA	328	3.114,36			
	CE	515	20.961,52			
	MA	160	1.955,81			
	PB	129	1.040,90			
	PE	276	4.539,57			
	PI	23	507,80			
	RN	238	2.992,63			
	SE	66	485,62			
Centro-Oeste	DF	247	2.531,30	16.426,84	1,52	9,86
	GO	273	4.631,24			
	MS	295	2.409,24			
	MT	196	6.855,06			
Sudeste	ES	549	1.926,54	68.345,70	1,16	41,02
	MG	3.236	36.509,39			
	RJ	1.276	12.748,38			
	SP	2.975	17.161,39			
Sul	PR	1.123	8.758,37	40.611,27	5,26	24,37
	RS	1.677	20.272,60			
	SC	1.094	11.580,30			
TOTAL		14.938	166.619	166.619	100	100

Fonte: ANEELb, 2017.

Observa-se que a região sul, sudeste e nordeste são as três principais regiões com micro e mini GD, com 24,37%, 41,02% e 21,93% do total nacional, destacando-se os estados do Rio Grande do Sul (potência instalada de 20.272,60 kW, correspondente a 12,17%), São Paulo (potência instalada de 17.161,39 kW, correspondente a 10,30%), Minas Gerais (potência instalada de 36.509,39 kW, correspondente a 21,91%) e Ceará (potência instalada de 20.961,52 kW, correspondente a 12,58%).

O Paraná, no entanto, aparece com uma participação discreta de 5,26%, com menos de 9 MW de potência instalada com micro e mini geração distribuída, o que se torna um estímulo ao estudo do potencial do estado a fim de incentivar a GD no estado.

2.5. GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO BIOMASSA COMO INSUMO ENERGÉTICO

Além de a matriz energética brasileira ser, em sua maioria, proveniente de fontes renováveis de energia, 5,7% da OIEE de 2016 foi referente à queima de bagaço de cana (MME,2017).

Apesar da dificuldade em competir em condições de igualdade os sistemas de médio e grande porte à base de queima de combustíveis fósseis em razão do alto custo e baixo tempo útil quando comparado aos sistemas convencionais de geração, em áreas de pequenas populações dispersas, como ambientes rurais ou localidades isoladas, a queima de resíduos provenientes da agropecuária torna-se uma alternativa economicamente interessante, uma vez que estas localidades frequentemente têm dificuldades de extensão da rede elétrica tradicional e a logística de transporte de combustível são muitas vezes difíceis (GALDINO *et al*, 2000).

A Figura 5 é um demonstrativo dos principais processos de conversão energética utilizando a biomassa como insumo energético, que pode ser proveniente de: resíduos de manejo (baços, cascas, palha), biogás (resíduos sólidos, lixo, aterro e dejetos orgânicos), lenha, briquetes, carvão vegetal entre outros.

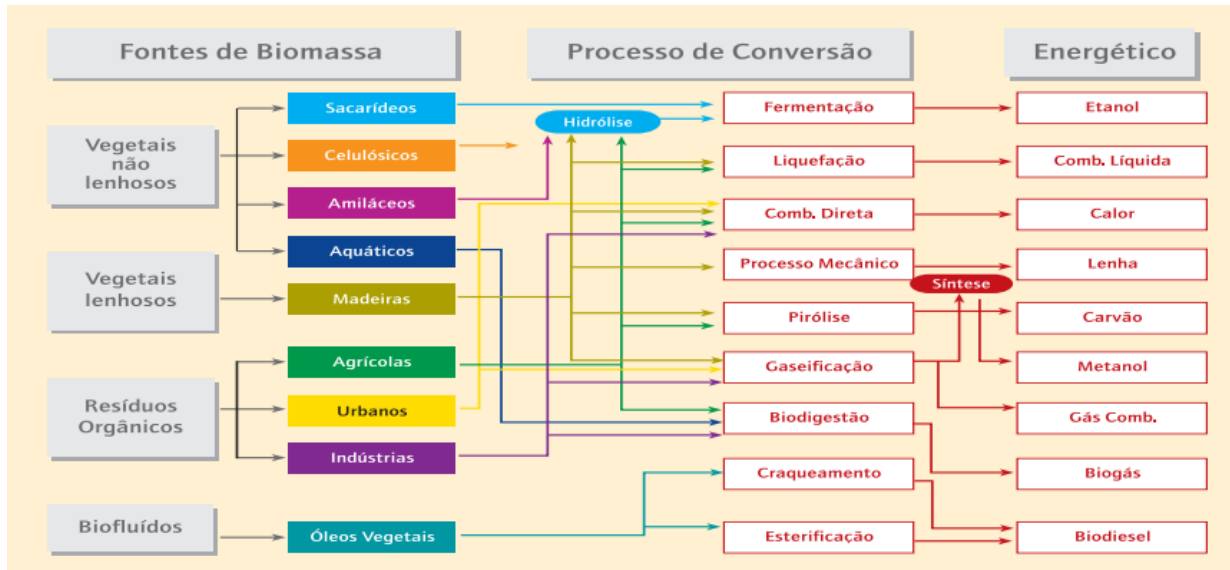


Figura 5 – Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa

Fonte: ANEEL, 2002.

Como pode ser observado na Figura 5, há várias rotas para se obter energia elétrica a partir de biomassa, sendo que todas são baseadas em converter a matéria-prima em um produto intermediário que será efetivamente utilizado em uma máquina motriz, que produzirá energia mecânica, acionando o gerador de energia elétrica (ANEEL, 2002). A energia mecânica pode ser proveniente da queima do biogás em processos de combustão controlada ou em processos de cogeração⁶ (PECORA, 2006).

A ANEEL (2002) estabelece as principais rotas tecnológicas aplicadas em processos de cogeração como sendo:

- **Ciclo a vapor com turbinas de contrapressão:** sistema de grande aceitação no mercado devido ao baixo custo comparado aos outros sistemas e com eficiência mediana. Nele, a biomassa é queimada diretamente em caldeiras e a energia térmica resultante é utilizada na produção do vapor (produto intermediário), que será usado como força motriz;
- **Ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração:** sistema de maior eficiência e que demanda maior infraestrutura quando comparado ao ciclo a vapor com turbinas de contrapressão. É feita a condensação do vapor ao final da realização do trabalho na turbina, e a energia condensada é retirada em um ponto intermediário da expansão do vapor que irá movimentar as turbinas. As

⁶ Produção de dois ou mais energéticos a partir de um único processo para geração de energia.

principais diferenças em relação à contrapressão é a existência de um condensador na exaustão da turbina, que proporciona maior flexibilidade da geração termoelétrica;

- **Ciclo combinado integrado à gaseificação da biomassa:** a biomassa é transformada em biogás por meio do processo de gaseificação⁷, matéria prima de alto poder energético. De acordo com o Plano Nacional de Energia (PNE) 2030, a maior dificuldade para a sua aplicação não é o processo básico de gaseificação, mas sim a obtenção de um equipamento capaz de produzir um gás de qualidade, com confiabilidade e segurança, adaptado às condições particulares do combustível e da operação;

Dessas três rotas derivam-se os processos de conversão mais usuais referentes à Figura 5, tais como a fermentação (da qual se obtém o etanol), a combustão direta, a pirólise (resultando no carvão vegetal), a gaseificação (cujo resultado é o gás combustível), a esterificação e, por fim, a biodigestão (de onde provém o biogás).

A fermentação, processo biológico anaeróbico, baseia-se na metabolização de açúcares presentes na matéria-prima por bactérias na ausência de oxigênio. Tal processo é bastante comum no cotidiano, como na produção de pães caseiros, sendo que um dos produtos desse processo metabólico é o etanol. No Brasil, a principal matéria-prima utilizada nesse processo é a cana-de-açúcar, que possui rendimento de 11% em fermentação com produção de até 63 L/T (CORTEZ; LARA; OLIVARES, 2008).

A pirólise⁸, também chamada de carbonização ou craqueamento térmico, é o processo que prova a quebra de moléculas por aquecimento a altas temperaturas, ou seja, consiste na queima do material até que o mesmo seja convertido em carvão vegetal. É um dos processos mais antigos de conversão de lenha em outro produto com melhor qualidade energética (ANEEL, 1996) e oferece uma rota rápida de craqueamento da estrutura polimérica da biomassa com altos rendimentos de produtos líquidos que são a fonte valiosa de produtos (GARCIA-PÈREZ, CHAALA e ROY, 2002). A pirólise, utilizando catalisadores, é um processo em desenvolvimento eficaz para melhorar a qualidade do bio-óleo por uma remoção de oxigênio, aumentando seu poder calorífico e estabilidade química já na fase de degradação térmica da biomassa (FERREIRA, 2014).

A gaseificação tem como objetivo converter a biomassa sólida em biomassa gasosa

⁷ Conversão de um combustível líquido ou sólido em um gás energético pela oxidação parcial em temperatura elevada.

⁸ Do grego *Pyro* (fogo) e *Lysis* (separação)

utilizando reações termoquímicas utilizando vapor quente e ar. Consiste em um processo mais refinado, contudo, que necessita de maior tecnologia, pois requer um combustível uniforme para atingir a operação ótima além da implementação de filtros devido aos gases altamente tóxicos, produtos do processo de conversão.

A esterificação consiste em uma reação química para obtenção de ésteres a partir da reação entre um ácido carboxílico e um álcool, sendo uma rota promissora para a obtenção de biodiesel, uma vez que possibilita a utilização de matérias ricas em ácidos graxos livres presentes em resíduos e subprodutos de processamentos industriais da biomassa (SCHROEDER, 2013).

Por fim, na biodigestão, o principal subproduto é o biogás, insumo largamente utilizado no aquecimento e iluminação residencial, além da geração de energia elétrica.

2.5.1. Biodigestão

O processo de biodigestão pode ser definido como um processo biológico natural como resultado do metabolismo de diferentes micro-organismos em um ambiente anaeróbio, cuja interação tem como objetivo promover a transformação de compostos orgânicos complexos em produtos mais simples, resultando, principalmente os gases metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) (ORRICO JÚNIOR, 2007).

De acordo com Nogueira (1986) e Magalhães (1986) o processo de biodigestão é suscetível às mudanças de estado, como temperatura e concentração de material orgânico, o que pode resultar em diferentes quantidades de produção de CH_4 e em ambientes mais ácidos. Assim, para que o processo seja eficiente, faz-se necessário o controle de algumas variáveis de estado do sistema, tais como concentração de nitrogênio, enxofre, bicarbonato, amônia e controle do pH do meio.

Além do biogás, outros subprodutos do processo de biodigestão são os biofertilizantes (MACHADO, 2013), os quais são largamente utilizados na melhoria das características químicas, físicas e biológicas do solo, além do controle de pragas e doenças (DAROLT, 2006).

2.6 GEOGRAFIA E AGROPECUÁRIA PARANAENSE

De acordo com o Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social (IPARDES), o Paraná tem área aproximada de 199.880 km² e conta atualmente com 399 municípios registrados, uma população majoritariamente urbana. É um estado que representa por volta de 6% do PIB nacional, com 10,4% da economia baseada na agropecuária, sendo visto como o celeiro do país, devido à alta produção de produtos agropecuários, sendo referência em produção de cana-de-açúcar, milho, soja, mandioca, milho e batata-inglesa, além dos rebanhos de aves, suínos e bovinos (IPARDESb, 2017).

O IPARDES subdivide o estado em 10 mesorregiões (Figura 6 e Anexo 1), representadas pela cidade mais populosa da região. A Tabela 3 traz a listagem das mesorregiões do estado, com suas respectivas cidades representantes, área total, população censitária e grau de urbanização em 2010, além do consumo de energia elétrica (E.E.) em 2016.

Tabela 3 - Dados geográficos, demográficos e políticos das mesorregiões paranaenses

Nº	Mesorregião	Cidade representante	Área total [km ²]	População censitária	Grau de urbanização [%]	Consumo de E.E. [MWh]
1	Noroeste Paranaense	Umuarama	24.759.384	676.319	83,40	1.573.195
2	Centro Ocidental Paranaense	Campo Mourão	11.937.564	334.125	80,26	762.542
3	Norte Central Paranaense	Londrina	24.553.976	2.037.183	91,63	5.214.006
4	Norte Pioneiro Paranaense	Cornélio Procópio	15.718.917	546.224	80,00	990.715
5	Centro Oriental Paranaense	Ponta Grossa	21.812.024	689.279	84,70	3.053.610
6	Oeste Paranaense	Cascavel	22.864.702	1.219.558	85,61	3.741.025
7	Sudoeste Paranaense	Francisco Beltrão	17.060.444	587.496	70,23	1.558.085
8	Centro-Sul Paranaense	Guarapuava	21.093.588	453.821	65,74	836.350
9	Sudeste Paranaense	Irati	16.941.469	404.779	58,58	904.552
10	Metropolitana de Curitiba	Curitiba	23.147.132	3.493.742	91,57	9.734.625
Total paranaense			199.880,200	10.444.526	85,33	28.368.705

Fonte: IPARDES, 2012 e IPARDESa, 2017.

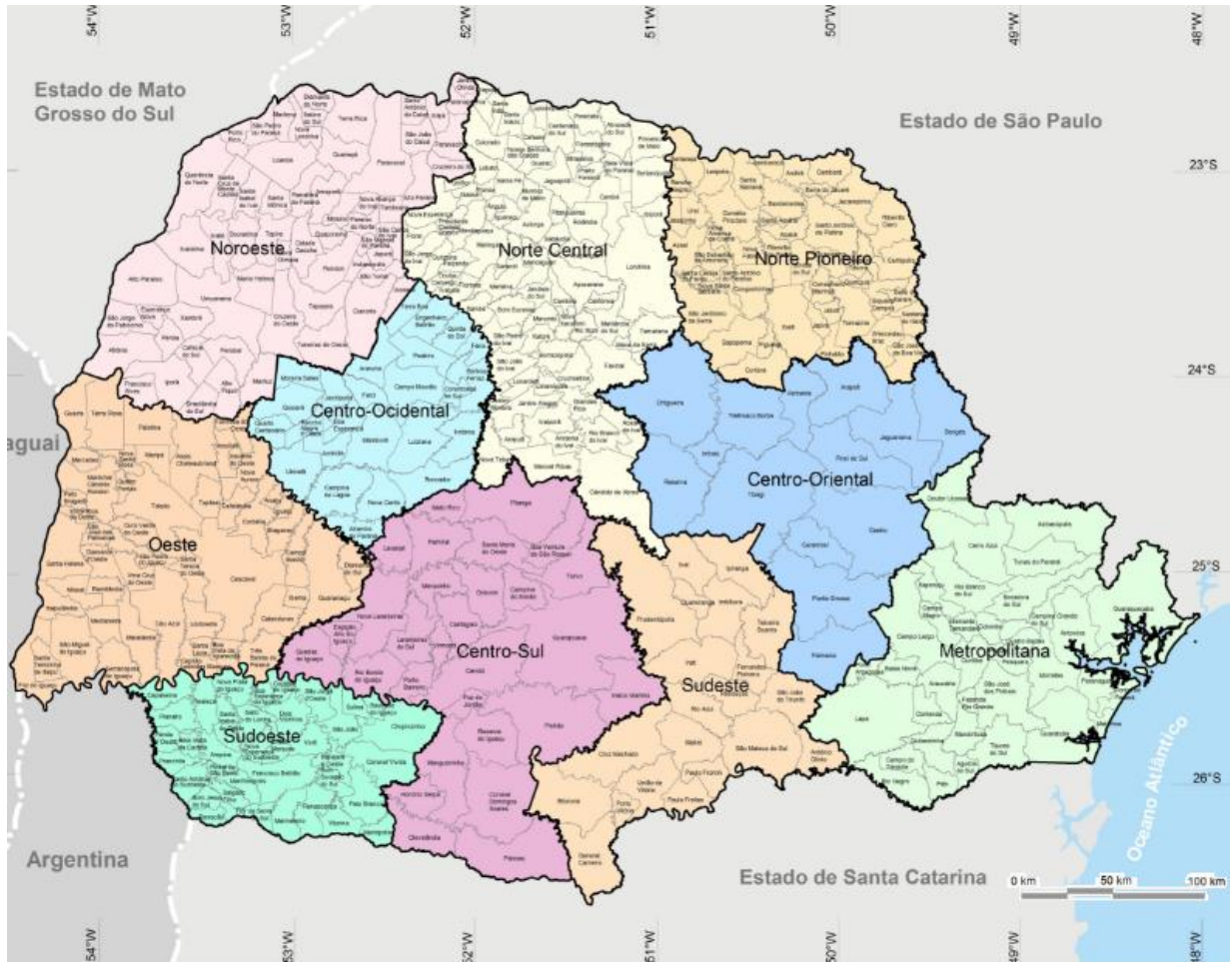


Figura 6 – Mesorregiões geográficas paranaenses

Fonte: IPARDESc, 2017.

2.6.1. Perfil agropecuário paranaense

O Paraná é um dos principais responsáveis pelo destaque brasileiro referente à produção de *commodities* e derivados da pecuária. Em 2015 foi o maior produtor de trigo, soja, milho, cevada e feijão do Brasil, sendo o quarto maior representante na cultura de cana-de-açúcar (SEAB, 2016), além de possuir o maior rebanho de suínos em 2016 (SEAB, 2017). As Tabelas 4 e 5, elaboradas a partir de um compilado de dados disponibilizados pelo IPARDES (IPARDESb, 2017) mostram, respectivamente, um resumo do perfil agrícola e pecuário paranaense, apresentando a produção bruta anual, em toneladas ou cabeças, das principais culturas e o correspondente à produção total do estado.

Tabela 4 – Principais culturas agrícolas paranaenses em números totais e relativas à produção total do estado referentes ao ano de 2016.

Cultura agrícola	Total produzido [T]	Participação relativa à produção total do estado [%]
Cana-de-açúcar	42.538.832	54,48%
Soja	17.151.020	21,96%
Milho	12.241.987	15,68%
Mandioca	2.424.487	3,10%
Trigo	1.925.740	2,47%
Outros	1.805.409	2,31%
Total	78.087.475	100,00%

Fonte: IPARDESb, 2017.

Tabela 5 – Principais culturas pecuárias paranaenses em números totais e relativos à produção total do estado referente ao ano de 2016.

Cultura pecuária	Total de cabeças	Participação relativa à produção total do estado [%]
Galináceos	335.082.396	95,03%
Bovinos	9.487.999	2,69%
Suínos	7.131.132	2,02%
Ovinos	598.264	0,17%
Equinos	297.369	0,08%
Total	352.597.160	100,00%

Fonte: IPARDESb, 2017.

Observa-se que mais de 90% da produção se concentra em cana-de-açúcar, soja e milho, enquanto que 7,88% se dividem em outras 14 culturas (arroz, banana, batata inglesa, café, feijão, fumo, laranja, mandioca, mate, palmito, tangerina, tomate, trigo e uva) (IPARDESb, 2017). Verifica-se também que, condizente com os dados apresentados na Figura 4, os principais rebanhos presentes no estado são de bovinos e suínos, com mais de 9,4 milhões e 7,1 milhões de cabeças, respectivamente (Tabela 5). A principal diferença entre os dados da Tabela 5 e da Figura 4 são referentes à avicultura, majoritária no Paraná, que sozinha representa 95,03% da produção pecuária estadual em número de cabeças, mas que não é classificada como rebanho pela SEAB/DERAL.

É importante ressaltar que as tabelas apresentadas são um resumo do perfil do estado. No desenvolvimento do trabalho serão analisados os perfis agropecuários de cada mesorregião,

individualmente, considerando as cinco culturas pecuárias mostradas na Tabela 5 (galináceos, bovinos, suínos, ovinos e equinos) e as quatro principais culturas agrícolas (relativas à produção anual).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para estimar o potencial de geração de energia elétrica a partir de diversos tipos de biomassa.

A primeira fase de análise dos dados, que precede efetivamente a utilização da metodologia de cálculo para conversão de energia química em elétrica, consiste em estabelecer quais dados serão analisados, dado grande número de culturas agropecuárias e a inviabilidade de um estudo aprofundado para cada uma destas. Assim, define-se que os rebanhos analisados são os bovinos, suínos, equinos, ovinos (com base no percentual apresentado em 2017, como mostra a Figura 4) além dos galináceos. Para a escolha das culturas agrícolas é feita uma análise histórica de produção, utilizando aquelas que apresentarem a maior média em cada mesorregião.

Após a escolha das culturas para análise, inicia-se a segunda fase, baseada⁹ na metodologia descrita por Coelho, Monteiro e Karniol (2012) no Atlas de Bioenergia do Brasil. A metodologia consiste em converter a quantidade bruta de produção, seja agrícola ou número de cabeças, em um volume útil à geração de energia.

É importante ressaltar que uma parte dos rejeitos da produção agrícola é deixada no solo para realizar solo para realizar a recomposição do mesmo sem a utilização de adubos químicos. Tal percentual não é abordado no trabalho para cálculo do potencial elétrico referente às culturas, mas são utilizadas estimativas para definir a potência útil para projetos. Além disso, a metodologia adotada desconsidera o consumo de energia da própria unidade geradora a ser empregada, uma vez que cada edificação tem as suas particularidades e o objetivo é de levantar o potencial total de geração.

3.1. RESÍDUOS VEGETAIS

Para se estimar qual o potencial elétrico de determinada cultura agrícola, é necessário

⁹ Diz-se baseada pois os autores não abrangem todas as culturas necessárias para a análise apresentada neste trabalho, assim, faz-se necessário utilizar informações complementares obtidas na literatura. Além disso, na metodologia proposta para resíduos animais os autores convertem os dados de produção para capacidade de biogás gerada, dessa forma, a metodologia foi complementada para fornecer o potencial elétrico de determinado rebanho.

saber qual o coeficiente de produção da mesma, que é o percentual de biomassa em relação ao total produzido. Também é necessário conhecer as características energéticas do subproduto, ou seja, o Poder Calorífico Inferior (PCI) da biomassa e, por fim, o rendimento médio de sistemas de pequeno porte e o tempo médio de operação destes. A potência elétrica referente aos resíduos das culturas agrícolas calcula-se a partir da Equação 1:

$$P_i = \frac{M_i \cdot k \cdot \text{PCI}_i \cdot c \cdot \eta}{t_{\text{op}}} \quad (1)$$

Onde:

P_i é o potencial estimado referente ao resíduo i , em MW/ano;

M_i é a massa bruta de determinada cultura, em $T_{\text{produção}}$;

k é o coeficiente de produção, em $T_{\text{biomassa}}/T_{\text{produção}}$;

PCI_i é o poder calorífico inferior da biomassa, em MJ/kg^{10}

c é o coeficiente de conversão de MJ para kWh, e corresponde a 0,277.

η é o rendimento do sistema, cujo valor adotado foi de 15%, para sistemas de baixo rendimento termodinâmico, compostos de caldeira de 20 bar¹¹ e turbina de condensador atmosférico;

t_{op} é número de horas que deseja-se que o sistema opere, com valor estipulado em 8.322 horas (equivalente a 95% do ano);

Consideram-se as seguintes culturas agrícolas para a análise: cana-de-açúcar, feijão, mandioca, milho, soja e trigo. A Tabela 6 mostra as 10 mesorregiões paranaenses e as quatro principais culturas agrícolas regionais. Consideram-se as maiores produções médias relativo ao total produzido entre os anos de 2006 e 2016.

¹⁰ O PCI pode ser informado também em kcal/kg. Para isso utiliza-se a constante $c = 0,00116\bar{2}$. 1 kcal é equivalente a 4,184 joules.

¹¹ O bar é uma unidade de pressão e equivale a 0,987 atm

Tabela 6 – Principais culturas agrícolas de cada mesorregião do Paraná referente aos anos de 2006 a 2016.

Mesorregião	Cultura	Produção - 2006 a 2016 [T]	Percentual total [%]
01 - Noroeste paranaense	Cana-de-açúcar		85
	Mandioca		8
	Milho		3
	Soja		3
	Total	211.133.921	100
02 – Centro ocidental paranaense	Cana-de-açúcar		42
	Soja		27
	Milho		22
	Mandioca		5
	Total	56.247.314	100
03 – Norte central paranaense	Cana-de-açúcar		69
	Milho		13
	Soja		12
	Trigo		3
	Total	166.398.975	100
04 – Norte pioneiro paranaense	Cana-de-açúcar		72
	Milho		12
	Soja		11
	Trigo		3
	Total	101.731.592	100
05 – Centro oriental paranaense	Soja		41
	Milho		34
	Trigo		12
	Feijão		4
	Total	28.530.392	100
06 – Oeste paranaense	Milho		40
	Soja		34
	Cana-de-açúcar		11
	Mandioca		9
	Total	77.446.471	100
07 – Sudoeste paranaense	Soja		31
	Milho		30
	Cana-de-açúcar		20
	Trigo		9
	Total	33.006.508	100
08 – Centro-sul paranaense	Soja		40
	Milho		36
	Trigo		7
	Cana-de-açúcar		6
	Total	31.508.836	100
09 – Sudeste paranaense	Milho		37
	Soja		32
	Feijão		7
	Batata inglesa*		6
	Total	20.125.217	100
10 – Metropolitana de Curitiba	Milho		36
	Cana-de-açúcar		24
	Soja		15
	Batata inglesa*		9
	Total	22.273.860	100

Fonte: Os autores, com base em (IPARDES, 2007), (IPARDES, 2008), (IPARDES, 2009), (IPARDES, 2011), (IPARDES, 2012), (IPARDES, 2013), (IPARDES, 2015), (IPARDES, 2016) e (IPARDESd, 2017).

* A cultura de batata-inglesa foi desconsiderada da análise por não ser energeticamente expressiva e não ter sido encontrados dados de rendimento de produção para a mesma.

3.1.1. Dados energéticos das culturas

Os dados energéticos das culturas agrícolas apresentadas são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 – Dados energéticos das culturas agrícolas paranaenses

Cultura	Resíduo	PCI [MJ/kg]	k	P [MW/T _{produção} ·ano]
Cana-de-açúcar ¹²	Bagaço	65,5 ¹³	0,54 ¹⁴	17,7 x 10 ⁻⁵
Feijão	Palha	14,0 ¹⁵	1,16 ¹⁵	8,13 x 10 ⁻⁵
Mandioca	Ramas	16,0 ¹⁵	0,65 ¹⁵	5,21 x 10 ⁻⁵
Milho	Colmo, folha e palha	17,7 ¹⁵	1,96 ¹⁵	17,4 x 10 ⁻⁵
Soja	Palha	14,6 ¹⁵	2,12 ¹⁵	15,5 x 10 ⁻⁵
Trigo	Palha	12,4 ¹⁵	1,5 ¹⁵	9,31 x 10 ⁻⁵

Fonte: Em notas de rodapé.

Tomando como exemplo a produção de cana-de-açúcar na mesorregião noroeste em 2015: foi produzido um total de 8.992.343 toneladas. Assim, o potencial estimado conforme a Equação 1 é de:

$$P_{cana} = \frac{8992343 \cdot 0,54 \cdot 65,5 \cdot 0,15}{3,60 \cdot 8322} = 1,59 \text{ GW}$$

3.2. RESÍDUOS LÍQUIDOS ANIMAIS

Para se estimar o potencial elétrico de um tipo de rebanho considera-se que será queimado o metano presente nas fezes. Dessa forma, é necessário conhecer a quantidade média de esterco proveniente de um indivíduo, a quantidade de biogás possível de se obter das fezes,

¹² Para o cálculo de potencial de cana-de-açúcar, não utilizou-se a metodologia apresentada por Coelho, Monteiro e Karniol (2012), optando-se por utilizar a Equação 1 para cálculo de potencial elétrico da cultura.

¹³ (OLIVEIRA, 2014).

¹⁴ (SOUZA, SORDI e OLIVA, 2002).

¹⁵ (EPE, 2014).

a concentração de metano no biogás e o rendimento do sistema para cada rebanho. Na metodologia de Coelho, Monteiro e Karniol (2012) somente é feita a estimativa da quantidade de metano obtida para cada cultura, dessa forma, fez-se complementá-la para que atendesse os objetivos desse trabalho. Assim, a potência elétrica disponível para os resíduos de uma determinada cultura pecuária é calculada de acordo com a Equação 2.

$$P_i = \frac{n \cdot N \cdot E_t \cdot P_b \cdot C_{CH_4} \cdot PCI_{CH_4} \cdot c \cdot \eta}{\rho \cdot t_{op}} \quad (2)$$

Onde:

P_i é o potencial estimado referente ao resíduo i , em MW;

n é o número de dias operação da unidade geradora, estipulado em 365 dias/ano;

N é o número de cabeças da cultura;

E_t é o esterco gerado por 1 indivíduo e processado na unidade geradora, dado em $kg_{esterco}/dia$;

P_b é o rendimento de biogás em relação ao esterco, dado em $kg_{biogás}/kg_{esterco}$;

C_{CH_4} é a concentração de metano no biogás, dado em $kg_{CH_4}/kg_{biogás}$;

PCI_{CH_4} é o poder calorífico inferior do metano, sendo este igual a $8.550 \text{ kcal}/m^3$;

c é o coeficiente de conversão de kcal para MWh, e corresponde a $1,163 \times 10^{-6}$;

η é o rendimento do sistema, cujo valor adotado foi de 25%, considerando microturbinas para sistemas de pequeno porte (PECORA, 2006);

ρ é o volume específico do metano, sendo este igual a $0,670 \text{ kg}_{CH_4}/m^3_{CH_4}$;

t_{op} é número de horas que deseja-se que o sistema opere, com valor estipulado em 8.322 horas (equivalente a 95% do ano);

No caso do Paraná, consideram-se os seguintes rebanhos: bovinos, suínos, ovinos, equinos e galináceos (compostos pela soma de galinhas, galos, frangos, frangas e pintos) devido ao baixo número de cabeças dos demais rebanhos.

Coelho, Monteiro e Karniol (2012) não abrangem em seu trabalho o rebanho de ovinos. O valor de rendimento de biogás em relação ao esterco encontrado na literatura é fornecido em $[m^3_{biogás}/100kg_{esterco}]$. Dessa forma, para o cálculo de potência elétrica utilizando o esterco de ovinos, utiliza-se a Equação 3.

$$P_{ovinos} = \frac{n \cdot N \cdot E_t \cdot P_b \cdot C_{CH_4} \cdot PCI_{CH_4} \cdot c \cdot \eta}{100 \cdot t_{op}} \quad (3)$$

3.2.1. Dados energéticos das culturas

Os dados energéticos das culturas pecuárias apresentadas são mostrados na Tabela 8. Foi encontrada divergência na literatura entre os valores de contração de metano no biogás no esterco dos rebanhos, dessa forma foi utilizado um valor médio. O valor de E_t para os ovinos também se trata de um valor médio, uma vez que há grande diferença entre as espécies do rebanho.

Tabela 8 – Dados energéticos dos rebanhos pecuários paranaenses

Rebanho	E_t	P_b	C_{CH_4}	P [MW/cabeça.ano]
Bovinos	2,25 ¹⁶	0,037 ¹⁷	55% ¹⁶	0,75 x 10 ⁻⁶
Suínos	10 ¹⁶	0,062 ¹⁷	60% ¹⁶	6,05 x 10 ⁻⁶
Ovinos	4 ¹⁸	5,0* ¹⁹	50% ¹⁶	1,09 x 10 ⁻⁶
Equinos	12 ¹⁶	0,048 ¹⁷	50% ¹⁶	4,69 x 10 ⁻⁶
Galináceos	0,18 ¹⁶	0,055 ¹⁷	50% ¹⁶	0,81 x 10 ⁻⁶

Fonte: Em notas de rodapé.

*Valor em [m³_{biogás}/100kg_{esterco}].

Observa-se que os valores de concentração de metano no biogás não apresentam grandes divergências para os diversos rebanhos, diferentemente do rendimento P_b . Cada quilograma de dejetos suíno pode gerar até 67% mais biogás em relação aos dejetos bovinos, implicando em um melhor rendimento energético por cabeça.

Dessa forma, tomando como exemplo os suínos na mesorregião 06 no ano de 2016, o rebanho total foi de 4.534.707 cabeças. Assim, o potencial estimado aplicando-se a Equação 2 referente ao rebanho suíno nesse ano é de:

$$P_{suínos} = \frac{30.4534707 \cdot 10 \cdot 0,062 \cdot 0,6 \cdot 8550 \cdot 0,25}{0,67 \cdot 860420 \cdot 8322} = 22,5 \text{ MW.}$$

¹⁶ (SANTOS e JUNIOR, 2013).

¹⁷ (COELHO, MONTEIRO e KARNIOL, 2012)

¹⁸ (ALVES e PINHEIRO, 2007)

¹⁹ (SOUZA e LAGE FILHO, 2013)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com as equações para conversão de energia apresentadas no capítulo 3, é possível estimar o potencial elétrico por mesorregião paranaense, utilizando dados de produção entre 2006 e 2016 fornecidos pelo IPARDES, com exceção dos anos de 2009 e 2013 (IPARDES, 2007), (IPARDES, 2008), (IPARDES, 2009), (IPARDES, 2011), (IPARDES, 2012), (IPARDES, 2013), (IPARDES, 2015), (IPARDES, 2016) e (IPARDESd, 2017).

Os dados levantados das referências acima são analisados utilizando o software Microsoft Excel (2013) e os resultados obtidos são apresentados a seguir em gráficos de potencial elétrico das principais culturas agropecuárias no tempo.

Na análise dos dados coletados, aplicou-se os métodos de interpolação de primeiro, segundo e terceiro grau a fim de realizar a projeção do potencial elétrico das mesorregiões. Devido às grandes variações de produção entre anos consecutivos, as curvas obtidas apresentam erros muito expressivos. Por orientação do professor José Carlos Pereira Coninck²⁰ (UTFPR) obtida durante reunião presencial para esclarecimentos sobre análises estatísticas, fez-se uma análise de séries temporais de Fourier, que consiste em encontrar padrões de periodicidade nos dados, possível somente excluindo-se *outliers*, encontrando-se uma periodicidade de quatro anos.

De acordo com Coninck, devido à falta de memória na série analisada (amostra de produção agropecuária de maior período) apresenta somente dois padrões periódicos de Fourier, e segundo o teste de Durbin-Watson, a hipótese nula de autocorrelação não possibilita nenhum ajuste do tipo SARIMA, ARIMA, ARMA, AR ou MA, necessários para um *forecast* ($DW = 2,6829$ e $p\text{-valor} = 0,7533$). Dessa forma, concluiu-se que mesmo uma análise de redes neurais NNAR (1,1) não consegue ter uma previsão adequada devido ao problema de baixa amostragem.

Adotaram-se quatro parâmetros para análise dos dados: média relativa, na qual exclui-se os *outliers*; média absoluta, na qual considera-se todos os dados obtidos; taxa de

²⁰ Possui bacharelado em Estatística e Física pela Universidade Federal do Paraná, mestrado em Física pela Universidade Federal do Paraná (2002) e doutorado em Física pela Universidade Federal do Paraná (2006) na área de Dinâmica Não Linear e Caos aplicado na interação não linear de ondas eletromagnéticas interagentes dissipativas em plasmas geofísicos espaciais (Wistler-Stokes e Anti-Stokes). Participou do programa de pós doutorado em Redes Neurais como bolsista do CNPq. Atua na área de física-computacional de alto desempenho e física estatística aplicados a redes neurais. Tem experiência na área de Física, com ênfase em Métodos Matemáticos da Física e na área de Estatística com ênfase em Análise de Séries Temporais e Processos Estocásticos. (Texto informado pelo autor).

crescimento α^{21} , utilizada para estimar tendências de crescimento ou decréscimo do potencial elétrico; e potência útil para projetos, na qual considera-se perdas de resíduos deixados no campo e um coeficiente de segurança do sistema.

Ressalta-se que, embora se tenha considerado as perdas no campo para estimar a potência útil para projetos de termoelétricas a partir da queima de biomassa agropecuária, os gráficos de potencial de geração de energia elétrica consideram o total de resíduos gerados, a fim de se estimar o potencial total referente a estas.

O gráfico da Figura 7 mostra o perfil do potencial elétrico da mesorregião geográfica noroeste paranaense, referente aos anos 2006 a 2016.

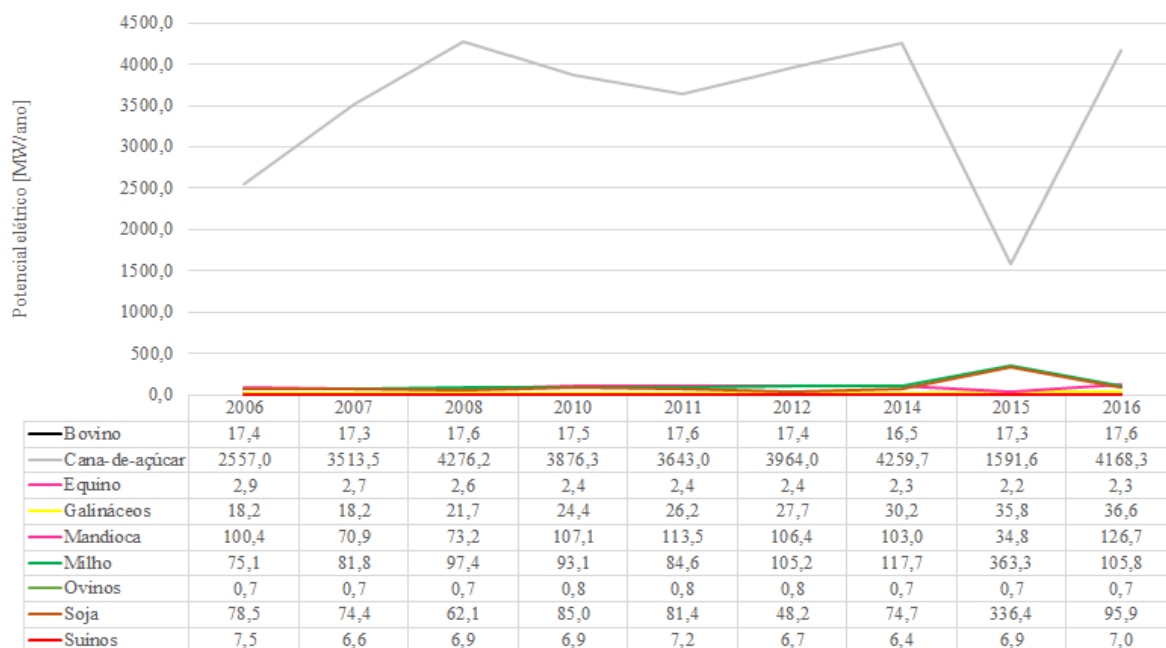


Figura 7 – Potencial elétrico das principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica noroeste paranaense entre os anos de 2006 e 2016

Fonte: Os autores, com base em (IPARDES, 2007), (IPARDES, 2008), (IPARDES, 2009), (IPARDES, 2011), (IPARDES, 2012), (IPARDES, 2013), (IPARDES, 2015), (IPARDES, 2016) e (IPARDESd, 2017).

Observa-se que na mesorregião noroeste há uma grande predominância da cultura de

²¹ O conceito de α adotado foi a razão entre o coeficiente angular da reta de interpolação linear dos dados (excluindo-se os picos e vales), em MW/ano, e o potencial médio relativo, em MW, tendo como resultado um percentual de crescimento. Assim, adotou-se 7 possíveis resultados para α : constante ($-0,4\% \leq \alpha \leq 0,4\%$); decréscimo moderado ($-7\% \leq \alpha < -0,4\%$); decréscimo acentuado ($\alpha < -7\%$); e crescimento moderado e crescimento acentuado, com os mesmos limites (positivos) dos adotados para decréscimo.

cana-de-açúcar em todo o período analisado. Destaca-se o grande potencial elétrico da cultura, chegando a quase 4,3 GW em 2008 e 2014, o que equivale a 6 vezes a potência nominal da usina Itaipu Binacional. A Tabela 9 mostra uma análise da média relativa, absoluta, taxa de crescimento α e potência útil para projetos.

Analisando os dados da Tabela 9 observa-se o elevado potencial elétrico total da região, com média relativa de 4,11 GW, além de uma projeção positiva principalmente para as culturas de cana-de-açúcar, milho e soja, cuja potência estável é aproximadamente 4 GW. É relevante ressaltar que os picos e vales dos dados foram desconsiderados para a determinação da taxa de crescimento apresentada, utilizada para determinar uma tendência de crescimento ou decréscimo da produção da cultura. Os dejetos animais somam quase 54 MW de potencial elétrico na região, cujo maior participante é referente aos dejetos bovinos, com 17,35 MW.

Quanto à potência útil para projetos destaca-se a possibilidade de implementação de um sistema com potência nominal de 3 GW a base de bagaço de cana-de-açúcar, além de sistemas de 30 MW para resíduos de milho e mandioca, 20 MW para resíduos de soja e de aproximadamente 12 MW para resíduos bovinos. A potência útil referente à cultura de galináceos foi desconsiderada uma vez que as fezes desta ainda são de difícil extração.

Tabela 9 – Valores de média relativa, média absoluta, coeficiente de crescimento do potencial elétrico e potência útil para projetos referente às principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica noroeste paranaense entre os anos de 2006 e 2016.

Cultura agropecuária	\bar{X}_{rel} [MW]	\bar{X}_{abs} [MW]	α	Potência útil para projetos [MW]
Bovinos	17,35	17,35	Constante	12
Equinos	2,47	2,47	Constante	-
Galináceos	26,55	26,55	Crescimento moderado	-
Ovinos	0,72	0,72	Constante	-
Suínos	6,90	6,90	Decréscimo moderado	3
Cana-de-açúcar	3.782,24	3.538,80	Crescimento acentuado	3.000
Mandioca	100,14	92,87	Crescimento moderado	30
Milho	95,08	124,88	Crescimento moderado	30
Soja	75,01	104,05	Crescimento moderado	20
Total	4.106,45	3.914,63	-	3.085

Fonte: Os autores, com base em (IPARDES, 2007), (IPARDES, 2008), (IPARDES, 2009), (IPARDES, 2011), (IPARDES, 2012), (IPARDES, 2013), (IPARDES, 2015), (IPARDES, 2016) e (IPARDESd, 2017).

O gráfico da Figura 8 mostra o perfil elétrico da mesorregião geográfica centro ocidental paranaense referente aos anos 2006 a 2016.

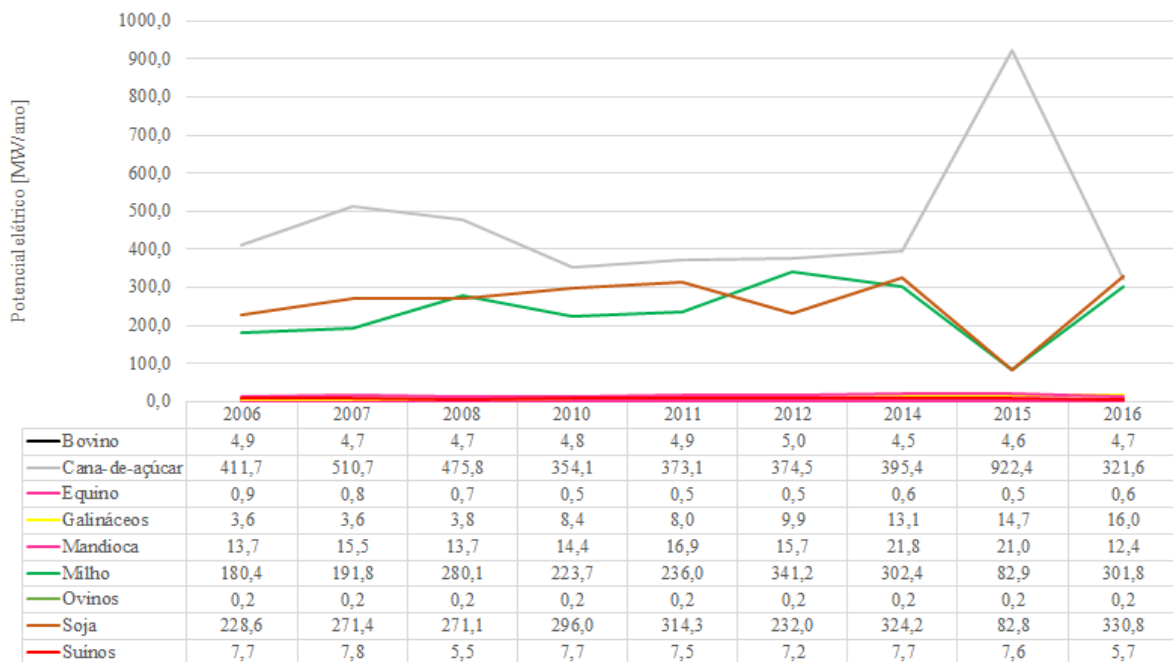


Figura 8 – Potencial elétrico das principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica centro ocidental paranaense entre os anos de 2006 e 2016

Fonte: Os autores, com base em (IPARDES, 2007), (IPARDES, 2008), (IPARDES, 2009), (IPARDES, 2011), (IPARDES, 2012), (IPARDES, 2013), (IPARDES, 2015), (IPARDES, 2016) e (IPARDESd, 2017).

Nota-se que na mesorregião centro ocidental há uma divisão entre duas faixas de potencial elétrico. A primeira, composta por cana-de-açúcar, milho e soja, corresponde a 96% do potencial teórico da mesorregião (analisando-se a média no período avaliado), e a segunda, composta por bovinos, equinos, galináceos, ovinos, suínos e mandioca. Destaca-se que, em 2015, houve produção recorde de cana-de-açúcar na região, com mais de 5 milhões de toneladas colhidas, o que acarretou em um potencial maior que 900 MW referentes à cultura. A Tabela 10 fornece uma análise estatística dos dados da região.

Tabela 10 – Valores de média relativa, média absoluta, coeficiente de crescimento do potencial elétrico e potência útil para projetos referente às principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica centro ocidental paranaense entre os anos de 2006 e 2016.

Cultura agropecuária	\bar{X}_{rel} [MW]	\bar{X}_{abs} [MW]	α	Potência útil para projetos [MW]
Bovinos	4,78	4,78	Constante	4
Equinos	0,63	0,63	Decréscimo moderado	-
Galináceos	9,02	9,02	Crescimento acentuado	-
Ovinos	0,18	0,18	Constante	-
Suínos	7,60	7,15	Constante	6
Cana-de-açúcar	402,11	459,92	Decréscimo moderado	200
Mandioca	16,12	16,12	Crescimento moderado	5
Milho	239,35	237,80	Crescimento acentuado	75
Soja	290,90	261,24	Crescimento moderado	70
Total	970,69	996,84	-	360

Fonte: Os autores, com base em (IPARDES, 2007), (IPARDES, 2008), (IPARDES, 2009), (IPARDES, 2011), (IPARDES, 2012), (IPARDES, 2013), (IPARDES, 2015), (IPARDES, 2016) e (IPARDESd, 2017).

Observa-se o elevado potencial elétrico total da região, com média relativa de 970,7 MW, além de uma projeção positiva principalmente para as culturas de milho e galináceos, cuja taxa de crescimento foi maior que 7% ao ano. A potência estável das culturas com perspectiva de crescimento excede os 550 MW. É notável também o potencial referente à cana-de-açúcar de aproximadamente 400 MW. As culturas pecuárias, em geral, não apresentaram boas perspectivas de crescimento, com exceção dos galináceos. O potencial destes somou 22 MW/ano.

Referente à potência útil para projetos destaca-se a possibilidade de implementação de um sistema com potência nominal de 200 MW a base de bagaço de cana-de-açúcar, 75 MW para resíduos de milho, 70 MW para resíduos de soja e 6 MW para resíduos de suínos. A mesorregião possui uma potência útil para projetos total de 360 MW.

O gráfico da Figura 9 mostra o perfil do potencial elétrico da mesorregião geográfica norte central paranaense, referente aos anos 2006 a 2016.

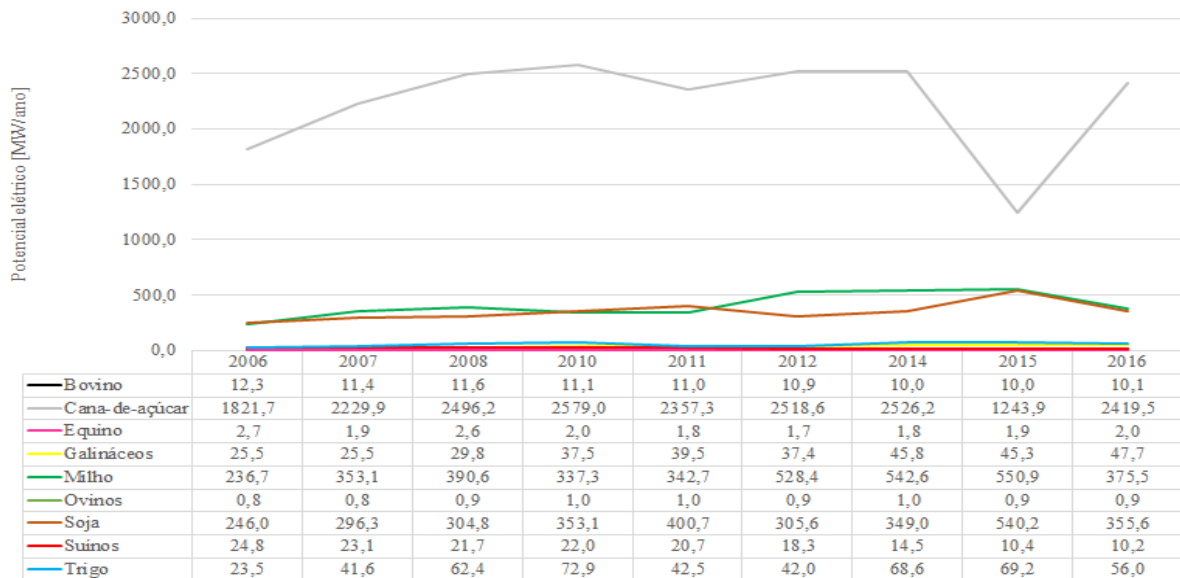


Figura 9 – Potencial elétrico das principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica norte central paranaense entre os anos de 2006 e 2016

Fonte: Os autores, com base em (IPARDES, 2007), (IPARDES, 2008), (IPARDES, 2009), (IPARDES, 2011), (IPARDES, 2012), (IPARDES, 2013), (IPARDES, 2015), (IPARDES, 2016) e (IPARDESd, 2017).

Observa-se que na mesorregião norte central, semelhante à mesorregião noroeste, há uma predominância referente à cultura de cana-de-açúcar, com potencial superior a 2,4 GW nos anos de 2008, 2010, 2012, 2014 e 2016. Concomitante a isso, alternativas interessantes para a região são o milho, a soja, trigo e galináceos.

Analisando a Tabela 11 é possível verificar o elevado potencial elétrico total da região, com média relativa de 3,23 GW, em maior parte relacionada às culturas de cana-de-açúcar (2369 MW), milho (410 MW) e soja (329 MW), somando as três uma potência elétrica superior a 3,1 GW. Os dejetos animais somam um potencial estimado próximo a 70 MW, com destaque para a cultura de galináceos, com 37 MW.

Referente à potência útil para projetos destaca-se a possibilidade de implementação de um sistema com potência nominal de aproximadamente 1,9 GW a base de bagaço de cana-de-açúcar, 130 MW para resíduos de milho, 80 MW para resíduos de soja e 20 MW para resíduos de trigo. A mesorregião possui uma potência útil para projetos total de 2,1 GW.

Tabela 11 – Valores de média relativa, média absoluta, coeficiente de crescimento do potencial elétrico e potência útil para projetos referente às principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica norte central paranaense entre os anos de 2006 e 2016.

Cultura agropecuária	\bar{X}_{rel} [MW]	\bar{X}_{abs} [MW]	α	Potência útil para projetos [MW]
Bovinos	10,92	10,92	Decréscimo moderado	5
Equinos	2,00	2,05	Decréscimo moderado	-
Galináceos	37,11	37,11	Crescimento acentuado	-
Ovinos	0,92	0,92	Crescimento moderado	-
Suínos	18,42	18,42	Decréscimo acentuado	-
Cana-de-açúcar	2368,54	2243,57	Crescimento moderado	1.895
Milho	410,27	406,41	Constante	130
Soja	329,36	350,15	Crescimento moderado	80
Trigo	53,21	53,21	Crescimento moderado	20
Total	3230,75	3122,76	-	2.130

Fonte: Os autores, com base em (IPARDES, 2007), (IPARDES, 2008), (IPARDES, 2009), (IPARDES, 2011), (IPARDES, 2012), (IPARDES, 2013), (IPARDES, 2015), (IPARDES, 2016) e (IPARDESd, 2017).

O gráfico da Figura 10 mostra o perfil do potencial elétrico da mesorregião geográfica norte pioneiro paranaense, referente aos anos 2006 a 2016. Semelhante às mesorregiões noroeste e norte central, há predomínio do potencial de cana-de-açúcar.

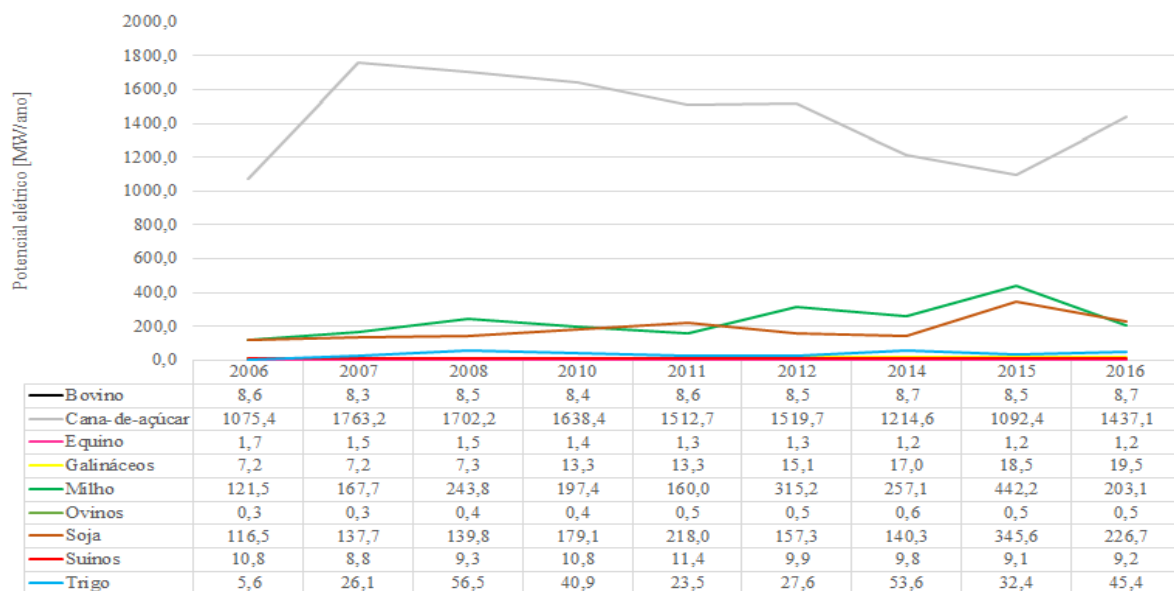


Figura 10 – Potencial elétrico das principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica norte pioneiro paranaense entre os anos de 2006 e 2016

Fonte: Os autores, com base em (IPARDES, 2007), (IPARDES, 2008), (IPARDES, 2009), (IPARDES, 2011), (IPARDES, 2012), (IPARDES, 2013), (IPARDES, 2015), (IPARDES, 2016) e (IPARDESd, 2017).

A Tabela 12 mostra os resultados da análise estatística aplicadas nos dados da região. A mesorregião norte pioneiro também é muito rica em termos energéticos, com um potencial estável total de 1,95 GW, com destaque para a cana-de-açúcar (1,49 GW), além do milho (234 MW) e soja (164 MW). Os gráficos de produção de milho e trigo se mostraram bastante interessantes, pois as séries temporais de Fourier foram de períodos curtos, intercalando picos e vales a cada dois anos. Os rebanhos somam cerca de 33 MW de potência estável, sendo 39,5% referente aos galináceos, que apresentam perspectiva de crescimento acentuado.

Referente à potência útil para projetos destaca-se a possibilidade de implementação de um sistema com potência nominal de 740 MW a base de bagaço de cana-de-açúcar, 75 MW para resíduos de milho, 40 MW para resíduos de soja, 14 MW para resíduos de trigo e 6 MW para resíduos de bovinos. A mesorregião possui uma potência útil para projetos total de 880 MW.

Tabela 12 – Valores de média relativa, média absoluta, coeficiente de crescimento do potencial elétrico e potência útil para projetos referente às principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica norte pioneiro paranaense entre os anos de 2006 e 2016.

Cultura agropecuária	\bar{X}_{rel} [MW]	\bar{X}_{abs} [MW]	α	Potência útil para projetos [MW]
Bovinos	8,54	8,54	Constante	6
Equinos	1,33	1,38	Decréscimo moderado	-
Galináceos	13,17	13,17	Crescimento acentuado	-
Ovinos	0,45	0,45	Crescimento moderado	-
Suínos	9,90	9,90	Decréscimo moderado	5
Cana-de-açúcar	1485,04	1439,53	Decréscimo moderado	740
Milho	234,23	234,23	Crescimento acentuado	75
Soja	164,42	184,55	Crescimento moderado	40
Trigo	34,62	34,62	Crescimento moderado	14
Total	1.951,70	1.926,37	-	880

Fonte: Os autores, com base em (IPARDES, 2007), (IPARDES, 2008), (IPARDES, 2009), (IPARDES, 2011), (IPARDES, 2012), (IPARDES, 2013), (IPARDES, 2015), (IPARDES, 2016) e (IPARDESd, 2017).

O gráfico da Figura 11 mostra o perfil do potencial elétrico da mesorregião geográfica centro oriental paranaense, referente aos anos 2006 a 2016. Diferente de todas as regiões anteriores, a cana-de-açúcar não aparece em destaque nesta mesorregião que é representada pela cidade de Ponta Grossa. As maiores contribuições da mesorregião são de milho, soja e

trigo. A Tabela 13 informa os resultados da análise estatística realizada para a mesorregião centro oriental.

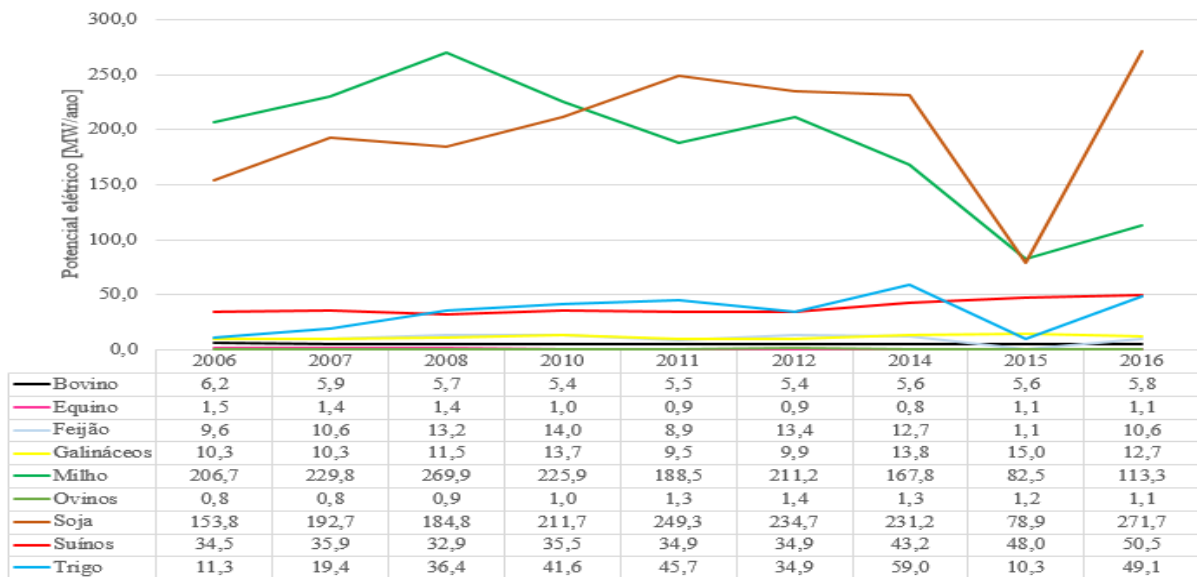


Figura 11 – Potencial elétrico das principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica centro oriental paranaense entre os anos de 2006 e 2016

Fonte: Os autores, com base em (IPARDES, 2007), (IPARDES, 2008), (IPARDES, 2009), (IPARDES, 2011), (IPARDES, 2012), (IPARDES, 2013), (IPARDES, 2015), (IPARDES, 2016) e (IPARDESd, 2017).

Tabela 13 – Valores de média relativa, média absoluta, coeficiente de crescimento do potencial elétrico e potência útil para projetos referente às principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica centro oriental paranaense entre os anos de 2006 e 2016.

Cultura agropecuária	\bar{X}_{rel} [MW]	\bar{X}_{abs} [MW]	α	Potência útil para projetos [MW]
Bovinos	5,68	5,68	Constante	4
Equinos	1,05	1,13	Decréscimo moderado	-
Galináceos	11,86	11,86	Crescimento moderado	-
Ovinos	1,07	1,07	Crescimento moderado	-
Suínos	38,92	38,92	Crescimento moderado	30
Feijão	12,01	10,46	Decréscimo moderado	2
Milho	201,63	188,39	Decréscimo acentuado	8
Soja	200,97	200,97	Crescimento moderado	50
Trigo	37,49	34,18	Crescimento acentuado	16
Total	510,68	492,66	-	100

Fonte: Os autores, com base em (IPARDES, 2007), (IPARDES, 2008), (IPARDES, 2009), (IPARDES, 2011), (IPARDES, 2012), (IPARDES, 2013), (IPARDES, 2015), (IPARDES, 2016) e (IPARDESd, 2017).

Observa-se que as culturas mais expressivas da região são milho, soja e trigo, com médias estáveis de 201,6 MW, 200,9 MW e 37,5 MW, respectivamente, somando as três mais de 440 MW. O feijão, pela primeira vez, apareceu como destaque agrícola, com um potencial estável de aproximadamente 12 MW e perspectiva de crescimento na mesorregião, a qual apresenta um potencial elétrico total estimado superior a 510 MW. Os rebanhos pecuários somaram cerca de 58,6 MW de potência estável, com destaque para a cultura de suínos (38,9 MW) com perspectiva de crescimento.

Referente à potência útil para projetos destaca-se a possibilidade de implementação de um sistema com potência nominal de 50 MW a base de resíduos de soja, 30 MW para resíduos de suínos, 16 MW para resíduos de trigo, 8 MW de resíduos de milho, 2 MW de resíduos de feijão e 4 MW para resíduos de bovinos. A mesorregião possui uma potência útil para projetos total de 100 MW.

O gráfico da Figura 12 mostra o perfil do potencial elétrico da mesorregião geográfica oeste paranaense, referente aos anos 2006 a 2016, que se comporta diferente das demais mesorregiões, uma vez que o potencial de cana-de-açúcar apresenta valores discretos em quase todo o período, com um grande pico em 2015 que ultrapassou 1 GW de potencial elétrico. Na Tabela 14 é possível verificar os resultados da análise estatística da mesorregião oeste paranaense.

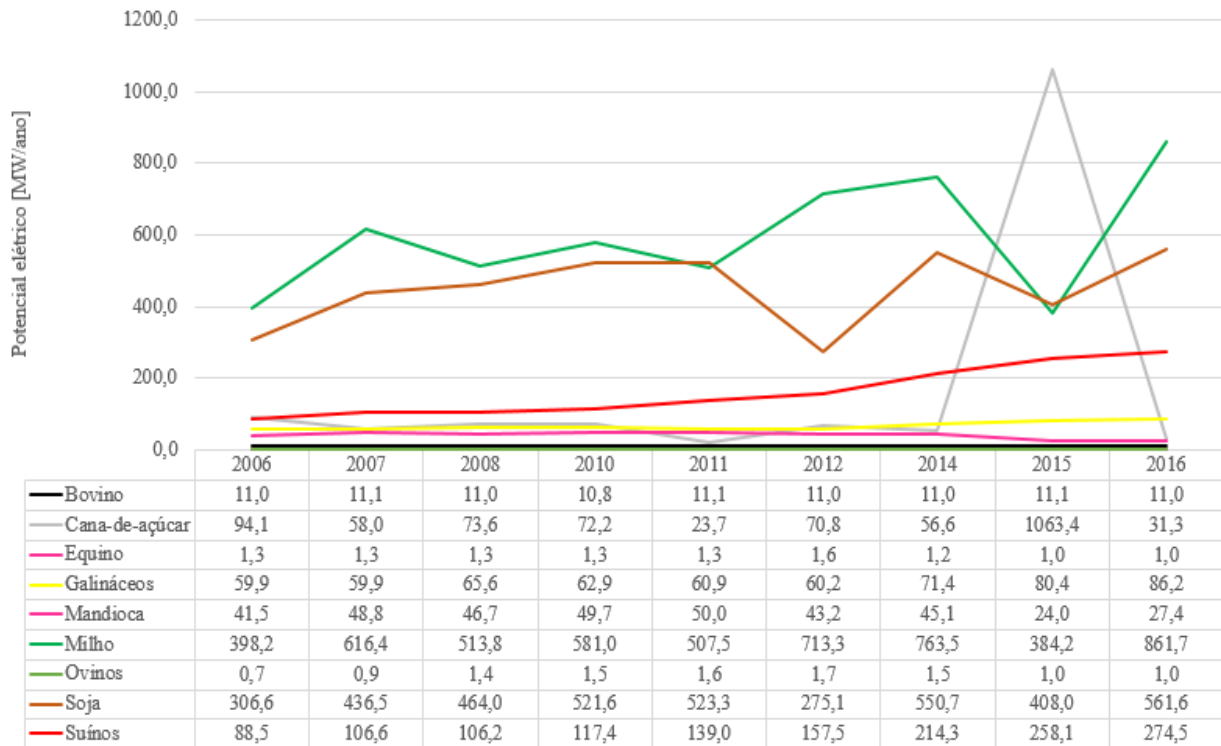


Figura 12 – Potencial elétrico das principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica oeste paranaense entre os anos de 2006 e 2016

Fonte: Os autores, com base em (IPARDES, 2007), (IPARDES, 2008), (IPARDES, 2009), (IPARDES, 2011), (IPARDES, 2012), (IPARDES, 2013), (IPARDES, 2015), (IPARDES, 2016) e (IPARDESd, 2017).

A mesorregião oeste paranaense apresentou os resultados mais distintos das demais analisadas até o momento, com maior participação das culturas pecuárias, que somam um potencial estável maior que 240 MW com perspectiva de crescimento moderado para galináceos e ovinos e crescimento acentuado para o rebanho de suínos. A mesorregião oeste possui o maior rebanho de suínos do estado, o que implica em um elevado potencial desta cultura, superior a 160 MW.

As culturas agrícolas apresentam padrões distintos daqueles obtidos anteriormente, principalmente em relação à cana-de-açúcar, com uma perspectiva de decréscimo acentuado e um potencial estável de cerca de 60 MW, semelhante à cultura de mandioca (44 MW). Diferentemente, os resíduos provenientes do milho e da soja apresentaram grandes potenciais estáveis e com perspectiva de crescimento acentuado, tendo a mesorregião oeste um potencial elétrico estável superior a 1,4 GW. No entanto, observa-se que somente a cana-de-açúcar, em 2015, apresentou um potencial de 1,06 GW, o que pode ser uma alternativa interessante.

Referente à potência útil para projetos destaca-se a possibilidade de implementação de

um sistema com potência nominal de 200 MW a base de resíduos de milho, 130 MW de resíduos de suínos e 110 MW para resíduos de soja. A mesorregião possui uma potência útil para projetos total de 460 MW.

Tabela 14 – Valores de média relativa, média absoluta, coeficiente de crescimento do potencial elétrico e potência útil para projetos referente às principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica oeste paranaense entre os anos de 2006 e 2016.

Cultura agropecuária	\bar{X}_{rel} [MW]	\bar{X}_{abs} [MW]	α	Potência útil para projetos [MW]
Bovinos	11,02	11,02	Constante	9
Equinos	1,27	1,27	Decréscimo moderado	-
Galináceos	67,49	67,49	Crescimento moderado	-
Ovinos	1,26	1,26	Crescimento moderado	-
Suínos	162,47	162,47	Crescimento acentuado	130
Cana-de-açúcar	60,05	171,54	Decréscimo acentuado	6
Mandioca	44,06	41,83	Decréscimo moderado	5
Milho	619,42	593,29	Crescimento acentuado	200
Soja	449,71	449,71	Crescimento acentuado	110
Total	1.416,75	1.499,88	-	460

Fonte: Os autores, com base em (IPARDES, 2007), (IPARDES, 2008), (IPARDES, 2009), (IPARDES, 2011), (IPARDES, 2012), (IPARDES, 2013), (IPARDES, 2015), (IPARDES, 2016) e (IPARDESd, 2017).

O gráfico da Figura 13 mostra o perfil do potencial elétrico da mesorregião geográfica sudoeste paranaense, referente aos anos 2006 a 2016, que se comporta de forma semelhante à região oeste do estado, uma vez que há um pico na produção e, portanto, no potencial de cana-de-açúcar em 2015, contudo, com uma baixa participação nos demais anos. Há também uma predominância das culturas de soja e milho. A Tabela 15 mostra os resultados da análise estatística realizada com os dados de potencial elétrico da mesorregião sudoeste paranaense.

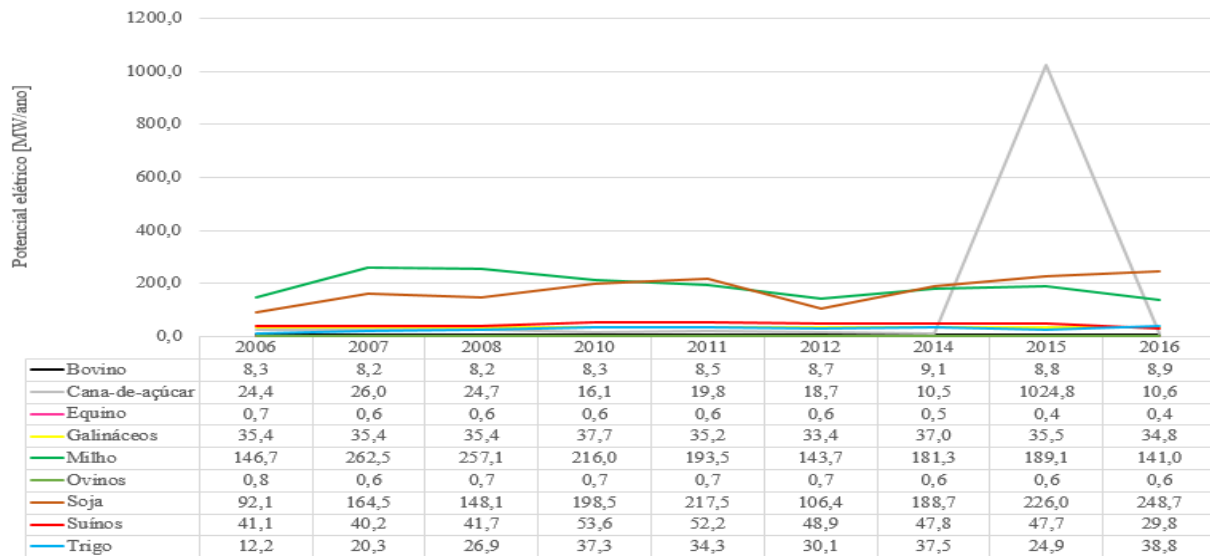


Figura 13 – Potencial elétrico das principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica sudoeste paranaense entre os anos de 2006 e 2016

Fonte: Os autores, com base em (IPARDES, 2007), (IPARDES, 2008), (IPARDES, 2009), (IPARDES, 2011), (IPARDES, 2012), (IPARDES, 2013), (IPARDES, 2015), (IPARDES, 2016) e (IPARDESd, 2017).

Tabela 15 – Valores de média relativa, média absoluta, coeficiente de crescimento do potencial elétrico e potência útil para projetos referente às principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica sudoeste paranaense entre os anos de 2006 e 2016.

Cultura agropecuária	\bar{X}_{rel} [MW]	\bar{X}_{abs} [MW]	α	Potência útil para projetos [MW]
Bovinos	8,55	8,55	Crescimento moderado	5
Equinos	0,56	0,56	Decréscimo moderado	-
Galináceos	35,54	35,54	Constante	-
Ovinos	0,67	0,67	Decréscimo moderado	-
Suínos	44,79	44,79	Crescimento moderado	35
Cana-de-açúcar	18,85	130,62	Decréscimo acentuado	-
Milho	192,32	192,32	Decréscimo moderado	30
Soja	176,70	176,70	Crescimento acentuado	45
Trigo	29,14	29,14	Crescimento acentuado	10
Total	507,12	618,89	-	125

Fonte: Os autores, com base em (IPARDES, 2007), (IPARDES, 2008), (IPARDES, 2009), (IPARDES, 2011), (IPARDES, 2012), (IPARDES, 2013), (IPARDES, 2015), (IPARDES, 2016) e (IPARDESd, 2017).

A mesorregião sudoeste paranaense apresentou os comportamentos das culturas de maneira semelhante ao das mesorregiões norte pioneiro e norte central, entretanto com um crescimento acentuado da soja e do trigo e um decréscimo moderado da cultura de milho.

Mesmo com a tendência de decréscimo moderado do milho, o potencial médio dos últimos 10 anos da cultura situa-se próximo à casa dos 200 MW, o que coloca a principal cultura em termos de potencial.

Os números da pecuária são inferiores aos da agricultura nessa mesorregião, que tem potencial de geração de energia a partir da biomassa dos rebanhos de suínos e galináceos, além de ter potencial de aproximadamente 45 MW a partir da biomassa dos rebanhos de suínos. Vale salientar que a produção de galináceos é constante nos últimos 10 anos e que o potencial do rebanho de suínos aumentou mais de 75% nesse período e tem tendência de crescimento moderado. No total, os rebanhos somam 90,11 MW de potencial de geração.

Referente à potência útil para projetos destaca-se a possibilidade de implementação de um sistema com potência nominal de 45 MW a base de resíduos de soja, 30 MW de resíduos de milho e 35 MW para resíduos de suínos. A mesorregião possui uma potência útil para projetos total de 125 MW.

O gráfico da Figura 14 mostra o perfil do potencial elétrico da mesorregião geográfica centro-sul paranaense, referente aos anos 2006 a 2016. Observa-se que o potencial do milho na mesorregião centro-sul tende a decair, apresentando já em 2016, potencial elétrico de 131,9 MW. Semelhante à mesorregião sudoeste, há uma previsão de crescimento acentuado para o trigo e para a soja, que somam quase 240 MW em média, contudo a soma dos potenciais em 2016 foi de 340 MW, em razão do rápido crescimento de produção de soja. A Tabela 16 resume os dados da produção agropecuária da mesorregião centro-oeste nos últimos 10 anos.

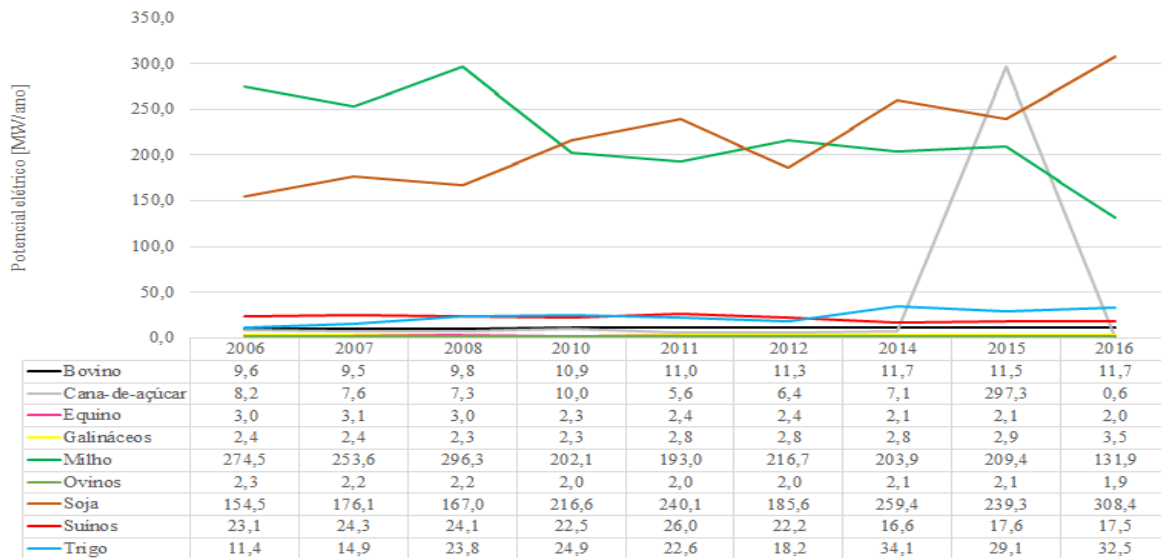


Figura 14 – Potencial elétrico das principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica centro-sul paranaense entre os anos de 2006 e 2016

Fonte: Os autores, com base em (IPARDES, 2007), (IPARDES, 2008), (IPARDES, 2009), (IPARDES, 2011), (IPARDES, 2012), (IPARDES, 2013), (IPARDES, 2015), (IPARDES, 2016) e (IPARDESd, 2017).

Tabela 16 – Valores de média relativa, média absoluta, coeficiente de crescimento do potencial elétrico e potência útil para projetos referente às principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica centro-sul paranaense entre os anos de 2006 e 2016.

Cultura agropecuária	\bar{X}_{rel} [MW]	\bar{X}_{abs} [MW]	α	Potência útil para projetos [MW]
Bovinos	10,78	10,78	Crescimento moderado	8
Equinos	2,35	2,50	Decréscimo moderado	-
Galináceos	2,71	2,71	Crescimento moderado	-
Ovinos	2,08	2,08	Decréscimo moderado	-
Suínos	21,53	21,53	Decréscimo moderado	10
Cana-de-açúcar	7,03	38,89	Decréscimo acentuado	-
Milho	210,65	220,17	Decréscimo moderado	40
Soja	216,33	216,33	Crescimento acentuado	55
Trigo	23,49	23,49	Crescimento acentuado	12
Total	496,95	538,48	-	125

Fonte: Os autores, com base em (IPARDES, 2007), (IPARDES, 2008), (IPARDES, 2009), (IPARDES, 2011), (IPARDES, 2012), (IPARDES, 2013), (IPARDES, 2015), (IPARDES, 2016) e (IPARDESd, 2017).

A mesorregião centro-sul paranaense apresentou um perfil energético semelhante à mesorregião oeste paranaense, com picos de produção de cana-de-açúcar no ano de 2015 e

crescimento acentuado da produção de soja e de trigo, apresentando potencial estável de quase 500 MW. As principais culturas presentes foram o milho, com potencial estável de 210,65 MW, a soja, 216,33 MW e o trigo, 23,49 MW. Ressalta-se que o milho, apesar do decréscimo de produção, tem o maior potencial dos últimos 10 anos, estando muito longe de ser igualado pelo trigo, que detém o terceiro maior potencial. Assim, o milho ainda é muito representativo em termos de potencial energético. A pecuária tem potencial de geração de energia discreto, com dois rebanhos principais: bovinos e suínos, que somam mais de 32 MW, equivalente a 81,9% do potencial animal.

Referente à potência útil para projetos destaca-se a possibilidade de implementação de um sistema com potência nominal de 55 MW a base de resíduos de soja e 40 MW a base de resíduos de milho. A mesorregião possui uma potência útil para projetos total de 125 MW.

O gráfico da Figura 15 mostra o perfil do potencial elétrico da mesorregião geográfica sudeste paranaense, referente aos anos de 2006 a 2016. Observa-se que as culturas de milho e soja são predominantes na mesorregião, apresentando potencial elétrico superior a 240 MW, tendo a soja uma perspectiva de crescimento acentuado. A Tabela 17 resume os dados da produção agropecuária da mesorregião sudeste nos últimos 10 anos.

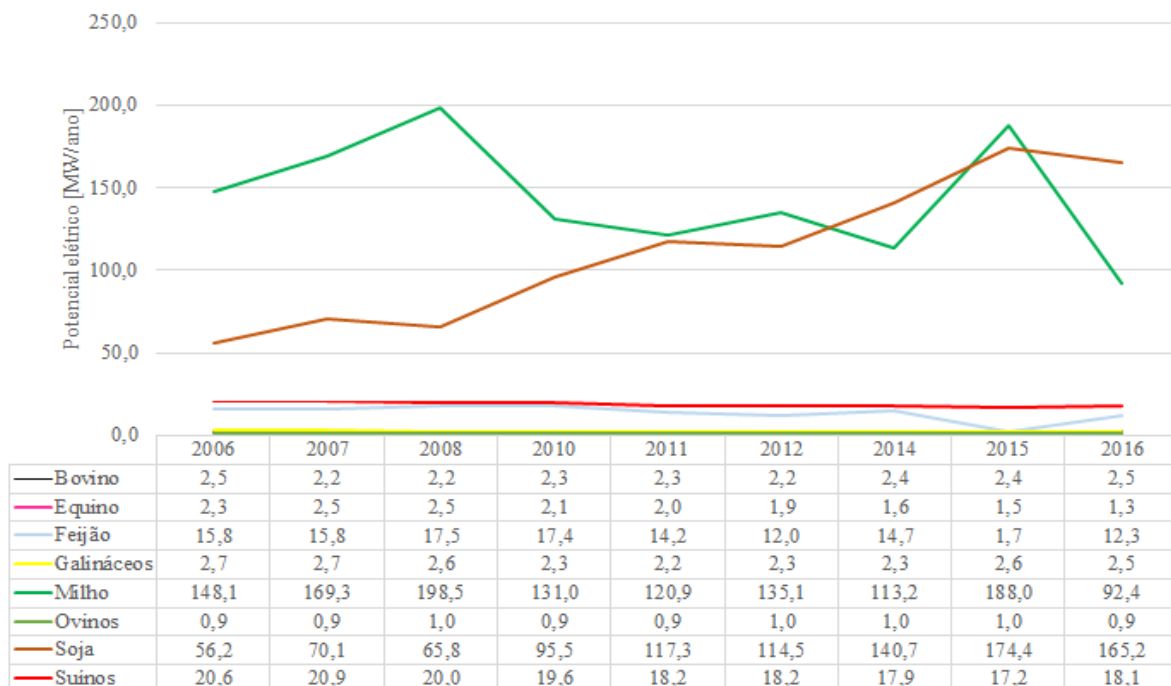


Figura 15 – Potencial elétrico das principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica sudeste paranaense entre os anos de 2006 e 2016

Fonte: Os autores, com base em (IPARDES, 2007), (IPARDES, 2008), (IPARDES, 2009), (IPARDES, 2011), (IPARDES, 2012), (IPARDES, 2013), (IPARDES, 2015), (IPARDES, 2016) e (IPARDESd, 2017).

O potencial médio da mesorregião supera os 280 MW, sendo representados principalmente pelas culturas de milho, soja, suínos e feijão. A mesorregião sudeste paranaense apresentou um perfil energético semelhante à mesorregião centro-sul paranaense, com um decréscimo acentuado da produção de milho e um crescimento acentuado da produção de soja. A pecuária tem potencial médio de geração de energia de 26,54 MW, com participação do rebanho de suínos de mais de 72%, contudo, com perspectiva de decréscimo moderado.

Referente à potência útil para projetos destaca-se a possibilidade de implementação de um sistema com potência nominal de 30 MW a base de resíduos de soja e 10 MW a base de resíduos de milho. A mesorregião possui uma potência útil para projetos total de 55 MW.

Tabela 17 – Valores de média relativa, média absoluta, coeficiente de crescimento do potencial elétrico e potência útil para projetos referente às principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica sudeste paranaense entre os anos de 2006 e 2016.

Cultura agropecuária	\bar{X}_{rel} [MW]	\bar{X}_{abs} [MW]	α	Potência útil para projetos [MW]
Bovinos	2,33	2,33	Constante	2
Equinos	1,84	1,98	Decréscimo acentuado	-
Galináceos	2,47	2,47	Decréscimo moderado	-
Ovinos	0,95	0,95	Crescimento moderado	-
Suínos	18,96	18,96	Decréscimo moderado	8
Feijão	14,97	13,50	Decréscimo moderado	5
Milho	129,97	144,03	Decréscimo acentuado	10
Soja	111,10	111,10	Crescimento acentuado	30
Total	282,59	295,32	-	55

Fonte: Os autores, com base em (IPARDES, 2007), (IPARDES, 2008), (IPARDES, 2009), (IPARDES, 2011), (IPARDES, 2012), (IPARDES, 2013), (IPARDES, 2015), (IPARDES, 2016) e (IPARDESd, 2017).

Por fim, a mesorregião geográfica metropolitana de Curitiba também apresentou perfil energético discreto, como é mostrado no gráfico da Figura 16. Houve um pico de potencial da cana-de-açúcar em 2015, que, no entanto, não apresentou potenciais superiores a 10 MW nos demais anos. A Tabela 18 expõe os resultados da análise estatística aplicada nos dados de potencial elétrico, que serão discutidos na sequência.

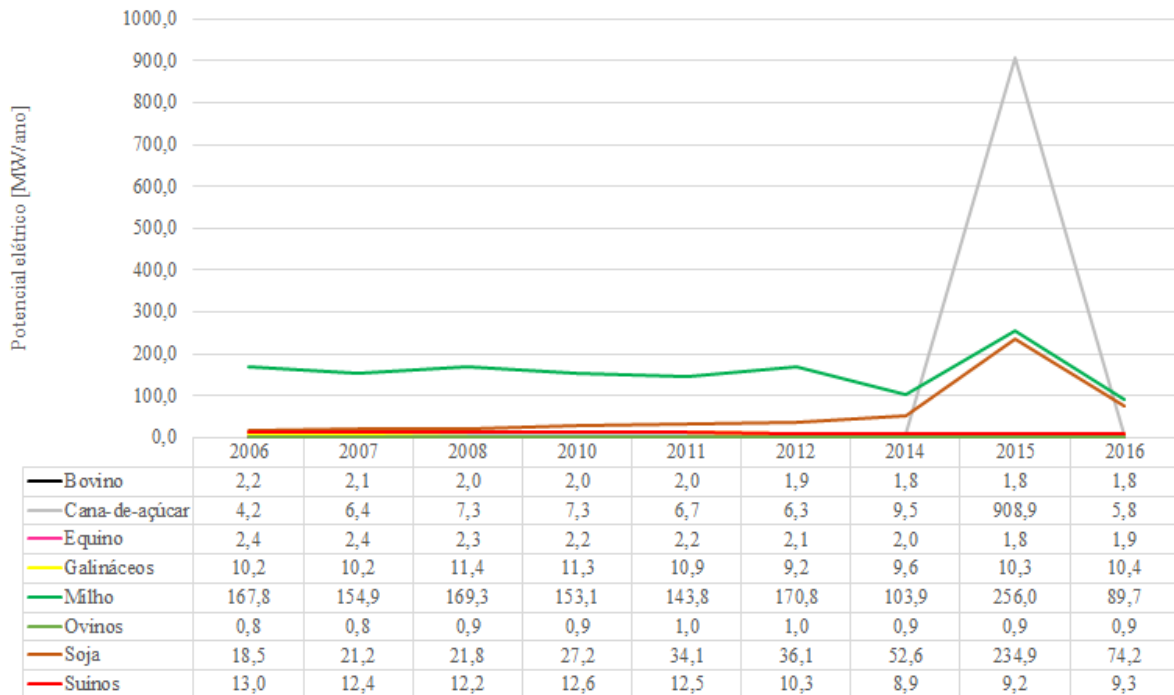


Figura 16 – Potencial elétrico das principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica metropolitana de Curitiba entre os anos de 2006 e 2016

Fonte: Os autores, com base em (IPARDES, 2007), (IPARDES, 2008), (IPARDES, 2009), (IPARDES, 2011), (IPARDES, 2012), (IPARDES, 2013), (IPARDES, 2015), (IPARDES, 2016) e (IPARDESd, 2017).

Tabela 18 – Valores de média relativa, média absoluta, coeficiente de crescimento do potencial elétrico e potência útil para projetos referente às principais culturas agropecuárias presentes na mesorregião geográfica metropolitana de Curitiba entre os anos de 2006 e 2016.

Cultura agropecuária	\bar{X}_{rel} [MW]	\bar{X}_{abs} [MW]	α	Potência útil para projetos [MW]
Bovinos	1,96	1,96	Decréscimo moderado	-
Equinos	2,10	2,16	Decréscimo moderado	-
Galináceos	10,39	10,39	Decréscimo moderado	-
Ovinos	0,90	0,90	Crescimento moderado	-
Suínos	11,16	11,16	Decréscimo moderado	5
Cana-de-açúcar	6,29	106,94	Decréscimo moderado	-
Milho	159,95	156,58	Crescimento acentuado	50
Soja	35,69	57,82	Crescimento acentuado	8
Total	228,44	347,91	-	63

Fonte: Os autores, com base em (IPARDES, 2007), (IPARDES, 2008), (IPARDES, 2009), (IPARDES, 2011), (IPARDES, 2012), (IPARDES, 2013), (IPARDES, 2015), (IPARDES, 2016) e (IPARDESd, 2017).

Observa-se que a maioria das culturas da região metropolitana de Curitiba apresentou uma tendência de decréscimo ou resultados pouco animadores, com perfis de potencial abaixo das obtidas nas demais mesorregiões paranaenses. O milho e a soja, no entanto, se mostraram mais uma vez promissores, somando quase 200 MW de potência estável, o que equivale a 85,6% do potencial estável da região. As culturas de galináceos e suínos na mesorregião metropolitana de Curitiba apresentaram potencial estável de 21,6 MW, sendo principais representantes dos rebanhos da região.

Referente à potência útil para projetos destaca-se a possibilidade de implementação de um sistema com potência nominal de 50 MW. A mesorregião possui uma potência útil para projetos total de 63 MW.

A Tabela 19 é um resumo dos resultados apresentados anteriormente, apresentando os potenciais estáveis de geração das dez mesorregiões paranaenses, separando-os em origem animal e vegetal.

Tabela 19 – Resumo dos potenciais estáveis de geração de energia elétrica provenientes da agricultura e da pecuária nas e a potência útil para projetos das mesorregiões paranaenses

Mesorregião geográfica paranaense	Potencial estável (culturas agrícolas) [MW]	Potencial estável (culturas pecuárias) [MW]	Potência útil para projetos [MW]
Noroeste	5061,4	54,0	3.085
Centro ocidental	966,3	22,2	360
Norte central	3143,9	69,4	2.130
Norte pioneiro	1599,0	33,4	880
Centro oriental	467,4	58,6	100
Oeste	1201,9	243,5	460
Sudoeste	426,7	90,1	125
Centro-sul	466,6	39,5	125
Sudeste	270,1	26,6	55
Metropolitana de Curitiba	202,3	26,5	63
Total	13.805,8	663,7	7.383

Fonte: Os autores.

Observa-se o grande potencial estável do estado, com total de 14.469 MW, sendo 95,4% referente às culturas agrícolas. A potência disponível no estado é devida não só à produção, mas também às culturas cultivadas, uma vez que as biomassas de cana-de-açúcar,

milho e soja possuem rendimento energético por tonelada elevado, conforme Tabela 7.

Também nota-se que, mesmo considerando perdas no campo, a potência disponível para implementação de sistemas termoelétricos à biomassa é bastante elevado, superior a 7 GW, equivalente a 10 usinas hidroelétricas do mesmo porte de Itaipu. Vale ressaltar ainda que tal potencial elétrico disponível possui uma margem de segurança de 20% a 50% da média estável de cada mesorregião, o que garante a manutenção de estoques de insumos energéticos, possibilitando uma geração contínua.

Foram elaborados mapas cloropléticos de distribuição de potencial elétrico no estado do Paraná a fim de representar as regiões de maior e menor potencial elétrico para as principais culturas do estado, como também relativo ao total. A Figura 17 mostra a distribuição de potencial de geração de energia elétrica disponível no estado.

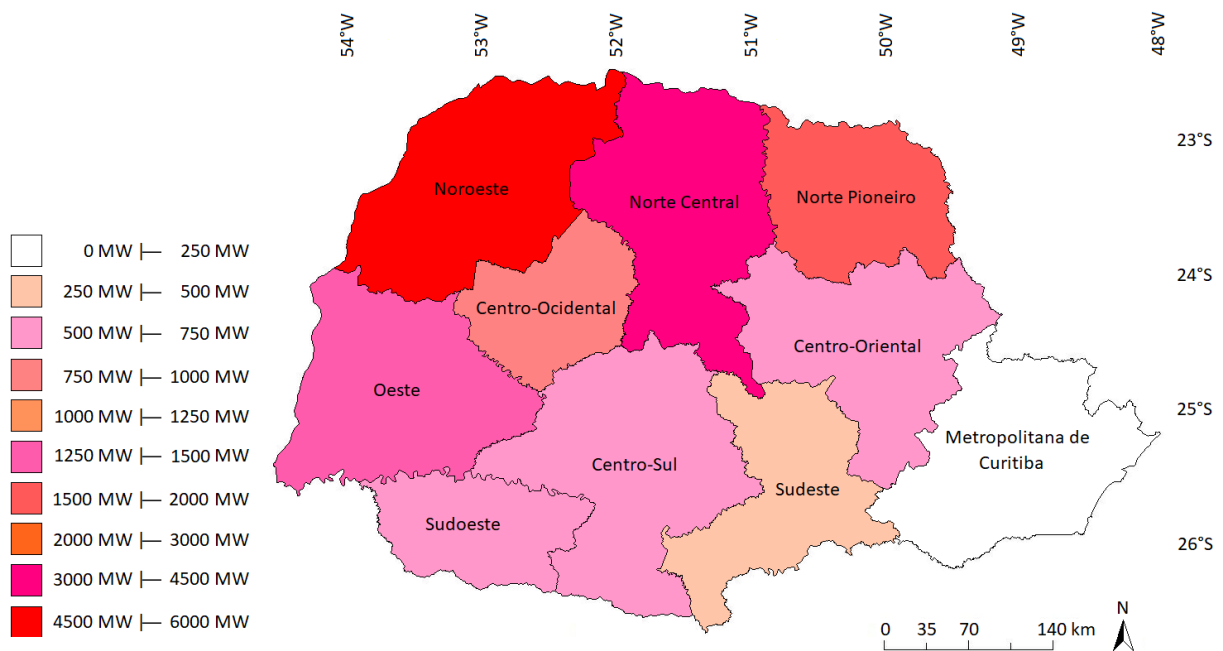


Figura 17 – Distribuição do potencial de geração de energia elétrica total referente às culturas agropecuárias do estado do Paraná

Fonte: Os autores.

É notável o elevado potencial nas mesorregiões ao norte do estado, principalmente relacionado às plantações de cana-de-açúcar. Destaca-se as mesorregiões noroeste, com potência estável disponível superior a 4,5 GW, e norte central, com potência estável disponível superior a 3,0 GW. A Figura 18 exibe a distribuição do potencial de geração de energia elétrica

referente ao rebanho bovino paranaense.

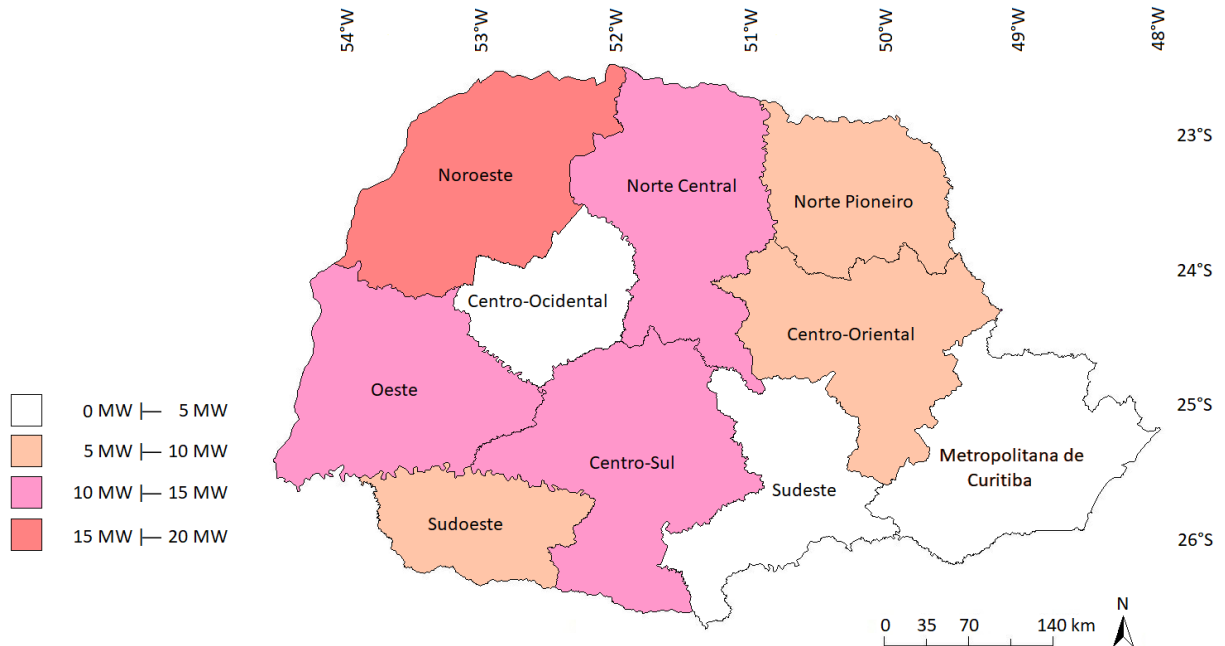


Figura 18 – Distribuição do potencial de geração de energia elétrica referente ao rebanho de bovinos

Fonte: Os autores.

Observa-se que o rebanho bovino do estado se concentra principalmente na mesorregião noroeste, mas aparece também de maneira um pouco menos expressiva na parte centro-oeste do estado. Os potenciais referentes à cultura são discretos, não ultrapassando os 20 MW.

A Figura 19 mostra a distribuição do potencial de geração de energia elétrica referente à cultura de cana-de-açúcar. Pode-se observar que a cultura de cana-de-açúcar se concentra nas mesorregiões do norte do estado, apresentando grande potencial elétrico. É válido observar também a escala adotada para a cultura, tendo o nível mais baixo uma potência de corte de 250 MW. A mesorregião com maior produção média da cultura é a região noroeste, cuja potência estável disponível é superior a 2 GW.

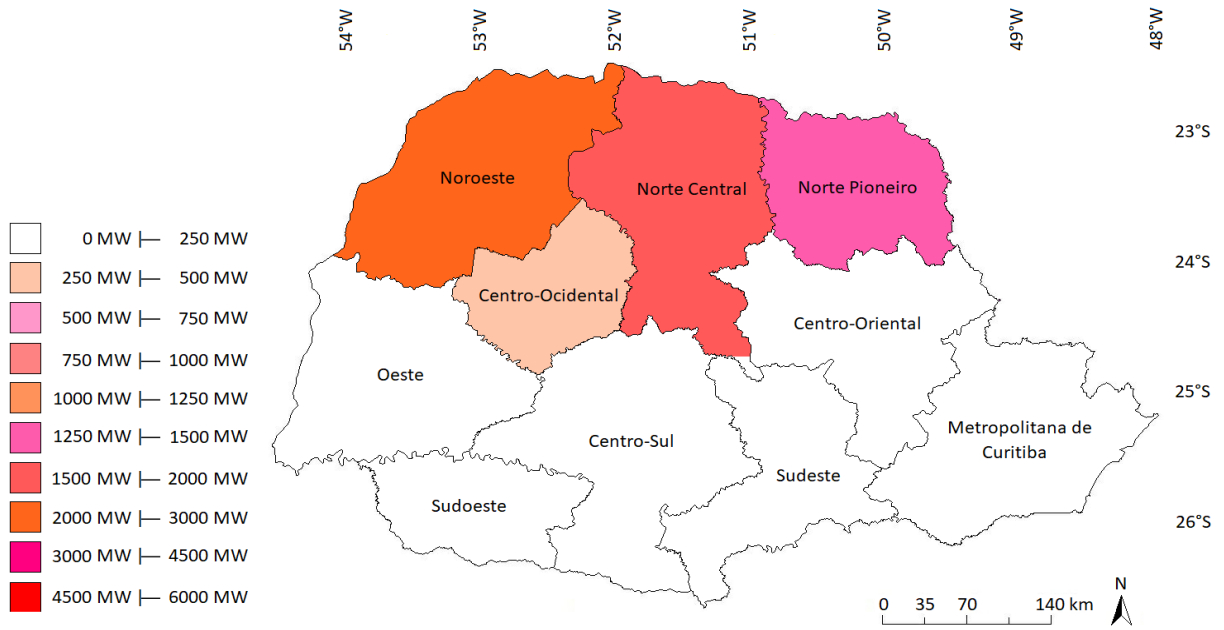


Figura 19 - Distribuição do potencial de geração de energia elétrica referente à cultura de cana-de-açúcar
Fonte: Os autores.

A Figura 20 mostra a distribuição do potencial de geração de energia elétrica referente à cultura de galináceos.

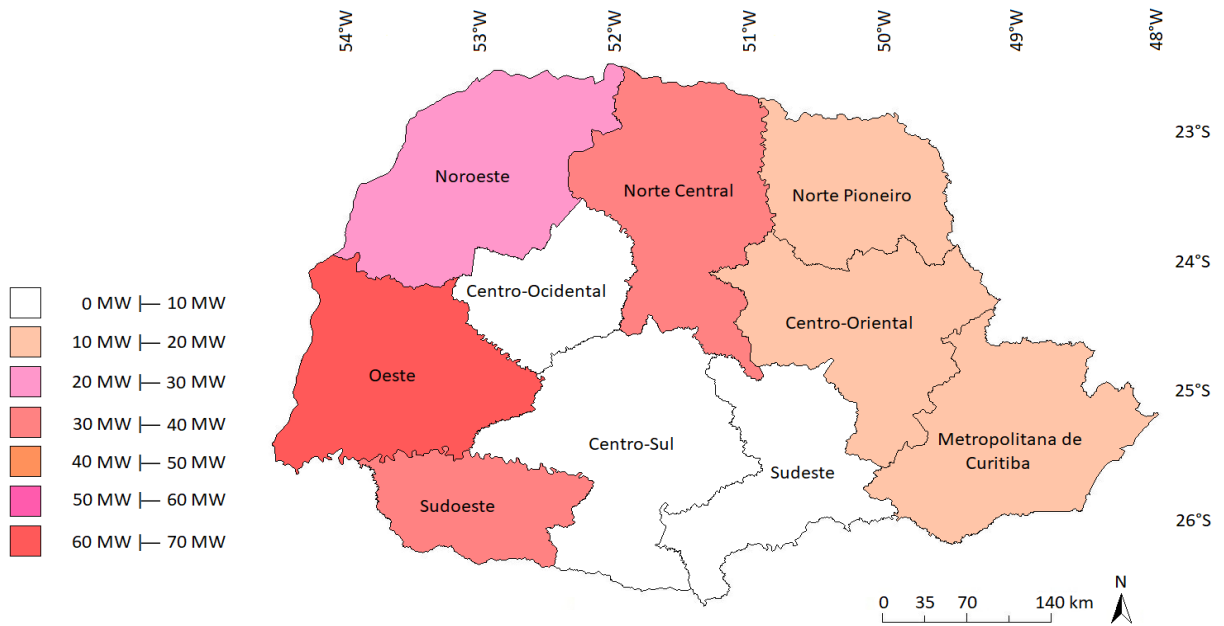


Figura 20 – Distribuição do potencial de geração de energia elétrica referente à cultura de galináceos
Fonte: Os autores.

A cultura de galináceos no estado do Paraná se concentra principalmente na faixa oeste do estado, como se observa na Figura 20. A mesorregião oeste é a que apresenta maior potencial para a cultura, com potência estável disponível superior a 60 MW. A Figura 21 mostra a distribuição do potencial de geração de energia elétrica referente à cultura de milho.

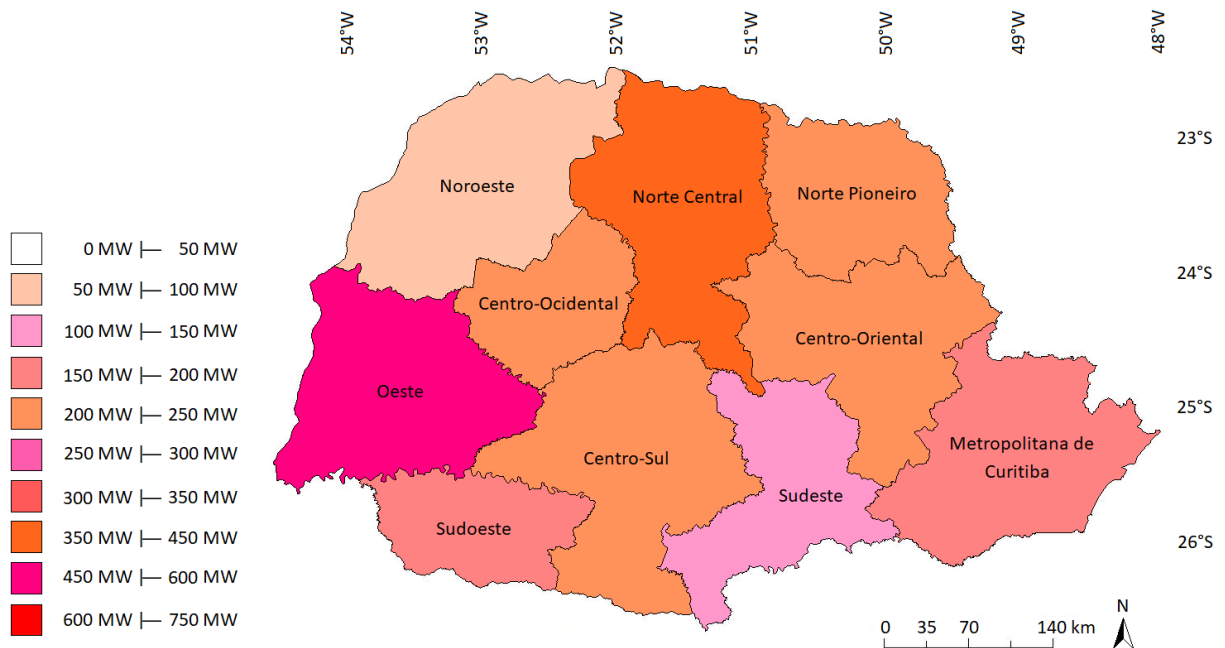


Figura 21 – Distribuição do potencial de geração de energia elétrica referente à cultura de milho

Fonte: Os autores.

A cultura de milho se mostrou bastante distribuída pelo estado, apresentando valores médios superiores a 200 MW em várias mesorregiões, e grandes potenciais ao norte e a oeste do estado. A menor colaboração está na mesorregião noroeste, com potência disponível inferior a 100 MW. A Figura 22 mostra o potencial de geração de energia elétrica referente à cultura de soja.

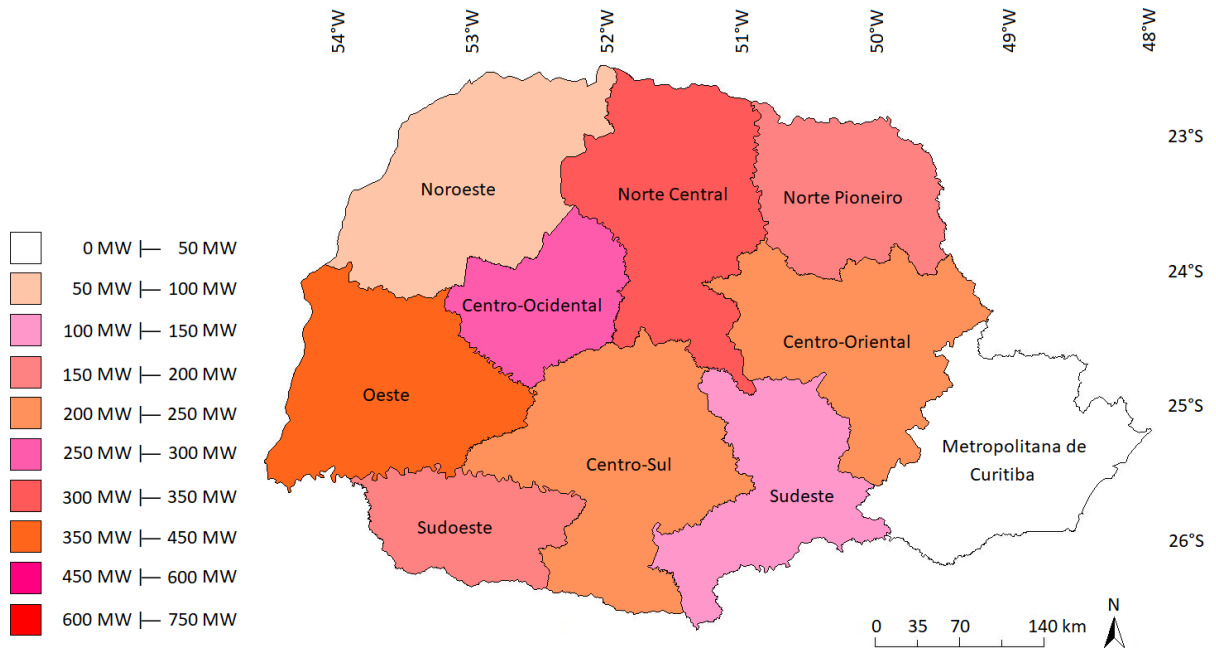


Figura 22 – Distribuição do potencial de geração de energia elétrica referente à cultura de soja

Fonte: Os autores.

A produção de soja também se mostra presente em praticamente toda extensão do Paraná, com exceção da mesorregião metropolitana de Curitiba, cujo potencial não excedeu os 50 MW de potência estável. Os destaques são a mesorregião oeste, com potência disponível superior a 350 MW, e norte central, com 300 MW, no entanto, a maioria das demais mesorregiões apresentaram potencial superior a 150 MW.

A Figura 23 mostra o potencial de geração de energia elétrica referente ao rebanho de suínos. O rebanho de suínos apresenta grande concentração na mesorregião oeste, cujo potencial excedeu os 160 MW de potência estável, sendo o maior representante das culturas pecuárias. No entanto, nas demais mesorregiões apresentou resultados discretos.

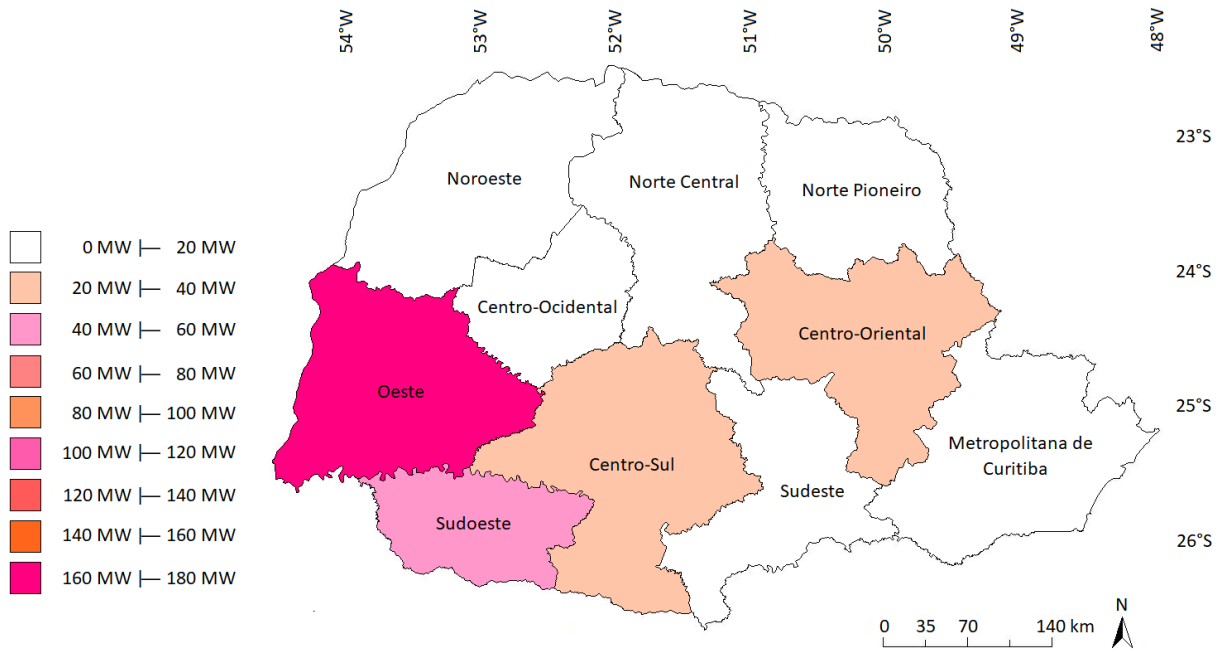


Figura 23 – Distribuição do potencial de geração de energia elétrica referente ao rebanho de suínos
Fonte: Os autores.

A Figura 24 mostra a distribuição do potencial de geração de energia elétrica referente à cultura de trigo.

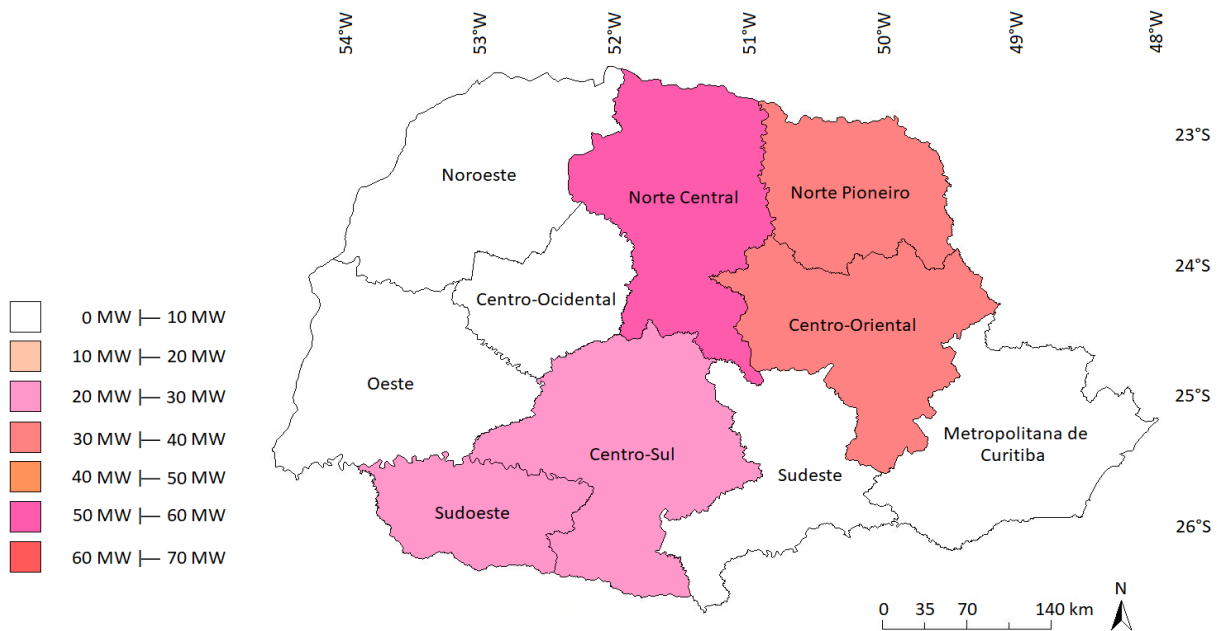


Figura 24 - Distribuição de potencial de geração de energia elétrica referente à cultura de trigo
Fonte: Os autores.

Comparando a Figura 24 com as demais observa-se que a cultura de trigo é a que apresentou perfil mais distinto, tendo maior representatividade na parte nordeste do estado, e potencial mediano ao sudoeste. Destaca-se as mesorregiões norte pioneiro e centro oriental, com potência estável disponível superior a 60 MW.

Analisando todos os dados apresentados verifica-se que a riqueza energética do Paraná relacionado à biomassa agropecuária é extremamente elevada. A utilização deste insumo energético é capaz de suprir mais de 18% da OIEE nacional, o que equivale a toda energia não renovável consumida no Brasil nesse período, sendo o potencial paranaense de 120.4 GWh em sistemas de baixo rendimento e operando 95% do ano (comparativo com os valores de OIEE brasileira de 2016 apresentadas na Tabela 1).

Como mostrado na Tabela 2, o Paraná é um estado da federação com pouca representatividade em consumidores com geração distribuída, com cerca de 2 MW de potência instalada, equivalente a aproximadamente 5,3 % do total instalado no Brasil, o que expõe a defasagem do estado em relação ao potencial disponível.

A Copel nos últimos anos iniciou a construção de complexos eólicos no Rio Grande do Norte, que terão, ao final de 2019, 28 parques eólicos com potência nominal de 663,6 MW, o suficiente para abastecer dois milhões de residências (COPEL, 2018). Essa capacidade de geração de energia coincide com o potencial total de geração da biomassa proveniente da pecuária do estado do Paraná, conforme a Tabela 19.

O Grupo Votorantim também investe significativamente em energia eólica e inaugurou em 2018 o complexo eólico “Ventos do Piauí”, situado no município de Curral Novo do Piauí/PI. O complexo exigiu investimentos de mais de R\$ 1,1 bilhão e é composto por sete parques eólicos, com 98 aerogeradores de potência nominal de 2,1 MW e fator de capacidade de 51,7%, o que garante ao complexo uma capacidade instalada de 206 MW (VOTORANTIM, 2018). Comparando-se com o potencial de geração da biomassa proveniente da agricultura paranaense, esse valor é ultrapassado pela mesorregião metropolitana de Curitiba, que tem o menor potencial de geração a partir da biomassa da agricultura do estado. Se considerado o potencial total de geração da agricultura paranaense, é possível gerar 67 vezes a energia do complexo da Votorantim.

5 CONCLUSÕES

Como evidenciado no capítulo anterior, os resultados do potencial de geração de energia elétrica do estado do Paraná a partir da biomassa são promissores, especialmente pela participação das culturas agrícolas de cana-de-açúcar, milho e soja e da biomassa animal.

O Paraná possui cerca de 10% de sua economia baseada na produção agropecuária, sendo um dos principais produtores do país. Isso salienta a importância da reprodução deste estudo nos demais estados da Federação, uma vez que os resultados são relevantes para o desenvolvimento de novas usinas de geração distribuída por parte de políticas de fomento.

No Setor Elétrico Brasileiro, a crise do abastecimento de água, que ocorre desde 2014, evidencia a necessidade de complementar a geração. Com isso, têm crescido o número de unidades de geração distribuída, principalmente fotovoltaicas e eólicas. Contudo, sabe-se que as usinas eólicas podem alterar as rotas migratórias das aves e que os sistemas de geração solar *off-grid*, ainda comuns em áreas rurais, utilizam, para armazenamento de energia, baterias, que têm prazo de vida útil curta e são de difícil descarte e reciclagem.

Nesse contexto, a biomassa apresenta uma solução diferenciada ao utilizar os dejetos das atividades agropecuárias, o que pode contribuir para diminuição de contaminação do meio ambiente e, certamente, para a geração de energia.

Em comparação com os outros modelos de geração de energia limpa, a geração pela queima da biomassa tem maior estabilidade e pode ser considerada uma energia “firme”, pois não se altera com a mudança instantânea de fatores climáticos, como flutuações de potência solar ou eólica. Outrossim, é viável a manutenção de estoques de biomassa, corroborando com a geração contínua de energia.

Ainda assim, os resultados deste trabalho mostram que a geração de energia pela biomassa é uma importante via a ser explorada pelo enorme potencial energético apresentado. Os dados apresentados indicam uma energia disponível de 120,4 TWh, sendo 114,9 TWh referente aos resíduos vegetais, e 5,5 TWh aos animais. É importante ressaltar que essa energia está distribuída pelo estado, assim é difícil mensurar o real potencial, uma vez que todas as variáveis das equações de método foram padronizadas para todas as mesorregiões. No entanto é inegável o potencial do Paraná, principalmente relacionado à cana-de-açúcar, milho e soja, que juntos somam potencial estável de 105,5 TWh.

Em relação às perspectivas promissoras:

- para a mesorregião noroeste apresentaram-se interessantes as culturas de cana-de-açúcar, mandioca, milho, soja, galináceos e bovinos;
- para a mesorregião centro oriental cana-de-açúcar, milho, soja e galináceos;
- para a mesorregião norte central cana-de-açúcar, milho, soja, trigo e galináceos;
- para a mesorregião norte pioneiro cana-de-açúcar, milho, soja, trigo, galináceos e bovinos;
- para a mesorregião centro oriental soja, suínos, trigo e galináceos;
- para a mesorregião oeste milho, soja, suínos, galináceos e bovinos;
- para a mesorregião sudoeste soja, suínos, galináceos, trigo e bovinos;
- para a mesorregião centro-sul soja, milho, trigo e bovinos;
- para a mesorregião sudeste a soja;
- para a mesorregião metropolitana de Curitiba, o milho e a soja.

Estes somam um potencial estável e promissor estimado em 106,5 TWh, sendo 3,93% proveniente das culturas pecuárias.

Dessa forma, conclui-se que o Paraná é rico quanto à biomassa proveniente de sua indústria agropecuária, com mesorregiões de grande diversidade de culturas e com alto poder energético, e, em sua maioria, com perspectiva de aumento de produção/potencial para os próximos anos, fazendo a geração de energia em áreas rurais do estado em sistemas de micro e mini geração distribuída, *on/off grid*, mesmo em sistemas de baixo rendimento, viável e interessante para incentivos.

Para trabalhos futuros propõe-se um estudo aprofundado das perdas referentes à biomassa deixada em campo para recomposição do solo, possíveis sistemas de acúmulo e retirada de dejetos de milho, soja e esterco bovino, estudos de viabilidade para utilização de cama de galináceos de granja para geração de energia e estudos de análise estatística para projeções de produção agropecuária.

REFERÊNCIAS

ALVES, F. S. F.; PINHEIRO, R. R.; **O esterco caprino e ovino como fonte de renda.** Disponível em: <goo.gl/f6VLrJ>. São Paulo, 2007.

ANEEL [Agência Nacional de Energia Elétrica]. **Atlas de Biomassa.** [s.l.] 1996, 1996. v. 2020.

ANEEL [Agência Nacional de Energia Elétrica]. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil 1. ed.** Brasília. 2002.

ANEEL [Agência Nacional de Energia Elétrica]. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil 2.** Pp. 48-107. Brasília. 2005.

ANEEL [Agência Nacional de Energia Elétrica]. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil 3.** Pp. 143. Brasília. 2008.

ANEEL [Agência Nacional de Energia Elétrica]. **Cadernos Temáticos ANEEL. Geração Distribuída. Sistema de Compensação de Energia Elétrica.** Disponível em: <goo.gl/h8tzqa> pg 07. Acesso em 20 de agosto de 2017. Brasília. 2016.

ANEELa [Agência Nacional de Energia Elétrica]. **Matriz de energia elétrica.** Disponível em: <goo.gl/3iwuaG>. Acesso em 18 de abril de 2017. Brasília. 2017.

ANEELb [Agência Nacional de Energia Elétrica]. **Unidades Consumidoras com Geração Distribuída.** Disponível em: <goo.gl/8A8VQu>. Acesso em 09 de setembro de 2017. Brasília. 2017.

AZEVEDO, A.C.S.; BARBOSA FILHO, W.P. **Geração distribuída: vantagens e desvantagens.** Disponível em: <goo.gl/qMbT6P>. Acesso em 23 de outubro de 2017. Belém. 2013.

BAJAY, S. V.; BERNI, M. D. **O contexto dos biocombustíveis para o transporte rodoviário no Brasil.** Disponível em: < goo.gl/72LjnY >. Acesso em 29 de maio de 2018. Campinas. 2006.

BARRERA, Paulo. **Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural**. São Paulo: Ícone, 1993, p. 11.

BRÜSEKE, Franz. **Desenvolvimento e natureza: estudos para uma sociedade sustentável**. 1 Edição ed. INPSO-FUNDAJ. P 15-21. Recife, 1994.

CCEE [Câmara de Comercialização de Energia Elétrica]. **27º leilão de energia nova contrata projetos renováveis com menores preços da história**. Disponível em: <goo.gl/NiYmXt>. Acesso em 29 de maio de 2018. 2018.

COELHO, S.; MONTEIRO, M.; KARNIOL, M.; **Atlas de bioenergia do Brasil**. São Paulo, 2012.

CONINCK, José Carlos Pereira. **Análise de séries temporais de Fourier**. Curitiba, UTFPR, 18 de maio de 2018. Entrevista concedida aos autores.

CORTEZ, L. A. B.; LARA, E. E. S.; OLIVARES, G. E. **Biomassa para energia**. 2 ed. Campinas. 2008.

COPEL [Companhia Paranaense de Energia Elétrica]. **Copel inaugura sete parques eólicos**. Disponível em: <<https://bit.ly/1SPZOx5>>. Publicado em 1º de julho de 2016. Acesso em 26/05/2018.

DAROLT, Moacir. **BIOFERTILIZANTES: Caracterização Química, Qualidade Sanitária e Eficiência em Diferentes Concentrações na Cultura da Alface**. P.3. Curitiba. 2006.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. **Nota técnica 15/14 – Inventário Energético de Resíduos Rurais**. P. 11-19. Rio de Janeiro. 2014.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. **Matriz Energética e Elétrica**. Disponível em: <<https://bit.ly/2IkCFli>>. Acesso em 22/05/2018.

EVANS, A.; STREZOV, V.; EVANS, T. J. **Sustainability considerations for electricity generation from biomass**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 14, n. 5, p. 1419–1427, jun. 2010.

FERREIRA, Nathália. **Pirólise de biomassa lignocelulósica utilizando diferentes catalisadores para produção de bio-óleo.** P. 28-34. Belo Horizonte. 2014.

FIORAVANTI, Carlos. **Rios empobrecidos: hidrelétricas alteram funcionamento do rio Paraná e ampliam erosão das margens.** Revista Ciência e Tecnologia no Brasil – Pesquisa FAPESP. Ed. 160. Pp. 54-55. Junho 2009.

GALDINO, M. A.; LIMA, J. H. G.; RIBEIRO, C. M.; SERRA, E. T. **O Contexto das Energias Renováveis no Brasil,** Revista da DIRENG. Rio de Janeiro, Brasil, pp. 17-25. 2000.

GARCÍA, V. G.; BARTOLOMÉ, M. M. **Rural electrification systems based on renewable energy: The social dimensions of an innovative technology.** Technology in Society, v. 32, n. 4, p. 303–311, nov. 2010.

GARCIA-PÉREZ, M.; CHAALA, A.; ROY, C.; **Vacuum Pyrolysis of Sugarcane Bagasse.** *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol.65, p.111-136, 2002.

GOMBATA, Marsílea. **Hidrelétricas chegarão a um limite, e precisaremos de outra fonte.** Disponível em <goo.gl/MKPNmy>. Publicado em 15 de fevereiro de 2016. Acesso em 06 de maio de 2017.

GOUDARD, B.; FOGLIATTI, M. C.; FILIPPO, S. **Avaliação de Impactos Ambientais - Aplicação aos Sistemas de Transporte.** 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. v. 01. 249p

GRAMACHO, B. B.; BARROSO, F. K.; MACHADO, M. F.; BARRETO, R. A.; ARAÚJO, P. J. P. **Construção sustentável: soluções para construir agredindo menos o ambiente.** Disponível em: <goo.gl/q5kToh>. Acesso em 20 de agosto de 2017. Sergipe. 2013.

IPARDES [Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social]. **Anuário estatístico do estado do Paraná – 2006.** Disponível em: <goo.gl/kBe3m8>. Acesso em 01 de outubro de 2017. Curitiba. 2007.

IPARDES [Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social]. **Anuário estatístico do estado do Paraná – 2007.** Disponível em: <goo.gl/SzNNrQ>. Acesso em 01 de outubro de 2017. Curitiba. 2008.

IPARDES [Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social]. **Anuário estatístico do estado do Paraná – 2008**. Disponível em: <goo.gl/JNJ8KE>. Acesso em 01 de outubro de 2017. Curitiba. 2009.

IPARDES [Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social]. **Anuário estatístico do estado do Paraná – 2010**. Disponível em: <goo.gl/pQTZBi>. Acesso em 01 de outubro de 2017. Curitiba. 2011.

IPARDES [Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social]. **Anuário estatístico do estado do Paraná – 2011**. Disponível em: <goo.gl/VqNnc1>. Acesso em 01 de outubro de 2017. Curitiba. 2012.

IPARDES [Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social]. **Anuário estatístico do estado do Paraná – 2012**. Disponível em: <goo.gl/VQ17PN>. Acesso em 01 de outubro de 2017. Curitiba. 2013.

IPARDES [Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social]. **Anuário estatístico do estado do Paraná – 2014**. Disponível em: <goo.gl/iJ6YJ7>. Acesso em 01 de outubro de 2017. Curitiba. 2015.

IPARDES [Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social]. **Anuário estatístico do estado do Paraná – 2015**. Disponível em: <goo.gl/X1MnKf>. Acesso em 01 de outubro de 2017. Curitiba. 2016.

IPARDESa [Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social]. **Perfil avançado das regiões geográficas**. Disponível em: <goo.gl/Fikr9A>. Acesso em 01 de outubro de 2017. Curitiba. 2017.

IPARDESb [Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social]. **Paraná em números**. Disponível em: <goo.gl/mZisPw>. Acesso em 01 de outubro de 2017. Curitiba. 2017.

IPARDESc [Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social]. **Base física e política – Mesorregiões geográficas (IBGE) - Paraná**. Disponível em: <goo.gl/PKHhnr>. Acesso em 01 de outubro de 2017. Curitiba. 2017.

IPARDESd [Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social]. **Anuário estatístico do estado do Paraná – 2016**. Disponível em: <goo.gl/vZVUkj>. Acesso em 01 de outubro de 2017. Curitiba. 2017.

KOOPMANS, A., KOPPEJAN, J.. **Agricultural and forest residues – Generation, utilization and availability**. In: Regional Consultation on Modern Applications of Biomass Energy. Pp. 6-10. Kuala Lumpur, Malaysia. 1997.

MACHADO, G. B. **Decomposição da matéria orgânica: Decomposição Aeróbia e Anaeróbia**. Disponível em: <goo.gl/fRjcRh>. Acesso em 01 de setembro de 2017. São Paulo. 2013.

MAGALHÃES, A. P. T. **Biogás - um projeto de saneamento urbano**. 1ª Edição ed. São Paulo. 1986.

MMA [Ministério do Meio Ambiente]. **Energias renováveis em debate**. Disponível em: <goo.gl/2WaKmJ>. Acesso em 18 de julho de 2017. Brasília. 2012.

MME [Ministério de Minas e Energia]. **Políticas do MME para a Expansão do Sistema Energético Nacional**. Disponível em: <<http://slideplayer.com.br/slide/3174780/>>. Acesso em 20 de abril de 2017. Brasília. 2011.

MME [Ministério de Minas e Energia]. **Brasil registra 41% de energias renováveis na matriz energética**. Disponível em: <goo.gl/qB1aTR>. Acesso em 18 de abril de 2017. Brasília. 2016.

MME [Ministério de Minas e Energia]. **Resenha Energética Brasileira. Exercício de 2016. Edição: Junho de 2017**. Disponível em: <goo.gl/FfXyvF>. Acesso em 12 de agosto de 2017. Brasília. 2017.

NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta. **Biodigestão: a alternativa energética**. 1ª ed., ed. São Paulo: Nobel, 1986.

ORRICO JÚNIOR, Marco Antonio Previdelli. **Biodigestão anaeróbia e compostagem de dejetos de suínos, com e sem separação de sólidos**. Pg 5. São Paulo. 2007.

PECORA, Vanessa. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP – Estudo de caso.** P. 41-47. São Paulo, 2006.

PORTAL BRASIL. **Brasil é o maior gerador de energia eólica da América Latina.** Disponível em: <<https://goo.gl/bBbKHU>>. Acesso em 19/02/2018. Brasília. 2017.

RODRIGUEZ, Carlos. **Mecanismos regulatórios, tarifários e econômicos na geração distribuída: o caso dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede.** P. 2. Campinas. 2002.

SANTOS, E. L. B.; JUNIOR, G. N.; **Produção de biogás a partir de dejetos de origem animal.** Botucatu, 2013.

SCHROEDER, Luiza. **Obtenção de ácidos graxos de biomassa úmida de microalgas através de saponificação.** P. 30. Curitiba. 2013.

SEAB [Secretaria da Agricultura e do Abastecimento]. **Área e Produção Agrícola no Estado do Paraná e comparativo com o Brasil. Comparativo Paraná-Brasil.** Disponível em: <goo.gl/jSJNgm>. Acesso em 19 de abril de 2017. Curitiba. 2016.

SEAB [Secretaria da Agricultura e do Abastecimento]. **Números da pecuária paranaense. Compilação geral dos dados.** Disponível em: <goo.gl/NB1ASD>. Acesso em 09 de abril de 2017. Curitiba. 2017.

SEIXAS *et al.* **Construção e funcionamento de biodigestores.** Brasília: EMBRAPA – DID, 1980. **EMBRAPA-CPAC.** Circular técnica, 4.

SGANZERLA, E. **BIOGIDESTOR - Uma solução.** Porto Alegre: [s.n.]. pg. 88. 1983.

SOUZA, Camila Rodrigues. **Capim-elefante, uma fonte alternativa de energia e renda para pequenas propriedades rurais.** 57p. Brasília, 2014.

SOUZA, M. L. B.; LAGE FILHO, F. A.; **Emprego de biodigestores anaeróbios no aproveitamento energético de resíduos animais e controle da poluição ambiental.** Disponível em: <goo.gl/HC6UXc>. 2013.

SOUZA, S.; SORDI, A.; OLIVA, C.; **Potencial de energia primária de resíduos vegetais no Paraná.** 4º Encontro de energia no meio rural. P. 3.Campinas, 2002.

TIEPOLO, Gerson Máximo; CANGIOLIERI JUNIOR, Osiris; URBANETZ JUNIOR, Jair. **Estudo do potencial de participação das fontes renováveis de energia na matriz elétrica do estado do Paraná.** Vol. 20, nº 2, 2º Sem. 2014, pp. 79-90.

VOTORANTIM. **Votorantim Energia inaugura Complexo Eólico Ventos do Piauí.** Disponível em: <<https://bit.ly/2LiDgY5>>. Publicado em 20 de março de 2018. Acesso em 26/05/2018.

ANEXOS

ANEXO 1 – RELAÇÃO DOS MUNICÍPIOS PARANAENSES ORDENADOS SEGUNDO AS MESORREGIÕES E AS MICRORREGIÕES GEOGRÁFICAS DO IBGE

MESORREGIÃO GEOGRÁFICA / MICRORREGIÃO GEOGRÁFICA / MUNICÍPIOS
01 - MESORREGIÃO GEOGRÁFICA NOROESTE PARANAENSE
<i>01 - Microrregião Geográfica Paranavaí</i>
Alto Paraná
Amaporã
Cruzeiro do Sul
Diamante do Norte
Guairaçá
Inajá
Itaúna do Sul
Jardim Olinda
Loanda
Marilena
Mirador
Nova Aliança do Ivaí
Nova Londrina
Paraíso do Norte
Paranacity
Paranapoema
Paranavaí
Planaltina do Paraná
Porto Rico
Querência do Norte
Santa Cruz de Monte Castelo
Santa Isabel do Ivaí
Santa Mônica
Santo Antônio do Caiuá
São Carlos do Ivaí
São João do Caiuá
São Pedro do Paraná
Tamboara
Terra Rica
<i>02 - Microrregião Geográfica Umuarama</i>
Altônia
Alto Paraíso (1)
Alto Piquiri
Brasilândia do Sul
Cafezal do Sul
Cruzeiro do Oeste
Douradina
Esperança Nova
Francisco Alves
Icaraíma
Iporã

<p>Ivaté Maria Helena Mariluz Nova Olímpia Perobal Pérola São Jorge do Patrocínio Tapira Umuarama Xambrê</p>
<p>03 - Microrregião Geográfica Cianorte</p> <p>Cianorte Cidade Gaúcha Guaporema Indianópolis Japurá Jussara Rondon São Manoel do Paraná São Tomé Tapejara Tuneiras do Oeste</p>
<p>02 - MESORREGIÃO GEOGRÁFICA CENTRO OCIDENTAL PARANAENSE</p>
<p>04 - Microrregião Geográfica Goioerê</p> <p>Altamira do Paraná Boa Esperança Campina da Lagoa Goioerê Janiópolis Juranda Moreira Sales Nova Cantu Quarto Centenário Rancho Alegre D'Oeste Ubitatã</p>
<p>05 - Microrregião Geográfica Campo Mourão</p> <p>Araruna Barbosa Ferraz Campo Mourão Corumbataí do Sul Engenheiro Beltrão Farol Fênix Iretama Luiziana Mamborê Peabiru Quinta do Sol Roncador Terra Boa</p>

03 - MESORREGIÃO GEOGRÁFICA NORTE CENTRAL PARANAENSE**06 - Microrregião Geográfica Astorga**

Ângulo
 Astorga
 Atalaia
 Cafeara
 Centenário do Sul
 Colorado
 Flórida
 Guaraci
 Iguaçu
 Itaguajé
 Jaguapitã
 Lobato
 Lupionópolis
 Mandaguaçu
 Munhoz de Melo
 Nossa Senhora das Graças
 Nova Esperança
 Presidente Castelo Branco
 Santa Fé
 Santa Inês
 Santo Inácio
 Uniflor

07 - Microrregião Geográfica Porecatu

Alvorada do Sul
 Bela Vista do Paraíso
 Florestópolis
 Miraselva
 Porecatu
 Prado Ferreira
 Primeiro de Maio
 Sertanópolis

08 - Microrregião Geográfica Floraí

Doutor Camargo
 Floraí
 Floresta
 Itambé
 Ivatuba
 Ourizona
 São Jorge do Ivaí

09 - Microrregião Geográfica Maringá

Mandaguari
 Marialva
 Maringá
 Paçandu
 Sarandi

10 - Microrregião Geográfica Apucarana

Apucarana
 Araçongas
 Califórnia
 Cambira
 Jandaia do Sul

<p>Marilândia do Sul Mauá da Serra Novo Itacolomi Sabáudia</p> <p>11 - Microrregião Geográfica Londrina</p> <p>Cambé Ibiporã Londrina Pitangueiras Rolândia Tamarana</p>
<p>12 - Microrregião Geográfica Faxinal</p> <p>Bom Sucesso Borrazópolis Cruzmaltina Faxinal Kaloré Marumbi Rio Bom</p>
<p>13 - Microrregião Geográfica Ivaiporã</p> <p>Arapuã Ariranha do Ivaí Cândido de Abreu Godoy Moreira Grandes Rios Ivaiporã Jardim Alegre Lidianópolis Lunardelli Manoel Ribas Nova Tebas Rio Branco do Ivaí Rosário do Ivaí São João do Ivaí São Pedro do Ivaí</p>
<p>04 - MESORREGIÃO GEOGRÁFICA NORTE PIONEIRO PARANAENSE</p> <p>14 - Microrregião Geográfica Assaí</p> <p>Assaí Jataizinho Nova Santa Bárbara Rancho Alegre Santa Cecília do Pavão São Jerônimo da Serra São Sebastião da Amoreira Uraí</p>
<p>15 - Microrregião Geográfica Cornélio Procópio</p> <p>Abatiá Andirá Bandeirantes Congonhinhas Cornélio Procópio Itambaracá Leópolis</p>

<p>Nova América da Colina Nova Fátima Ribeirão do Pinhal Santa Amélia Santa Mariana Santo Antônio do Paraíso Sertaneja</p>
<p>16 - Microrregião Geográfica Jacarezinho Barra do Jacaré Cambará Jacarezinho Jundiá do Sul Ribeirão Claro Santo Antônio da Platina</p>
<p>17 - Microrregião Geográfica Ibaiti Conselheiro Mairinck Curiúva Figueira Ibaiti Jaboti Japira Pinhalão Sapopema</p>
<p>18 - Microrregião Geográfica Wenceslau Braz Carlópolis Guapirama Joaquim Távora Quatiguá Salto do Itararé Santana do Itararé São José da Boa Vista Siqueira Campos Tomazina Wenceslau Braz</p>
<p>05 - MESORREGIÃO GEOGRÁFICA CENTRO ORIENTAL PARANAENSE</p>
<p>19 - Microrregião Geográfica Telêmaco Borba Imbaú Ortigueira Reserva Telêmaco Borba Tibagi Ventania</p>
<p>20 - Microrregião Geográfica Jaguariaíva Arapoti Jaguariaíva Piraí do Sul Sengés</p>
<p>21 - Microrregião Geográfica Ponta Grossa Carambeí Castro Palmeira Ponta Grossa</p>

06 - MESORREGIÃO GEOGRÁFICA OESTE PARANAENSE**22 - Microrregião Geográfica Toledo**

Assis Chateaubriand
 Diamante D'Oeste
 Entre Rios do Oeste
 Formosa do Oeste
 Guaira
 Iracema do Oeste
 Jesuítas
 Marechal Cândido Rondon
 Maripá
 Mercedes
 Nova Santa Rosa
 Ouro Verde do Oeste
 Palotina
 Pato Bragado
 Quatro Pontes
 Santa Helena
 São José das Palmeiras
 São Pedro do Iguaçu
 Terra Roxa
 Toledo
 Tupãssi

23 - Microrregião Geográfica Cascavel

Anahy
 Boa Vista da Aparecida
 Braganey
 Cafelândia
 Campo Bonito
 Capitão Leônidas Marques
 Cascavel
 Catanduvas
 Corbélia
 Diamante do Sul
 Guaraniaçu
 Ibema
 Iguatu
 Lindoeste
 Nova Aurora
 Santa Lúcia
 Santa Tereza do Oeste
 Três Barras do Paraná

24 - Microrregião Geográfica Foz do Iguaçu

Céu Azul
 Foz do Iguaçu
 Itaipulândia
 Matelândia
 Medianeira
 Missal
 Ramilândia
 Santa Terezinha de Itaipu
 São Miguel do Iguaçu
 Serranópolis do Iguaçu
 Vera Cruz do Oeste

07 - MESORREGIÃO GEOGRÁFICA SUDOESTE PARANAENSE
25 - Microrregião Geográfica Capanema Ampére Bela Vista da Caroba Capanema Pérola d'Oeste Planalto Pranchita Realeza Santa Izabel do Oeste
26 - Microrregião Geográfica Francisco Beltrão Barracão Boa Esperança do Iguaçu Bom Jesus do Sul Cruzeiro do Iguaçu Dois Vizinhos Enéas Marques Flor da Serra do Sul Francisco Beltrão Manfrinópolis Marmeleiro Nova Esperança do Sudoeste Nova Prata do Iguaçu Pinhal de São Bento Renascença Salgado Filho Salto do Lontra Santo Antônio do Sudoeste São Jorge d'Oeste Verê
27 - Microrregião Geográfica Pato Branco Bom Sucesso do Sul Chopinzinho Coronel Vivida Itapejara d'Oeste Mariópolis Pato Branco São João Saudade do Iguaçu Sulina Vitorino
08 - MESORREGIÃO GEOGRÁFICA CENTRO-SUL PARANAENSE
28 - Microrregião Geográfica Pitanga Boa Ventura de São Roque Laranjal Mato Rico Palmital Pitanga Santa Maria do Oeste
29 - Microrregião Geográfica Guarapuava Campina do Simão Candói Cantagalo

<p>Espigão Alto do Iguaçu Foz do Jordão Goioxim Guarapuava Inácio Martins Laranjeiras do Sul Marquinho Nova Laranjeiras Pinhão Porto Barreiro Quedas do Iguaçu Reserva do Iguaçu Rio Bonito do Iguaçu Turvo Virmond</p>
<p>30 - Microrregião Geográfica Palmas Clevelândia Coronel Domingos Soares Honório Serpa Mangueirinha Palmas</p>
<p>09 - MESORREGIÃO GEOGRÁFICA SUDESTE PARANAENSE</p>
<p>31 - Microrregião Geográfica Prudentópolis Fernandes Pinheiro Guamiranga Imbituva Ipiranga Ivaí Prudentópolis Teixeira Soares</p>
<p>32 - Microrregião Geográfica Irati Irati Mallet Rebouças Rio Azul</p>
<p>33 - Microrregião Geográfica União da Vitória Bituruna Cruz Machado General Carneiro Paula Freitas Paulo Frontin Porto Vitória União da Vitória</p>
<p>34 - Microrregião Geográfica São Mateus do Sul Antônio Olinto São João do Triunfo São Mateus do Sul</p>
<p>10 - MESORREGIÃO GEOGRÁFICA METROPOLITANA DE CURITIBA 35 - Microrregião Geográfica Cerro Azul Adrianópolis Cerro Azul Doutor Ulysses</p>

<p>36 - Microrregião Geográfica Lapa</p> <p>Lapa Porto Amazonas</p>
<p>37 - Microrregião Geográfica Curitiba</p> <p>Almirante Tamandaré Araucária Balsa Nova Bocaiúva do Sul Campina Grande do Sul Campo Largo Campo Magro Colombo Contenda Curitiba Fazenda Rio Grande Itaperuçu Mandirituba Pinhais Piraquara Quatro Barras Rio Branco do Sul São José dos Pinhais Tunas do Paraná</p>
<p>38 - Microrregião Geográfica Paranaguá</p> <p>Antonina Guaraqueçaba Guaratuba Matinhos Morretes Paranaguá Pontal do Paraná</p>
<p>39 - Microrregião Geográfica Rio Negro</p> <p>Agudos do Sul Campo do Tenente Piên Quitandinha Rio Negro Tijucas do Sul</p>

NOTA: Posição em junho de 2012.

(1) Até março de 2004, o município de Alto Paraíso denominava-se Vila Alta.

Fonte: IPARDESb, 2017.