

STELA BASSO MONTORO

**ANÁLISE TÉCNICO E ECONÔMICA DA CODIGESTÃO ANAERÓBIA DA CAMA
DE FRANGOS COM CULTURAS ENERGÉTICAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA**

Botucatu

2020

STELA BASSO MONTORO

**ANÁLISE TÉCNICO E ECONÔMICA DA CODIGESTÃO ANAERÓBIA DA CAMA
DE FRANGOS COM CULTURAS ENERGÉTICAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA**

Tese apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus
de Botucatu, para obtenção do título de
Doutor em Agronomia (Energia na
Agricultura).

Orientador: Jorge de Lucas Junior

Coorientador: David Ferreira Lopes Santos

Botucatu

2020

M798a

Montoro, Stela Basso

Análise técnico e econômica da codigestão anaeróbia da cama de frangos com culturas energéticas para geração de energia / Stela Basso Montoro. -- Botucatu, 2020
97 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu

Orientador: Jorge de Lucas Junior

Coorientador: David Ferreira Lopes Santos

1. Biogás. 2. Biofertilizante. 3. Batata doce. 4. Mandioca. 5.
Simulação de Monte Carlo. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

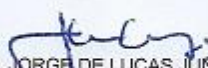
Título: ANÁLISE TÉCNICO E ECONÔMICA DA CODIGESTÃO ANAERÓBIA DA CAMA DE FRANGOS COM CULTURAS ENERGÉTICAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA

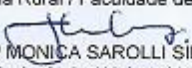
AUTORA: STELA BASSO MONTORO

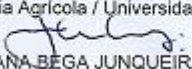
ORIENTADOR: JORGE DE LUCAS JUNIOR

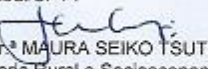
COORDENADOR: DAVID FERREIRA LOPES SANTOS

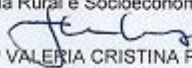
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em AGRONOMIA (ENERGIA NA AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. JORGE DE LUCAS JUNIOR
Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - UNESP


Prof.ª Dr.ª MONICA SAROLLI SILVA DE MENDONÇA COSTA
Engenharia Agrícola / Universidade Estadual do Oeste do Paraná


Dr.ª JULIANA BEGA JUNQUEIRA
Jaboticabal/SP /


Prof.ª Dr.ª MAURA SEIKO TSUTSUI ESPERANCINI
Engenharia Rural e Socioeconomia / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP


Prof.ª Dr.ª VALERIA CRISTINA RODRIGUES SARNIGHAUSEN
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP

Botucatu, 16 de abril de 2020.

Aos meus Excelentíssimos professores,

George e David,

dedico

AGRADECIMENTOS

Ao meu namorado, noivo, marido, Gabriel Conde, que sem dúvidas foi a pessoa que mais me deu suporte, amor e atenção nesta jornada, sempre compreensivo, paciente e alegre, me auxiliou, sanou dúvidas estatísticas, carregou os baldes pesados com dejetos e escutou inúmeras vezes um monólogo sobre finanças e outros assuntos da tese. Sempre me deu forças e proporcionou momentos felizes de lazer, para que eu pudesse concluir esta intensa etapa da minha vida. Eu te amo, esta conquista também é sua.

A minha família, pai Rolando Montoro e mãe Rosangela I. B. Montoro, que me conceberam a vida e deram TODO o suporte necessário para eu chegar até aqui, e aos meus irmãos Rafaela e Victor, dessas quatro pessoas incríveis, amor, carinho e atenção, nunca faltou. Sempre apoiaram a minha escolha pela vida acadêmica. Incentivam e auxiliam para eu atingir meu objetivo e sonho de ser professora, pesquisadora e consultora. Jamais deixaram de acreditar no meu potencial para seguir este caminho de muito estudo, dedicação e responsabilidade. Amo vocês.

Ao professor Jorge de Lucas Junior, meu amigo e orientador. Excelente profissional e Emérito, dedica sua vida à ciência, educação e ao desenvolvimento do país. Sempre brilhante na arte de educar, com muita paciência e atenção, me ensinou, me guiou e desenvolveu meu potencial desde a graduação. Vibrou e comemorou, muitas vezes ao meu lado, as minhas conquistas acadêmicas até aqui. Acompanhou de perto e de longe o meu amadurecimento acadêmico e humano, me dando suporte, segurança e autonomia para realizar as minhas escolhas, sempre crente no meu potencial. A você sempre faltarão palavras para expressar toda minha gratidão. Te admiro como ser humano e profissional, e agradeço por sempre tê-lo presente em minha vida. “Você é ótimo”.

Ao professor David Ferreira Lopes Santos, meu também orientador. Profissional Brilhante e raro atualmente, com tão pouca idade, tem tantas experiências e atividades, que aparentemente o seu tempo é regulado diferente dos demais, a isso, se deve toda sua dedicação, responsabilidade e excelência em tudo que se propõe, você é um exemplo. Proporcionou um dos anos mais intensos e produtivos da minha vida acadêmica e me permitiu descobrir, mais uma vez, a 1ª foi na graduação, outra realização profissional, agora, uni as finanças, a pesquisa e à docência. Sempre atencioso, prontamente sanou minhas dúvidas, me ensinou e orientou, trouxe novos

conhecimentos, desafios, TCCs, artigos e a esperança do pós-doc. Admiro o profissional e a pessoa que você é, e agradeço sua atenção e confiança em mim até aqui. Espero que eu possa continuar em sua equipe, trabalhando muito e me desenvolvendo ainda mais, afinal “não existe almoço grátis”.

A minha amiga e irmã de coração Henriette “Atrevida”, presente que a faculdade e república me proporcionaram. Me auxiliou e apoiou em tantos momentos, mediu gás, abasteceu biodigestores, se sujou e me deu carona MUITO SUJA após preparar cargas. Amiga em todas as horas, sorrimos e choramos, erramos e aprendemos juntas, nesses 10 anos. Você faz parte intensamente de tantos momentos e emoções, de cada etapa, da graduação, mestrado e doutorado. Te admiro muito e obrigada por tudo. #famíliajabuka.

Aos amigos e familiares que torceram, deram forças e participam da minha vida.

Ao programa Energia na Agricultura, Unesp Botucatu, Unesp Jaboticabal e todos os professores e funcionários que me auxiliaram, contribuíram e participaram de alguma maneira para a realização deste trabalho e em minha formação.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro que possibilitou me dedicar inteiramente a esta pesquisa.

Aos membros da banca por se disporem a contribuir e aprimorar este estudo.

“Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável para aprender a conhecer a influência libertadora da beleza do reino do espírito, para seu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade à qual seu futuro trabalho pertencer”. Albert Einstein

RESUMO

As demandas por energia e alimento aumentarão com as projeções do crescimento populacional mundial. O Brasil está entre os países com o desafio de atender essas demandas. O tratamento dos resíduos gerados na agropecuária tem potencial para produção de biogás e biofertilizante por meio de biodigestores, insumos essenciais para alavancar a produção de alimentos e o desenvolvimento sustentável. Com isso, analisou-se a viabilidade técnica e econômica da codigestão de cama de frango com batata doce ou mandioca visando aumentar a produção de energia e reciclagem de nutrientes dos resíduos da produção de frangos. A utilização de culturas energéticas para codigestão anaeróbia é uma inovação para geração de energia renovável em propriedades rurais e tem ganhado atenção em economias emergentes, que tem como desafio suportar a produção de alimentos com sustentabilidade. O ensaio foi realizado com três tratamentos, cama de frango, cama de frango com batata doce e cama de frango com mandioca. A codigestão com as culturas energéticas foram mais eficientes que a monodigestão. A mandioca superou a batata doce em 17,09% no rendimento médio de biogás diário e reduziu 12 e 3,32% mais sólidos totais e voláteis, respectivamente. No entanto, o potencial de biogás da batata doce $0,449 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{SVad}$ e da mandioca $0,457 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{SVad}$ não apresentaram diferença significativa, assim como os teores de metano com 61,92 e 61,79%, respectivamente, demonstrando o potencial equivalente das duas culturas na geração de bioenergia. Além da geração de energia renovável, o processo de codigestão produziu um biofertilizante com concentrações médias de 1,24% de N, 3,09% de P e 3,11% de K. Para avaliar se esse sistema é economicamente viável realizou-se a análise econômica pelo método do Fluxo de Caixa Descontado e estocástica com o suporte da Simulação de Monte Carlo, definindo como variáveis de incerteza do modelo os preços de energia elétrica, adubo mineral e biodigestores, com reflexos no Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR). Foram elaborados 30 cenários referentes aos três tratamentos do ensaio de digestão anaeróbia em 10 escalas animais, a fim de contemplar pequenos, médios e grandes avicultores. Os resultados dos VPLs anualizados incrementais demonstraram que a codigestão anaeróbia da Cama de frango com batata doce e mandioca melhora os lucros dos médios e grandes produtores em 56 a 275%, quando comparado ao custo oportunidade da venda da cama aviária. Os resultados estocásticos validam a viabilidade econômica de médios e grandes avicultores com 100% de probabilidade, mesmo com variações nos preços de receita e custo do investimento. Aos pequenos produtores é vantajoso o uso das culturas energéticas e a venda do resíduo do processo de preparação do substrato dos biodigestores, como adubo orgânico, para que o investimento seja viável em 64,3 a 100% das possibilidades. Não obstante, a digestão anaeróbia possibilitou a produção de energia renovável 80% mais barata que a média nacional.

Palavras-chave: Biogás. Biofertilizante. Batata doce. Mandioca. Simulação de Monte Carlo.

ABSTRACT

Demand for energy and food will increase with projections of world population growth. Brazil is among the countries with the challenge of meeting these demands. The treatment of waste generated in agriculture has the potential to produce biogas and biofertilizer through biodigesters, essential inputs to leverage food production and sustainable development. With this, the technical and economic feasibility of codigestion of chicken with sweet potatoes or manioc was analyzed in order to increase energy production and recycling nutrients from chicken production residues. The use of energy crops for anaerobic codigestion is an innovation for the generation of renewable energy in rural properties and has gained attention in emerging economies, which have the challenge of supporting sustainable food production. The trial was carried out with three treatments, chicken bed, chicken bed with sweet potato and chicken bed with cassava. Codigestion with energy crops was more efficient than monodigestion. Cassava exceeded sweet potatoes by 17.09% in the average daily biogas yield and reduced 12 and 3.32% more total and volatile solids, respectively. However, the biogas potential of sweet potato 0.449 m³ kg⁻¹SVad and cassava 0.457 m³ kg⁻¹SVad did not show any significant difference, as well as the methane contents with 61.92 and 61.79%, respectively, demonstrating the equivalent potential of both cultures in the generation of bioenergy. In addition to the generation of renewable energy, the co-management process produced a biofertilizer with average concentrations of 1.24% N, 3.09% P and 3.11% K. To assess whether this system is economically viable, the economic analysis using the Discounted and Stochastic Cash Flow method with the support of the Monte Carlo Simulation, defining the electricity uncertainty, mineral fertilizer and digestors prices as variables of uncertainty in the model, reflecting the Net Present Value (NPV) and Rate Internal Return Rate (IRR). Thirty scenarios were elaborated referring to the three treatments of the digestion test in 10 animal scales, in order to contemplate small, medium and large poultry farmers. The results of the incremental annualized NPV showed that the anaerobic codigestion of the chicken bed with sweet potatoes and cassava improves the profits of medium and large producers by 56 to 275%, when compared to the opportunity cost of selling poultry litter. The stochastic results validate the economic viability of medium and large poultry farmers with 100% probability, even with variations in revenue prices and investment costs. Small producers have the advantage of using energy crops and selling the residue from the digester substrate preparation process, as organic fertilizer, so that the investment is viable in 64.3 to 100% of the possibilities. Nevertheless, anaerobic digestion enabled the production of renewable energy 80% cheaper than the national average.

Keywords: Biogas. Biofertilizer. Sweet potato. Cassava. Monte Carlo simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desenho esquemático na seção frontal do reator semi-contínuo.....	36
Figura 2 – Etapas para preparação das cargas.....	38
Figura 3 – Fluxo das etapas desenvolvidas para análise de viabilidade econômica ..	40
Figura 4 – Produção diária de biogás dos três tratamentos avaliados (TCF, TBD e TM)	56
Figura 5 – Indicadores econômicos VPL, TIR dos 30 cenários analisados.....	68
Figura 6 – Preço do kWh e total de kWh gerados em 10 anos com biodigestores.....	74
Figura 7 – Histogramas dos cenários de pequenos produtores incrementados com a receita do adubo orgânico.....	75
Figura 8 – Histogramas com VPLs e TIR dos cenários TCF, TBD e T M com 20.000 e 40.000 aves.....	93
Figura 9 – Histogramas com VPLs e TIR dos cenários TCF, TBD e TM com 60.000 e 80.000 aves.....	94
Figura 10 – Histogramas com VPLs e TIR dos cenários TCF, TBD e TM com 100.000 e 120.000 aves.....	95
Figura 11 – Histogramas com VPLs e TIR dos cenários TCF, TBD e TM com 140.000 e 160.000 aves.....	96
Figura 12 – Histogramas com VPLs e TIR dos cenários TCF, TBD e TM com 180.000 e 200.000 aves.....	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição dos tratamentos.....	37
Tabela 2 – Dimensionamento dos cenários para análise econômica.....	43
Tabela 3 – m ³ de biogás dia ⁻¹ , Energia elétrica (kWh ano ⁻¹), Nitrogênio, Pentóxido de Fosforo e óxido de Potássio gerados em cada cenário.....	47
Tabela 4 – Gastos com investimentos e custos anuais do sistema.....	49
Tabela 5 – Balanço de massa dos materiais e substratos dos 3 tratamentos.....	54
Tabela 6 – Redução de sólidos totais e voláteis (RST e RSV) dos três tratamentos avaliados (TCF; TBD e TM)	54
Tabela 7 – Produção de biogás, porcentagem de metano e rendimentos específicos de biogás e metano para cada tratamento.....	58
Tabela 8 – Concentrações de Nitrogênio, Fósforo e Potássio no biofertilizante.....	60
Tabela 9 – Fluxos de caixa médio, em mil reais, dos cenários TCF, TBD e TM, para escalas de 20.000 a 100.000 frangos.....	64
Tabela 10 – Fluxos de caixa médio, em mil reais, dos cenários TCF, TBD e TM, para escalas de 120.000 a 200.000 frangos.....	65
Tabela 11 – Custos oportunidade da cama de frango e médias das receitas de energia elétrica e biofertilizante dos projetos (TCF, TBD e TM)	68
Tabela 12 – VPLs anualizados dos 30 cenários, VPLs anualizados incremental e % de incremento de renda anual do sistema de digestão anaeróbia que supera o custo oportunidade da venda da cama de frango.....	70
Tabela 13 – Quantidade de substrato retido na separação de sólidos e potencial de receita com a venda do material, como condicionador de solo.....	71
Tabela 14 – Valores de VPLs e TIRs com maiores probabilidades de acontecer.....	72

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	25
2.1	IMPORTÂNCIA DE RECURSOS NATURAIS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA.....	25
2.2	AVICULTURA NO BRASIL.....	27
2.3	Cama de frango.....	29
2.4	DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	30
2.5	CODIGESTÃO E CULTURAS ENERGÉTICAS.....	31
2.6	ANÁLISE ECONÔMICA.....	32
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	35
3.1	ENSAIO SEMI-CONTÍNUO.....	35
3.1.1	Substratos e inóculo.....	35
3.1.2	Descrição dos biodigestores.....	35
3.1.3	Descrição dos tratamentos.....	37
3.1.4	Métodos analíticos e químicos.....	38
3.1.5	Análise estatística.....	40
3.2	ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....	40
3.2.1	Construção dos cenários.....	41
3.2.2	Premissas dos fluxos de caixa dos projetos.....	44
3.2.3	Indicadores Econômicos.....	50
3.2.4	Simulação de Monte Carlo.....	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
4.1	ENSAIO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	54
4.1.1	Eficiência na remoção de sólidos.....	54
4.1.2	Rendimentos e potenciais específicos de biogás e metano.....	56
4.1.3	Recuperação de nutrientes na digestão anaeróbia.....	59
4.2	ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....	61
4.2.1	Análise econômica determinística.....	61
4.2.2	Análise econômica estocástica.....	72
4.2.3	Implicação tecno-econômica.....	76
5	CONCLUSÃO.....	79
	REFERÊNCIAS.....	81
	APÊNDICE A – HISTOGRAMAS.....	93

1 INTRODUÇÃO

Produzir energia limpa e acessível à população sem impactar o ambiente natural é um desafio fundamental das economias mundiais. Tal desafio estimulou o desenvolvimento tecnológico de biodigestores ao longo de décadas culminando no uso desse sistema principalmente no setor agropecuário em diferentes países e regiões: Bangladesh (KHAN et al., 2016); Brasil (FERREIRA et al., 2018); Índia (MITTAL et al., 2018); América Latina (GARFÍ et al., 2016); Europa (GRANDO et al., 2017); África (MUTUNGWAZI et al., 2018).

Os estudos sobre biodigestores nesses contextos esclarecem que a tecnologia da digestão anaeróbia em propriedades rurais possibilita a geração de energia renovável e a substituição de fertilizantes minerais, mitigando as emissões de gases de efeito estufa e reduzindo a contaminação do solo e da água causadas pelo descarte incorreto dos dejetos animais, se efetivando como uma tecnologia estratégica orientada para uma economia circular no agronegócio (MAO et al., 2015).

A produção agrícola e de proteína animal brasileira desempenha um papel fundamental na oferta de alimentos ao mercado doméstico e principalmente internacional, na medida que o país é o principal exportador mundial de proteína animal, alcançando 189 países (USDA, 2019).

A produção de frangos de corte industrial no Brasil produziu 6,16 bilhões de aves em 2019 (IBGE, 2019), porém, em média cada ave gera 3 kg de CO₂ (CALVET et al., 2011). Desta forma, a avicultura industrial brasileira apresenta alta produção global de CO₂, no entanto, cerca de 39% das emissões incorporadas à carne das aves brasileiras são oriundas da produção de soja utilizada na engorda dos frangos que são produzidos para atender as exportações (SILVA et al., 2014; CARO et al., 2018).

Comprometidos internacionalmente com os objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) traçados pela Organização das Nações Unidas (ONU), o Brasil tem o desafio de suportar o suprimento de 40% da demanda por alimentos do mundo, em função do crescimento populacional estimado em 9 bilhões de pessoas, nos próximos 35 anos (RENZAHO, et al., 2017).

Frente a isso, reconhece-se a necessidade do desenvolvimento de tecnologias que auxiliem a agropecuária brasileira produzir de forma sustentável e competitiva, destacando o país não só como produtor e exportador de alimentos, mas também

como excelência na utilização de sistemas de produção sustentáveis (GOVINDAN, 2018).

A avicultura é uma atividade com alto consumo de energia, no entanto, produz resíduos com considerável potencial energético, como a cama de frango, que, ao ser processada de forma a disponibilizar essa energia por meio da recuperação de nutrientes na digestão anaeróbia, contribui para o equilíbrio energético nas operações que se desenvolvem dentro do ambiente de produção, retornando 46,7% da energia utilizada (SANTOS e LUCAS JR., 2004; GALBIATTI et al., 2010).

Apesar dos efeitos positivos da digestão anaeróbia na produção de frangos, com a recuperação energética e a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) já explorados na literatura (ROMERO-GÜIZA et al., 2016; GRANDO et al., 2017; LIN et al., 2018), a tecnologia tem potencial para ser amplamente utilizada na avicultura brasileira, especialmente se houver estudos que comprovem também a sua viabilidade econômica para geração de biogás e biofertilizante utilizando a cama de frango como biomassa.

Estudos já realizados demonstram que a cama de frango tem altas quantidades de ácido úrico, sendo que as altas concentrações de amônia resultantes da degradação, podem causar inibição do processo de digestão anaeróbia, desequilibrando a relação carbono/nitrogênio e comprometendo a produção de biogás e biofertilizante (ABOUELENIEN et al., 2009; NIU et al., 2013; RAJAGOPAL et al., 2013).

A inibição do processo anaeróbio pode ser evitada com a codigestão, processo que combina diferentes materiais orgânicos com características complementares, equilibrando de maneira eficiente a relação carbono/nitrogênio (ABOUELENIEN et al., 2014; ZHANG et al., 2014; GLANPRACHA e ANNACHHATRE, 2016; DAMACENO et al., 2019; MONTORO et al., 2019).

O uso da mandioca e da batata doce oferece um enorme potencial para a produção de bioenergia e, em particular, o biogás, já que as duas raízes acumulam cerca de 35 e 32% de carboidratos, teor de amido de 32,4% e 29,3% e açúcares solúveis de 6,39% e 15,3% na matéria fresca, respectivamente (SCHMTIZ et al., 2016; BATISTA et al., 2019), componentes que, melhoram a eficiência dos microorganismos nos biodigestores, acelerando o processo de degradação dos materiais e aumentando a produção de biogás (DAMACENO et al., 2019; MONTORO et al., 2019).

Essas culturas energéticas são amplamente estudadas para produção de bioetanol, principalmente em países em desenvolvimento, já que são reconhecidas como culturas de fácil cultivo, adaptadas a diferentes solos e climas e são principalmente produzidas por agricultores familiares, o que as torna não só uma fonte de matéria prima para produção de energia renovável, mas também desenvolve a agricultura sustentável, aumentando a geração de emprego e renda para pequenos produtores rurais (OKUDOH et al., 2014; CARMONA et al., 2015; MOTSA et al., 2016; VEIGA et al., 2016).

O destaque da avicultura brasileira no mercado de carnes, com 13,9 milhões de toneladas produzidas em 2019 e as estimativas de crescimento do setor em 34,5% (USDA, 2019), exige dos avicultores brasileiros uma gestão eficiente dos recursos e resíduos gerados na produção, com vistas à sustentabilidade dos seus sistemas de produção.

O consumo de energia na produção de frango de corte é um fator determinante para o sucesso do negócio, pois devido ao metabolismo intenso das aves e sua baixa capacidade de termorregulação corporal, uma variação na temperatura no galpão de 5°C acima da temperatura interna da ave torna-se letal (FUNCK e FONSECA, 2008).

Além disso, os aviários no Brasil possuem uma estreita margem de lucro no setor, que segundo Dracocce, Leismann e Hofer (2018) é atribuído às assimetrias no poder de barganha entre agroindústrias e produtores que acabam sendo remunerados somente para cobrirem os custos de produção, tornando o pequeno avicultor dependente da receita secundária com a venda da cama de frango; além disso, os autores relatam que esses produtores não possuem um planejamento empresarial e, tampouco, propostas para o gerenciamento dos resíduos sólidos gerados pela atividade.

Neste contexto, avaliar a viabilidade técnica e econômica de uma tecnologia que possibilite o melhor gerenciamento dos resíduos pode permitir ao produtor avícola: i) autossuficiência energética por uma fonte alternativa de energia renovável e descentralizada; ii) produção de adubo orgânico e biofertilizante, contribuindo à redução dos custos de produção dos alimentos dos animais; iii) eliminação dos riscos decorrentes das variações de preços de energia elétrica, bem como das constantes interrupções associadas às redes de distribuição no meio rural em um país continental; iv) comercialização do adubo orgânico, subproduto do processo de

codigestão (SCARLAT et al., 2015; MAYERLE e FIGUEREDO, 2016; MONTORO et al., 2019; FREITAS et al., 2019).

Há um desafio na avaliação da viabilidade econômica de projetos desta natureza que é incluir no modelo de análise as diferentes incertezas inerentes ao processo de produção. Apesar disso, a literatura existente sobre análise econômica de investimentos em biodigestores quase sempre utiliza uma abordagem determinística para extrair o Valor presente líquido (VPL), Taxa interna de retorno e *Payback* simples e descontado, como exemplos, tem-se: milho (GEBREZGABHER et al., 2010; AKBULUT et al., 2013); silagem de milho e sorgo (BALUSSOU et al., 2011); sorgo (AGOSTINI et al. 2016); Beterraba (BOLDRIN et al., 2016) e Batata doce (MONTORO et al., 2019).

Diante disso, avaliar as possíveis alterações nos preços que compõe a receita dos projetos de digestão anaeróbia, assim como o valor do investimento, podem auxiliar na gestão dos recursos e riscos do projeto, bem como, possibilita uma análise mais ampla considerando um elevado conjunto de cenários.

Neste caso, justifica-se em trabalhos que tratam do uso de biodigestores para geração de energia o uso da Simulação de Monte Carlo, a qual baseia-se em múltiplos cenários prováveis, pouco utilizada neste campo de pesquisa. Por meio da geração de números aleatórios, adequadamente distribuídos, atribui-se valores às variáveis que se deseja investigar a partir de parâmetros objetivos, contribuindo para uma análise de risco mais próxima à realidade (ZHAO et al., 2015; BATAN et al., 2016; CLERCQ et al., 2016; DENNEHY et al., 2017).

Em suma, frente os desafios atuais e previstos que exigem um setor agropecuário sustentável e que seja capaz de fornecer produtos que atendam às demandas por alimentos e energia, reconhece-se a real importância do tema vislumbrando a necessidade de promover o desenvolvimento sustentável dos produtores avícolas.

Por tanto objetivou-se avaliar os potenciais da batata doce e da mandioca, para incrementar a produção de biogás e melhorar a reciclagem de nutrientes da cama de frango, quando codigeridas em biodigestores e analisar a viabilidade econômica para pequenos, médios e grandes produtores avícolas de implementarem biodigestores para geração de energia elétrica, biofertilizante e condicionador de solo utilizando os resíduos orgânicos gerados na produção e culturas energéticas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Importância de recursos naturais para geração de energia

Estima-se que, em 2050, a população mundial superará 9 bilhões de pessoas, a necessidade por água e alimento crescerá mais de 50% e a demanda por energia praticamente dobrará, sendo cruciais os esforços para fornecer eletricidade a 1,2 bilhões de pessoas, água potável a outras 783 milhões e alimento a 842 milhões de desnutridos (IRENA, 2015).

Em um mundo cada vez mais limitado por recursos, o conceito que ganha espaço nos últimos anos, é o nexo água-energia-alimento (*Water-Energy-Food* - WEF) (ENDO et al., 2017). O conceito traz a ideia de “economia verde” e surge em resposta às mudanças climáticas e sociais, incluindo crescimento populacional, globalização, crescimento econômico e urbanização, que pressionam os três pilares do nexo resultando em sinergias ou *trade-offs* em diferentes setores ou grupos de interesse (GUTA et al., 2017; FERREIRA et al., 2018).

Neste contexto, torna-se evidente a interconexão desses fatores, já que, recursos hídricos são necessários para geração de energia em hidroelétricas, a energia é imprescindível para a captação, transporte e tratamento de águas e efluentes; e ambos – a água e a energia - são necessários para que alimentos sejam produzidos (FINLEY e SEIBER 2014; KIBLER et al., 2018). A abordagem inovadora do nexo reconhece a interdependência do uso desses recursos para o desenvolvimento com sustentabilidade (BIGGS et al., 2015).

No Brasil a água possui uma importância significativa já que a matriz energética é predominantemente hidráulica e gera 64% da energia elétrica doméstica (FERREIRA et al. 2018). Apesar de renovável a fonte hidráulica não é plenamente sustentável, pois novas usinas exigem novas plantas em biomas brasileiros sensíveis (Amazônia, Pantanal, Caatinga, Cerrado), gerando impactos ambientais irreversíveis em razão dos grandes lagos artificiais, e sociais, com a deslocação de populações ribeirinhas, na construção dessas obras, como por exemplo, Belo Monte, Santo Antônio e Jirau (LEES et al., 2017).

Além disso, a produção de energia hidráulica é centralizada em áreas distantes dos principais centros consumidores o que exige grandes investimentos nas linhas de distribuição, assim como, é dependente de chuvas, o que ocasiona problemas no

abastecimento de energia à população, quando há escassez no regime de precipitações. A dependência por esta fonte demonstra a necessidade de uma maior diversificação da matriz energética do país para garantir segurança nacional, incluindo novas fontes renováveis em uma estrutura de oferta descentralizada (IRENA, 2015).

O Brasil é destaque para suprir parte da necessidade por alimentos consumidos no mundo nas próximas décadas (CAMARGO et al., 2017; FAO 2019), pois o país detém alta disponibilidade de terra, água e energia renovável para a produção de alimentos em larga escala, em relação a outros países (CAMARGO et al., 2017; CHEN et al., 2018); todavia, essa atividade gerará grande quantidade de resíduos orgânicos, considerando as tecnologias e sistemas de produção existentes.

Além disso, o uso que se faz da energia é um dos fatores determinantes para o desenvolvimento do agronegócio e a possibilidade de escassez deste recurso, assim como a poluição causada por fontes fósseis, tem sugerido aos órgãos governamentais estimularem a busca de outras fontes alternativas de energias, preferencialmente não poluentes (FERREIRA et al., 2018; FREITAS et al., 2019).

A produção de energia renovável a partir da biomassa é uma alternativa para a diversificação da matriz energética brasileira, que é muito dependente de usinas hidrelétricas, no entanto a geração de energia elétrica por meio do biogás ainda não é muito representativa no país, com menos de 0,08% de participação e desse total 1,73% é proveniente de dejetos animais (FREITAS et al., 2019).

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), um município com 264.000 habitantes consomem cerca de 687,7GWh de energia elétrica por ano, sendo que, se houvesse a utilização do potencial de geração de biogás, a partir dos resíduos animais da produção pecuária brasileira, seriam gerados 13.452,96 GWh por ano, o suficiente para suprir a demanda de 5.164.434,25 de habitantes (FERREIRA et al., 2018).

A biomassa da produção agropecuária tem sido interesse de pesquisadores para o desenvolvimento de novas matérias primas como fonte alternativa de geração de energia, que impactem menos o ambiente em que estão inseridos (OKUDOH et al., 2014; PACETTI et al., 2015; SCARLAT et al., 2015; PATHAK et al., 2016; AFZAL et al., 2017; FERREIRA et al., 2018; HOLOHAN et al., 2019) e que atendam as demandas e objetivos de desenvolvimento sustentável globais traçados pela ONU (RENZHO, et al., 2017).

Os resíduos orgânicos agropecuários demonstram grande potencial para aumentar a participação da biomassa na geração de energia renovável à matriz

energética brasileira com o uso de biodigestores (FERREIRA et al., 2018), essa tecnologia auxilia a redução dos impactos ambientais causados pelos resíduos, descentraliza a distribuição de eletricidade e aumenta a competitividade do setor ao gerar trabalho e renda nas áreas rurais (SCARLAT et al., 2015; MAYERLE e FIGUEREDO, 2016; FERREIRA et al., 2018).

Para viabilizar a microgeração distribuída como alternativa para o aumento da produção de energia renovável de fontes alternativas no Brasil, tecnologias como os sistemas de digestão anaeróbia têm sido difundidas no país, atreladas as disposições legais criadas nos últimos anos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que visam incentivar essa prática aos produtores rurais, segundo a Resolução Normativa (REN) no. 482/2012 (FERREIRA et al., 2018).

Desta forma, o biogás é um combustível com todas as condições técnicas e econômicas a serem exploradas no Brasil. Com a expansão e crescimento dessa categoria de reutilização de energia, é possível estimular o desenvolvimento tecnológico e o setor industrial especializado em biodigestores, motores, conversores, unidades de controle e outros equipamentos e como consequência aumentar emprego e renda, além de difundir um sistema de geração de energia sustentável (FREITAS et al., 2019).

2.2 Avicultura no Brasil

O Brasil se destaca mundialmente como produtor e exportador de grãos e proteína animal (CAMARGO et al., 2017), sendo o maior exportador de carne de frango do mundo, produzindo 13,9 milhões de toneladas de frangos de corte em 2019 (FAO, 2019; USDA, 2019). As projeções apontam que, para o ano de 2027, a produção de carne de frango será de aproximadamente 17,7 milhões de toneladas, o que representa um acréscimo de 34,5% no volume produzido (USDA, 2019).

O agronegócio brasileiro possui no seu setor avícola um sistema de produção integrado entre avicultores e indústrias frigoríficas (GUARESKI et al., 2019). A importância socioeconômica da cadeia avícola de corte para o desenvolvimento brasileiro é altamente significativo, pois a carne de frango é a fonte de proteína animal mais consumida no país (45%) (USDA, 2019), além do setor congregar mais de 3,5 milhões de trabalhadores nas áreas rural e urbana (ABPA, 2019). O estado do Paraná

se destaca no país como maior produtor e exportador com 1,56 bilhões de aves produzidas e 1,48 bilhões exportadas (GUARESKI et al., 2019).

Para atender à crescente demanda e produzir em escala é necessário novas tecnologias, altos investimentos, linhas de créditos e taxas de juros que sejam compatíveis com a realidade do setor e competitivas no mercado internacional (OLIVEIRA et al., 2015). Segundo Espíndola (2012) e Schmidd e Silva, (2018) as sucessivas incorporações de novas tecnologias ao longo do tempo propiciaram a redução dos custos de energia e insumos e a melhoria dos sistemas de produção e controle na cadeia do frango.

Atualmente produtores de frango e as agroindústrias têm realizado parcerias com intuito de construir aviários altamente tecnológicos, porém existe uma preferência de ofertar essas parcerias para médios e grandes avicultores, os quais tendem a possuir melhores condições para obter crédito e realizar investimentos (DACROCE; LEISMANN; HOFER, 2018).

O pequeno produtor de aves brasileiro é precursor no sistema de integração vertical (RECK e SCHULTZ, 2016; GUARESKI et al., 2019), mas possuem instalações e equipamentos defasados e recursos financeiros limitados para fazer frente ao fluxo de investimento necessário em novas tecnologias sem comprometer sua liquidez no curto prazo (SCHMIDD e SILVA, 2018).

Com isso, a cadeia produtiva de frango de corte tem se transformando, na medida que, pequenos avicultores integrados, com problemas organizacionais e carências na gestão de seus recursos, estão cada vez mais descapitalizados e, com efeito, encerrando suas atividades, o que favorece a concentração em propriedades de médio e grande porte mais profissionalizadas (DACROCE; LEISMANN; HOFER, 2018).

Além disso, a necessidade em adequar as instalações e sistema de produção às regulamentações (ambientais, trabalhistas, sanitárias) aumentam os custos de produção no curto prazo e, com efeito, reduzem as margens e por vezes inviabilizam a atividade para pequenos e médios produtores (SCHMIDD e SILVA, 2018).

A fragilidade financeira dos produtores diante das exigências regulatórias e de mercado requeridas pelas agroindústrias, torna-os dependentes de recursos financeiros de terceiros (ESPÍNDOLA, 2012), sendo que a maioria dos produtores não possuem capacidade de alavancagem (SCHMIDD e SILVA, 2018), logo, tem sido indispensável o acesso ao crédito subsidiado para o início e a manutenção na

atividade (OLIVEIRA et al., 2015). Nesse sentido, a oferta de financiamentos de longo prazo facilita a viabilização dos empreendimentos de grande escala, estimulando o crescimento econômico do setor (DACROCE; LEISMANN; HOFER, 2018).

Segundo os dados levantados em estudos com aviários na região sul do Brasil o pequeno produtor possui galpão de 1.200m² e até 60.000 aves por lote, sendo economicamente sustentáveis, entretanto, o produtor não consegue superar seus custos e alguns até não se manteriam no mercado em médio e longo prazo sem a receita adicional da cama de frango, pois a margem entre o custo de produção por ave é de R\$ 0,377 e o valor pago pela agroindústria é de R\$0,370 (FARIAS e SCHNEIDER, 2017; DACROCE; LEISMANN; HOFER, 2018).

A capacidade produtiva é de fundamental importância para o êxito econômico dos produtores, pois a margem baixa exige que o pequeno avicultor aumente sua escala de produção, no entanto, para isso se faz necessário avaliar às condições para realizar o investimento (BELUSSO e HESPANHOL, 2011).

Frente a um agronegócio cada vez mais competitivo e um mercado consumidor mais exigente torna-se indispensável aliar a produção à novas tecnologias em equilíbrio com os aspectos econômicos, ambientais e sociais (OLIVEIRA et al., 2015). Desse modo, as inovações tecnológicas adotadas pelo avicultor são determinantes para elevar a competitividade e essenciais para definir sua posição no setor (SCHMIDD e SILVA, 2018).

2.3 Cama de frango

A atividade avícola é grande geradora de resíduos, em média, para cada 2 kg de carne produzida (DRACOSE et al., 2018) gera-se 1,75kg de cama por frango na matéria natural (Santos et al. 2005). Estima-se que em 2019 o Brasil gerou 10,79 bilhões de toneladas de cama de frango, com a produção de 6,16 bilhões de frangos (IBGE, 2019). A indústria avícola nos EUA gera mais de 10 milhões de toneladas de resíduos de cama de frango por ano (SHARMA et al., 2013). No Japão, cerca de 13 milhões de toneladas de cama de frango são geradas anualmente (ABOUELENIEN et al., 2009).

Quando gerenciados de maneira inadequada, os resíduos de aves podem causar sérios danos ao ambiente natural (YANG Y et al., 2012; SILVA et al., 2014): i) poluição do ar, com a emissão de gases de efeito estufa (PACHECO NETO et al.,

2018); ii) poluição do solo, com a acidificação, a eutrofização e a formação de oxidantes fotoquímicos (BILLEN et al., 2015).

O esterco de aves é amplamente tratado pelo processo de compostagem, porém este método não mitiga os gases de efeito estufa, que contribuem para o aquecimento global, além de, liberar nitrogênio através da volatilização da amônia, o que reduz o valor agronômico dos compostos (ABOUELENIEN et al., 2009).

O composto orgânico da cama aviária é muito utilizado na agricultura como adubo orgânico, pois contém grande quantidade de N amoniacal, porém devido aos processos de nitrificação e desnitrificação, a sua utilização para adubação causa maiores emissões de NH_3 , N_2O e NO_x (BILLEN et al., 2015).

Em contrapartida, é uma fonte abundante de biomassa para a produção de biogás via digestão anaeróbia (ABOUELENIEN et al., 2014). Segundo o levantamento realizado por Ferreira et al., (2018) no estado do Paraná, a cama de frango é o resíduo da produção pecuária com maior potencial anual de geração de energia, 911,15 GWh se comparado com os resíduos da produção de suínos com 574,38 GWh e de vacas leiteiras com 400,63GWh

No entanto, a cama de frango tem uma fração alta de matéria orgânica biodegradável em relação a outros resíduos animais, principalmente ácido úrico e proteínas, o que pode causar a inibição do processo de degradação e a diminuição do rendimento de biogás, com o desequilíbrio da relação carbono/nitrogênio no biodigestor (ABOUELENIEN et al., 2009; NIU et al., 2013; RAJAGOPAL et al., 2013; NESHAT et al., 2017). Deste modo, cria-se a oportunidade para o desenvolvimento da técnica de codigestão anaeróbia e o uso de biodigestores para gerenciar os resíduos da avicultura.

2.4 Digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo biológico que transforma matéria orgânica em biogás e biofertilizante ao degradar diferentes tipos de resíduos de origem animal e vegetal (ZHANG et al., 2016; DAMACENO et al., 2019). Esta tecnologia é amplamente estudada para o tratamento de resíduos orgânicos por apresentar alta eficiência na reciclagem de nutrientes e redução da carga orgânica, reduzindo o potencial poluente presente na biomassa (ROMERO-GÜIZA et al., 2016; GRANDO et al., 2017; LIN et al., 2018).

O biogás e o biofertilizante resultantes do processo são produzidos por meio de atividades metabólicas sinérgicas de consórcios de bactérias hidrolíticas, acidinogênicas, acetogênicas e metanogênicas em materiais orgânicos (LI et al., 2011).

O biogás contém cerca de 40 a 60% de metano que pode ser usado como fonte de energia renovável com diferentes usos (eletricidade, biocombustível ou térmica) (MAYERLE e FIGUEIREDO, 2016; LIN et al., 2018), reduzindo principalmente o consumo de água e combustíveis fósseis na produção de energia e as emissões de gases de efeito estufa na atmosfera (LIN et al., 2018).

O biofertilizante é um adubo orgânico líquido, rico em nutrientes e pode ser usado para fertirrigação de culturas, reduzindo o consumo de água na produção agrícola e os impactos ambientais na extração e produção de adubo mineral (SHEETS et al., 2015; YANG et al., 2015).

O emprego de biodigestores no meio rural pode proporcionar um melhor gerenciamento e aproveitamento dos resíduos agropecuários, aumentando a eficiência produtiva com a redução de custos, preservando os recursos naturais e o meio (FERREIRA et al., 2018; MONTORO et al., 2019).

2.5 Codigestão e culturas energéticas

Estudos demonstram que a inibição do processo anaeróbio pode ser melhorada com a codigestão, que consiste na combinação de diferentes materiais orgânicos com características complementares para otimizar o processo de degradação e aumentar a produção de metano, como observado nos estudos de Abouelenien et al., (2014) que obtiveram um incremento de 93% de metano; Zhang et al., (2014), 73% e Yeqing et al., (2013) um rendimento extra de $2,6\text{MJ kg}^{-1}\text{SVad}$, em relação a monodigestão da cama de frango.

Outros trabalhos têm utilizado a codigestão para estudar o potencial de produção de biogás de culturas energéticas como mandioca e a batata doce com resíduos animais (OKUDOH et al., 2014; GLANPRACHA e ANNACHHATRE, 2016; DAMACENO et al., 2019; MONTORO et al., 2019).

Segundo esses estudos o uso da mandioca e da batata doce oferecem um enorme potencial para a produção de bioenergia, com várias vantagens: serem produzidas em diferentes tipos de solo e clima; alta tolerância a seca; baixa incidência

de pragas ou doenças limitantes; baixa necessidade de fertilizantes; alta eficiência fotossintética e baixa exigência de manejo (OKUDOH et al., 2014; CASTRO et al., 2014; CARMONA et al., 2015; MOTSA et al., 2016; VEIGA et al., 2016).

As duas culturas possuem elevado teor de amido (32,4% e 29,3%) e açúcares solúveis (6,39% e 15,3%) na matéria fresca, para mandioca e batata doce, respectivamente (SCHMTIZ et al., 2016; BATISTA et al., 2019), o que auxilia no equilíbrio da relação C/N e melhora a eficiência dos biodigestores na degradação dos resíduos animais, aumentando os rendimentos de biogás e a qualidade do biofertilizante (OKUDOH et al., 2014; MONTORO et al., 2019).

A utilização da biomassa de culturas energéticas para produção de bioenergia tem sido interesse de estudos atuais, pois diminui os custos da energia e auxilia na mitigação do aquecimento global, comparado aos combustíveis fósseis (BEVENGA et al., 2016; ZABED et al., 2017; FERREIRA et al., 2018; SILVA et al., 2019). O biogás frente aos diferentes biocombustíveis é o que demonstra melhores oportunidades aos países em desenvolvimento, pois impulsiona a sustentabilidade na agricultura, melhora a qualidade do ambiente e gera emprego e renda (OKUDOH et al., 2014).

Apesar do amplo reconhecimento da recuperação de energia, água e nutrientes que a digestão anaeróbia pode realizar, barreiras técnicas, econômicas e políticas atrasam a implementação desse sistema em propriedades rurais de países em desenvolvimento (FERREIRA et al., 2018; ARNOLD e YILDIZ, 2015).

2.6 Análise econômica

As publicações atuais de estudos sobre biodigestores para produção de biogás, a partir das culturas energéticas, centram-se somente no potencial técnico dessas culturas (CAVINATO et al., 2010; CUETOS et al., 2011; ZHANG et al., 2013; LIJÓ et al., 2014; AGOSTINI et al., 2015; BOLDRIN et al., 2016; AKYOL et al., 2016; TUMUTEGYEREIZE et al., 2016; ACHEBE et al., 2018; MKRUQULWA et al., 2019; DAMACENO et al., 2019).

A escassez de trabalhos é ainda maior sobre estudos tecno-econômicos para produção de biogás com a utilização de batata doce e mandioca, sendo a maioria dos estudos sobre a produção de bioetanol com essas culturas (SCHWEINBERGER et al., 2016; WEBER et al., 2016; NANDIYANTO et al., 2018; MARX, 2019) e não há

estudos tecno-econômicos que avaliaram o potencial dos resíduos da avicultura de corte codigeridos com raízes de batata doce ou mandioca¹.

Os estudos econômicos já realizados para avaliar o potencial de biogás a partir da codigestão de culturas energéticas (beterraba, trigo, cevada, milho, sorgo, cana gigante, batata doce) com resíduos animais (bovinos, suínos e aves) (MURPHY e POWER 2009; GEBREZGABHER et al., 2010; BALUSSOU et al., 2011; AKBULUT et al., 2013; SGROI et al., 2015; AGOSTINI et al., 2016; BOLDRIN et al., 2016; MONTORO et al., 2019) demonstram que os gastos iniciais de capital para implementação desses sistemas, assim como, os custos de operação, matéria prima e riscos inerentes ao projeto podem impedir que produtores rurais invistam nos biodigestores.

Os estudos sobre viabilidade econômica citados utilizam as mesmas técnicas de análise de investimento desenvolvidas para as finanças corporativas, os quais associam a análise tradicional do Fluxo de Caixa Descontado e as estimativas do Valor Presente Líquido e da Taxa Interna de Retorno, no entanto, esta técnica não leva em conta todas as incertezas que envolvem as variáveis que suportam o fluxo de caixa (MUSSHOFF, 2012), podendo afetar as decisões de investimento.

O Fluxo de Caixa é uma ferramenta gerencial com propósito de viabilizar a gestão e o controle das entradas e saídas de caixa de uma empresa ou projeto (LIMA et al., 2016). O empresário rural necessita aprimorar suas habilidades administrativas, as quais são determinadas pelo gerenciamento organizacional e a gestão correta do fluxo de caixa da fazenda, para diminuir o impacto negativo do fator econômico-financeiro vinculado à sua empresa (PEREIRA et al., 2015; FARINELLI et al., 2018).

O valor de um investimento está atrelado a sua capacidade de geração caixa, a vida útil do projeto e o seu risco inerente (SANTOS e JURCA, 2013). Para isso, elabora-se os cálculos do fluxo de caixa livre para o investidor durante a vida útil do investimento, de modo que, os valores de cada período são descontados à taxa de juros que representa o mínimo retorno esperado para o capital, comumente expresso pelo Custo Médio Ponderado de Capital (CMPC) (MONTORO et al., 2017; FARINELLI et al., 2018).

¹ Essa afirmação decorre de pesquisa junto às bases Scopus e Web of Science em 01/11/2019 utilizando os termos biodigestores; cama de frango; resíduos da avicultura; batata doce; mandioca; viabilidade econômica nos campos de título, palavras chaves e resumo.

As incertezas de um projeto devem-se a fatores externos, como oscilações estocásticas dos preços e custos que compõe o fluxo de caixa. Segundo Copeland e Antikarov, (2001) “as flexibilidades gerenciais embutidas nos projetos dão liberdade ao gerente para tomar decisões, tais como investir ou abandonar um determinado projeto, estas flexibilidades são denominadas opções reais”.

Neste contexto, quando há uma sub-avaliação do projeto e alguma possibilidade seja ignorada na análise econômica pode ocasionar em erros irreversíveis na tomada de decisões, portanto, a flexibilidade gerencial tem um valor que não é considerado pelas técnicas convencionais, tais como o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR) (MUSSHOFF, 2012).

Segundo o estudo de Arnold e Yildiz (2015) a técnica de Simulação de Monte Carlo, ainda pouco utilizada no gerenciamento de riscos financeiros de projetos para produção de energia renovável, permite focar nos fatores que podem impactar os fluxos de caixa econômicos, e os possíveis efeitos de um evento adverso nos ganhos do projeto, permitindo um melhor gerenciamento dos riscos e flexibilidade para a tomada de decisão.

Conhecida como uma técnica de simulação estocástica que avalia iterativamente um modelo determinístico usando variáveis de risco aleatórias como entradas, a Simulação de Monte Carlo pode ser usada para avaliar uma proposta de investimento permitindo ao investidor gerenciar melhor os riscos de um projeto, sendo assim, a combinação de variáveis de entrada do modelo abrange o conjunto de cenários e riscos aos quais o investimento pode estar exposto (BATAN et al., 2016).

Segundo Dennehy et al., (2017) a principal vantagem da técnica estocástica em relação a determinística para usinas de biogás é a possibilidade de analisar os efeitos da variação dos parâmetros de entrada nas métricas financeiras, em que, a probabilidade de um projeto ser financeiramente viável pode ser quantificada. Tais previsões estocásticas são muito valiosas, no entanto, deve-se notar que a precisão de tais métodos é proporcional à precisão das distribuições de valores de entrada assumidos como prováveis no futuro.

Estudos atuais evidenciam a importância de avaliar a viabilidade econômica dos biodigestores para produção de energia usando abordagens de modelagem determinística e estocásticas (ZHAO et al., 2015; BATAN et al., 2016; CLERCQ et al., 2016; DENNEHY et al., 2017), permitindo satisfazer as necessidades e perspectivas de investidores avesso ao risco.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Objetivando examinar comparativamente os efeitos técnicos e econômicos que a batata doce (BD) e a mandioca (M) gerariam quando codigeridas com cama de frango (CF) em biodigestores, dividiu-se o estudo em duas etapas: a) Ensaio semi-contínuo e b) Análise de viabilidade econômica.

3.1 Ensaio semi-contínuo

3.1.1 Substratos e inóculo

Os substratos do ensaio foram compostos por CF, BD, M e água. A CF foi adquirida de um galpão convencional localizado no município de Monte Alto – SP, era de 4ª reutilização, composta por casca de amendoim e estava armazenada há 1 ano, em uma caixa d' água coberta com tampa, no Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV) de Jaboticabal. A batata-doce (*Ipomoea batatas*), de casca rosada e polpa branca e a Mandioca (*Manihot esculenta*, Crantz) foram obtidas semanalmente em um mercado local durante o experimento e armazenadas no refrigerador.

O inóculo utilizado foi composto por 300L de efluente de digestores operados com CF e água (5% ST), 240L de efluente de digestores operados com esterco de gado leiteiro e água (8% ST), todos com 30 dias de tempo de retenção hidráulica (TRH) em sistema semi-contínuo, somados a mistura de 20kg de CF diluídos em 180L de água, separando a fração sólida com peneira de malha de 3mm.

3.1.2 Descrição dos biodigestores

Os digestores semi-contínuos utilizados foram construídos pela equipe do Laboratório de Biomassa e digestão Anaeróbia da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV), UNESP – Campus Jaboticabal (Figura 1).

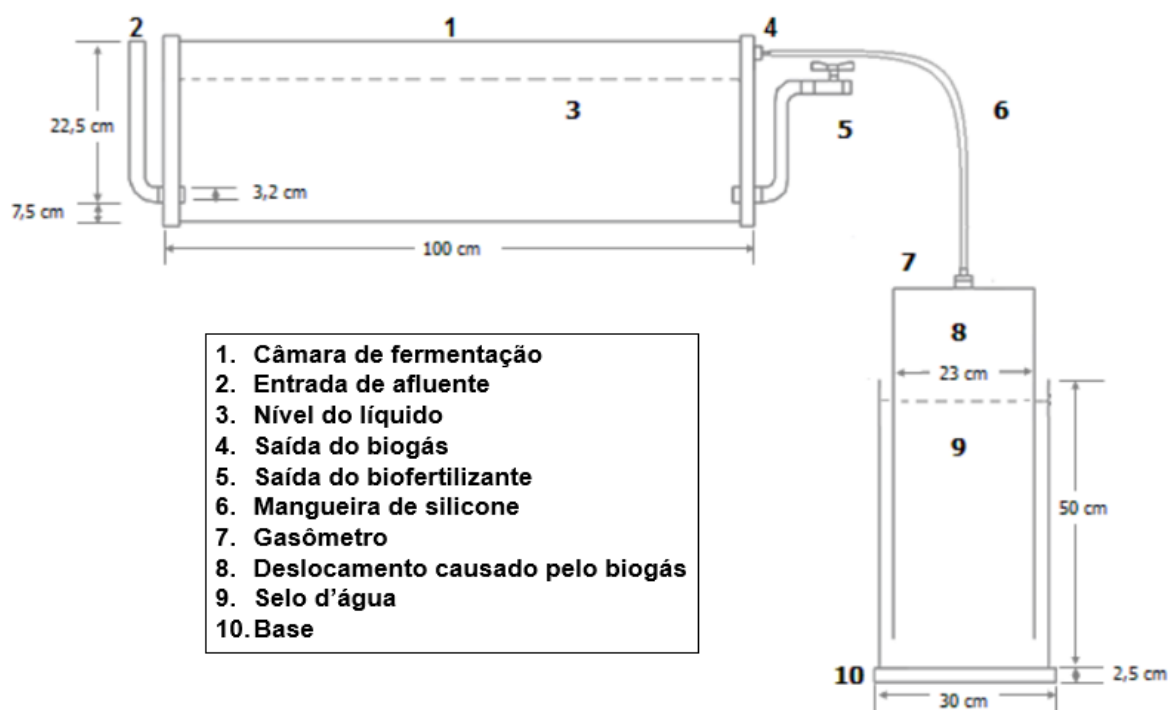
A confecção dos digestores foi realizada com tubos de PVC, sendo uma câmara de fermentação (60L), com as extremidades vedadas por placas de PVC, onde em cada extremidade instalou-se um tubo para entrada do substrato, outro para

saída do biofertilizante e uma mangueira de silicone que conduz o biogás ao gasômetro.

Os gasômetros consistem em um tubo de PVC, com apenas uma extremidade vedada, preenchidos com água e outro tubo de PVC, com uma extremidade vedada e um registro instalado, para liberação do biogás, como este último permanece submerso em água, é possível medir o deslocamento na medida que o gás é produzido na câmara de fermentação e conduzido ao gasômetro. Uma régua graduada foi fixada no lado externo dos gasômetros para determinar o deslocamento.

Os digestores foram colocados em suportes de madeira dentro de uma sala do laboratório sem sofrer influência direta de temperatura e umidade.

Figura 1 – Desenho esquemático na seção frontal do reator semi-contínuo



Fonte: Damaceno et al. (2019)

3.1.3 Descrição dos tratamentos

Utilizaram-se 12 digestores semi-contínuos com capacidade de 60L cada e tempo de retenção hidráulica determinado para a degradação dos materiais de 30 dias. O ensaio semi-contínuo foi composto por 3 tratamentos, com 4 repetições cada (Tabela1). Para iniciar o processo de forma eficiente os digestores foram abastecidos com 60L de inóculo (3.1.1) e após 30 dias iniciaram-se as cargas diárias de 2L durante 60 dias.

As coletas de dados foram realizadas diariamente, a partir da primeira carga, para as análises de produção de biogás e semanalmente, para as análises de qualidade e potenciais do biogás e biofertilizante, esta última, iniciando-se 10 dias após o início das cargas, pois este foi o tempo necessário para a estabilização do processo, e duraram 50 dias.

Para a composição dos tratamentos determinaram-se as quantidades de matéria seca (MS) da CF (87%), BD (19,83%) e M (40,32%) e a partir desses dados pôde-se calcular as cargas diárias de 2L (CF + água) contendo 6% de MS, diluição de 1:20, antes do peneiramento. A BD e a M foram adicionadas após o peneiramento. Por fim, as cargas abastecimento dos biodigestores continham em média 1,28, 1,46 e 1,64 % de MS.

Tabela 1 – Descrição dos tratamentos: cama de frango (TCF) batata doce (TBD) e mandioca (TM), em matéria natural.

(TCF)	0,14kg de CF + 1,86kg de água
(TBD)	0,14kg de CF + 1,86kg de água + 0,021kg de BD
(TM)	0,14kg de CF + 1,86kg de água + 0,021kg de M

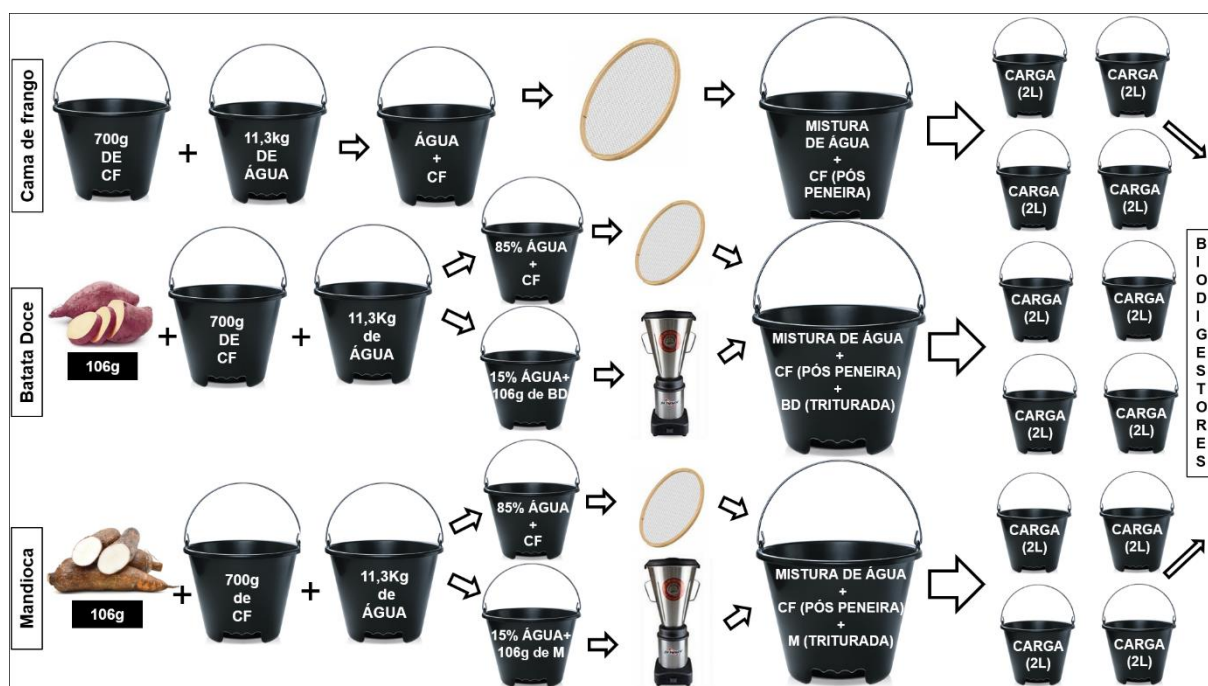
As cargas foram preparadas efetuando-se as seguintes etapas:

Primeiramente pesaram-se as mesmas quantidades totais de água e CF para os três tratamentos em baldes separados. Para o tratamento TCF a quantia total de CF foi misturada à quantia total de água e após a homogeneização, a fração sólida foi separada, utilizando-se uma peneira de 3mm.

Nos tratamentos que continham a BD e a M, pesou-se a mesma quantia de cada tuberosa separadamente e as mesmas foram trituradas em liquidificador industrial com parte do total de água previamente pesada para cada tratamento.

A parte restante de água foi misturada com o total de CF previamente pesada e após a homogeneização, a fração sólida foi retirada com auxílio de uma peneira de 3mm. A mistura de BD e água, assim como a de M e água, trituradas, foram adicionadas no recipiente contendo a mistura CF e água pós peneiramento dos tratamentos TBD e TM e homogeneizadas. Por fim, separava-se a mistura total de cada tratamento em quatro baldes de 2L cada, para abastecer os digestores e o que restava era utilizado para análises (Figura 2).

Figura 2 – Etapas para preparação das cargas.



3.1.4 Métodos analíticos e químicos

Utilizando a metodologia descrita por APHA (2005) realizou-se as quantificações de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV), dos materiais que compuseram as cargas e das amostras semanais dos afluentes e efluentes, expressos em porcentagem.

As amostras do efluente de cada digestor foram coletadas semanalmente e digeridas em estado líquido. A digestão da matéria orgânica foi realizada no aparelho

Digesdahl Hach a base de ácido sulfúrico a 98% (H_2SO_4) e peróxido de hidrogênio a 50% (H_2O_2) para avaliar a composição de Nitrogênio (N), Fosforo (P) e Potássio (K) presente no efluente de acordo com Bataglia et al. (1993).

Após a digestão das amostras determinou-se as concentrações de N utilizando-se o destilador micro-Kjeldahl, segundo Silva (1981), P pelo método colorimétrico, utilizando o espectrofotômetro modelo DR-2000, de acordo com Malavolta (1991) e o teor de K foi determinado em espectrofotômetro do modelo de absorção atômica GBC 932 AA.

Para determinação do volume de biogás produzido mensurou-se diariamente o deslocamento vertical dos gasômetros com auxílio de uma régua fixada, nos mesmos, e multiplicou-se pela área transversal interna do gasômetro, ou seja $0,04909 \text{ m}^2$. Após cada medição os gasômetros eram zerados. Com o auxílio de um termômetro digital de haste longa, media-se a temperatura do biogás dentro do gasômetro.

Segundo Xavier e Lucas Junior (2010) e Sagula, Costa e Lucas Junior (2017) a correção do volume de biogás produzido foi realizada com base no trabalho de Caetano (1985) por meio da combinação das leis de Boyle e Gay-Lussac sob as condições de 1 atm de pressão atmosférica e 20°C de temperatura (equação 1). Nos primeiros 2 dias de fornecimento de substrato aos digestores e coleta de dados de produção de biogás realizou-se o teste de queima para detectar a existência de metano.

$$\frac{P_1 \times V_1}{T_1} = \frac{P_0 \times V_0}{T_0} \quad (1)$$

Onde P_1 é a pressão do biogás no instante da leitura, 9.652,10 mm de água; V_1 é volume do gás no gasômetro; T_1 é a temperatura do biogás, em K, no instante da leitura; V_0 é volume de biogás corrigido, m^3 ; P_0 é a pressão corrigida do biogás, 10.322,72 mm de água; T_0 é a temperatura corrigida do biogás, 293,15 K.

Obtém-se como resultado a seguinte expressão, para correção do volume do biogás:

$$V_0 = \frac{V_1}{T_1} \times 273,26023 \quad (2)$$

A qualidade do biogás foi analisada uma vez por semana determinando os teores de metano em um cromatógrafo Tracera modelo CG-2010 Plus com detector de ionização por plasma BID-2010 Plus, acoplado a uma coluna ShinCarbon ST Micropacote. O gás de arraste utilizado foi o He a uma taxa de 70 mL/min. A temperatura do detector foi mantida a 280°C e a do injetor a 150°C. O volume de injeção da amostra foi de 1mL. As amostras de biogás foram coletadas com seringas de vidro e analisadas em seguida. O teor de metano foi expresso em porcentagem.

Os potenciais de biogás e metano foram calculados usando a produção de biogás e metano em relação as quantidades de ST e SV adicionados. A eficiência do processo de degradação foi medida por meio das reduções de ST e SV e estas foram expressas em porcentagem.

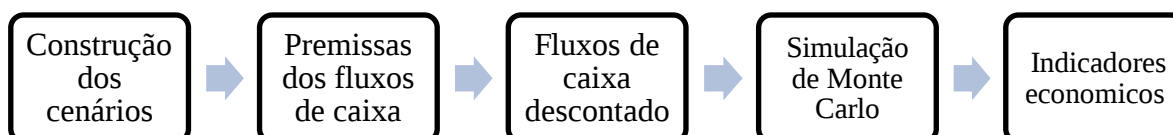
3.1.5 Análise estatística

Adotou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado com três tratamentos e quatro repetições. Os resultados dos rendimentos diários de biogás, os rendimentos específicos de biogás e metano, as eficiências de remoção de sólidos totais e voláteis e o conteúdo de macronutrientes foram submetidos à análise de variância e os valores médios foram comparados pelo teste de Tukey a um nível de 5% de probabilidade no programa Sas® 9.3.

3.2 Análise de viabilidade econômica

Para analisar a viabilidade econômica da implantação do sistema de digestão anaeróbia para produção de energia renovável e biofertilizante a partir dos resíduos da avicultura de corte, assim como avaliar o custo/benefício de produzir a BD e M para serem utilizadas como insumo nos biodigestores para incrementar a geração de energia foram elaborados 30 cenários, em escala real. A Figura 3 ilustra as etapas para realização da análise de viabilidade econômica.

Figura 3 – Etapas desenvolvidas para análise de viabilidade econômica



3.2.1 Construção dos cenários

Para avaliar a implantação do biodigestor em escala real foram estimados 10 cenários, para cada tratamento do ensaio semi-contínuo (TCF, TBD, TM), resultando um total de 30 cenários.

Os cenários avaliados para cada tratamento continham 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 galpões de 1.200m² com capacidade estática de 20.000 frangos cada, lote de criação com 60 dias, sendo tempo de criação (45 dias) e vazio sanitário (15 dias), totalizando 6 lotes por ano.

A partir disso, estimou-se para todos os cenários 6 reutilizações de cama por ano, ou seja, a cama seria reutilizada nos 6 lotes de criação e ao final de cada ano, seria retirada dos galpões e armazenada, para ser tratada nos biodigestores.

Essas características de reutilização a cada 6 lotes são padrão do avicultor pequeno (20.000 a 60.000 aves), médio (80.000 a 140.000 aves) e grande (160.000 a 200.000 aves), segundo os estudos de Dacroce; Leismann; Hofer (2018) e Farias e Schneider (2018) realizados na região sul do Brasil, que é a mais representativa em produção de frangos, com 31,92% do total produzido no país, segundo os dados do IBGE (2019).

O pressuposto dos cenários é que a energia elétrica será utilizada para a produção dos frangos (alimentação, ventilação, iluminação e aquecimento), considerando a utilização de 100% da energia gerada e o biofertilizante será utilizado na produção das culturas energéticas e na produção de grãos, para alimentação dos frangos, considerando também a utilização de 100% do biofertilizante gerado no sistema.

3.2.1.1 Dimensionamento dos biodigestores

A partir dos resultados de Fukayama (2008) estimou-se que na 6ª reutilização da CF seriam gerados 7,88kg de cama ave⁻¹, o valor obtido foi adotado para calcular a produção total de CF para todos os cenários. Considerou-se que a CF retirada a cada 6 lotes seria armazenada e as cargas seriam realizadas diariamente durante os 365 dias do ano.

A partir dos dados de MS da CF (87%), sólidos retidos na peneira (13%) e quantidades de BD e M adicionados nas cargas diárias (1,05%) e TRH de 30 dias, do

ensaio semi-contínuo foram utilizados para calcular o dimensionamento dos digestores de cada cenário (Tabela 2), segundo os cálculos apresentados na sequência.

- a) *Produção de CF lote⁻¹(kg) = n^o de aves lote⁻¹ x 7,88kg de CF ave⁻¹*
- b) *Disponibilidade de CF dia⁻¹(kg) = Produção de CF lote⁻¹(kg)/365 dias*
- c) *MS de CF dia⁻¹(kg) = disponibilidade de CF dia⁻¹ (kg) x % MS de CF*
- d) *quantidade de água dia⁻¹(kg) = MS de CF dia⁻¹ (kg)/5%*
- e) *Carga diária TCF (kg) = [MS de CF dia⁻¹(kg) + água dia⁻¹(kg)] x 87%*
- f) *Carga diária TBD e TM (kg) = Carga diária TCF (kg) +
[Carga diária TCF (kg) x 1,05% (TBD/TM) (kg)]*
- g) *Volume biodigestor (m³) = [Carga diária (kg)x TRH de 30 dias]/1000*

Tabela 2 – Dimensionamento dos cenários para análise econômica.

Cenários	Nº aves/lote	Produção CF lote ⁻¹ (t)	CF no substrato (kg dia ⁻¹)	BD e M no substrato (kg dia ⁻¹)	Água no substrato (kg dia ⁻¹)	substrato (kg dia ⁻¹)	Volume digestores (m³)	
Pequeno	TCF	20.000	158	432	-	6.536	6.863	206
	TBD	20.000	158	432	64	6.536	6.927	208
	TM	20.000	158	432	64	6.536	6.927	208
	TCF	40.000	315	864	-	13.073	13.726	412
	TBD	40.000	315	864	128	13.073	13.854	416
	TM	40.000	315	864	128	13.073	13.854	416
	TCF	60.000	473	1.295	-	19.609	20.589	618
	TBD	60.000	473	1.295	192	19.609	20.781	623
	TM	60.000	473	1.295	192	19.609	20.781	623
Médio	TCF	80.000	630	1.727	-	26.145	27.452	824
	TBD	80.000	630	1.727	255	26.145	27.708	831
	TM	80.000	630	1.727	255	26.145	27.708	831
	TCF	100.000	788	2.159	-	32.681	34.316	1.029
	TBD	100.000	788	2.159	319	32.681	34.635	1.039
	TM	100.000	788	2.159	319	32.681	34.635	1.039
	TCF	120.000	946	2.591	-	39.218	41.179	1.235
	TBD	120.000	946	2.591	383	39.218	41.562	1.247
	TM	120.000	946	2.591	383	39.218	41.562	1.247
	TC	140.000	1.103	3.022	-	45.754	48.042	1.441
	TBD	140.000	1.103	3.022	447	45.754	48.489	1.455
	TM	140.000	1.103	3.022	447	45.754	48.489	1.455
Grande	TCF	160.000	1.261	3.454	-	52.290	54.905	1.647
	TBD	160.000	1.261	3.454	511	52.290	55.416	1.662
	TM	160.000	1.261	3.454	511	52.290	55.416	1.662
	TCF	180.000	1.418	3.886	-	58.827	61.768	1.853
	TBD	180.000	1.418	3.886	575	58.827	62.343	1.870
	TM	180.000	1.418	3.886	575	58.827	62.343	1.870
	TCF	200.000	1.576	4.318	-	65.363	68.631	2.059
	TBD	200.000	1.576	4.318	639	65.363	69.270	2.078
	TM	200.000	1.576	4.318	639	65.363	69.270	2.078

3.2.2 Premissas dos fluxos de caixa dos projetos

Entre as técnicas para analisar a viabilidade econômica de projetos, o fluxo de caixa descontado está fundamentado no conceito de que o valor de um investimento está diretamente relacionado as entradas e saídas de caixa e ao cronograma nos quais os fluxos de caixa estarão distribuídos. Segundo Damodaran (2014) o valor de um investimento é medido em função do que ele gera de fluxo de caixa, o momento em que esses fluxos de caixa ocorrem e o nível de incertezas associadas a eles.

Esta técnica é adaptada e amplamente utilizada para gestão de projetos para geração de energia renovável (DUSONCHET e TELARETTI, 2015; ALVAREZ et al., 2016; MEHR et al., 2017; KABYANGA et al., 2018; CARUANA, 2019; MONTORO et al., 2019). Esses estudos demonstram que a construção do fluxo de caixa auxilia a tomada de decisão sob um investimento, pois a estrutura desta técnica facilita o planejamento e controle dos montantes de recursos financeiros de cada projeto ao longo do tempo.

Neste estudo os fluxos de caixa foram construídos para um período de 10 anos, em função das características do projeto e tempo de depreciação dos equipamentos. As premissas para construção do fluxo de caixa são:

3.2.2.1 Receitas

A receita de cada cenário foi estimada a partir da economia com os custos de energia elétrica na produção dos frangos (alimentação, ventilação, iluminação e aquecimento) e economia com os custos de aquisição de adubo mineral para produção de grãos (alimentação das aves) e culturas energéticas (matéria prima dos biodigestores). Para isso, calculou-se os rendimentos de biogás e biofertilizante.

Além das receitas de energia elétrica e biofertilizante, entendeu-se que no processo de preparo das cargas o material retido no separador de sólidos poderia ser vendido como condicionador de solos, por ser um material rico em matéria orgânica. Esta terceira receita está apresentada no capítulo resultados e discussão e foi estimada a partir dos preços médios de comercialização da CF com 4 reutilizações, que são materiais mais pobres em nutrientes.

3.2.2.1.1 Rendimento do biogás

Para calcular a produção anual de energia elétrica (PE) em kWh (Tabela 3) utilizou-se o rendimento médio de biogás por dia (RMB) gerados em cada cenário. Para isso, foram utilizados os dados de potencial de produção de biogás por quilograma de sólidos totais adicionados ($m^3 \text{ kg}^{-1} \text{STad}$) dos três tratamentos (TCF, TBD e TM) do ensaio semi-contínuo, assim como, as quantidades de ST da CF, BD e M.

A quantidade de energia elétrica em kWh foi determinada a partir das especificações e coeficientes técnicos de potência (kVA) e consumo de biogás (Nm^3/h) do fabricante do gerador a biogás, orçado para este estudo. Os cálculos realizados estão demonstrados na sequência.

$$\text{a) } RMB \text{ da CF } (m^3) = MS \text{ de CF na carga } (kg \text{ dia}^{-1}) \times m^3 \text{ biogás } kg^{-1} \text{STad}$$

$$\text{b) } RMB \text{ da BD } (m^3) = [MS \text{ de CF na carga } (kg \text{ dia}^{-1}) + MS \text{ de BD na carga } (kg \text{ dia}^{-1})] \times m^3 \text{ biogás } kg^{-1} \text{STad}$$

$$\text{c) } RMB \text{ da M } (m^3) = [MS \text{ de CF na carga } (kg \text{ dia}^{-1}) + MS \text{ diária da M na carga}] \times m^3 \text{ biogás } kg^{-1} \text{STad}$$

$$\text{d) } \text{Produção anual de energia elétrica (kwh)} = RMB \times 1,8 \text{ (coeficiente técnico do motor)} \times 365 \text{ dias}$$

O benefício com a economia de energia elétrica que o produtor deixará de comprar das concessionárias em função da utilização da energia gerada a partir do biogás produzido no biodigestor, para cada cenário, foi mensurado por meio dos preços (R\$) da tarifa de energia elétrica (kWh) paga pelo produtor rural, em setembro de 2019, segundo o Ranking das 50 distribuidoras da região sul do Brasil, obtidas no site da Agência Nacional de Energia Elétrica, variando de R\$0,29 a R\$0,59 o kWh, com impostos.

3.2.2.1.2 Rendimento do Biofertilizante

Para o cálculo da quantidade de nutrientes gerados em cada cenário (Tabela 3) foram utilizados os dados de concentrações de N, P e K contidos na MS dos

efluentes dos digestores do ensaio semi-contínuo, para os tratamentos TCF (1,68%MS), TBD (1,5%MS) e TM (1,5%MS).

Nos cenários que continham a BD e a M foram abatidas as quantidades de adubo necessário para produção de cada cultura e o cálculo da receita do biofertilizante foi realizada com a quantidade restante.

A quantidade de biofertilizante foi obtida por meio da equivalência do N em Sulfato de Amônio (SA), do P em Super Fosfato Simples (SS) e do K em Cloreto de Potássio (KCL), a partir das equações a seguir.

- a) $N \text{ (kg dia}^{-1}\text{)} = MS \text{ no biofertilizante (kg dia}^{-1}\text{)} \times \% \text{ de N na MS}$
- b) $SA \text{ (kg ano}^{-1}\text{)} = N \text{ (kg dia}^{-1}\text{)} / 0,2 \times 365 \text{ dias}$
- c) $P \text{ (kg dia}^{-1}\text{)} = MS \text{ no biofertilizante (kg dia}^{-1}\text{)} \times \% P \text{ na MS}$
- d) $SS \text{ (kg ano}^{-1}\text{)} = \{[(P \text{ (kg dia}^{-1}\text{)} \times 2,29) / 0,18] \times \% P \text{ na MS}\} \times 365 \text{ dias}$
- e) $K \text{ (kg dia}^{-1}\text{)} = MS \text{ no biofertilizante (kg dia}^{-1}\text{)} \times \% K \text{ na MS}$
- f) $KCL \text{ (kg ano}^{-1}\text{)} = \{[(K \text{ (kg dia}^{-1}\text{)} \times 1,2) / 0,6] \times \% K \text{ na MS}\} \times 365 \text{ dias}$

O benefício com a economia de adubo mineral que o produtor deixará de comprar em função da utilização do biofertilizante produzido no biodigestor foi mensurado por meio dos preços dos adubos minerais SA variando de R\$ 550,00 a R\$1.150,00, SS de R\$ 750,00 a R\$1.300,00 e KCL de R\$ 1.300,00 a R\$ 1.900,00 obtidos a partir de orçamentos junto a empresas que comercializam esses produtos no estado do Paraná.

Tabela 3 – Produção de energia elétrica e concentração de Nitrogênio, Pentóxido de Fosforo e óxido de Potássio gerados em cada cenário.

Cenários	Biogás (m ³ dia ⁻¹)	Energia Elétrica (kWh ano ⁻¹)	Nitrogênio (kg ano ⁻¹)	P ₂ O ₅ (kg ano ⁻¹)	K ₂ O (kg ano ⁻¹)
TCF	86	56.321	518	2.381	1.532
TBD	110	72.568	498	3.192	1.561
TM	122	79.939	482	2.942	1.407
TCF	171	112.642	1.037	4.763	3.064
TBD	221	145.137	995	6.384	3.123
TM	243	159.879	965	5.883	2.814
TCF	257	168.963	1.555	7.144	4.596
TBD	331	217.705	1.493	9.577	4.684
TM	365	239.818	1.447	8.825	4.221
TCF	343	225.283	2.073	9.525	6.128
TBD	442	290.273	1.991	12.769	6.245
TM	487	319.758	1.929	11.766	5.628
TCF	429	281.604	2.591	11.907	7.660
TBD	552	362.841	2.489	15.961	7.807
TM	608	399.697	2.412	14.708	7.035
TCF	514	337.925	3.110	14.288	9.192
TBD	663	435.410	2.986	19.153	9.368
TM	730	479.636	2.894	17.649	8.442
TCF	600	394.246	3.628	16.669	10.724
TBD	773	507.978	3.484	22.345	10.929
TM	852	559.576	3.376	20.591	9.849
TCF	686	450.567	4.146	19.051	12.256
TBD	884	580.546	3.982	25.537	12.490
TM	973	639.515	3.859	23.532	11.256
TCF	772	506.888	4.664	21.432	13.788
TBD	994	653.115	4.479	28.730	14.052
TM	1.095	719.454	4.341	26.474	12.663
TCF	857	563.208	5.183	23.813	15.320
TBD	1.105	725.683	4.977	31.922	15.613
TM	1.217	799.394	4.823	29.415	14.070

3.2.2.1.3 Custos operacionais do projeto

Os investimentos iniciais necessários para cada cenário referem-se a compra e instalação dos equipamentos (digestor e gerador), esses valores foram adquiridos por meio de orçamentos junto as empresas que comercializam esses itens no mercado brasileiro em dezembro de 2019. Os custos de manutenção dos digestores são equivalentes a 1% a.a. sob o valor do equipamento e a troca total da cúpula no 5º ano do projeto. Os custos de manutenção dos geradores são em relação a potência, consumo e horas de funcionamento de cada gerador, obtidos junto aos fabricantes.

A mão de obra necessária para operação do sistema é de apenas um funcionário para realização das cargas diárias e manutenção operacional do sistema, foram considerados os custos com remuneração e EPIs (Equipamentos de Proteção Individual) para um trabalhador rural no estado do Paraná. Nos projetos avaliados aos pequenos produtores não foi incluído este custo, pois a mão de obra é familiar.

Para calcular os custos de produção de BD e M utilizou-se os coeficientes técnicos, custos com insumos e operações necessários para a produção das tuberosas. Os dados foram adquiridos nos sites da Secretaria de Estado de Agricultura, Abastecimento e desenvolvimento Rural do Distrito Federal (SEAGRI), Secretaria da Agricultura e abastecimento do Paraná (SEAB) e da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e baseados nos estudos de Albuquerque et al., (2019) e Junior et al., (2019).

Cabe ressaltar que, os gastos com aquisição dos adubos minerais (4-14-8) e (20-00-20) necessários para adubação da BD e da M foram abatidos dos custos totais de produção das tuberosas, pois estes foram substituídos pelo biofertilizante produzido no biodigestor.

O sistema de tributação utilizado foi o Lucro Real calculado com alíquota de 15% sob o lucro operacional e 9% sobre o capital social e lucro líquido. Para fins de dedução fiscal permitidas pela legislação brasileira os equipamentos e instalações foram depreciados considerando as taxas de depreciação estabelecidas pela Receita Federal Brasileira.

Tabela 4 – Valores dos investimentos e custos anuais do sistema para cada cenário.

Cenários		Biodigestor + Separador de sólidos (R\$)	Geradores à biogás (R\$)	Manutenção dos equipamentos (R\$)	Cúpula do biodigestor (R\$)	Produção de tuberosas (R\$)	Mão de obra e EPIs (R\$)
TCF	20.000	146.224	136.927 (30 kVA)	8.252	48.734	-	1.000
TBD		146.224	136.927 (30 kVA)	10.516	48.734	3.918	1.000
TM		146.224	136.927 (30 kVA)	11.543	48.734	4.789	1.000
TCF	40.000	224.054	139.917 (50 kVA)	8.956	95.432	-	1.000
TBD		224.054	139.917 (50 kVA)	11.310	95.432	7.836	1.000
TM		224.054	139.917 (50 kVA)	12.378	95.432	9.578	1.000
TCF	60.000	278.135	221.697 (80 kVA)	12.942	108.081	-	31.845
TBD		278.135	221.697 (80 kVA)	16.416	108.081	11.754	31.845
TM		278.135	221.697 (80 kVA)	17.992	108.081	14.367	31.845
TCF	80.000	291.750	254.227 (120 kVA)	18.760	116.250	-	31.845
TBD		291.750	254.227 (120 kVA)	23.892	116.250	15.672	31.845
TM		291.750	254.227 (120 kVA)	26.220	116.250	19.156	31.845
TCF	100.000	302.071	254.227 (120 kVA)	23.258	122.443	-	31.845
TBD		302.071	254.227 (120 kVA)	29.674	122.443	19.590	31.845
TM		302.071	254.227 (120 kVA)	32.584	122.443	23.946	31.845
TCF	120.000	305.566	464.457 (250 kVA)	20.299	124.540	-	31.845
TBD		305.566	464.457 (250 kVA)	25.856	124.540	23.509	31.845
TM		305.566	464.457 (250 kVA)	28.377	124.540	28.735	31.845
TCF	140.000	331.799	464.457 (250 kVA)	23.642	140.280	-	31.845
TBD		331.799	464.457 (250 kVA)	27.980	140.280	27.427	31.845
TM		331.799	464.457 (250 kVA)	30.703	140.280	33.524	31.845
TCF	160.000	334.118	464.457 (250 kVA)	26.862	141.671	-	31.845
TBD		334.118	464.457 (250 kVA)	34.271	141.671	31.345	31.845
TM		334.118	464.457 (250 kVA)	37.633	141.671	38.313	31.845
TCF	180.000	354.363	514.457 (330 kVA)	30.174	153.818	-	31.845
TBD		354.363	514.457 (330 kVA)	38.509	153.818	35.263	31.845
TM		354.363	514.457 (330 kVA)	42.290	153.818	43.102	31.845
TCF	200.000	357.350	514.457 (330 kVA)	31.021	155.610	-	31.845
TBD		357.350	514.457 (330 kVA)	39.596	155.610	39.181	31.845
TM		357.350	514.457 (330 kVA)	43.486	155.610	47.891	31.845

3.2.3 Indicadores Econômicos

A tomada de decisão para investir em um projeto é baseada na análise de indicadores determinísticos calculados a partir dos fluxos de caixa estimados no projeto. Pelo critério de avaliação do Fluxo de Caixa Descontado o valor do projeto é mensurado a partir dos fluxos de caixa gerados no futuro, e seu valor é obtido pelo valor presente desses fluxos, dada uma taxa de desconto que reflita o custo de oportunidade e o risco associado à distribuição desses fluxos (DAMODARAN, 2014; WRESTA et al., 2015; WEBER et al., 2017; BERNARDO et al., 2019; MONTORO et al., 2019), segundo a equação 3 a seguir.

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FCL_t}{(1 + CMPC)^t} - I_0 \quad (3)$$

Onde, VPL é o Valor presente líquido, FCL é o Fluxo de caixa livre construído em cada período (t), n é o tempo de vida útil do projeto, I_0 é o investimento inicial e o CMPC (custo médio ponderado do capital) é a taxa de desconto.

Na obtenção de VPL positivo aceita-se o projeto, caso seja negativo, o projeto deve ser rejeitado, como critério de decisão.

O cálculo do CMPC considera as fontes de financiamentos para execução do projeto incluindo os recursos de terceiros e o capital próprio, segundo a equação 4.

$$CMPC = \left[K_e \left(\frac{E}{D+E} \right) \right] + \left[K_d \left(\frac{D}{D+E} \right) \right] \quad (4)$$

Onde, K_e é o custo de oportunidade do capital próprio; E (*Equity*) é o capital próprio; K_d é o custo do capital de terceiros; D é o capital de terceiros ou a dívida.

A partir da teoria do portfólio e do modelo de precificação de ativos calcula-se o K_e , segundo a equação 3, permitindo analisar o risco e o retorno do capital próprio, pois quanto maior o k_e , maior será o risco de se obter o retorno desejado para a realização do investimento. (BROTHERSON, 2013; FARINELLI et al., 2018).

$$Ke = Rf + \beta(Rm - Rf) \quad (3)$$

Onde, Rf é a taxa livre de risco; β é o risco sistemático (não diversificável) e Rm é o retorno do mercado.

Baseado nos estudos de Farinelli et al., (2018) e Montoro et al., (2019), calculou-se o custo do capital próprio, com um beta no valor de 0,63, que determina o risco não diversificável referente aos retornos de capital no mercado de energia elétrica brasileiro em covariação com os retornos de mercado do principal índice brasileiro (IBOVESPA) em novembro de 2019, a taxa livre de risco do mercado brasileiro (Selic) no valor de 3,75% em março de 2020, e o prêmio de mercado de capitais brasileiro de 8,2% (FERNANDEZ, 2018).

Para o cálculo do CMPC considerou-se a possibilidade de financiamento de 90% do investimento total pela linha de financiamento agricultura de baixo carbono do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), a um custo de 7% e os 10% restantes com capital próprio.

Além do VPL outros indicadores refletem a expectativa dos investidores quanto ao desempenho econômico esperado do projeto. São eles a TIR, que é a taxa que iguala o VPL a zero, o tempo de retorno do investimento (*Payback* descontado), o Índice de lucratividade (IL) e o Retorno sobre o investimento (ROI) (WRESTA et al., 2015; WEBER et al., 2017; BERNARDO et al., 2019; MONTORO et al., 2019).

3.2.4 Simulação de Monte Carlo

Observando que a técnica do fluxo de caixa descontado considera apenas a taxa mínima de atratividade para controle das incertezas do projeto, desconsiderando a variabilidade dos preços que compõe as receitas do mesmo, reconhece-se a importância de garantir ao produtor um gerenciamento de risco mais eficaz para avaliar se o projeto é capaz de gerar retorno adequado sobre o investimento.

O modelo de simulação de Monte Carlo é utilizado na análise de investimentos, quando há incertezas de acontecimentos futuros, mas o intervalo de confiança é conhecido (ARNOLD e YILDIZ, 2015, ZAHAO et al., 2015, BATAN et al., 2016, REZVANI et al., 2017 e GOUGH et al., 2017).

O método consiste na simulação de distribuições probabilísticas, por meio da geração de números aleatórios a partir de variáveis independentes, simulando cenários randômicos prováveis, também para as variáveis dependentes, possibilitando uma análise estatística dos resultados, segundo os autores Arnold e Yildiz, (2015), Zahao et al., (2015), Batan et al., (2016), Rezvani et al., (2017) e Gough et al., (2017). Os estudos desses autores demonstram que o cálculo da probabilidade possui diversas aplicações na análise tecno-econômica de investimentos para geração de bioenergia quando se tem um elemento de incerteza.

As variáveis de risco do modelo foram os preços do kWh de energia elétrica, dos adubos minerais (SA; SS e KCL) e dos biodigestores. A escolha dessas variáveis se deu, porque os preços de energia elétrica e adubo mineral que compõe a receita do projeto são variáveis muito sensíveis as variações de preço do mercado e região, o que aumenta os riscos e incertezas na avaliação dos investimentos, e os biodigestores possuem seus preços dimensionados especificamente para cada projeto e propriedade, podendo sofrer variações de valor.

As variáveis dependentes foram todos os gastos do projeto: a) investimentos (gerador), b) custos operacionais, c) depreciação e d) imposto de renda, as quais não foram sensíveis a variações de preço, uma vez que foram obtidas por meio de orçamentos específicos para cada item. A variável de saída esperada do modelo são as probabilidades de VPLs, TIRs.

Os modelos de distribuições escolhidos para geração dos valores aleatórios foram: i) Normal, para os preços de energia elétrica; ii) Uniforme, para os preços de adubos minerais e biodigestores. A escolha de cada modelo de distribuição se deu em função dos dados de cada variável.

Para energia elétrica obteve-se uma amostra com variabilidade de 50 preços de tarifas de energia (kWh) praticados na região sul do Brasil. A amostra desses preços foi testada estatisticamente por meio do teste de normalidade Kolmogorov Smirnov com p-valor de 0,4508, rejeitando-se a hipótese de assimetria dos dados e a partir da estatística descritiva da amostra obteve-se os valores de média (0,46) e desvio-padrão (0,067) para gerar à randomização das tarifas e obter as possíveis variações de receita de energia elétrica de cada cenário.

Para gerar a randomização das receitas de biofertilizante de cada cenário utilizou-se os preços mínimo e máximo dos adubos minerais Sulfato de Amônio de R\$ 550,00 a R\$ 1.150,00, Super Fosfato Simples de R\$ 750,00 a R\$1.300,00 e Cloreto

de Potássio de R\$ 1.300,00 a R\$1.900,00, respectivamente, comercializados na região sul do Brasil.

A randomização do valor dos investimentos em biodigestores para cada cenário foi realizada a partir da variação de 10% para mais e 10% para menos, os preços médios das plantas, que foram obtidos em uma das principais empresas que comercializa este equipamento no Brasil.

Os dados de entrada do modelo foram preparados para que os de saída (VPL/TIR) apresentassem um comportamento de distribuição normal com 10.000 simulações, o que permite obter maior segurança dos resultados. Segundo Ross (2006) a partir do Teorema do Limite Central, descrito por Stevenson em 1981, em uma amostra com distribuição normal, a média é utilizada como ponto de referência e o desvio padrão como unidade de medida de variabilidade da amostra com nível de significância de 95%.

As simulações foram realizadas no software Microsoft Excel® 2018, sendo esta, uma das principais facilidades da utilização desta análise. O número amostral de simulações é definido pela capacidade e requisitos do software que realiza a simulação, segundo Donatelli e Konrath et al. (2005), amostras iguais ou maiores que 10^4 diminuem o ruído amostral resultando em estimativas mais confiáveis

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ensaio de digestão anaeróbia

As quantidades de ST dos materiais que compuseram as cargas, assim como, as médias de ST das cargas de cada tratamento estão descritas na Tabela 5.

Tabela 5 – Balanço de massa dos materiais e substratos dos 3 tratamentos.

	CF	BD	M	SR (13%)	TCF	TBD	TM
ST (%)	87	20	40	32	1,28	1,46	1,64
MN (kg)	0,14	0,021	0,021	0,312	2	2	2
ST (kg)	0,122	0,004	0,008	0,100	0,026	0,030	0,033

Legenda: SR: 13% de sólidos retidos na peneira no processo de preparação das cargas; TCF: Tratamento Cama de Frango; TBD: Tratamento Batata Doce e TM: Tratamento Mandioca.

4.1.1 Eficiência na remoção de sólidos

A CF, BD e a M que compuseram os substratos para abastecimento dos biodigestores continham 66,99, 73,02 e 75,45% de SV, contido nos ST. As cargas apresentaram em média 0,85, 1,05 e 1,23% de SV, respectivamente. A Tabela 6 apresenta as reduções de sólidos totais (RST) e voláteis (RSV) dos três tratamentos após o processo de mono e codigestão anaeróbia durante 50 dias.

Tabela 6 – Redução de sólidos totais e voláteis (RST e RSV) dos três tratamentos avaliados (TCF; TBD e TM).

	% RST	% RSV
TCF	33,64 ^c ± 4,11	64,82 ^c ± 12,21
TBD	46,88 ^b ± 5,93	73,02 ^b ± 10,87
TM	52,51 ^a ± 7,24	75,45 ^a ± 9,83
CV	13,31	15,42
F	538	57,81
P valor	0,001	0,001

Legenda: %RST: Porcentagem de redução de sólidos totais; %RSV: Porcentagem de redução de sólidos voláteis. P valor com nível de significância de 5%.

A codigestão foi mais eficaz na redução de ST e SV em relação a monodigestão. Os resultados demonstram que a codigestão da CF com a M reduziu

significativamente mais ST em relação a codigestão com a BD, 35,93% e 28,26%, respectivamente. O mesmo observa-se com a RSV, em que, a codigestão com a M reduziu 14% de SV e a BD 11,22%, em relação a monodigestão. Os resultados demonstram que a composição nutricional da BD e da M favorecem a redução da carga poluente da CF, reciclando uma maior quantidade de nutrientes e recuperando mais energia.

A melhor eficiência do TM na remoção de sólidos aconteceu, pois, além da M acrescentar uma maior quantidade de sólidos nas cargas diárias, houve uma melhor sinergia do material biodegradável adicionado no TM. Possivelmente o teor e as características dos carboidratos contidos na M de estruturas moleculares mais complexas, podem ter ocasionado uma degradação mais lenta, propiciando maiores consumos de matéria seca (MS), matéria orgânica (MO), em relação aos carboidratos contidos na BD.

O amido é um polissacarídeo composto por cadeias de amilose e amilopectina. As proporções em que estas estruturas aparecem, diferem entre as diversas fontes e estas variações podem resultar em grânulos de amido com propriedades físico-químicas e funcionais diferenciadas, o que pode afetar sua utilização ou aplicações. Portanto, a relação amilose/amilopectina, podem influenciar a taxa de hidrólise e absorção (HUANG et al., 2015; YONG et al., 2018).

Além disso, a CF possui alto conteúdo protéico degradável. Quando a taxa de fermentação de carboidratos excede a taxa de degradação da proteína pode ocorrer redução na produção de proteína microbiana. Maximizar a síntese de proteína microbiana requer equilíbrio entre a energia oriunda de carboidratos e o nitrogênio disponível para os microorganismos (Fregadolli et al., 2001).

Com isso, entende-se que as características do carboidrato da M permitiram melhor equilíbrio do pH e da eficiência das fases acidogênica e metanogênica, fazendo com que os compostos gerados fossem consumidos de forma balanceada (Cremonez et al., 2016).

As populações microbianas envolvidas na digestão anaeróbia removem nutrientes da matéria orgânica para crescer e se multiplicar, sendo que os principais nutrientes são carbono (C) e nitrogênio (N) (OZTURK et al., 2013). A CF é um material com altas concentrações de ácido úrico e baixa relação C/N, que, se em altas quantidades inibem o processo (ACHEBE et al., 2018), e a M e a BD são materiais

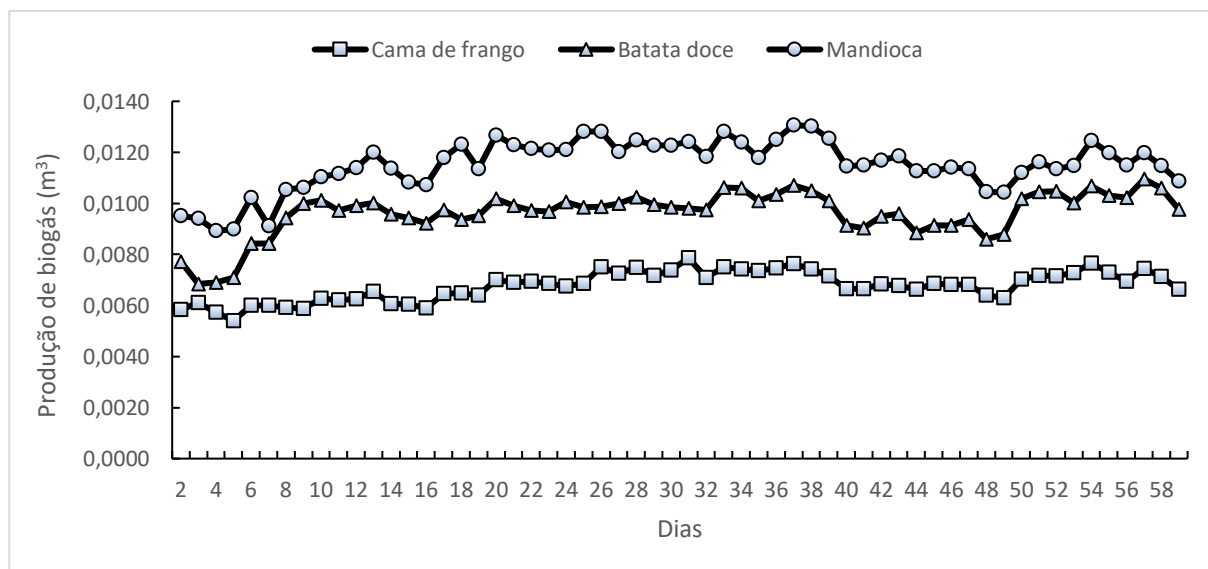
com alto teor de carboidratos solúveis, e alta relação C/N, que, em altas quantidades acidificam o meio (GLANPRACHA e ANNACHHATRE, 2016).

Os efeitos benéficos de redução da carga orgânica não só da M, mas também da BD com a CF foram positivos, pois segundo Espósito et al. 2012, a sinergia de materiais ricos em sólidos solúveis de fácil degradação associados a materiais ricos em proteína, equilibram o meio para os microrganismos da fermentação se desenvolverem, aumentam a capacidade de tamponamento, promovendo um pH estável (OZTURK et al. , 2013; DAMACENO et al. 2019), o que favorece a multiplicação das arqueas metanogênicas, melhora a biodegradação e o aumento da produção de metano e biogás (LE e STUCHEY, 2017).

4.1.2 Rendimentos e potenciais específicos de biogás e metano

A produção de biogás a partir do ensaio semi-contínuo de digestão anaeróbia, coletada no período de 60 dias esta representada na Figura 4. Os resultados obtidos demonstram que para os três tratamentos analisados, o processo se tornou estável entre os dias 7 e 9, utilizando-se para a realização das análises de biogás um período de 50 dias, ocorridos entre os dias 7 e 56. Os resultados médios de produção diária de biogás da codigestão com BD ($0,0097\text{m}^3$) e M ($0,0117\text{m}^3$) foram superiores a monodigestão da CF ($0,0068\text{m}^3$), em 29,89 e 41,88%, respectivamente, sendo que a M proporcionou um melhor rendimento em relação a BD de 17,09%.

Figura 4. Produção diária de biogás dos três tratamentos avaliados



Os resultados obtidos comprovam uma melhor interação dos nutrientes favorecidos pela codigestão com adição de 21g de BD e M no substrato contendo 140g de CF. No estudo de Nkodi et al. (2016), 42,7 g de cascas de M contendo 95,98% de sólidos voláteis foram codigeridas com uma concentração de 0,01% de uréia e o equilíbrio dos nutrientes proporcionou um aumento na produção de biogás de 24,33% comparado com a monodigestão das cascas.

Os substratos codigeridos neste experimento continham uma proporção de 13% de BD e M e 87% de CF, no entanto, a M contém 20% mais ST que a BD, o pode explicar a maior produção de biogás do TM. Outra explicação desses resultados é a relação C/N de cada material e a sinergia entre eles no substrato.

A CF que contém uma relação C/N de 10 (ACHEBE et al., 2018), a M contém uma relação C/N de 210 (PANICHNUMSIN et al., 2010) e a BD uma relação C/N de 107 (DAMACENO et al., 2019), o que pode ter resultado uma relação C/N melhor no TM em relação ao TBD. Segundo OZTURK (2013) a faixa ideal para a metanogênese é cerca de 20 a 35 para produção de metano.

Em estudos com codigestão de diferentes proporções de culturas energéticas e resíduos animais, a melhor proporção de CF e cascas de M no substrato foi 75:25, respectivamente, relação C/N de 23,4 aumentando a produção total de biogás, gerando 24 L g⁻¹SV, 45% a mais, que a monodigestão dos resíduos de aves (ACHEBE et al., 2018) e a melhor proporção de lodo do abate de aves e BD foi 80:20, relação C/N de 12, o que rendeu 5% a mais de metano, 0,5032 m³ kg⁻¹SV, comparado com a monodigestão (DAMACENO et al., 2019).

A monodigestão da CF, rica em compostos proteicos favorece a formação de bicarbonato de amônia, que normalmente é benéfico ao biodigestor por ser uma fonte de nitrogênio e tampão para as mudanças de pH. Entretanto, tanto o íon amônia (NH₄⁺) quanto a amônia livre (NH₃), produzidos na fase acidogênese podem ser inibidoras, se em altas concentrações (LE e STUKCEY, 2017). Ao adicionar a BD e a M neutraliza-se esses possíveis efeitos inibitórios, melhorando a conversão dos carboidratos em ácidos graxos de cadeia curta consumidos na acetogênese e metanogênese, proporcionando um aumento na produção do biogás e metano (Tabela 7).

Tabela 7 – Produção de biogás, porcentagem de metano e rendimentos específicos de biogás e metano para cada tratamento

	TCF	TBD	TM	F	P valor
RTB (L)	342,0 ^c ± 0,34	489,0 ^b ± 0,48	586,0 ^a ± 0,58	764	<0,001
RMB (L dia ⁻¹)	6,8 ^c ± 0,0005	9,7 ^b ± 0,0005	11,7 ^a ± 0,0008	2603	<0,001
PBST (L)	262,0 ^c ± 0,006	325,0 ^b ± 0,002	345,0 ^a ± 0,001	392	<0,001
PBSV (L)	389,0 ^b ± 0,10	449,0 ^a ± 0,003	457,0 ^a ± 0,001	134	<0,001
PBCF (L)	59,0 ^c ± 0,0002	84,4 ^b ± ,0001	101,2 ^a ± 0,00005	1737	<0,001
QM (% CH ₄)	61,6 ^a ± 2,53	61,9 ^a ± 2,13	61,8 ^a ± 1,77	0,07	0,928
RMM (L dia ⁻¹)	4,2 ^c ± 0,0001	6,0 ^b ± 0,0002	7,2 ^a ± 0,0001	952	<0,001
PMST (L)	160,0 ^b ± 0,003	200,0 ^a ± 0,004	210,0 ^a ± 0,007	98	<0,001
PMSV (L)	240,0 ^b ± 0,004	270,0 ^a ± 0,006	280,0 ^a ± 0,009	39	<0,001
PMCF (L)	36,4 ^c ± 0,0001	52,3 ^b ± 0,0001	62,5 ^a ± 0,0003	306	<0,001

Legenda: Rendimento Total de biogás (RTB); Rendimento médio de biogás (RMB); Potencial de produção de biogás kg⁻¹STad (PBST); Potencial de produção de biogás kg⁻¹SVad (PBSV); Potencial de biogás kg⁻¹CF (PBCF); Qualidade metano (QM); Rendimento médio de metano (RMM); Potencial de metano kg⁻¹STad (PMST); Potencial de produção de metano kg⁻¹SVad (PMSV); Potencial de produção de metano kg⁻¹CF (PMCF)

Os rendimentos de biogás e metano por kg de SV adicionados foram significativamente superiores nos tratamentos TBD e TM em relação ao TCF, demonstrando o potencial da BD e da M para produção de bioenergia por meio da digestão anaeróbia.

O TBD quando comparado com o TM apresentou menor no potencial de produção de biogás por kg de ST adicionados, pois a M adicionou 20% mais ST que a BD no substrato. No entanto, não houve diferença significativa no potencial por kg de SV adicionados, o que demonstra o potencial equivalente da BD e M em produzir 15,42 e 17,48% mais biogás, em relação a monodigestão.

A BD apresentou uma eficiência melhor para produção de biogás e metano do que a M, por kg de SV adicionados, pois com 20% menos MS proporcionou rendimentos equivalentes, sem diferença significativa.

As concentrações de carboidratos das duas raízes são equivalentes entre 32 e 35%, porém os teores de açúcares redutores (glicose, sacarose e frutose) da BD são 20,89% do total de carboidratos (MOHANRAJ e SIVASANKAR, 2014), que representam 4,18% da MS total e a M contém apenas 2% de açúcares redutores, o restante são polissacarídeos (SCHMTIZ et al., 2016).

A hidrólise desses compostos acontece no início do processo, sendo a principal fonte de energia para os microrganismos, acelerando a biodegradabilidade e a produção de metano (MONTORO et al., 2019; DAMACENO et al., 2019). Os SV são responsáveis diretos pela produção de biogás, sendo que quanto maior a concentração de SV no substrato da carga do biodigestor, maior será a capacidade de produção de biogás (Montoro et al., 2019). A BD e a M estudadas continham, em média, teores de SV de 73 e 75 % dos ST, respectivamente, garantindo elevada produção de biogás.

Em estudo anterior Montoro et al. (2019) demonstraram uma eficiência linear da BD para produção de metano por SV adicionados (45,4; 90,9; 136,4 e 190,9%), em proporções crescentes de 20, 30, 40 e 50% de BD codigeridas com esterco de vaca, comparadas a monodigestão. PORN PAN et al. (2010) ao comparar a monodigestão do dejetos suíno, demonstraram que o rendimento específico de metano aumentou 41% quando codigerido com M em concentrações de até 60% de SV adicionados.

Esses resultados são possivelmente alcançados com o aumento da disponibilidade de carboidratos facilmente degradáveis em proporções que não afetam a capacidade de tamponamento, com uma deficiência de nitrogênio amoniacal.

As porcentagens de metano não apresentaram diferença significativa nos tratamentos TCF, TBD e TM. DAMACENO et al. (2019) obtiveram teores de biogás variando de 38,9 a 72,8% entre os tratamentos com diferentes proporções de BD e codigeridas com lodo do abate de aves, demonstrando que o aumento ocorreu com maiores proporções do lodo de aves.

Desse modo, constata-se que os resíduos da produção animal, contém nutrientes que possibilitam a obtenção de metano com boa qualidade, em faixas ideais acima de 60% para produção de energia, contudo, a codigestão com matérias primas ricas em carboidratos solúveis, em quantidades equilibradas, aumentam o potencial e o rendimento, sem perder a qualidade do biogás.

4.1.3 Recuperação de nutrientes na digestão anaeróbia

Os resultados na Tabela 8 apresentam a recuperação dos nutrientes obtidos na digestão anaeróbia. As concentrações médias de N e P obtidas no biofertilizante não apresentaram diferenças estatísticas significativas nos tratamentos. Já as concentrações de K não apresentaram diferença significativa nos tratamentos TBD e

TM, mas esses tratamentos tiveram correlação positiva com a adição da BD e M, respectivamente, em relação ao TCF.

As concentrações de N não se alteraram com a adição da BD e da M, pois a CF é o material do substrato que compõe as maiores concentrações de componentes proteicos rico em nitrogênio, como o ácido úrico, presente na excreta das aves (BILLEN et al., 2015). Já a BD e a M concentram maiores teores de P e K nas raízes e N nas ramas (OLIVEIRA et al., 2015; ALVES et al. 2012), o que explica as concentrações desses nutrientes nos tratamentos analisados.

Tabela 8 – Concentrações de nutrientes no biofertilizante dos tratamentos.

	N	P %	K
TCF	1,2326 ^a ± 0,18	2,4681 ^b ± 1,34	3,0381 ^a ± 0,56
TBD	1,2771 ^a ± 0,27	3,5577 ^a ± 1,51	3,3282 ^a ± 0,54
TM	1,2327 ^a ± 0,25	3,2756 ^a ± 1,63	2,9954 ^a ± 0,85
P valor	0,48	0,002	0,32
F	0,72	6,80	1,16

Legenda: N: Nitrogênio; P: Fósforo; K: Potássio; P valor com nível de significância de 5%.

A obtenção do biofertilizante por meio da reciclagem de nutrientes e água dos resíduos do processo de produção, estabiliza a matéria orgânica e proporciona uma economia circular da empresa rural, ao ser utilizado para fertirrigação na produção de alimentos. Segundo Weiland et al. (2010) e Peng e Pivato (2019) o biofertilizante oriundo de resíduos animais possui grande potencial fertilizante devido aos teores de macros e micronutrientes presentes (WEILAND et al., 2010; PENG e PIVATO, 2019).

A qualidade do biofertilizante depende das concentrações dos nutrientes, as quais devem estar em conformidade com padrões de qualidade conforme regulamentações nacionais e internacionais, bem como padrões específicos e metodológicos de aplicabilidade a cada cultura agrícola (NKOA, 2014).

Na Europa existem diferentes padrões em relação as concentrações de N, P, K para fertilizantes orgânicos: i) Na França, o total de N, K₂O e P₂O₅ deve ser superior a 3%, na matéria natural; ii) Na Alemanha, o total deve ser maior que 0,5% (N), 0,3% (P) e 0,5% (K₂O), na matéria seca; iii) Na Espanha os biofertilizantes considerados equilibrados e contemplados como os fertilizantes minerais; iv) Na Inglaterra há especificado limite de nutrientes para os biofertilizantes, embora parâmetros como

matéria seca, matéria orgânica, pH, teor de sal, micro e macronutrientes, devem ser declarados (NKOA, 2014).

No Brasil a legislação não contempla atributos de qualidade do produto, aspectos técnicos e garantias mínimas de nutrientes, deixando a cargo de engenheiros agrônomos e técnicos os parâmetros avaliados para o uso agrícola, assegurados pela lei Nº 6.894 de 1980 e decreto Nº 4.954 de 2004, que em síntese define que o produto contenha princípio ativo ou agente capaz de atuar, direta ou indiretamente, sobre o todo ou partes das plantas cultivadas, elevando a sua produtividade.

O conteúdo de nutrientes do biofertilizante depende principalmente da natureza da matéria-prima e do processo de digestão (ALBURQUERQUE et al., 2012). O biofertilizante derivado da CF é adequado para produção de gramíneas, que são culturas com alta demanda de N (NKOA et al., 2001). Independentemente dos padrões, Weiland et al. (2010) e Voça et al. (2005), após análises químicas e biológicas, concluíram que biofertilizantes derivados de esterco de galinha são fertilizantes valiosos e adequados para a produção agrícola.

4.2 Análise de viabilidade econômica

4.2.1 Análise econômica determinística

Primeiramente foi realizada a análise do fluxo de caixa descontado. O cálculo da receita foi realizado a partir do preço médio do kWh, R\$0,46 e adubo mineral, SA, SS e KCL com valores de R\$ 850,00, R\$1.025,00, R\$1.600,00, respectivamente, praticados no mercado da região Sul do Brasil.

Com auxílio técnico e comercial de especialistas da principal empresa que comercializa biodigestores no Brasil, estimou-se o dimensionamento e os preços médios das plantas de digestão anaeróbia e manutenção, para os 30 cenários analisados. Os preços dos biodigestores foram compostos por obra civil, equipamentos e separador de sólidos.

Os preços dos geradores adaptados a rede seguindo às normas de geração distribuída de energia elétrica foram adquiridos junto a empresa que comercializa este equipamento no estado do Paraná, assim como as potências específicas e consumo de biogás por hora (30kVA-13Nm³, 50kVA-25Nm³, 80kVA-41Nm³, 120kVA-56Nm³,

250kVA-100Nm³ e 330kVA-108Nm³) e os custos de manutenção por hora, R\$3,26 (30 e 50 kVA); R\$ 5,25 (80kVA); R\$ 7,96 (120kVA); R\$ 10,28 (250 e 330 kVA). O tempo de funcionamento dos geradores foi em média de 10 horas por dia.

Os resultados de cada variável dos fluxos de caixa dos 30 cenários estão apresentados nas Tabelas 9 e 10. Os valores apresentados são referentes ao valor presente (VP) descontados a taxa de 6,85%, no período de 10 anos.

Tabela 9 – Fluxos de caixa médio dos cenários TCF, TBD e TM, para escalas de 20.000 a 100.000 frangos (Valores em R\$ 1.000).

Variáveis	20.000			40.000			60.000			80.000			100.000		
Cenário	VP (TCF)	VP (TBD)	VP (TM)	VP (TCF)	VP (TBD)	VP (TM)	VP (TCF)	VP (TBD)	VP (TM)	VP (TCF)	VP (TBD)	VP (TM)	VP (TCF)	VP (TBD)	VP (TM)
Receita Bruta	322,75	401,81	442,27	645,84	807,13	824,94	968,16	1.205,32	1.236,75	1.290,89	1.607,09	1.649,00	1.613,61	2.008,86	2.061,25
Energia Elétrica	182,72	235,43	259,35	365,59	471,06	518,91	548,50	706,73	778,51	731,33	942,30	1.038,02	914,16	1.177,88	1.297,52
Biofertilizante	140,03	166,37	182,92	280,25	336,07	306,04	419,67	498,59	458,24	559,56	664,79	610,99	699,45	830,98	763,73
Dedução	3,23	4,02	4,42	6,46	8,07	8,25	9,68	12,05	12,37	12,91	16,07	16,49	16,14	20,09	20,61
Receita líquida	319,52	397,79	437,85	639,38	799,06	816,70	958,48	1.193,26	1.224,38	1.277,98	1.591,02	1.632,51	1.597,47	1.988,77	2.040,64
Custos variáveis	0,00	25,64	31,34	0,00	51,27	62,67	0,00	76,91	94,01	0,00	102,54	125,34	0,00	128,18	156,68
MC	319,52	372,15	406,51	639,38	747,78	754,02	958,48	1.116,35	1.130,38	1.277,98	1.488,47	1.507,17	1.597,47	1.860,59	1.883,96
Custos fixos	126,20	123,76	147,39	174,24	166,92	194,41	441,35	434,22	470,78	493,74	496,13	538,38	531,15	543,67	586,83
EBITDA	193,32	248,39	259,12	465,13	580,87	559,61	517,13	682,14	659,60	784,24	992,34	968,79	1.066,32	1.316,92	1.297,14
Depreciação	153,93	153,91	153,93	210,96	210,97	211,04	283,54	283,41	283,37	316,10	316,16	316,21	323,38	323,48	323,37
LAIR	39,39	94,48	105,19	254,18	369,90	348,57	233,59	398,73	376,23	468,14	676,19	652,58	742,94	993,45	973,77
Imposto de renda	17,18	27,77	29,83	68,70	94,34	89,29	66,26	102,44	97,02	117,71	164,59	159,00	179,65	238,75	234,09
Resultado líquido	22,21	66,71	75,36	185,48	275,56	259,28	167,33	296,28	279,21	350,43	511,60	493,58	563,29	754,69	739,68
Depreciação	153,93	153,91	153,93	210,96	210,97	211,04	283,54	283,41	283,37	316,10	316,16	316,21	323,38	323,48	323,37
FC operacional	176,14	220,62	229,29	396,44	486,53	470,32	450,87	579,69	562,58	666,53	827,76	809,79	886,67	1.078,17	1.063,05
Investimento	283,15	283,12	283,15	363,97	363,99	364,09	499,83	499,65	499,60	545,98	546,06	546,14	556,30	556,43	556,27
FC Descontado	-107,01	-62,50	-53,86	32,47	122,54	106,24	-48,96	80,04	62,99	120,55	281,70	263,65	330,38	521,74	506,78

Legenda: MC: Margem de contribuição; EBITDA: Lucro antes dos juros, imposto de renda, depreciação e amortizações; LAIR: Lucro antes do imposto de renda;

FC operacional: Fluxo de caixa operacional; FC descontado: Fluxo de caixa descontado; VP: Valor presente.

Tabela 10 – Fluxos de caixa médio dos cenários TCF, TBD e TM, para escalas de 120.000 a 200.000 frangos (Valores em R\$ 1.000).

Variáveis	120.000			140.000			160.000			180.000			200.000		
cenários	VP (TCF)	VP (TBD)	VP (TM)	VP (TCF)	VP (TBD)	VP (TM)	VP (TCF)	VP (TBD)	VP (TM)	VP (TCF)	VP (TBD)	VP (TM)	VP (TCF)	VP (TBD)	VP (TM)
Receita Bruta	1.936,33	2.410,63	2.473,50	2.259,05	2.812,40	2.885,75	2.581,77	3.214,17	3.298,00	2.904,49	3.615,95	3.710,26	3.227,21	4.017,72	4.122,51
Energia Elétrica	1.096,99	1.413,45	1.557,02	1.279,82	1.649,03	1.816,53	1.462,66	1.884,60	2.076,03	1.645,49	2.120,18	2.335,53	1.828,32	2.355,75	2.595,04
Biofertilizante	839,34	997,18	916,48	979,23	1.163,38	1.069,23	1.119,11	1.329,57	1.221,97	1.259,00	1.495,77	1.374,72	1.398,89	1.661,96	1.527,47
Dedução	19,36	24,11	24,74	22,59	28,12	28,86	25,82	32,14	32,98	29,04	36,16	37,10	32,27	40,18	41,23
Receita líquida	1.916,96	2.386,52	2.448,77	2.236,46	2.784,28	2.856,90	2.555,95	3.182,03	3.265,02	2.875,45	3.579,79	3.673,15	3.194,94	3.977,54	4.081,28
Custos variáveis	0,00	153,82	188,01	0,00	179,45	219,35	0,00	205,09	250,68	0,00	230,73	282,02	0,00	256,36	313,35
MC	1.916,96	2.232,71	2.260,76	2.236,46	2.604,83	2.637,55	2.555,95	2.976,94	3.014,34	2.875,45	3.349,06	3.391,13	3.194,94	3.721,18	3.767,93
Custos fixos	537,25	525,64	582,01	575,23	554,72	611,12	599,24	602,00	659,00	639,68	644,38	706,88	647,30	655,43	715,11
EBITDA	1.379,71	1.707,07	1.678,74	1.661,23	2.050,10	2.026,43	1.956,72	2.374,95	2.355,35	2.235,77	2.704,68	2.684,25	2.547,65	3.065,75	3.052,81
Depreciação	474,19	474,16	474,07	492,70	492,88	492,96	494,34	494,23	494,26	543,90	543,75	543,79	546,01	545,87	546,11
LAIR	905,52	1.232,91	1.204,68	1.168,53	1.557,22	1.533,47	1.462,38	1.880,71	1.861,08	1.691,87	2.160,93	2.140,46	2.001,63	2.519,87	2.506,70
Imposto de renda	217,70	295,96	289,20	280,56	373,75	368,05	350,98	451,37	446,66	406,05	518,62	513,71	480,39	604,77	601,61
Resultado líquido	687,83	936,95	915,47	887,96	1.183,47	1.165,42	1.111,40	1.429,34	1.414,42	1.285,82	1.642,31	1.626,75	1.521,24	1.915,10	1.905,09
Depreciação	474,19	474,16	474,07	492,70	492,88	492,96	494,34	494,23	494,26	543,90	543,75	543,79	546,01	545,87	546,11
FC operacional	1.162,02	1.411,11	1.389,54	1.380,67	1.676,35	1.658,38	1.605,74	1.923,57	1.908,68	1.829,72	2.186,06	2.170,54	2.067,25	2.460,98	2.451,20
Investimento	770,02	769,98	769,85	796,26	796,51	796,63	798,58	798,43	798,47	868,82	868,61	868,66	871,81	871,61	871,95
FC descontado	391,99	641,13	619,69	584,41	879,84	861,75	807,16	1.125,15	1.110,21	960,90	1.317,45	1.301,88	1.195,45	1.589,36	1.579,26

Legenda: MC: Margem de contribuição; EBITDA: Lucro antes dos juros, imposto de renda, depreciação e amortizações; LAIR: Lucro antes do imposto de renda;

FC operacional: Fluxo de caixa operacional; FC descontado: Fluxo de caixa descontado; VP: Valor presente.

A partir dos resultados dos fluxos de caixa descontados é possível observar que os cenários com apenas 1 galpão e 20.000 aves, não apresentam viabilidade econômica. Nota-se que a inviabilidade econômica ocorreu mesmo nos cenários que se utilizou a BD e a M para aumentar o potencial de receita. O fator determinante para o insucesso foi o valor do investimento, pois os índices margens de contribuição (MC) (98,9%, 92,1% e 91,4%) e operacional (EBITIDA) (66,2%, 61,8% e 62,2%), demonstram que os custos variáveis e fixos não oneram o resultado operacional, no entanto os ROIs foram negativos em -30,4%, -22,1% e -13,4%.

O cenário TCF com 60.000 aves também foi negativo, sendo impactado pela adição da mão de obra contratada, reduzindo o índice margem EBITIDA para 57,2%, assim como, pelo valor do investimento, pois o aumento dos resíduos produzidos em função da escala de produção, frente aos cenários de 20.000 e 40.000 aves acrescentou a produção anual de biogás 66% e 33%, respectivamente, sendo necessário investir em um motor mais potente, fazendo com que o ROI fosse negativo em -2,27%.

Os demais cenários foram viáveis a partir da análise determinística dos fluxos de caixa descontados com preços médios. Esses resultados corroboram com de demais estudos encontrados (Tabela 11), os quais demonstram que os investimentos necessários para implementação das plantas de digestão, são fatores determinantes para a viabilidade da geração de bioenergia. Outro fator determinante em todos os estudos mencionados é o alto custo com aquisição ou produção de culturas energéticas para aumentar a produção de biogás e metano com a codigestão de resíduos animais ou agroindustriais.

Quadro 1 – Estudos de análise de viabilidade tecno-econômica do potencial de biogás em biodigestores com resíduos animais e culturas energéticas.

País	Cenários	resultados econômicos	Autores
Irlanda	monodigestão para produção de biometano: beterraba; trigo e cevada	Com investimento de € 200 milhões e custo médio da matéria prima de € 66/t, o trigo foi o mais viável, com menor custo de produção 0,83€/mN ³ , frente a beterraba e cevada.	Murphy e Power (2009)
Holanda	codigestão para produção de eletricidade e biofertilizante: resíduos animais e milho	Com investimento de € 6,75 milhões e custos com matéria prima de € 4,58t, os resíduos animais com milho foram viáveis, VPL de € 6,2 milhões e TIR de 25%.	Gebrezgabher et al (2010)
Alemanha	codigestão para produção de eletricidade: silagem de milho e silagem de sorgo	Com investimentos € 2 milhões e custos de matéria prima de 120 €/t, as culturas energéticas, permitiram uma recuperação de capital em 6,7 anos.	Balussou et al (2011)
Turquia	codigestão para produção de eletricidade e biofertilizante: esterco de vaca e milho	Com investimento de € 6.521, o esterco de vaca e milho permitiram uma recuperação do capital em 3,92 anos.	Akbulut et al (2013)
Itália	Codigestão para produção de eletricidade e biofertilizante: Esterco de vaca e cana gigante	A usina é viável porém o investimento representou 92% dos gastos e os custos de produção da cana gigante 20%, fatores determinantes para a viabilidade do projeto.	Sgroi et al (2015)
Itália	codigestão para produção de biogás e biofertilizante: esterco de vaca e sorgo	Com investimento de € 4 milhões e custos de matéria prima de 1.650 €/ha, o esterco de vaca e sorgo, permitiram uma TIR de 8,4% a uma taxa de desconto de 5%.	Agostini et al. (2016)
Dinamarca	Codigestão para produção de biogás e biofertilizante: dejetos suínos e beterraba	Com investimento de € 3,3 a 5,2milhões os custos de aquisição da beterraba inviabilizaram economicamente o projeto, apesar do aumento no rendimento de biogás	Boldrin et al. (2016)

Neste estudo, a partir da margem de contribuição dos cenários TBD e TM (Tabela 9 e 10), observou-se que os custos variáveis para produção de BD e M não impactaram negativamente os resultados do projeto, demonstrando a eficiência econômica dessas culturas para produzir bioenergia no Brasil, frente aos países da Europa (Quadro 1).

Além dos baixos custos de produção dessas duas culturas frente a outras culturas energéticas (OKUDOH et al., 2014; MOTSA et al., 2016; SCHWEINBERGER et al., 2016) e sua alta aptidão de produção nas diversas regiões brasileira (CAMARGO et al., 2017), cabe ressaltar frente aos achados técnicos e econômicos deste estudo, que analisar as características dos resíduos e das matérias primas que serão codigeridas, permite mensurar a proporção correta de cada material para compor as cargas dos biodigestores. Esta atitude favorecerá não só uma melhor eficiência do sistema, mas também uma redução dos custos variáveis do projeto ao dimensionar a quantidade exata de cada cultura energética que deverá ser produzida.

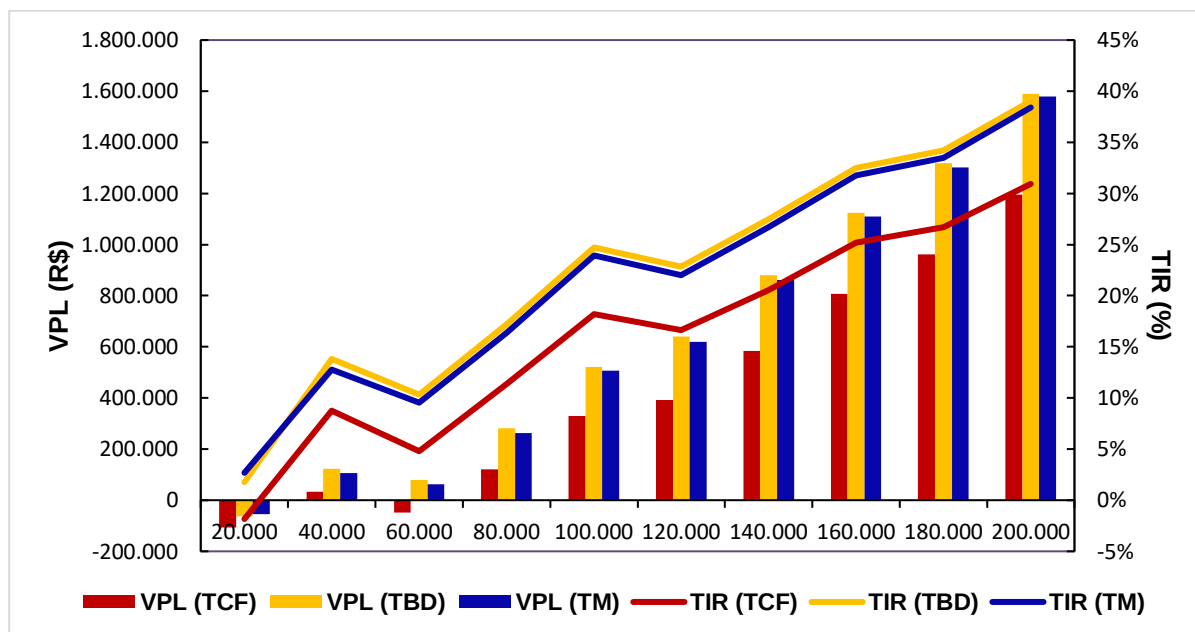
A Figura 5 demonstra os resultados médios de VPLs e TIRs dos 30 cenários analisados. Pode-se observar que a escala produção influencia no aumento dos retornos financeiros e a adição das culturas energéticas melhora os indicadores econômicos dos projetos em relação ao cenário da monodigestão. As culturas energéticas apresentaram resultados semelhantes, no entanto a BD proporcionou ligeiramente maiores VPLs e TIRs na maioria dos cenários, pois seu custo de produção é 18% menor que o da M.

Quanto aos *paybacks* descontados os cenários TCF, TBD e TM com 20.000 animais não apresentaram retorno, assim como o TCF com 60.000, já os demais demonstraram tempos de retornos médios de 8, 9, 7, 5, 5, 4, 4, 4 e 3 anos, respectivamente da escala menor para a maior, sendo que os cenários com culturas energéticas TBD e TM sempre retornam o capital mais rapidamente, que os cenários TCF.

Os *Paybacks* descontados diminuíram em função da escala produção, consequentemente pela maior quantidade de resíduos produzidos, demonstrando que, não só com a diminuição do tempo de retorno do capital investido, mais também com os indicadores econômicos positivos, que o aumento dos resíduos da produção, quando bem gerenciados e tratados da maneira correta, podem deixar de ser passivos onerosos para se tornarem ativos, proporcionando maiores ganhos ao produtor com

economia dos custos de produção e obtenção de receitas secundárias (energia elétrica e biofertilizante).

Figura 5 – Indicadores econômicos VPL, TIR dos 30 cenários analisados.



O alto desempenho econômico dos projetos pesquisados se deve ao fato de que, mesmo com altos investimentos, que representaram em média cerca de 43,48, 72 e 79% dos gastos totais dos projetos em 10 anos nos cenários TCF, TBD e TM, as receitas de todos os cenários, com exceção para o pequeno avicultor com 20.000 frangos TCF, TBD e TM e o de 60.000 TCF, foram suficientes para cobrir os custos de capital e operação, e gerar valor, com índices de lucratividade de 16,60, 33,66 e 34,40% para produtores com 40.000 frangos, 16,02 e 17, 43%, com 60.000 frangos; 29,75, 51,58 e 52,57% com 80.000 frangos, 67,09, 93,76 e 94,78% com 100.000 frangos, 59,06, 83,26 e 85,16% com 120.000 frangos, 81,59, 101,46 e 112,44% com 140.000 frangos, 109,28, 140,92 e 142,75% com 160.000 frangos, 118,89, 151,67 e 153,52% com 180.000 frangos e 145,42, 182,34 e 184,28% com 200.000 frangos, para os cenários TCF, TBD e TM, respectivamente.

Cabe ressaltar que, o produtor de frangos brasileiro comercializa a CF como adubo orgânico, a cada 6 lotes de criação (GUARESKI et al., 2019; CALDAS et al., 2019), gerando uma receita secundária média de R\$ 75,00 por tonelada, segundo a SEAB. Neste estudo, esta receita foi considerada o custo oportunidade (Tabela 11).

Tabela 11 – Custos oportunidade da cama de frango e médias das receitas de energia elétrica e biofertilizante dos projetos (TCF, TBD e TM).

Cenários	Cama de frango (kg ano ⁻¹)	Custo oportunidade (R\$ ano ⁻¹)	Energia elétrica (R\$ ano ⁻¹)	Biofertilizante (R\$ ano ⁻¹)
20.000	157.600	11.820,00	32.010,00	23.116,77
40.000	315.200	23.640,00	64.034,27	43.573,08
60.000	472.800	35.460,00	96.059,19	65.027,78
80.000	630.400	47.280,00	128.078,92	86.703,71
100.000	788.000	59.100,00	160.098,65	108.379,64
120.000	945.600	70.920,00	192.118,38	130.055,57
140.000	1.103.200	82.740,00	224.138,11	151.731,49
160.000	1.260.800	94.560,00	256.157,84	173.407,42
180.000	1.418.400	106.380,00	288.177,58	195.083,35
200.000	1.576.000	118.200,00	320.197,31	216.759,28

A digestão anaeróbia se mostrou mais rentável ao gerar o biofertilizante, que supera a receita da venda da CF em 183%. Além disso, a tecnologia recupera o metano produzido na fermentação, mitigando as emissões de gases de efeito estufa, agregando valor ao produto em 271%, com a receita de energia elétrica (Tabela 11).

Reconhecendo que a CF é um resíduo valorizado pelo avicultor, pois aumenta os ganhos na atividade avaliou-se se é mais vantajoso ao avicultor vender a CF ou utilizá-la como insumo nos biodigestores, analisando comparativamente os lucros anuais dos 30 cenários com os lucros anuais recebidos pelo avicultor com a venda da CF, para auxiliar no gerenciamento adequado dos resíduos.

Para isso, calculou-se os VPLs anualizados dos 30 cenários, técnica que consiste em “determinar uma série anual uniforme equivalente às quantias a serem desembolsadas durante a realização de um projeto” (Souza e Clemente, 2004), ou seja, os retornos reais do investimento são calculados anualmente. A partir dos resultados de VPLs anualizados na Tabela 12 foi possível calcular os VPLs anualizados incrementais e observar se os retornos estimados da opção de investir no biodigestor e renunciar à opção de venda da CF é mais lucrativa ou não.

Tabela 12 – VPLs anualizados dos 30 cenários, VPLs anualizados incremental e % de incremento de renda anual do sistema de digestão anaeróbia que supera o custo oportunidade da venda da cama de frango.

Cenários	VPL anualizado (R\$)			VPL anualizado (incremental) (R\$)			Incremento de renda sob o custo oportunidade		
	(TCF)	(TBD)	(TM)	(TCF)	(TBD)	(TM)	(TCF)	(TBD)	(TM)
20.000	-15.131	-8.837	-7.616	-24.114	-17.820	-16.599	-	-	-
40.000	4.590	17.326	15.021	-13.376	-640	-2.945	-	-	-
60.000	-6.923	11.318	8.906	-33.872	-15.632	-18.044	-	-	-
80.000	17.045	39.830	37.278	-18.888	3.897	1.345	-	10%	4%
100.000	46.712	73.770	71.654	1.796	28.854	26.738	4%	39%	37%
120.000	55.425	90.651	87.620	1.525	36.751	33.720	3%	41%	38%
140.000	82.631	124.402	121.845	19.748	61.520	58.962	24%	49%	48%
160.000	114.126	159.087	156.975	42.260	87.221	85.109	37%	55%	54%
180.000	135.863	186.277	184.075	55.014	105.428	103.226	40%	57%	56%
200.000	169.026	224.723	223.294	79.194	134.891	133.462	47%	60%	60%

Observa-se que os retornos reais anuais do investimento em biodigestores superam o custo oportunidade da CF nos cenários com mais de 100.000 aves, incrementando a renda que seria obtida com a venda da CF em até 60%.

Nos cenários com 80.000 aves fica evidente que o investimento em biodigestores e a utilização das culturas energéticas como insumo incremental aumentam os retornos do projeto e proporcionam ganhos de 4% a 10% superior que o gerado com a comercialização da CF. No entanto, nos cenários contendo de 20.000 a 60.000 aves, os retornos reais anuais do investimento em biodigestores, mesmo com a utilização das culturas energéticas como insumos para aumentar a geração de energia elétrica, não superam as receitas anuais da venda da CF.

Neste contexto, o que justifica esses resultados econômicos negativos e a linearidade nos resultados em relação ao aumento de escala de produção é que o biodigestor e o gerador são equipamentos ofertados no mercado com características técnicas específicas, que nem sempre se adequam as necessidades e demandas do pequeno e médio produtor, resultando em um sistema com equipamentos ociosos.

Frente a isso, os resultados técnicos e econômicos encontrados lançam luz a questão e novos estudos podem ser realizados para testar o aumento de proporções de culturas energéticas no substrato com CF buscando aumentar a produção de biogás para sistemas com capacidade de geração de energia ociosa, assim como, às

fabricantes desses equipamentos, no desenvolvimento de tecnologias mais adaptadas a realidade do pequeno produtor.

Não obstante, os dados de pesquisa colhidos no ensaio semi-contínuo mostraram que no processamento da CF para compor o substrato da digestão anaeróbia, 13% do substrato fica retido no separador de sólidos. O material retido possui 32% de MS e baixa concentração de nutrientes. No entanto, esse material pode ser comercializado pelo produtor de frangos como condicionador de solo, porém terá um valor menor no mercado, em relação a CF, que é mais rica em nutrientes e qualidade.

Com isso, o material que sobra no processo de digestão anaeróbia poderá agregar mais 13% de valor sobre a receita do projeto, se comercializado. Para o cálculo, considerou-se o preço de 50,00 a tonelada do condicionador de solo, sendo este o valor mínimo de comercialização da CF, com baixa qualidade nutricional, quando reutilizada em poucos lotes de criação.

Os resultados da Tabela 13 demonstram os benefícios econômicos que a gestão adequada dos resíduos pode proporcionar ao produtor de frangos de corte, quando pautada em uma economia circular e aproveitamento máximo dos resíduos gerados na produção.

Tabela 13 – Quantidade de substrato retido na separação de sólidos e potencial de receita com a venda do material, como condicionador de solo.

Cenários	Cama de frango		Diluição	Carga	Fração sólida retida		Receita de condicionador de solo
	(kg dia ⁻¹)	(kg MS dia ⁻¹)	(L dia ⁻¹)	(L dia ⁻¹)	(kg dia ⁻¹)	(kg MS dia ⁻¹)	(R\$ ano ⁻¹)
20.000	432	376	7.513	7.889	1.026	328	5.989
40.000	864	751	15.026	15.777	2.051	656	11.978
60.000	1.295	1.127	22.539	23.666	3.077	985	17.967
80.000	1.727	1.503	30.052	31.555	4.102	1.313	23.956
100.000	2.159	1.878	37.565	39.443	5.128	1.641	29.945
120.000	2.591	2.254	45.078	47.332	6.153	1.969	35.934
140.000	3.022	2.630	52.591	55.220	7.179	2.297	41.923
160.000	3.454	3.005	60.104	63.109	8.204	2.625	47.912
180.000	3.886	3.381	67.617	70.998	9.230	2.954	53.901
200.000	4.318	3.756	75.130	78.886	10.255	3.282	59.891

4.2.2 Análise econômica estocástica

Para aumentar a confiabilidade da análise econômica dos investimentos em sistemas de digestão anaeróbia para produção de bioenergia e auxiliar a tomada de decisão dos produtores de frango, frente aos possíveis riscos que a variação de preços, podem ocasionar na obtenção das receitas e nos gastos com investimentos, fatores determinantes para a viabilidade dos projetos, realizou-se a Simulação de Monte Carlo em todos os cenários variando os preços de energia elétrica, fertilizante minerais e biodigestores, referente ao mercado brasileiro.

Com base nas interações de Monte Carlo as maiores probabilidades de valores de VPLs e TIRs possíveis de acontecerem em 10.000 randomizações estão demonstrados na Tabela 14.

Tabela 14 – Valores de VPLs e TIRs com maiores probabilidades de acontecer.

Cenários	VPL (TCF)	Probabilidade (TCF)	VPL (TBD)	Probabilidade (TBD)	VPL (TM)	Probabilidade (TM)
20.000	-43.380	56,87%	14.178	67,07%	24.753	52,78%
40.000	169.064	53,53%	288.407	62,19%	268.809	57,73%
60.000	115.761	62,87%	277.907	60,75%	256.860	56,08%
80.000	365.310	67,20%	547.077	49,10%	554.229	66,48%
100.000	635.442	56,06%	894.754	64,87%	877.337	62,69%
120.000	811.488	69,18%	1.121.464	63,37%	1.112.133	67,11%
140.000	1.059.850	57,94%	1.442.975	59,81%	1.439.439	64,36%
160.000	1.345.996	52,10%	1.772.434	60,17%	1.771.804	63,78%
180.000	1.606.748	66,29%	2.060.466	62,51%	2.037.149	58,84%
200.000	1.905.612	59,73%	2.421.085	60,87%	2.420.950	62,02%
Cenários	TIR (TCF)	Probabilidade (TCF)	TIR (TBD)	Probabilidade (TBD)	TIR (TM)	Probabilidade (TM)
20.000	-1,77%	53,50%	2,12%	64,67%	3,23%	63,92%
40.000	9,09%	61,05%	14,36%	63,95%	13,44%	67,18%
60.000	5,28%	65,67%	10,33%	50,67%	10,05%	63,49%
80.000	11,41%	51,58%	17,76%	62,93%	16,89%	61,96%
100.000	18,78%	64,56%	24,61%	47,86%	24,83%	67,63%
120.000	16,72%	51,85%	23,11%	56,31%	22,82%	68,50%
140.000	20,79%	56,19%	27,57%	51,55%	27,52%	67,00%
160.000	25,88%	66,77%	33,35%	67,06%	32,60%	65,13%
180.000	27,33%	64,83%	35,30%	69,36%	34,47%	67,48%
200.000	32,36%	78,29%	40,06%	66,43%	38,79%	56,44%

A partir dos resultados dos histogramas de cada cenário (Apêndice A) pode-se constatar que a probabilidade dos projetos TCF, TBD e TM para todas as escalas avaliadas, com exceção dos TCF, TBD e TM com 20.000 animais e do TCF com 60.000, perderem dinheiro é 0%. Isso significa que em 10.000 interações 100% dos cenários apresentaram VPLs positivos e TIRs acima da taxa de desconto de 6,85%.

O cenário TCF com 20.000 animais apresentou 99,98% de chance de ser negativo e 100% de não retornar o capital acima da taxa mínima desejada. No entanto, para o pequeno produtor conseguir viabilizar o projeto, ao adicionar a BD e a M suas chances aumentam para 74,68% e 88,81% de obter VPLs positivos, respectivamente, porém o retorno sobre o investimento será menor que 6,85% com 99% de chance.

O produtor TCF com 60.000 aves, tem apenas 0,06% de chances de obter VPL negativo e apenas 7,59% de chance de obter um retorno interno do projeto acima da taxa de 6,85%. Primeiramente, esse resultado reafirma o potencial das culturas energéticas na viabilização dos projetos, já que as probabilidades de obter VPLs positivos e as TIRs acima do esperado foram de 100% no TBD e TM com 60.000 animais.

Segundo, pode-se constatar que a simulação de Monte Carlo permitiu uma análise mais detalhada dos cenários frente a análise determinística, como demonstrando neste exemplo, é possível obter lucros positivos em um cenário que analisado tradicionalmente era inviável e que com taxas de juros mais flexíveis e menores é possível obter retornos acima do esperado.

Um dos problemas enfrentados pelos pequenos agricultores brasileiros são as dificuldades de obter acesso e recursos de programas governamentais que incentivem o investimento em tecnologias de desenvolvimento sustentável e segurança alimentar (BERCHIN et al., 2019), além das altas taxas de juros do mercado brasileiro de 3,75% em 2020, frente a países como os EUA (0,25%), Austrália (0,5%), Europa (0%) e Japão com taxas de juros negativas, segundo o Banco mundial.

Essas barreiras diminuem o poder de barganha e a competitividade dos pequenos agricultores para permanecerem na área rural, frente a presença de altos investimentos privados favorecendo a economia de escala e as cadeias de suprimento internacionais (NEHRING et al., 2016).

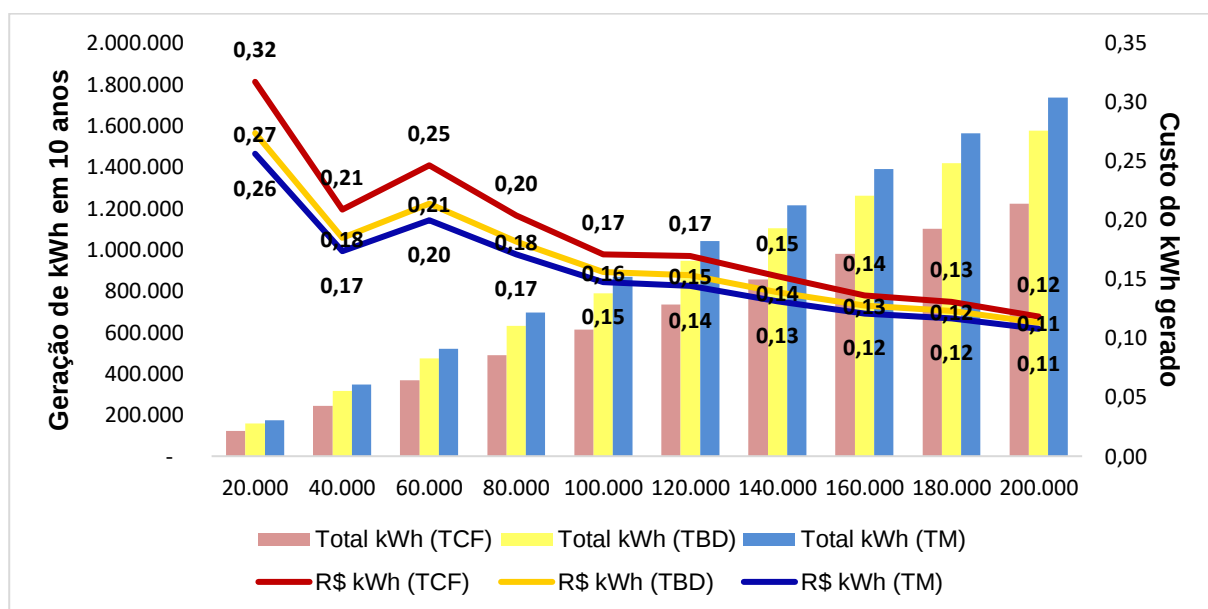
Os resultados estocásticos demonstram que, em geral, o desempenho econômico dos projetos de geração de energia limpa e biofertilizante pesquisados

para os produtores de frangos de corte no Brasil é bom. Os possíveis ganhos com VPLs e TIRs aumentam consideravelmente a riqueza dos produtores.

Portanto, a análise permite observar que a variação nos preços dos biodigestores não impactou os retornos financeiros dos médios e grandes avicultores e que a quantidade de resíduos gerados em função da escala de produção, assim como o uso de culturas energéticas são fatores importantes a serem avaliados, principalmente aos pequenos produtores para recuperar os altos investimentos e aumentar os lucros do projeto.

As variações nos preços da receita não foram representativas para inviabilizar em grande parte os cenários estudados. No entanto, fica evidente que os preços de energia elétrica brasileira são altos e oscilantes, em função do modelo hidroelétrico. Sendo a energia elétrica um recurso fundamental para a competitividade do produtor de frangos, sua produção a partir de biodigestores possibilita reduzir o custo médio do kWh em até 80%, além de não depender das variações do mercado, problemas na distribuição e acesso à rede (Figura 6).

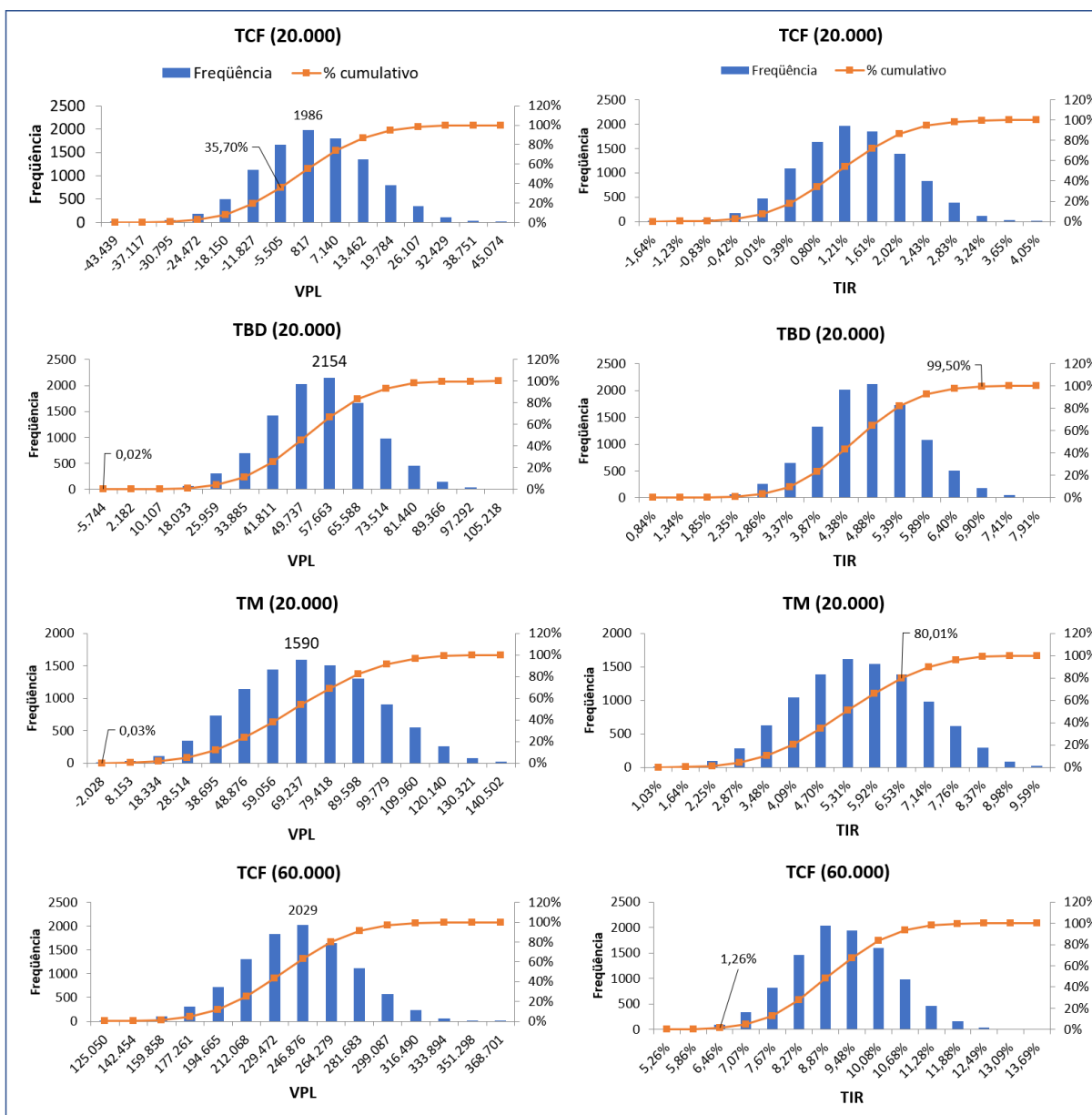
Figura 6 – Geração total de kwh, em 10 anos, em biodigestores e custo do kwh dos 30 cenários analisados.



Em função dos resultados negativos do pequeno produtor com 20.000 animais (TCF, TBD e TM) e 60.000 (TCF) analisou-se os efeitos que o acréscimo da receita com a comercialização do condicionador de solo produzido a partir do material retido no separador de sólidos causaria nos retornos financeiros do projeto.

Com os resultados estocásticos da Figura 7 pode-se constatar que o incremento da receita dos projetos com a venda do condicionador de solo possibilitou viabilizar os cenários TCF, TBD e TM (20.000 animais) com probabilidades de 64,3; 99,98 e 99,97% de obter VPLs positivos, respectivamente, e aumentou as probabilidades de obter TIRs acima do esperado. No cenário com 60.000 animais o aumento da receita permitiu obter 100% dos VPLs positivos com apenas 1,26% de chance da TIR ser menor que 6,85%.

Figura 7 – Histogramas dos cenários de pequenos produtores incrementados com a receita do condicionador de solo.



No entanto, a partir da análise estocástica dos VPLs anualizados incrementais o cenário com 20.000 aves sem a inclusão das culturas energéticas não superam o

custo oportunidade da venda da CF em 100% das possibilidades, já os cenários com a adição de BD e M superam em 6,57 e 17,98% das probabilidades. No cenário TCF com 60.000 aves o custo oportunidade é superado em 36,63% das possibilidades.

Esses resultados corroboram com outros estudos para produtores de frango (DRACOCO et al., 2018; GUARESKI et al., 2019; CALDAS et al., 2019), os quais apontam que o pequeno produtor é dependente da renda secundária da CF para obter lucros na atividade, assim como, esta renda é essencial para aumentar os lucros líquidos em todas as escalas animais. Com isso, ressalta-se a importância do manejo correto e mais eficiente dos resíduos gerados na atividade, sendo este fundamental para o desenvolvimento de aviários sustentáveis, principalmente ao pequeno produtor.

4.2.3 Implicação tecno-econômica

O Brasil está entre os maiores produtores de alimentos do mundo e apresenta grande potencial de produzir biogás a partir dos resíduos orgânicos gerados na produção pecuária, o que favorece a solução de muitos problemas donexo WEF, com a reciclagem de nutrientes, diminuição do impacto ambiental, diversificação da matriz energética e produção de alimento economicamente sustentável.

O biogás produzido em biodigestores é uma fonte intermitente e pode ser utilizada como biocombustível e bioenergia, substituindo os combustíveis fósseis. A barreira econômica e técnica dos insumos e equipamentos dos sistemas de digestão anaeróbia a torna desfavorável para operações de pequena escala. O desenvolvimento de culturas energéticas de baixo custo de produção com potencial para geração de energia e equipamentos mais adequados à realidade do avicultor podem aumentar os ganhos econômicos dos pequenos produtores e sua competitividade no setor.

A fragilidade do pequeno produtor diante das exigências das agroindústrias o torna dependente da CF para obtenção de lucros. O fator financeiro é um limitante de adequação e expansão da atividade, sendo que, o mesmo pode ser amenizado utilizando a tecnologia da digestão anaeróbia para gerenciar adequadamente os resíduos e proporcionar um melhor aproveitamento dos recursos, possibilitando uma maior participação do pequeno produtor na produção de alimentos com segurança ambiental, econômica e social.

A aplicação do modelo de Monte Carlo a uma amostra de 30 casos reais conferiu ao modelo uma evidência favorável de que o mesmo possa ser considerado adequado e consistente. Clercq et al., (2017) analisaram economicamente a produção de biogás em Hainan na China e demonstraram escolasticamente que os preços do gás natural precisariam ser subsidiados em 2,19 RMB/Nm³ para que o projeto viabilizasse.

Arnold e Yildiz, (2015) estudando infraestruturas descentralizadas de energia renovável observaram que este modelo gera informações substanciais de valor agregado com relação ao risco do projeto e vantagens metodológicas consideráveis para avaliar a relação risco/retorno e a volatilidade dos preços dos projetos quando comparado com a estimativa comum do VPL ou análise de sensibilidade, sendo relevante para investidores e credores.

A simulação de monte Carlo neste estudo permitiu variar parâmetros de entrada incertos simultaneamente na análise financeira dos projetos, reduzindo os riscos das previsões, sugerindo que as probabilidades de um valor ser maior ou menor do que o valor-alvo podem ser determinadas dentro de um intervalo de confiança, facilitando o gerenciamento dos recursos e a viabilização de projetos, especialmente para pequenos produtores.

Desta forma, os resultados tecno-econômicos apresentados são relevantes para o surgimento de novas pesquisas de biomassas com potencial energético e gerenciamento adequado de resíduos e recursos dos produtores rurais.

Não obstante, é importante à órgãos públicos, agências de créditos e empresas ligadas ao setor, que juntamente com dados de outros estudos e áreas correlatas poderão auxiliar no desenvolvimento de programas de gerenciamento de resíduos mais adequados, aos diferentes tipos e classes de produtores. Tais fatores promoverão mais incentivos para o desenvolvimento tecnológico sustentável, pautado na economia circular e ampliarão o acesso a recursos e subsídios, principalmente aos pequenos produtores.

As limitações do estudo inerentes à determinação do risco econômico são enfatizadas, uma vez que riscos relacionados a condições do avicultor conseguir utilizar toda energia elétrica e biofertilizante produzidos, assim como a opção de venda desses produtos, que não foram considerados.

Nesse sentido, novos estudos podem avaliar a viabilidade de diferentes proporções do uso da energia elétrica e biofertilizante na produção para a obtenção

de receita, a opção de comercialização desses produtos e o uso de proporções maiores de BD e M para aumentar a produção de energia.

Também deve ser considerado analisar os efeitos econômicos com diferentes estratégias tributárias; nesta pesquisa, foi utilizado o cálculo pelo lucro real; no entanto, outros trabalhos podem avaliar o impacto com lucro presumido e/ou simples e associá-lo a diferentes estratégias para pequenos e médios produtores.

5 CONCLUSÃO

A codigestão anaeróbia aumentou os rendimentos de biogás em relação a monodigestão. O TM obteve um desempenho melhor na redução da carga orgânica de 75,45% e na produção média de biogás $0,0117 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ do que o TBD com 73,02% e $0,0097 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$. A BD e a M apresentaram potencial equivalente para aumentar os rendimentos de biogás em biodigestores de $0,449$ e $0,457 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}\text{SVad}$, respectivamente, em relação a monodigestão com $0,389 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}\text{SVad}$.

A recuperação dos nutrientes N (1,23, 1,27 e 1,23%); P (2,46, 3,55 e 3,27%) e K (3,03, 3,32 e 2,99%) foram similares aos três tratamentos.

Na análise econômica determinística concluiu-se que os cenários com 60.000 até 200.000 aves são viáveis economicamente com VPLs positivos e TIRs acima da taxa mínima de atratividade, sendo que a BD proporcionou ligeiramente maiores lucros, por apresentar um custo de produção 18% menor que a M. No entanto, as escalas com 20.000 (TCF, TBD e TM) e com 60.000 (TCF) não foram viáveis com VPLs negativos, tendo como fator limitante o valor do investimento.

A partir dos VPLs anualizados incrementais pôde-se concluir que os biodigestores superaram em cerca de 56 a 275% o custo oportunidade da CF em escalas acima de 100.000 frangos. Em propriedades com 80.000 frangos é necessário utilizar as culturas energéticas como insumo para incrementar a produção de biogás e as receitas geradas, para viabilizar o investimento frente ao custo oportunidade. Já em propriedades com 20.000, 40.000 e 60.000 frangos o uso do biodigestor gerou retornos reais anuais inferiores ao da venda da CF.

A análise estocástica permitiu concluir que as variações dos preços de energia elétrica e adubos minerais não causam impacto negativo na viabilidade dos projetos e que a variação de 10% nos preços dos biodigestores não é o fator limitante para inviabilizar os cenários estudados, já que acima de 60.000 aves as chances de obter VPLs positivos e TIRs acima de 6,85% são de 100%.

No entanto, os VPLs estocásticos dos cenários TBD e TM com 20.000 animais possuem apenas 25,32 e 11,19% de chance de serem negativos, porém as TIRs demonstram que o retorno do investimento ocorrerá abaixo do mínimo esperado. Do mesmo modo o cenário TCF com 60.000 animais apresentou apenas 0,06% de chance de obter VPL negativo, porém 92,41% do retorno ser abaixo da taxa mínima.

Contudo, a inclusão da receita adicional do condicionador de solo permitiu aumentar os lucros nos cenários TCF, TBD e TM (20.000) e TCF (60.000) em 64,3, 99,98, 99,97 e 100% das possibilidades, respectivamente, permitindo superar o custo oportunidade de 10 a 20%.

A adição de culturas energéticas como a BD e a M podem potencializar os rendimentos de biogás, proporcionando uma energia elétrica cerca de 34 a 80% mais barata ao produtor, promovendo um aumento da renda e economia dos custos de produção.

O desenvolvimento de energia renovável envolve muitos aspectos, dos quais o mais importante é provavelmente o incentivo técnico e econômico aos produtores. A partir dos resultados conclui-se que a digestão anaeróbia é uma tecnologia altamente eficiente para gerenciar os resíduos da produção de frangos, promovendo a reciclagem de nutrientes e a produção de biogás, agregando valor a CF e a empresa rural.

REFERÊNCIAS

- ABPA – Associação Brasileira de Proteína Animal. Disponível em: <http://abpabr.com.br/>. Acesso em 05 jan 2020.
- APHA, 2005. American Public Health Association. American water works association; water environment Federation – APHA/AWWA/WEF. Standard Methods for Examination of Water and Manure Water (twenty-first ed.), American Water Works Association, Washington, D.C. (2005), p. 1368p
- ABOUELENIEN, F., KITAMURA, Y., NISHIO, N., NAKASHIMADA, Y. Dry anaerobic ammonia–methane production from chicken manure. **Applied microbiology and biotechnology**, v. 82, n. 4, p. 757-764, 2009.
- ACHEBE, C. H.; ONOKPITE, E.; ONOKWAI, A. O. Anaerobic Digestion and Co-digestion of Poultry Droppings (PD) and Cassava Peels (CP): Comparative Study of Optimal Biogas Production. **Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 12, p. 87-93, 2018.
- AFZAL, M., NAEEM, M., IQBAL, M., SHARIF, M., HUANG, Q. Efficient energy resource scheduling for sustainable diversified farming. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 9, n. 4, p. 044902, 2017.
- AGOSTINI, A., BATTINI, F., PADELLA, M., GIUNTOLI, J., BAXTER, D., MARELLI, L., AMADUCCI, S. Economics of GHG emissions mitigation via biogas production from Sorghum, maize and dairy farm manure digestion in the Po valley. **Biomass and Bioenergy**, v. 89, p. 58-66, 2016.
- AGOSTINI, A., BATTINI, F., GIUNTOLI, J., TABAGLIO, V., PADELLA, M., BAXTER, D., AMADUCCI, S. Environmentally sustainable biogas? The key role of manure co-digestion with energy crops. **Energies**, v. 8, n. 6, p. 5234-5265, 2015.
- ALBUQUERQUE, J. R. T., RIBEIRO, R. M. P., PEREIRA, L. A. F., JUNIOR, A. P. B., DA SILVEIRA, L. M., DOS SANTOS, M. G., NETO, F. B. Sweet potato cultivars grown and harvested at different times in semiarid Brazil. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 46, p. 4810-4818, 2016.
- ALVES, R. N. B., JUNIOR, M., & FERREIRA, E. R. Doses de NPK na adubação de mandioca (*Manihot esculenta*, L) variedade paulozinho em Moju-Pará. **Embrapa Amazônia Oriental-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2012.
- ALVAREZ, R. E. A., ROMAN, M. B., KIRK, D., CHAVARRIA, J. A. M., BAUDRIT, D., PEREIRA, J. F. A., LIAO, W. Technical and economic feasibility of a solar-bio-powered waste utilization and treatment system in Central America. **Journal of environmental management**, v. 184, p. 371-379, 2016.
- AKBULUT, A., KOSE, R., & AKBULUT, A. Technical and economic assessments of biogas production in a family size digester utilizing different feedstock rotations: Döğler case study. **International journal of green energy**, v. 11, n. 2, p. 113-128, 2014.
- AKYOL, Ç., OZBAYRAM, E. G., INCE, O., KLEINSTEUBER, S., INCE, B. Anaerobic co-digestion of cow manure and barley: Effect of cow manure to barley ratio on

methane production and digestion stability. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 35, n. 2, p. 589-595, 2016.

ARNOLD, U., & YILDIZ, Ö. Economic risk analysis of decentralized renewable energy infrastructures—A Monte Carlo Simulation approach. **Renewable Energy**, v. 77, p. 227-239, 2015.

BALUSSOU, D., KLEYBÖCKER, A., MCKENNA, R., MÖST, D., & FICHTNER, W. An economic analysis of three operational co-digestion biogas plants in Germany. **Waste and Biomass Valorization**, v. 3, n. 1, p. 23-41, 2012.

BATAGLIA, A.M.C. FURLANI, J.P.F. TEIXEIRA, P.R. FURLANI, J.R. Gallo Methods of Chemical Analysis of Plants Instituto Agrônômico, Campinas (1983), p. 48p (Boletim Técnico 78).

BATISTA, S. D. P., GUERRA, E. P., RESENDE, J. T. V. D., GUERI, M. V. D., CARVALHO, G. C., CRESTANI, J. N. D. S., SILVA, I. F. L. D. Potential for biogas generation from sweet potato genotypes. **Revista Ambiente & Água**, v. 14, n. 2. 2019.

BATAN, L. Y., GRAFF, G. D., & BRADLEY, T. H. Techno-economic and Monte Carlo probabilistic analysis of microalgae biofuel production system. **Bioresource technology**, v. 219, p. 45-52, 2016.

BELUSSO, D., HESPANHOL, A. N. A evolução da avicultura industrial brasileira e seus efeitos territoriais. **Revista Percursos**, v. 2, n. 1, p. 25-51, 2011.

BENVENGA, M. A. C., LIBRANTZ, A. F. H., SANTANA, J. C. C., TAMBOURGI, E. B. Genetic algorithm applied to study of the economic viability of alcohol production from Cassava root from 2002 to 2013. **Journal of Cleaner Production**, v. 113, p. 483-494, 2016.

BIGGS, E. M., BRUCE, E., BORUFF, B., DUNCAN, J. M., HORSLEY, J., PAULI, N., HAWORTH, B. Sustainable development and the water–energy–food nexus: A perspective on livelihoods. **Environmental Science & Policy**, v. 54, p. 389-397, 2015.

BILLEN, P., COSTA, J., VAN DER AA, L., VAN CANEGHEM, J., VANDECASTEELE, C. Electricity from poultry manure: a cleaner alternative to direct land application. **Journal of Cleaner Production**, v. 96, p. 467-475, 2015.

BOLDRIN, A., BARAL, K. R., FITAMO, T., VAZIFEHKHORAN, A. H., JENSEN, I. G., KJÆRGAARD, I., TRIOLO, J. M. Optimised biogas production from the co-digestion of sugar beet with pig slurry: Integrating energy, GHG and economic accounting. **Energy**, v. 112, p. 606-617, 2016.

BROTHERSON, W. T., EADES, K. M., HARRIS, R. S., HIGGINS, R. C. 'Best Practices' in Estimating the Cost of Capital: An Update. **Journal of Applied Finance (Formerly Financial Practice and Education)**, v. 23, n. 1, 2013.

CAETANO, L. Proposição de um sistema modificado para quantificação de biogás. 1985. 75 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1985.

CALDAS, E. O. L., LIMA, A. L. R., & LARA, L. J. C. Viabilidade econômica da produção de frangos de corte sob diferentes estruturas de governança. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, 71(5), 1639-1648, 2019.

CALVET, S., ESTELLÉS, F., CAMBRA-LÓPEZ, M., TORRES, A. G., VAN DEN WEGHE, H. F. A. The influence of broiler activity, growth rate, and litter on carbon dioxide balances for the determination of ventilation flow rates in broiler production. **Poultry science**, v. 90, n. 11, p. 2449-2458, 2011.

CAMARGO, F. A. O., SILVA, L. S., MERTEN, G. H., CARLOS, F. S., BAVEYE, P. C., TRIPLETT, E. W.. Brazilian Agriculture in Perspective: Great Expectations vs Reality. In: **Advances in Agronomy**. Academic Press, 2017. p. 53-114.

CARMONA, P. A., PEIXOTO, J. R., AMARO, G. B., MENDONÇA, M. A. Genetic divergence of sweet potato accessions based on morpho-agronomic descriptors of the roots. **Horticultura Brasileira**, v. 33, n. 2, p. 241-250, 2015.

CARO, D., DAVIS, S. J., KEBREAB, E., MITLOEHNER, F. Land-use change emissions from soybean feed embodied in Brazilian pork and poultry meat. **Journal of cleaner production**, v. 172, p. 2646-2654, 2018.

CARUANA, M. E. C. Organizational and economic modeling of an anaerobic digestion system to treat cattle manure and produce electrical energy in Argentina's feedlot sector. **Journal of cleaner production**, v. 208, p. 1613-1621, 2019.

CASTRO, C., CARPINTERO, Ó., FRECHOSO, F., MEDIAVILLA, M., DE MIGUEL, L. J. A top-down approach to assess physical and ecological limits of biofuels. **Energy**, v. 64, p. 506-512, 2014.

CAVINATO, C., FATONE, F., BOLZONELLA, D., PAVAN, P. Thermophilic anaerobic co-digestion of cattle manure with agro-wastes and energy crops: comparison of pilot and full scale experiences. **Bioresource technology**, v. 101, n. 2, p. 545-550, 2010.

CHEN, Z., & JIANG, X. (2014). Microbiological safety of chicken litter or chicken litter-based organic fertilizers: a review. **Agriculture**, v. 4, n. 1, p. 1-29, 2014.

CLERCQ, D., WEN, Z., FEI, F. Economic performance evaluation of bio-waste treatment technology at the facility level. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 116, p. 178-184, 2017.

CREMONEZ, PAULO A., TELEKEN, JOEL G., FEIDEN, ARMIN, ROSSI, EDUARDO DE, SOUZA, SAMUEL M. DE, TELEKEN, JHONY, DIETER, JONATHAN, E ANTONELLI, JHONATAS. Biodigestão anaeróbia de um polímero orgânico de fécula de mandioca. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 39, n. 1, p. 122-133, 2016.

COPELAND, T. ANTIKAROV, V. Real Options - A Practitioner's Guide, Texere LLC Publishing, 2001.

CUETOS, M. J., FERNÁNDEZ, C., GÓMEZ, X., MORÁN, A. Anaerobic co-digestion of swine manure with energy crop residues. **Biotechnology and Bioprocess Engineering**, v. 16, n. 5, p. 1044, 2011.

DALÓLIO, F. S., SILVA, J. N., DA COSTA BAÊTA, F., TINÔCO, I. D. F. F., CARNEIRO, A. C. O. NOTA técnica: cama de frango e resíduo moveleiro: alternativa

energética para a zona da mata mineira. **revista engenharia na agricultura-reveng**, v. 25, n. 3, p. 261-271, 2017.

DAMACENO, F. M., CHIARELOTTO, M., RESTREPO, J. C. P. S., BULIGON, E. L., DE MENDONÇA COSTA, L. A., DE LUCAS JUNIOR, J., & DE MENDONÇA COSTA, M. S. S. Anaerobic co-digestion of sludge cake from poultry slaughtering wastewater treatment and sweet potato: Energy and nutrient recovery. **Renewable energy**, v. 133, p. 489-499, 2019.

DAMODARAN, A. Valuation approaches and metrics: a survey of the theory and evidence. **Foundations and Trends® in Finance**, v. 1, n. 8, p. 693-784, 2007.

DENNEHY, C., LAWLOR, P. G., GARDINER, G. E., JIANG, Y., SHALLOO, L., ZHAN, X. Stochastic modelling of the economic viability of on-farm co-digestion of pig manure and food waste in Ireland. **Applied energy**, v. 205, p. 1528-1537, 2017.

DACROCE, N. P. D., LEISMANN, E. L., HOFER, E. Panorama dos pequenos produtores avícolas diante de novas tecnologias, biossegurança e exigências ambientais. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 11, n. 2, p. 431-456, 2018.

DI BERNARDO, E., FRALEONI-MORGERA, A., IANNELLO, A., TONEATTI, L., & POZZETTO, D. Economical Analysis of Alternative Uses of Biogas Produced by an Anaerobic Digestion Plant. **International Journal of Environmental Research**, v. 13, n. 1, p. 199-211, 2019.

DONATELLI, G. D. KONRATH, A. C. Simulação de Monte Carlo na Avaliação de Incertezas de Medição. **Revista de Ciência & Tecnologia**, V. 13, n 25/26, p. 5-15. Jan./Dez. 2005

DUSONCHET, L., TELARETTI, E. Comparative economic analysis of support policies for solar PV in the most representative EU countries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 986-998, 2015.

ENDO, A., TSURITA, I., BURNETT, K., ORENCIO, P. M. A review of the current state of research on the water, energy, and food nexus. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 11, p. 20-30, 2017.

ESPOSITO, G., FRUNZO, L., GIORDANO, A., LIOTTA, F., PANICO, A., PIROZZI, F. Anaerobic co-digestion of organic wastes. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 11, n. 4, p. 325-341, 2012.

ESPÍNDOLA, C. J. Trajetórias do progresso técnico na cadeia produtiva de carne de frango do Brasil. **Revista Geosul, Florianópolis**, v. 27, n. 53, p. 89-113. 2012.

FAO. 2019 Food Outlook - Biannual Report on Global Food Markets – November 2019. Rome.

FARINELLI, J. B.M, HORITA, K., SANTOS, D. F. L. Analysis of the economic viability of the peanut crop in the region of Jaboticabal, São Paulo. **Científica**, v. 46, n. 3, p. 215-220, 2018.

FARIAS, C. J., SCHNEIDER, M. B. Caracterização dos produtores avícolas da região oeste do paraná. **Orbis Latina**, v. 7, n. 4, p. 30-47, 2018.

FERNANDEZ, P., EQUITY P. Historical, Expected, Required and Implied (2019). Available at <https://ssrn.com/abstract=933070> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.933070>

FERREIRA, L. R. A., OTTO, R. B., SILVA, F. P., DE SOUZA, S. N. M., DE SOUZA, S. S., JUNIOR, O. A. Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 440-455, 2018.

FINLEY, J. W., SEIBER, J. N. The nexus of food, energy, and water. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 62, n. 27, p. 6255-6262, 2014.

FREGADOLLI, F. L., ZEOULA, L. M., PRADO, I. N. D., BRANCO, A. F., CALDAS NETO, S. F., KASSIES, M. P., & DALPONTE, A. O. Efeito das fontes de amido e nitrogênio de diferentes degradabilidades ruminais. 1. Digestibilidades parcial e total. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 30, n. 3, p. 858-869, 2001.

FREITAS, F. F., DE SOUZA, S. S., FERREIRA, L. R. A., OTTO, R. B., ALESSIO, F. J., DE SOUZA, S. N. M., JUNIOR, O. A. The Brazilian market of distributed biogas generation: Overview, technological development and case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 101, p. 146-157, 2019.

FUKAYAMA, E. H. .121p. **Características quantitativas e qualitativas da cama de frango sob diferentes reutilizações: efeitos na produção de biogás e biofertilizante**. Tese de doutorado. Universidade Estadual Paulista. Jaboticabal-SP. 2008.

FUNCK, S. R., FONSECA, R. A. Avaliação energética e de desempenho de frangos com aquecimento automático a gás e a lenha. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v. 12, n. 1, p. 91-97, 2008.

GARFÍ, M., MARTÍ-HERRERO, J., GARWOOD, A., FERRER, I. Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 60, p. 599-614, 2016.

GEBREZGABHER, S. A., MEUWISSEN, M. P., PRINS, B. A., LANSINK, A. G. O. Economic analysis of anaerobic digestion—A case of Green power biogas plant in The Netherlands. **NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences**, v. 57, n. 2, p. 109-115, 2010.

GLANPRACHA, N., ANNACHHATRE, A. P. Anaerobic co-digestion of cyanide containing cassava pulp with pig manure. **Bioresource technology**, v. 214, p. 112-121, 2016.

GOVINDAN, K. Sustainable consumption and production in the food supply chain: A conceptual framework. **International Journal of Production Economics**, v. 195, p. 419-431, 2018.

GOUGH, R., DICKERSON, C., ROWLEY, P., WALSH, C. Vehicle-to-grid feasibility: A techno-economic analysis of EV-based energy storage. **Applied energy**, v. 192, p. 12-23, 2017.

GRANDO, R. L., DE SOUZA ANTUNE, A. M., DA FONSECA, F. V., SÁNCHEZ, A., BARRENA, R., FONT, X. Technology overview of biogas production in anaerobic

digestion plants: A European evaluation of research and development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 44-53, 2017.

GUARESCHI, A. H. P., ZACHOW, M., FACHIN, G., RIBEIRO, W. Sistema Contratual de Integração: Vantagens e Desvantagens percebidas pelos produtores de frangos de corte na região de Cafelândia-Paraná. **Revista de Gestão e Organizações Cooperativas**, v. 6, n. 11, p. 43-60, 2019.

GUIMARÃES, G., LANA, R. D. P., REIS, R. D. S., VELOSO, C. M., SOUSA, M. R. D. M., RODRIGUES, R. C., CAMPOS, S. D. A. Produção de cana-de-açúcar adubada com cama de frango. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v. 17, n. 4, 2016.

GUTA, D., JARA, J., ADHIKARI, N., CHEN, Q., GAUR, V., MIRZABAEV, A. Assessment of the Successes and Failures of Decentralized Energy Solutions and Implications for the Water–Energy–Food Security Nexus: Case Studies from Developing Countries. **Resources**, v. 6, n. 3, p. 24, 2017.

HOLOHAN, C., SOUTAR, I., SUCKLING, J., DRUCKMAN, A., LARKIN, A., MCLACHLAN, C. Stepping-up innovations in the water–energy–food nexus: A case study of anaerobic digestion in the UK. **The Geographical Journal**, v. 185, n. 4, p. 391-405, 2019.

HUANG, J.; SHANG, Z.; MAN, J.; LIU, Q.; ZHU, C.; WEI, C. Comparison of molecular structures and functional properties of high-amylose starches from rice transgenic line and commercial maize. **Food Hydrocolloids**, v. 46, p. 172-179, 2015.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. Estatística da Produção Pecuária. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/2380/epp_2019_3tri.pdf. Acesso em: 02 jan de 2020.

IRENA. Renewable energy in the water, energy and food nexus International Renewable Energy Agency (2015)

Http://www.irena.org/documentdownloads/publications/irena_water_energy_food_nexus_2015.pdf [acessado em jan de 2020]

JUNIOR, S., DANTAS, W., BALDISSERA, J. F., BERTOLINI, G. R. F. Análise de opções reais aplicada na diversificação da produção rural no estado do Paraná. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 57, n. 2, p. 253-269, 2019.

KHAN, E. U., MARTIN, A. R. Review of biogas digester technology in rural Bangladesh. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 62, p. 247-259, 2016.

KPATA-KONAN, E. N., GNAGNE, T., KOUAMÉ, F. Y., KONAN, F. K., KOUAMÉ, M. K., TANO, K. Optimum amount of inoculum for anaerobic digestion of cassava waste. **Parameters**, v. 5, n. B10, p. B15, 2018.

LE, C., STUCKEY, D. C. Impact of feed carbohydrates and nitrogen source on the production of soluble microbial products (SMPs) in anaerobic digestion. **Water research**, v. 122, p. 10-16, 2017.

LEES, AC, PERES, CA, FEARNSTIDE, PM, SCHNEIDER, M. ZUANON, JA. Hydropower and the future of Amazonian biodiversity. **Biodiversity and conservation**, v. 25, n. 3, p. 451-466, 2016.

LI, Y., ZHANG, R., CHEN, C., LIU, G., HE, Y., LIU, X. Biogas production from co-digestion of corn stover and chicken manure under anaerobic wet, hemi-solid, and solid state conditions. **Bioresource Technology**, v. 149, p. 406-412, 2013.

LIJÓ, L., GONZÁLEZ-GARCÍA, S., BACENETTI, J., FIALA, M., FEIJOO, G., LEMA, J. M., MOREIRA, M. T. Life Cycle Assessment of electricity production in Italy from anaerobic co-digestion of pig slurry and energy crops. **Renewable Energy**, v. 68, p. 625-635, 2014.

LIMA, J. D. D.; ALBANO, J. C. da S.; OLIVEIRA, G. A.; TRENTIN, M. G.; BASTITIUS, D. R. Revisão de proposições para a gestão econômico-financeira de sistemas produtivos agropecuários: a inter-relação entre fluxo de caixa, sistemas de custos e recursos compartilhados. **Custos e @gronegócio on line**, Recife, v. 12, n. 1, p. 113-141, 2016.

LIN, L., XU, F., GE, X., LI, Y. Improving the sustainability of organic waste management practices in the food-energy-water nexus: A comparative review of anaerobic digestion and composting. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 89, p. 151-167, 2018.

KABYANGA, M., BALANA, B. B., MUGISHA, J., WALEKHWA, P. N., SMITH, J., GLENK, K. Economic potential of flexible balloon biogas digester among smallholder farmers: A case study from Uganda. **Renewable energy**, v. 120, p. 392-400, 2018.

KIBLER, K. M., REINHART, D., HAWKINS, C., MOTLAGH, A. M., WRIGHT, J. Food waste and the food-energy-water nexus: A review of food waste management alternatives. **Waste management**, v. 74, p. 52-62, 2018.

MALAVOLTA, E., VITTI, G. C., OLIVEIRA, S. A. D. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 1997.

MAO, C., FENG, Y., WANG, X., REN, G. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 540-555, 2015.

MARX, S. Mandioca como matéria-prima para a produção de etanol: uma perspectiva global. Na *produção de bioetanol a partir de culturas alimentares* (pp. 101-113). Academic Press. 2019.

MAYERLE, S. F., E FIGUEIREDO, J. N. Designing optimal supply chains for anaerobic bio-digestion/energy generation complexes with distributed small farm feedstock sourcing. **Renewable Energy**, v. 90, p. 46-54, 2016.

Mehr, A. S., Gandiglio, M., MosayebNezhad, M., Lanzini, A., Mahmoudi, S. M. S., Yari, M., Santarelli, M. Solar-assisted integrated biogas solid oxide fuel cell (SOFC) installation in wastewater treatment plant: Energy and economic analysis. **Applied energy**, v. 191, p. 620-638, 2017.

MITTAL, S., AHLGREN, E. O., SHUKLA, P. R. Barriers to biogas dissemination in India: A review. **Energy Policy**, v. 112, p. 361-370, 2018.

MKRUQULWA, U., OKUDOH, V., OYEKOLA, O. Optimizing Methane Production from Co-digestion of Cassava Biomass and Winery Solid Waste Using Response Surface Methodology. **Waste and Biomass Valorization**, p. 1-10, 2019.

Mohanraj, R., Sivasankar, S. Sweet Potato (*Ipomoea batatas* [L.] Lam)-A valuable medicinal food: A review. **Journal of medicinal food**, 17(7), 733-741. 2014.

MONTORO, S. B.; SANTOS, D. F.L.; LUCAS JUNIOR, J. Economic and financial viability of digester use in cattle confinement for beef. **Engenharia Agrícola**, v. 37, n. 2, p. 353-365, 2017.

MONTORO, S. B., LUCAS JR, J., SANTOS, D. F. L., COSTA, M. S. S. M. Anaerobic co-digestion of sweet potato and dairy cattle manure: A technical and economic evaluation for energy and biofertilizer production. **Journal of cleaner production**, v. 226, p. 1082-1091, 2019.

MOTSA, N. M., MODI, A. T., MABHAUDHI, T. Sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) as a drought tolerant and food security crop. **South African Journal of Science**, v. 111, n. 11-12, p. 1-8, 2015.

MURPHY, J. D., POWER, N. Technical and economic analysis of biogas production in Ireland utilising three different crop rotations. **Applied Energy**, v. 86, n. 1, p. 25-36, 2009.

MUSSHOFF, O. Growing short rotation coppice on agricultural land in Germany: A Real Options Approach. **Biomass and Bioenergy**, [S.l.], v. 41, n. 01, p. 73-85, 2012.

MUTUNGWAZI, A., MUKUMBA, P., MAKAKA, G. Biogas digester types installed in South Africa: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 172-180, 2018.

NANDIYANTO, A. B. D., MAULANA, A. C., RAGADHITA, R., ABDULLAH, A. G. Economic evaluation of the production ethanol from cassava roots. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2018. p. 012023.

NESHAT, SA, MOHAMMADI, M., NAJAFPOUR, GD., LAHIJANI, P. Co-digestão anaeróbica de esterco animal e resíduos lignocelulósicos como uma abordagem potente para a produção sustentável de biogás. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, p. 308-322, 2017.

NIU, Q., QIAO, W., QIANG, H., HOJO, T., LI, Y. Y. Mesophilic methane fermentation of chicken manure at a wide range of ammonia concentration: stability, inhibition and recovery. **Bioresource Technology**, v. 137, p. 358-367, 2013.

NKODI, T. M., KM, T., KAYEMBE, S., MULAJI, C., MIHIGO, S. Biogas production by co-digestion of cassava peels with urea. **Carbon**, v. 55, p. 0.16a, 2016.

NKOA, R. Benefícios agrícolas e riscos ambientais da fertilização do solo com digestos anaeróbicos: uma revisão. **Agron. Sustentar. Dev.** 34 (2), 473–492. 2014.

NKOA, R., COULOMBE, J., DESJARDINS, Y., TREMBLAY, N. Towards optimization of growth via nutrient supply phasing: nitrogen supply phasing increases broccoli

(*Brassica oleracea* var. *italica*) growth and yield. **Journal of experimental botany**, v. 52, n. 357, p. 821-827, 2001.

OKUDOH, V., TROIS, C., WORKNEH, T., SCHMIDT, S. The potential of cassava biomass and applicable technologies for sustainable biogas production in South Africa: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 39, p. 1035-1052, 2014.

OLIVEIRA, A. M. S. D., BLANK, A. F., ALVES, R. P., PINTO, V. D. S., ARRIGONI-BLANK, M. D. F., MALUF, W. R. Características produtivas de clones de batata-doce cultivados em três períodos de cultivo em São Cristóvão-SE. 2015.

OLIVEIRA, L. G., DE FREITAS, D. C., BATALHA, M. O., ALCÂNTARA, R. L. C. Gerenciamento de riscos na cadeia agroindustrial de frango: análise da perspectiva dos avicultores em ubá, Minas Gerais. **Revista Produção Online**, v. 15, n. 4, p. 1305-1325. 2015.

OZTURK, B. Evaluation of biogas production yields of different waste materials. **Earth Science Research**, v. 2, n. 1, p. 165-174, 2013.

PACETTI, T., LOMBARDI, L., FEDERICI, G. Water–energy Nexus: a case of biogas production from energy crops evaluated by Water Footprint and Life Cycle Assessment (LCA) methods. **Journal of Cleaner Production**, v. 101, p. 278-291, 2015.

PANICHNUMSIN, P., NOPHARATANA, A., AHRING, B. CHAIPRASERT, P. Produção de metano por co-digestão de polpa de mandioca com várias concentrações de esterco de porco. **Biomassa e Bioenergia**, v. 34, n. 8, p. 1117-1124, 2010.

PATHAK, D. N., SWARNAKAR, N. K., DODA, D. K., RANJAN, R. A Review on Optimal & Sustainable Approaches for Decentralized Power Generation using Renewable Energy Sources in Remote Areas. **Journal of Advanced Research in Power Electronics & Power Systems**, v. 3, n. 1&2, p. 1-5, 2016.

Peng, W., Pivato, A. Sustainable Management of Digestate from the Organic Fraction of Municipal Solid Waste and Food Waste Under the Concepts of Back to Earth Alternatives and Circular Economy. **Waste Biomass Valor.** 10, 465–481. 2019.

RAJAGOPAL, R., MASSÉ, D. I. Start-up of dry anaerobic digestion system for processing solid poultry litter using adapted liquid inoculum. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 102, p. 495-502, 2016.

RECK, A. B. e SCHULTZ, G. Aplicação da metodologia multicritério de apoio à decisão no relacionamento inter organizacional na cadeia da avicultura de corte. **Rev. Econ. Sociol. Rural**, v. 54, n. 4, p. 709-728, dez. 2016.

TY - JOUR

REIS, R., ASCHERI, D.P.R., DEVILLA, I. Propriedades Físicas do Tubérculo e Propriedades Químicas e Funcionais do Amido de Inhame (*Dioscorea* sp.) Cultivar São Bento. **Revista Agrotecnologia - Agrotec** v. 1, n. 1, p. 71-88. 2010.

RENZHO, A. M., KAMARA, J. K., TOOLE, M. Biofuel production and its impact on food security in low and middle income countries: Implications for the post-2015 sustainable development goals. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, p. 503-516, 2017.

REZVANI, S., BAHRI, P. A., URMEE, T., BAVERSTOCK, G. F., MOORE, A. D. Techno-economic and reliability assessment of solar water heaters in Australia based on Monte Carlo analysis. **Renewable energy**, v. 105, p. 774-785, 2017.

ROGERI, D. A., ERNANI, P. R., LOURENCO, K. S., CASSOL, P. C., GATIBONI, L. C. Mineralization and nitrification of nitrogen from poultry litter applied to soil/Mineralizacão e nitrificação do nitrogênio proveniente da cama de aves aplicada ao solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 6, p. 534-541, 2015.

ROMERO-GÜIZA, M. S., MATA-ALVAREZ, J., CHIMENOS RIVERA, J. M., GARCIA, S. A. Nutrient recovery technologies for anaerobic digestion systems: An overview. **Revista Ion**, v. 29, n. 1, p. 7-26, 2016.

SAGULA, A. L.; COSTA, L. V. C.; LUCAS JUNIOR, J. Diferentes diluições e uso de reciclo na biodigestão anaeróbia de cama de frango triturada e peneirada: ensaio batelada/different dilutions and use of recycle in the anaerobic biodigestion of crushed and sieved poultry litter: batch test. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 11, n. 4, p. 373-384, 2017.

SANTOS, T., LUCAS JÚNIOR, J. D. Balanço energético em galpão de frangos de corte. **Engenharia Agrícola**, p. 25-36, 2004.

SANTOS, T.M.B.; LUCAS JR., J.; SAKOMURA, N.K. Efeitos da densidade populacional e da reutilização da cama sobre o desempenho de frangos de corte e produção de cama. **Revista Portuguesa de Ciências Veterinárias**, Lisboa, v.100, n.553, p.45-52, 2005.

SCHWEINBERGER, C. M., TRIERWEILER, J. O., TRIERWEILER, L. F. A simple equation for total reducing sugars (trs) estimation on sweet potato and ethanol yield potential. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 36, n. 1, p. 33-41, 2019.

SCHWEINBERGER, C. M., PUTTI, T. R., SUSIN, G. B., TRIERWEILER, J. O., TRIERWEILER, L. F. Ethanol production from sweet potato: The effect of ripening, comparison of two heating methods, and cost analysis. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 94, n. 4, p. 716-724, 2016.

SCARLAT, N., DALLEMAND, J. F., MONFORTI-FERRARIO, F., NITA, V. The role of biomass and bioenergy in a future bioeconomy: Policies and facts. **Environmental Development**, v. 15, p. 3-34, 2015.

SCHMITZ, G. J. H., DE MAGALHÃES ANDRADE, J., VALLE, T. L., LABATE, C. A., DO NASCIMENTO, J. R. O. Comparative proteome analysis of the tuberous roots of six cassava (*Manihot esculenta*) varieties reveals proteins related to phenotypic traits. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 64, n. 16, p. 3293-3301, 2016.

SCHMIDT, N. S., SILVA, C. L.. Pesquisa e desenvolvimento na cadeia produtiva de frangos de corte no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 56, n. 3, p. 467-482, 2018.

SILVA, D. J., QUEIROZ, A. C. Food analysis: chemical and biological methods. **Viçosa: Federal University of Viçosa**, 2002.

SILVA, V. P., VAN DER WERF, H. M., SOARES, S. R., CORSON, M. S. Environmental impacts of French and Brazilian broiler chicken production scenarios: An LCA approach. **Journal of environmental management**, v. 133, p. 222-231, 2014.

SILVA, C. E. D. F., GOIS, G. N. S. B., ABUD, A. K. S., AMORIM, N. C. S., GIROTTO, F., MARKOU, G., AMORIM, E. L. Anaerobic Digestion: Biogas Production from Agro-industrial Wastewater, Food Waste, and Biomass. In: **Prospects of Renewable Bioprocessing in Future Energy Systems**. Springer, Cham, 2019. p. 431-470.

SGROI, F., FODERÀ, M., DI TRAPANI, AM, TUDISCA, S. E TESTA, R. Avaliação econômica do tamanho da planta de biogás utilizando cana gigante. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 403-409, 2015.

SHEETS, J. P., YANG, L., GE, X., WANG, Z., LI, Y. Beyond land application: Emerging technologies for the treatment and reuse of anaerobically digested agricultural and food waste. **Waste Management**, v. 44, p. 94-115, 2015.

SOUZA, A; CLEMENTE, A. **Decisões financeiras e análise de investimentos: fundamentos, técnicas e aplicações**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2004.

STANIŠKIS, J. K. Sustainable consumption and production: how to make it possible. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 14, n. 6, p. 1015-1022, 2012.

TUMUTEGYEREIZE, P., KETLOGETSWE, C., GANDURE, J., BANADDA, N. Effect of variation in co-digestion ratios of matooke, cassava and sweet potato peels on hydraulic retention time, methane yield and its kinetics. **Journal of Sustainable Bioenergy Systems**, v. 6, n. 04, p. 93, 2016.

USDA. United States Department of Agriculture. USDA Agricultural projections to 2028. Disponível em: <https://www.ers.usda.gov/publications/> . Acesso em: 03 jan. 2020.

VEIGA, J. P. S., VALLE, T. L., FELTRAN, J. C., BIZZO, W. A. Characterization and productivity of cassava waste and its use as an energy source. **Renewable energy**, v. 93, p. 691-699, 2016.

VOĆA N, KRICKA T, COSIC T, RUPIC V, JUKIC Z, KALAMBURA S. Digested residues as a fertilizer after the mesophilic process of anaerobic digestion. *Plant Soil Environ* 51:262–266. 2005.

WEBER, C. T., TRIERWEILER, L. F., CASAGRANDE, T., TRIERWEILER, J. O. Economic evaluation of sweet potato distilled beverage produced by alternative route. **International Journal of Development and Sustainability**. v. 7, n. 10, p. 1759-2062, 2018.

WEILAND, P. Produção de biogás: estado atual e perspectivas. *Appl Microbiol Biotechnol* 85, 849-860. 2010.

WRESTA, A., ANDRIANI, D., SAEPUDIN, A., SUDIBYO, H. Economic analysis of cow manure biogas as energy source for electricity power generation in small scale ranch. **Energy Procedia**, 68, 122-131.

XAVIER, C. A. N; LUCAS JUNIOR, J. Parâmetros de dimensionamento para biodigestores batelada operados com dejetos de vacas leiteiras com e sem uso de inóculo. **Eng. Agríc.** v. 30, n. 2, p. 212-223. 2010.

YANG, L., XU, F., GE, X., LI, Y. Challenges and strategies for solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 824-834, 2015.

YANG, Y., CHEN, Y., ZHANG, X., ONGLEY, E., ZHAO, L. Methodology for agricultural and rural NPS pollution in a typical county of the North China Plain. **Environmental pollution**, v. 168, p. 170-176, 2012.

YONG, H.; WANG, X.; SUN, J.; FANG, Y.; LIU, J.; JIN, C. Comparison of the structural characterization and physicochemical properties of starches from seven purple sweet potato varieties cultivated in China. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 120, p.1632-1638, 2018.

ZABED, H., SAHU, J. N., SUELY, A., BOYCE, A. N., FARUQ, G. Bioethanol production from renewable sources: Current perspectives and technological progress. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 71, p. 475-501, 2017.

ZHAO, X., BROWN, T. R., TYNER, W. E. Stochastic techno-economic evaluation of cellulosic biofuel pathways. **Bioresource technology**, v. 198, p. 755-763, 2015.

ZHANG, T., YANG, Y., LIU, L., HAN, Y., REN, G., YANG, G. Improved biogas production from chicken manure anaerobic digestion using cereal residues as co-substrates. **Energy & Fuels**, v. 28, n. 4, p. 2490-2495, 2014.

APÊNDICE A – Histogramas

Figura 8 – Histogramas com VPLs e TIRs dos cenários TCF, TBD e TM com 20.000 e 40.000 aves

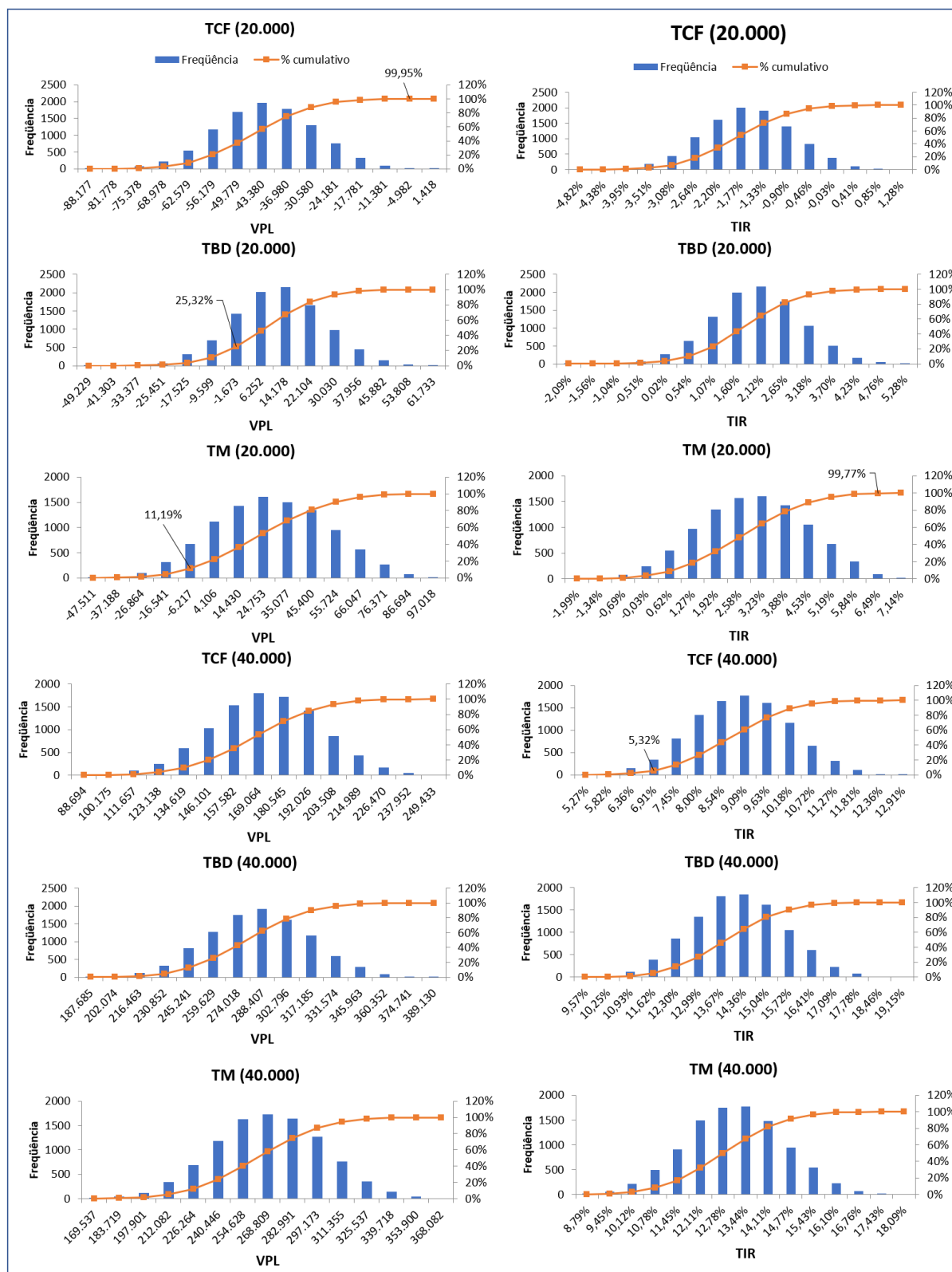


Figura 9 – Histogramas com VPLs e TIRs dos cenários TCF, TBD e TM com 60.000 e 80.000 aves

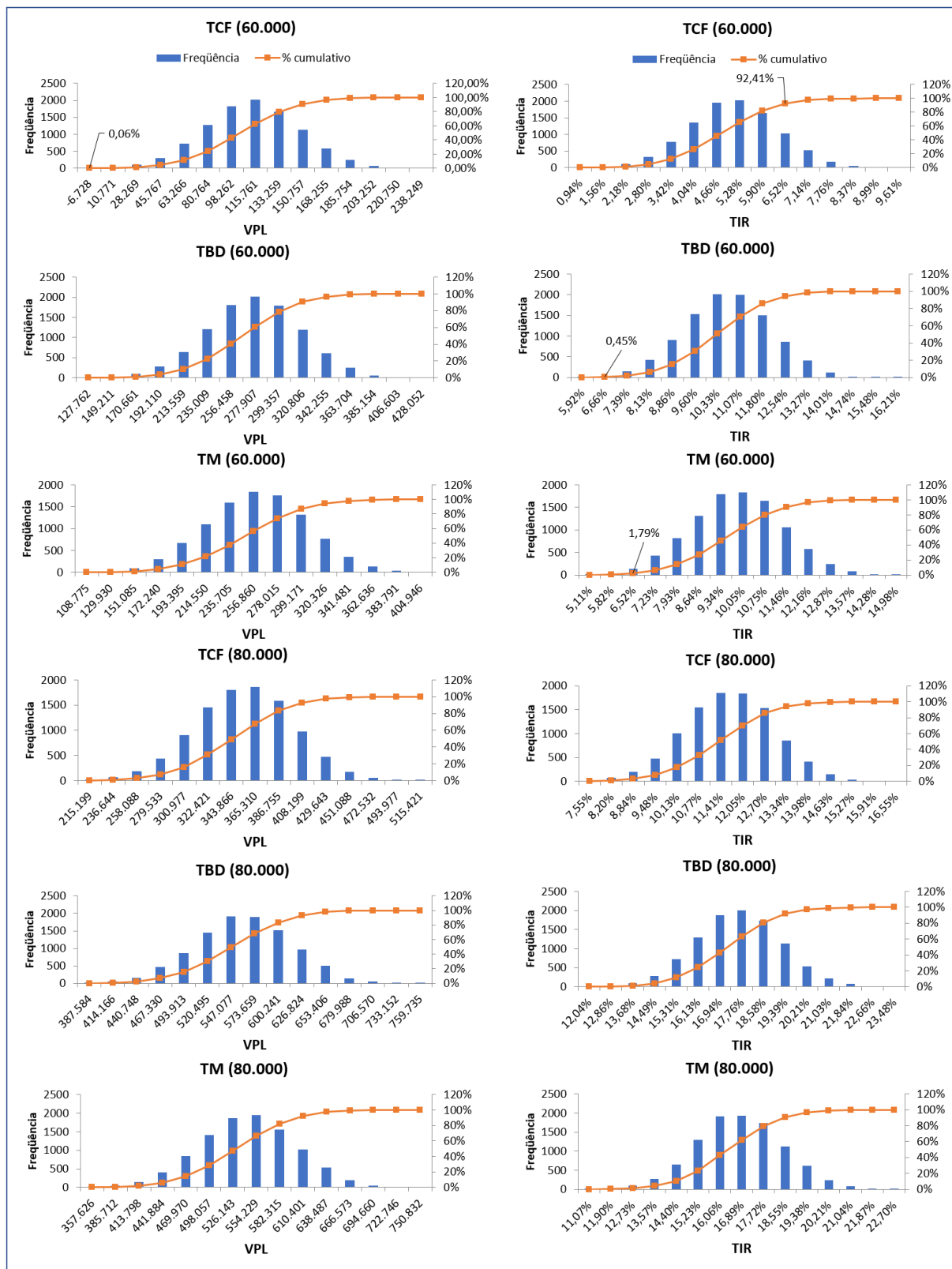


Figura 10 – Histogramas com VPLs e TIRs dos cenários TCF, TBD e TM com 100.000 e 120.000 aves

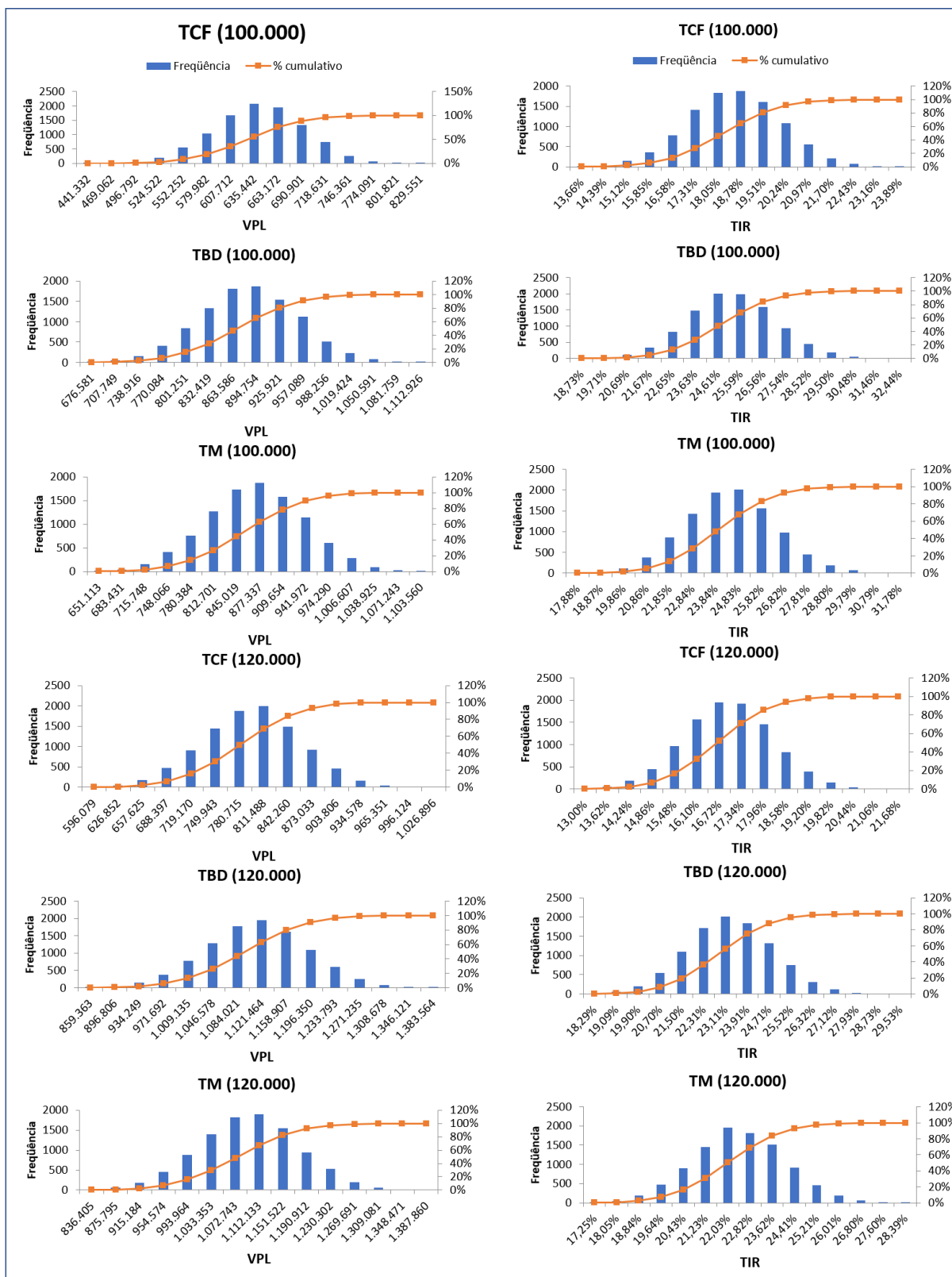


Figura 11 – Histogramas com VPLs e TIRs dos cenários TCF, TBD e TM com 140.000 e 160.000 aves

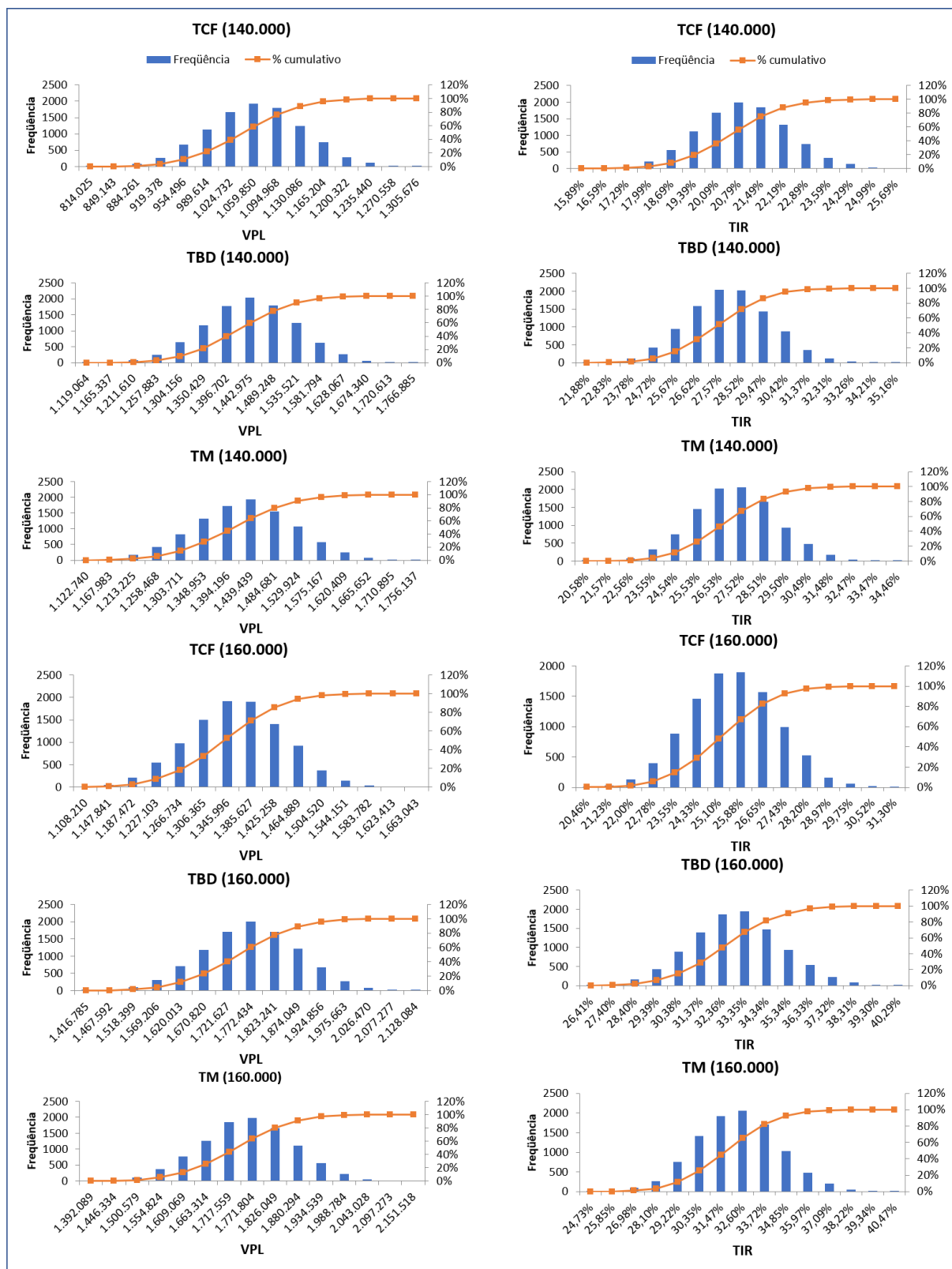


Figura12 – Histogramas com VPLs e TIRs dos cenários TCF, TBD e TM com 180.000 e 200.000 aves

