

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**AUGUSTO CESAR LAVIOLA DE OLIVEIRA**

**TÉCNICAS PARA AVALIAÇÃO E PROPOSIÇÃO DE SOLUÇÕES  
ENERGÉTICAS EM PEQUENAS ZONAS RURAIS**

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2021**

**AUGUSTO CESAR LAVIOLA DE OLIVEIRA**

**TÉCNICAS PARA AVALIAÇÃO E PROPOSIÇÃO DE SOLUÇÕES  
ENERGÉTICAS EM PEQUENAS ZONAS RURAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título *Magister Scientiae*.

Orientadora: Natália dos Santos Renato

Coorientadores: Isabela Miranda de Mendonça  
Marcio Arêdes Martins

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

O48t  
2021  
Oliveira, Augusto Cesar Laviola de, 1996-  
Técnicas para avaliação e proposição de soluções  
energéticas em pequenas zonas rurais / Augusto Cesar Laviola  
de Oliveira. – Viçosa, MG, 2021.  
127 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Natália dos Santos Renato.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 100-114.

1. Energia - Fontes alternativas. 2. Modelos matemáticos.  
3. Otimização matemática. 4. Desenvolvimento rural.  
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia  
Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.  
II. Título.

CDD 22. ed. 333.79

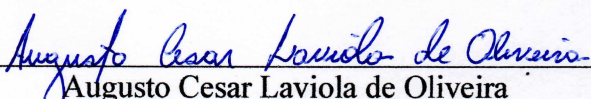
**AUGUSTO CESAR LAVIOLA DE OLIVEIRA**

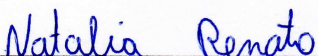
**TÉCNICAS PARA AVALIAÇÃO E PROPOSIÇÃO DE SOLUÇÕES  
ENERGÉTICAS EM PEQUENAS ZONAS RURAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título *Magister Scientiae*.

APROVADA: 25 de fevereiro de 2021.

Assentimento:

  
Augusto Cesar Laviola de Oliveira  
Autor

  
Natália dos Santos Renato  
Orientadora

*Aos meus pais, Marcelo José de Oliveira e Fabiane Laviola Ricardo Oliveira, pela infinita capacidade de amar, aos meus irmãos, Victor Hugo e Gustavo Henrique pelo companheirismo e confiança e à Isabela por todo o amor, carinho e paciência.*

## **DEDICO**

*Aos meus avós, familiares e amigos, por todos os conselhos, por sempre acreditarem e apoiarem meus sonhos e por me ajudarem a torná-los possíveis.*

## **OFEREÇO**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, que se mostrou criador, que foi criativo. Seu fôlego de vida em mim me foi sustento e me deu coragem para questionar realidades e propor sempre um novo mundo de possibilidades.

Aos meus pais, que me serviram como guia e apoio para todas as minhas decisões e realizações nessa jornada, e que a todo tempo não mediram esforços para que tudo isso fosse possível.

À Isabela Caroline Pereira Leite, pela confiança, amor, paciência e incentivo, por acreditar junto comigo que tudo daria certo na concepção dos modelos e testes realizados nesta dissertação.

À Professora Natália dos Santos Renato, pela confiança, incentivo e orientação que permitiram a conclusão deste trabalho, e pelos ensinamentos e conselhos que serão levados por toda vida.

À Professora Isabela Miranda de Mendonça e ao Professor Marcio Arêdes Martins, pela coorientação, pelas valiosas críticas, sugestões e conselhos.

Ao Professor e amigo Michael de Oliveira Resende, pelo companheirismo e incentivo durante os dois anos de mestrado.

Aos estudantes de pós-graduação da área de energia, pela parceria em demais trabalhos acadêmicos e convivência no dia a dia de estudos.

Aos amigos do Laboratório de Biocombustíveis, pela troca de conhecimento e apoio constantes.

À Prefeitura Municipal de São Francisco do Glória - MG, pelo apoio na coleta de dados, em especial ao Secretário de Agricultura e Vice-prefeito Inácio Ricardo.

A todos que de alguma forma fizeram com que esse momento se realizasse, seja com conselhos, sugestões, incentivo, apoio ou confiança.

À Universidade Federal de Viçosa, em especial ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## **BIOGRAFIA**

AUGUSTO CESAR LAVIOLA DE OLIVEIRA, filho de Marcelo José de Oliveira e Fabiane Laviola Ricardo Oliveira, nasceu em Miradouro, Minas Gerais, Brasil, em 11 de novembro de 1996.

Em agosto de 2014, iniciou o curso de Engenharia Mecatrônica no Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais (IF Sudeste MG), graduando-se em dezembro de 2018. No período de março de 2015 a julho 2016, foi monitor de Geometria Analítica e Cálculo III. Entre agosto de 2016 e julho de 2018, foi bolsista de iniciação científica nas áreas de Modelagem Computacional nos Estudo de Biomecânica Articular e Planejamento Estático de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica.

Em março de 2019, ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de Mestrado em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, na área de Energia na Agricultura, submetendo-se à defesa da dissertação, requisito indispensável para a obtenção do título de *Magister Scientiae*, em fevereiro de 2021.

## RESUMO

OLIVEIRA, Augusto Cesar Laviola de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2021. **Técnicas para avaliação e proposição de soluções energéticas para pequenas zonas rurais.** Orientadora: Natália dos Santos Renato. Coorientadores: Isabela Miranda de Mendonça e Marcio Arêdes Martins.

O uso de recursos não renováveis emitem grande quantidade de CO<sub>2</sub> no meio ambiente. Assim, a inserção de componentes renováveis nas matrizes energéticas e elétricas dos países é uma alternativa interessante para solucionar crises energéticas e problemas ambientais. Ambiciosos cenários de descarbonização requerem a implantação em larga escala de sistemas que utilizam biomassa, energia solar fotovoltaica e eólica. Nesta pesquisa de mestrado foram propostas duas etapas, cada uma delas com uma metodologia para avaliação e proposição de soluções energéticas em pequenas e médias propriedades rurais de um município típico da Zona da Mata do estado de Minas Gerais, Brasil. Na primeira etapa, o objetivo do estudo foi a elaboração de modelagens matemáticas capazes de estimar e otimizar a alocação do potencial energético proveniente de dejetos animais e esgoto doméstico. Para isso, fatores de conversão foram revisados, algoritmos determinísticos foram desenvolvidos e modelos não lineares foram ajustados. Os resultados indicaram um potencial total de 1,913 GWh ano<sup>-1</sup>, sendo 99,533% provenientes de esterco animal e o restante referente ao esgoto. Em média, as propriedades possuíam potencial de 17.236,20 ± 55.137,63 kWh ano<sup>-1</sup> e aquelas que não apresentavam potencial mínimo para implementação de projetos economicamente viáveis foram alocadas às usinas. O potencial médio por micro usina alocada variou entre 36.792 e 54.663 kWh ano<sup>-1</sup> devido às 16 combinações entre modelos matemáticos e casos de análise financeira. Um modelo foi ajustado capaz de prever 92,4% da variação do potencial de geração em função do consumo de eletricidade anual e do lucro da produção agropecuária da propriedade. Verificou-se por análise de variância que a perspectiva de investimento em energia renovável de um produtor rural depende do conhecimento que ele possui sobre o assunto e do consumo de energia em sua propriedade. O potencial de geração de eletricidade no município atenderia à demanda e injetaria um excedente médio na rede de 7.577 kWh ano<sup>-1</sup> por propriedade. Na segunda etapa, o sistema de geração a biomassa foi comparado aos sistemas de geração fotovoltaicos e eólicos e uma ferramenta de tomada de decisão baseada em indicadores que caracterizam as propriedades nos âmbitos financeiros, ambientais, sociais e físicos foi implementada a fim de selecionar a fonte alternativa mais viável. Os sistemas a biomassa, solar e eólico tiveram percentuais

de seleção iguais a 62,16, 15,32 e 22,52%, respectivamente. Com informações sobre o perfil agro econômico das propriedades rurais e sobre a fonte alternativa mais adequada, uma rede neural artificial foi treinada para otimizar o processo de seleção. Uma acurácia média máxima de  $81,80 \pm 3,36\%$  foi obtida para uma rede com quatro entradas, composta por 50 neurônios e treinada com 70% do conjunto de dados. Com a implementação de todos os sistemas de geração propostos, seriam gerados  $1,975 \text{ GWh ano}^{-1}$  e 435,23 toneladas de  $\text{CO}_2$  deixariam de ser emitidas por ano. Devido ao excesso de produção, um crédito de  $\text{CO}_2$  de 366,62 toneladas por ano seria injetado na rede. Contudo, os cenários de geração propostos tornar-se-ão realidade quando as políticas de diversificação da geração distribuída forem implementadas no Brasil.

Palavras-chave: Energia - Fontes alternativas. Modelos matemáticos. Otimização matemática. Desenvolvimento rural.

## ABSTRACT

OLIVEIRA, Augusto Cesar Laviola de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2021. **Techniques for assessing and proposing energy solutions in small rural areas.** Adviser: Natália dos Santos Renato. Co-advisers: Isabela Miranda de Mendonça and Marcio Arêdes Martins.

The use of non-renewable resources emits a large amount of CO<sub>2</sub> into the environment. Thus, the usage of renewable components in the countries' energy and electrical matrices is seen as an interesting alternative to solve energy crises and environmental problems. Ambitious decarbonization scenarios require a large-scale deployment of systems that use biomass, solar photovoltaic and wind energy. In this master's research, two stages were proposed, each with a methodology for evaluating and proposing energy solutions in small and medium-sized rural properties in a typical municipality in Zona da Mata in the state of Minas Gerais, Brazil. In the first stage, the goal of the study was to develop mathematical models capable of estimating and optimizing the allocation of energy potential from animal waste and domestic sewage. For this, conversion factors were revised, deterministic algorithms have been developed and non-linear models were adjusted. The results indicated a total potential of 1,913 GWh year<sup>-1</sup>, with 99.533% coming from animal manure and the remainder from sewage. On average, the properties had a potential of 17,236.20 ± 55,137.63 kWh year<sup>-1</sup> and those that did not have a minimum potential for the implementation of economically feasible projects were allocated to the plants. The average potential per micro plant allocated varied between 36,792 and 54,663 kWh year<sup>-1</sup> due to the 16 combinations between mathematical models and cases of financial analysis. An adjusted model was able to predict 92.4% of the variation in the generation potential due to the annual electricity consumption and the profit from the farm's agricultural production. It was verified by variance analysis that the perspective of investment in renewable energy of a rural producer depends on how much is him aware towards the energy consumption on his property. The electricity generation potential in the municipality would meet demand and inject an average surplus into the network of 7,577 kWh year<sup>-1</sup> per property. In the second stage, the biomass generation system was compared to the photovoltaic and wind generation systems and a decision-making tool based on indicators that characterize the properties in the financial, environmental, social and physical fields was implemented in order to select the source more feasible alternative. The biomass, solar and wind systems had percentages of selection equal to 62.16, 15.32 and 22.52%, respectively. Considering information on the agro-economic

profile of rural properties and on the most suitable alternative source, an artificial neural network has been trained for optimizing the selection process. A maximum mean accuracy of  $81.80 \pm 3.36\%$  was obtained for a network containing four inputs, built of 50 neurons and trained considering 70% of the data set. After the implementation of all the proposed generation systems,  $1,975 \text{ GWh year}^{-1}$  would be generated and 435.23 tons of  $\text{CO}_2$  would no longer be emitted per year. Due to overproduction, a  $\text{CO}_2$  credit of 366.62 tons per year would be injected into the network. However, the proposed generation scenarios will become a reality when the diversification policies of distributed generation be implemented in Brazil.

Keywords: Energy - Alternative sources. Mathematical models. Mathematical optimization. Rural development.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Expansão da Eletricidade Brasileira 2020-2029.....	32
Figura 2 - Fluxograma para dimensionamento interativo de biodigestores. ....	38
Figura 3 - Fluxograma do processo de alocação de micro usinas. ....	43
Figura 4 - Potencial energético do município e análise da distribuição nas fazendas.....	46
Figura 5 - Disposição dos dados de potencial de energia pelo PBS para os quatro casos de simulação (a) CS1, (b) CS2, (c) CS3 e (d) CS4. ....	49
Figura 6 - Distribuição geográfica das micro usinas para os modelos adotados (Eq. 22 a 25). .....	53
Figura 7 - Distribuição geográfica das micro usinas para os casos de simulação (CS1 a CS4). .....	53
Figura 8 - Irradiação direta e irradiação difusa.....	62
Figura 9 - Curvas de geração para geradores eólicos. ....	71
Figura 10 - Estrutura básica de uma rede neural artificial.....	77
Figura 11 - Validação cruzada para CS1 com função de ativação ReLU (a) e Tanh (b). ...	87
Figura 12 - Validação cruzada para CS2 com função de ativação ReLU (a) e Tanh (b). ...	88
Figura 13 - Validação cruzada para CS3 com função de ativação ReLU (a) e Tanh (b). ...	90
Figura 14 - Validação cruzada para CS4 com função de ativação ReLU (a) e Tanh (b). ...	90
Figura 15 - Desempenho do teste aleatório para a melhor configuração de rede.....	91
Figura 16 - Resumo gráfico do capítulo 2. ....	125
Figura 17 - Resumo gráfico do capítulo 3. ....	126
Figura 18 - Exemplo ilustrativo de corte transversal de um biodigestor.....	127

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores de conversão de energia para esterco animal.....	35
Tabela 2 - Modelo para estimativa do volume de esgoto para a região sudeste.....	36
Tabela 3 - Orçamento estratificado para um projeto de biodigestor do tipo lagoa coberta.	39
Tabela 4 - Dados de potência e custo para geradores de biogás.....	40
Tabela 5 - Análise de variância para um delineamento completamente causalizado.....	44
Tabela 6 - Parâmetros estimados do biodigestor para fazendas de pequeno e médio porte.	47
Tabela 7 - Dados de alocação de geradores em sistemas de geração de energia a biogás. .	47
Tabela 8 - Dados de análise financeira de sistemas de geração para casos de simulação...	48
Tabela 9 - Constantes de ajuste e análises estatísticas para o caso de simulação 1 (CS1)..	49
Tabela 10 - Constantes de ajuste e análises estatísticas para o caso de simulação 2 (CS2).	50
Tabela 11 - Constantes de ajuste e análises estatísticas para o caso de simulação 3 (CS3).	50
Tabela 12 - Constantes de ajuste e análises estatísticas para o caso de simulação 4 (CS4).	50
Tabela 13 - Potenciais energéticos mínimos para viabilizar os sistemas de geração de biogás. .....	51
Tabela 14 - Potencial médio de usinas de biogás para cada combinação.....	51
Tabela 15 - Número de plantas alocadas para cada combinação. ....	52
Tabela 16 - Número médio de fazendas implantadas em cada usina de biogás.....	52
Tabela 17 - Dados do modelo para previsão do potencial de energia. ....	54
Tabela 18 - Dados da análise de variância para CS-A. ....	55
Tabela 19 - Dados da análise de variância para CS-B.....	55
Tabela 20 - Dados de geração e carga para o Subsistema Sudeste/Centro-Oeste em 2019.	56
Tabela 21 - Fatores de conversão de energia para esterco animal.....	65
Tabela 22 - Dados de potência e custo para geradores a biogás.....	66
Tabela 23 - Estações de medição de irradiação solar em kWh m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> .....	67
Tabela 24 - Dados de potência de pico e custo para inversores fotovoltaicos. ....	68
Tabela 25 - Dados de potência e custo para geradores eólicos. ....	70
Tabela 26 - Escala de Phrase completion. ....	76
Tabela 27 - Pesos atribuídos às variáveis avaliadas. ....	76
Tabela 28 - Matriz de confusão para previsão de três sistemas alternativos. ....	79
Tabela 29 - Valores médios de volume de esterco, volume de metano e potencial energético. .....	80
Tabela 30 - Dados técnicos médios para sistemas de geração a biomassa.....	81

Tabela 31 - Irradiação solar média na área rural do município de estudo.....	82
Tabela 32 - Dados de alocação de inversores em sistemas de geração fotovoltaicos. ....	82
Tabela 33 - Dados eólicos médios a 50 metros de altura na área rural do município de estudo. .....	83
Tabela 34 - Dados sobre cenários de ocorrência de ventos na área rural do município.....	83
Tabela 35 - Dados de potência média, geração média e seleção de geradores eólicos. ....	84
Tabela 36 - Valores médios das variáveis por sistemas de geração avaliados. ....	85
Tabela 37 - Dados médios do índice de seleção de sistemas.....	85
Tabela 38 - Porcentagem de seleção para cada tipo de sistema. ....	86
Tabela 39 - Acurária da rede neural para CS1.....	87
Tabela 40 - Acurária da rede neural para CS2.....	88
Tabela 41 - Dados do modelo ajustados para as variáveis de entrada e saída da rede neural. .....	89
Tabela 42 - Acurária da rede neural para CS3.....	89
Tabela 43 - Matriz de confusão completa para teste da melhor configuração da rede.....	91
Tabela 44 - Número de empreendimentos de geração distribuída, por tipo de combustível e classe de fornecimento.....	92
Tabela 45 - Banco de dados coletados nas propriedades rurais do município de São Francisco do Glória.....	115
Tabela 46 – Limpeza inicial (\$ m <sup>-2</sup> ). ....	122
Tabela 47 - Escavação do terreno (\$ m <sup>-3</sup> ).....	122
Tabela 48 - Alvenaria (\$ m <sup>-2</sup> ). ....	122
Tabela 49 - Revestimento (\$ m <sup>-2</sup> ).....	123
Tabela 50 - Pavimentação (\$ m <sup>-2</sup> ).....	123
Tabela 51 - Instalação de membrana (\$ m <sup>-2</sup> ). ....	123
Tabela 52 - Instalação de tubulação de PVC (\$ m <sup>-1</sup> ).....	124
Tabela 53 - Tubulação de biogás (\$ m <sup>-1</sup> ).....	124
Tabela 54 - Limpeza final (\$ m <sup>-2</sup> ).....	124

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\overline{R^2}$  é o coeficiente de correlação ajustado;

$A_{esterco}$  é o fator de disponibilidade de esterco animal fresco (%);

$A_f$  é a área transversal da fossa (m<sup>2</sup>);

$A_g$  é a área da seção transversal da campânula (m<sup>2</sup>);

$A_{se}$  é a área útil necessária para instalação de um sistema eólico (m<sup>2</sup>);

$A_t$  é a área transversal total (m<sup>2</sup>);

$B_f$  é o balanço financeiro da propriedade rural (\$ ano<sup>-1</sup>);

$C_e$  é o consumo de eletricidade anual da propriedade rural (kWh ano<sup>-1</sup>);

$DBO_5$  é a taxa de geração média de DBO (ton<sub>DBO5</sub> m<sup>-3</sup>);

$D_{max}$  é a distância máxima entre a fazenda e o ponto ótimo de instalação;

$FC_t$  é o fluxo de caixa no ano  $t$  (\$);

$GM_{esgoto}$  é a quantidade de metano gerada anualmente pelo esgoto (ton<sub>CH4</sub> ano<sup>-1</sup>);

$GM_{esterco}$  é a quantidade de metano gerado (m<sub>CH4</sub><sup>3</sup> ano<sup>-1</sup>);

$G_{esterco}$  é a produção diária de esterco de um determinado animal (kg<sub>esterco</sub> d<sup>-1</sup>);

$I_{SS}$  é o índice de seleção do sistema;

$I_U$  é o vetor de dados correspondente a entrada  $U$  da rede neural artificial;

$M_{esterco}$  é a massa diária de esterco (kg d<sup>-1</sup>);

$N_a$  é o número de amostras utilizadas na rede neural artificial;

$P_{animal}$  é o número de animais;

$P_{esterco}$  é o potencial energético estimado para o esterco (kWh ano<sup>-1</sup>);

$P_{esgoto}$  é o potencial energético estimado para o esgoto (kWh ano<sup>-1</sup>);

$P_{inst}$  é a potência de instalação calculada para o sistema fotovoltaico (kWp);

$P_{mg}$  é a potência do moto gerador (kVA);

$P_{min}$  é o potencial mínimo para viabilização de sistemas a biomassa (kWh ano<sup>-1</sup>);

$P_{mod}$  é a potência do módulo fotovoltaico utilizado no dimensionamento (kWp);

$P_{op}$  é a potência de operação do sistema (W ou kW);

$P_{pico}$  é a potência de pico do sistema fotovoltaico (kWp);

$P_r$  é o perímetro transversal total (m);

$SS_{res}$  é a soma de quadrados do resíduo;

$SS_{total}$  é a soma de quadrados total;

$SS_{trat}$  é a soma de quadrados do tratamento;

$S^m$  são as dimensões de cada camada da rede;

$T_i$  é a soma dos investimentos no tratamento  $i$ ;

$V_{dim}$  é a velocidade de dimensionamento do sistema eólico ( $m\ s^{-1}$ );

$V_{esgoto}$  é o volume diário de esgoto ( $m^3\ d^{-1}$ );

$V_f$  é o valor da sucata em \$;

$V_f$  é o volume da fossa ( $m^3$ );

$V_g$  é o volume de biogás ( $Nm^3$ );

$V_i$  é o preço de compra do equipamento (\$);

$V_t$  é o volume total do biodigestor ( $m^3$ );

$V_w$  é o volume diário de resíduos ( $m^3\ d^{-1}$ );

$Y_{metano}$  é a produção de metano por meio do esterco animal fresco ( $Nm_{CH_4}^3\ kg_{esterco}^{-1}$ );

$d_{ge}$  é o diâmetro das pás dos geradores eólicos (m);

$n_{ge}$  é a quantidade de geradores eólicos;

$n_{mod}$  é a quantidade de módulos do sistema fotovoltaico;

$r_i$  é o número de repetições do tratamento  $i$ ;

$t_{op}$  é o tempo de uso diário do gerador a gás;

$w_l$  é o peso da variável  $l$  da tomada de decisão;

$x_l$  é o valor da variável  $l$  da tomada de decisão;

$z_r$  é a altitude de referência (m);

$\beta_i$  são constantes de ajuste de modelagens matemáticas;

$\eta_1$  é o valor de eficiência de conversão do grupo motor gerador;

$\eta_2$  é a eficiência do reator anaeróbio;

$\eta_{sfv}$  é o rendimento do sistema fotovoltaico;

$\rho_{esterco}$  é a massa específica do esterco ( $kg\ m^{-3}$ );

$h$  é a profundidade da fossa (m);

$A$  é a porcentagem do perímetro transversal destinado ao arco;

$BGEE$  é o benefício com a geração de eletricidade ( $\$ \text{ano}^{-1}$ );

$C$  é a circunferência da bolsa plástica (m)

$C$  é a correção;

$CEE$  é o consumo anual de eletricidade (kWh);

$CM$  é o consumo mínimo de energia elétrica cobrado pela concessionária;

$D$  é a massa específica do metano ( $\text{kg m}^{-3}$ );

$DFOP$  é o vetor de distância das fazendas até o ponto ótimo;

$F$  é o vetor que controla a alocação das fazendas;

$GC$  é o percentual de geração em relação consumo;

$GD$  é a matriz com os dados geográficos das propriedades rurais;

$I$  é o número de tratamentos;

$IM$  é a irradiação média do local de instalação ( $\text{kWh m}^{-2} \text{d}^{-1}$ );

$J$  é a entropia cruzada;

$L$  é o comprimento do biodigestor (m);

$M$  é o número de camadas da rede neural artificial;

$N$  é o número de habitantes que vivem na propriedade estudada (hab.);

$NMEF$  é o fator de emissão de metano ( $\text{ton. CH}_4 \text{ ton. DBO}_5^{-1}$ );

$OP$  é a variável para cálculo iterativo do ponto ótimo de instalação das usinas;

$P$  é o potencial de geração de energia estimado ( $\text{kWh ano}^{-1}$ );

$P$  é o vetor potencial de geração das fazendas;

$PBS$  é o *payback* simples;

$PCI$  é o poder calorífico inferior do  $\text{CH}_4$  ( $\text{kcal kg}^{-1}$ );

$PEE$  é a eletricidade produzida ( $\text{kWh ano}^{-1}$ );

$PIB$  é o PIB per capita ( $\text{\$ hab}^{-1}$ );

$POP$  é a população (hab.);

$PP$  é o vetor que armazena os potenciais das usinas alocadas ( $\text{kWh ano}^{-1}$ );

$PPOP$  é o vetor que armazena o ponto de instalação das usinas alocadas;

$PPOP$  é o vetor que armazena o ponto de instalação das usinas alocadas;

$R$  é a quantidade de metano recuperada;

$RMSE$  é a raiz do erro padrão da média;

$TDH$  é o tempo de detenção hidráulica (dias);

$TEE$  é a tarifa de eletricidade ( $\text{\$ ano}^{-1}$ );

$TGE$  é a taxa de geração de esgoto ( $\text{m}^3 \text{d}^{-1} \text{hab}^{-1}$ );

$TP$  é a variável de incrementação do potencial energético ( $\text{kWh ano}^{-1}$ );

$V$  é a velocidade do vento ( $\text{m s}^{-1}$ );  $k$  é o fator de forma (adimensional);

$V(z_r)$  é a velocidade na altura de referência  $z_r$  ( $\text{m s}^{-1}$ );

$V(z)$  é a velocidade na altura  $z$  ( $\text{m s}^{-1}$ );

$VPL$  é o valor presente líquido;

$a$  é menor largura da fossa (m),  $b$  é maior largura da fossa (m);

$c$  é o fator de escala ( $m s^{-1}$ );

$f(V)$  é a probabilidade de ocorrer uma determinada velocidade do vento  $V$ ;

$fp$  é o fator de potência;

$i$  é o índice de representação das unidades agrícolas;

$j$  é a taxa de juros anual ou custo de oportunidade;

$k$  é o número de amostras da análise de variância;

$n$  a vida útil dos sistemas de geração (anos);

$np$  é o número de propriedades rurais;

$p$  é a proporção de fase gasosa desejada ( $p \leq 0,4$ );

$r$  é o raio da bolsa plástica (m);

$t$  é o ano correspondente ao fluxo de caixa;

$x$  é a perspectiva de investir em energia renovável (\$);

$y$  são as saídas da rede neural artificial;

$z$  é a altitude (m);

$\varepsilon$  é a rugosidade média do terreno;

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	19
1.1	Revisão bibliográfica	20
1.2	Objetivos e motivações	29
1.3	Contribuições do trabalho	30
1.4	Estrutura do trabalho	30
<b>2</b>	<b>MODELAGEM PARA ESTIMATIVA E OTIMIZAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE ESTERCO ANIMAL E ESGOTO DOMÉSTICO EM FAZENDAS DE PEQUENO E MÉDIO PORTE</b>	31
2.1	Introdução	31
2.2	Material e métodos	34
2.2.1	Coleta de dados e pré-processamento	34
2.2.2	Metodologia proposta para estimativa do potencial energético	34
2.2.3	Dimensionamento e orçamentação de sistemas de geração à biomassa	37
2.2.4	Modelagem financeira dos sistemas de geração de energia à biomassa	40
2.2.5	Otimização do uso de resíduos para alocação de micro usinas de biogás	41
2.2.6	Modelagem do potencial energético	44
2.3	Resultados	45
2.3.1	Potencial energético	45
2.3.2	Sistema de geração de energia a biogás	46
2.3.3	Análise financeira e modelagem matemática	47
2.3.4	Alocação de micro usinas de biogás	51
2.3.5	Modelo de potencial de energia e análise de perspectiva de investimento	54
2.4	Discussão	55
2.5	Conclusão	58
<b>3</b>	<b>SOLUÇÕES ENERGÉTICAS RENOVÁVEIS BASEADAS EM INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA PRODUTORES RURAIS: ANÁLISE E PROPOSIÇÃO</b>	60
3.1	Introdução	60
3.2	Material e métodos	63
3.2.1	Coleta de dados	63
3.2.2	Sistemas de geração a biomassa	64
3.2.3	Sistemas de geração fotovoltaicos	67
3.2.4	Sistemas de geração eólicos	69

3.2.5 Ferramenta de tomada de decisão .....	71
3.2.5.1 Indicador financeiro .....	71
3.2.5.2 Indicador ambiental .....	72
3.2.5.3 Indicador social.....	73
3.2.5.4 Indicador físico .....	75
3.2.5.5 Índice de seleção de sistema .....	75
3.2.6 Redes neurais artificiais.....	77
3.3 Resultados.....	79
3.3.1 Sistemas de geração a biomassa .....	79
3.3.2 Sistemas de geração fotovoltaicos .....	81
3.3.4 Resultados da tomada de decisão.....	85
3.3.5 Desempenho da rede neural artificial.....	86
3.3.5.1 Caso de simulação 1 (CS1).....	86
3.3.5.2 Caso de simulação 2 (CS2).....	87
3.3.5.3 Caso de simulação 3 (CS3).....	88
3.3.5.4 Caso de simulação 4 (CS4).....	90
3.3.5.5 Melhor configuração da rede.....	91
3.4 Discussão .....	92
3.5 Conclusão.....	96
4 CONCLUSÃO .....	98
4.1 Conclusões Finais .....	98
4.2 Trabalhos futuros.....	99
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	100
APÊNDICE A .....	115
APÊNDICE B.....	122
APÊNDICE C .....	125

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda pela substituição de fontes de combustíveis fósseis para a geração de energia é uma das principais questões de agendas internacionais de políticas públicas (ABDOLI; PAMULAPATI; KARA, 2020). Nesse contexto, vem sendo observado, cada vez mais, preocupação, por parte de diversos estados, com o fornecimento de energia, com a poluição ambiental e com a redução da emissão de gases responsáveis pelo aquecimento global (BILGILI et al., 2017). O consumo de energia mundial é crescente tanto pelo uso mais intensivo das indústrias, como pelo aumento da renda per capita da população, sendo o petróleo e derivados as principais fontes (IEA, 2015). Somente em 2016, 159,668 PWh foram consumidos no mundo, dos quais 81,6 % são oriundos de fontes fósseis (MME, 2017).

O Brasil vem enfrentando uma crise energética proveniente da escassez de investimentos no setor e do aumento gradativo do consumo de energia elétrica. Dessa forma, o Governo Federal vem aplicando medidas que resultam na racionalização do uso e redução do consumo, sob pena de cortes no fornecimento de energia e multas. Uma das principais causas desse problema é a dependência do país com relação às usinas hidrelétricas, sendo essas responsáveis pela produção de 60,9% da energia elétrica consumida no território nacional (ANEEL, 2019), e pelo fato desse tipo de fonte ser influenciado diretamente por transformações ambientais (REIS; REIS, 2017).

Dessa forma, o investimento em fontes alternativas de energia, que sejam renováveis, deve ser o primeiro passo. O intuito disso é promover a diversificação da matriz elétrica brasileira e aproveitar as grandes dimensões territoriais, condições físicas e climáticas existentes ao longo dela. Contudo, para que isso aconteça em grande escala, tecnologias que proporcionem viabilidade para pequenos, médios e grandes produtores devem ser inseridas no mercado, a fim de que todos possam usufruir do potencial energético e contribuir para o desenvolvimento sustentável (OLIVEIRA; RESENDE; RENATO, 2019).

Para compreender o desenvolvimento do setor de energias renováveis ao longo dos anos, uma revisão bibliográfica de 1997 a 2020 foi realizada, conforme seção 1.1. As informações foram dispostas em ordem cronológica. Em um primeiro momento, trabalhos que enfatizam a preocupação de organizações mundiais com as emissões de poluentes foram analisados. A partir daí, apresentaram-se tecnologias de conversão, modelagens para previsões e cenários de geração em diversos países. Durante todo o processo histórico, é

possível constatar a elaboração e reformulação de políticas públicas com o intuito de facilitar e de subsidiar investimentos nessa área.

### **1.1 Revisão bibliográfica**

Em 1997, já existia uma consciência crescente entre todos os países, independentemente do desenvolvimento econômico e industrial, de que o meio ambiente deveria ser protegido. Isso foi especialmente importante no setor de energia, uma vez que as fontes de energia primária eram os combustíveis fósseis, principais agentes causadores dos problemas ambientais globais, como o efeito estufa, destruição da camada de ozônio, chuvas ácidas e poluição em geral. Dessa forma, países com elevados estágios de industrialização, começaram a liderar o caminho em medidas de proteção ambiental, e a Espanha, país membro da União Europeia, deu início a um planejamento para reduzir os poluentes produzidos pelas fontes de energia sem prejudicar o desenvolvimento econômico do país (CONTRERAS; YIGIT; VEZIROĞLU, 1997).

Nessa época, avanços para uma política energética sustentável com foco na proteção ambiental, gestão de recursos naturais e segurança energética começaram a ser implementados em muitos países. Logo, surgiram oportunidades para o desenvolvimento de empresas de serviços de energia e de um mercado para eletricidade “verde”. Regulamentação, mudanças de arranjos institucionais e econômicos, assim como liberalização do mercado de energia, foram os fatores potenciais para ocorrência desse cenário (STANFORD, 1997). Na região das Ilhas do Pacífico, uma estrutura foi proposta para formulação de políticas energéticas com base no planejamento e gestão de energia. A estrutura possuía seis componentes principais: (i) projeção da demanda de energia; (ii) análise de recursos e tecnologias energéticas; (iii) análise de políticas e legislação; (iv) análise financeira; (v) avaliação dos efeitos socioeconômicos e culturais; e (vi) avaliação de questões ambientais (YU; TAPLIN; AKURA, 1997).

Um importante compromisso selado na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima em 1992 foi o de conduzir análises de impacto ambiental, além de estabelecer medidas e políticas de mudanças climáticas. Um estudo realizado para o Cazaquistão indicou que a redução na emissão de CO<sub>2</sub> e de outros gases de efeito estufa pode ser um subproduto de medidas destinadas a aumentar a eficiência energética. Para isso, estratégias de mitigação foram conectadas com a estratégia geral nacional de desenvolvimento do setor de energia nesse país (PILIFOSOVA et al., 1997). Nessa mesma

perspectiva, cenários macroeconômicos e de demanda de energia final foram desenvolvidos na Bulgária, por um programa de estudos dos EUA. O procedimento consistiu em cinco etapas até a obtenção da estimativa do potencial e de uma política de eficiência energética setorial e geral (TZVETANOV; RUCHEVA; DENISIEV, 1997).

Um panorama energético interessante de ser avaliado, representativo na década de 90, pode ser exemplificado por meio dos dados de demanda para a Indonésia. Houve um aumento entre os anos de 1990 e 1995 do consumo de energia comercial de 557,41 TWh para 812,32 TWh, e as emissões de CO<sub>2</sub> do setor de energia aumentaram de 150 para mais de 200 milhões de toneladas no país. O crescimento econômico de 7 a 8% previa a necessidade de fornecimento de energia primária para o ano de 2020 em 5.153,06 TWh, isto é, um aumento de 5,9% ao ano. Com base nessa quantidade de energia já se estimava uma emissão de 1,264 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub> em 2020 (CAHYONO ADI et al., 1997). No entanto, dificuldades em medir a eficácia das políticas destinadas a encorajar o cumprimento dos acordos internacionais de restrição de carbono eram recorrentes (GOLOVE; SCHIPPER, 1997).

Na China, de 1996 a 2000, a produção de energia proveniente de recursos não renováveis caiu 17%, enquanto o uso de energia primária foi reduzido em 4%, impulsionado quase inteiramente pelo declínio da produção das minas de carvão e do uso direto. Como a China era, nesse período, o segundo maior emissor mundial de gases de efeito estufa, essa aparente transformação foi avaliada a fim de verificar se de fato havia ocorrido uma mudança permanente nos padrões de uso de energia. Foi constatado um aumento na geração de energia elétrica e uma queda acentuada nos usos finais em função de diversos fatores, como reestruturação industrial, reformas mais amplas no sistema econômico, políticas ambientais e de eficiência energética (SINTON; FRIDLEY, 2000).

Enquanto isso, a demanda de energia aumentou constantemente na Índia, sendo necessário o atendimento por fontes comerciais e renováveis. Devido à indisponibilidade desses recursos e da quantidade considerável de poluentes emitidos pela energia comercial, propostas de expansão da energia renovável começaram a ser pensadas. Um modelo de otimização foi desenvolvido para determinar a alocação ótima de energia renovável para vários usos finais em 2020-2021. Análises indicaram um aumento de 3% na aceitação social dos recursos biológicos para geração de energia e uma redução de 65% na utilização da energia solar fotovoltaica e, nessa proporção, foram introduzidos os recursos biológicos (SUGANTHI; WILLIAMS, 2000).

A exploração de recursos para produção de energia limpa e sustentável foi intensificada em muitas nações no início do século 21. Na Turquia, o potencial eólico foi determinado a partir da elaboração de mapas de velocidade do vento, topografia e variação da energia com diversas interpretações locais e regionais (ÖZTOPAL et al., 2000). Propostas de modernização da energia da biomassa, isto é, a sua produção e utilização de forma muito mais eficiente e econômica, geralmente nas formas mais convencionais de gases, líquidos ou eletricidade, foram realizadas. Contribuições da bioenergia para o fornecimento global, ganhos de eficiência energética, fontes alternativas de biomassa, variedade de questões socioeconômicas e ambientais, e mecanismos institucionais facilitadores foram discutidos para avaliar a viabilidade de implantação de sistemas de geração mais robustos (LARSON; KARTHA, 2000). Um Escritório de Tecnologias de Energia Solar (em inglês: *Office of Solar Energy Technologies - OSET*) também foi criado nos EUA a fim de proporcionar oportunidades de eficiência e esforços conjuntos que beneficiavam programas de pesquisa voltados para energia solar fotovoltaica, energia solar concentrada e edifícios solares (RANNELS, 2000).

Os potenciais de energias renováveis existentes em grande parte dos países, como por exemplo na República Federativa da Alemanha, ainda eram pouco utilizados em meados dos anos 2000. Uma mudança na estrutura de fornecimento de energia parecia muito arriscada no que diz respeito às finanças e ao mercado de trabalho. Contudo, uma extensão dos sistemas de energia renovável no estado alemão da Renânia do Norte-Vestfália levou melhores perspectivas de criação de emprego para essa região (ZIEGELMANN; MOHR; UNGER, 2000). No Brasil, desde o início dos anos 90, foi inicializado um programa de reformas no setor elétrico, que inclui privatização e a desverticalização dos serviços públicos. O objetivo era promover uma indústria de energia orientada para o mercado e atraente para investidores privados. No entanto, patrocínios para programas de promoção de eficiência energética, tecnologias de energias renováveis, eletrificação rural e proteção ambiental, que eram de interesse público, foram perdidos. Em meio a esse cenário, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) foi criada em 1997, com a tarefa de fornecer fundos e incentivos para a conservação da energia (JANNUZZI DE MARTINO, 2000).

A minimização dos resíduos sólidos urbanos e a conservação de energia visando o desenvolvimento sustentável foram considerados desafios para o Brasil no século 21, segundo KANAYAMA et al., (2000). A redução dos resíduos sólidos urbanos relaciona-se à utilização eficiente dos recursos materiais e pode contribuir para a erradicação do problema da escassez de área de disposição de lixo nos grandes centros urbanos. Por sua vez, a

conservação de energia consiste em uma alternativa quando a falta de investimentos no setor elétrico restringir a continuidade do crescimento econômico do país. Compostagem de resíduos orgânicos, reciclagem de materiais, incineração e redução na quantidade de resíduos efetivamente gerados foram maneiras avaliadas para lidar adequadamente com os resíduos sólidos e construir um modelo de desenvolvimento sustentável (KANAYAMA; DOS REIS; UDAETA, 2000).

No estado brasileiro do Rio Grande do Sul, um projeto iniciado em 1989, denominado “Rio Grande do Sul Energia para o ano 2000” (SOUZA; ANJOS, 2007), já tinha o intuito de promover o desenvolvimento sustentável a nível municipal para todo o estado, tendo as fontes renováveis de energia como tema central para fornecer eletricidade a todas as propriedades rurais, utilizando-se de fontes locais. Apesar da região ter passado por um êxodo rural de 1970 a 2000, cerca de 25% da população ainda vivia nas áreas rurais; e de um total de 550.000 propriedades rurais, 120.000 delas ainda não eram abastecidas com energia elétrica da rede pública (ANILDO et al., 2000).

Em Uganda, o subsetor de biomassa era a principal fonte de combustível em 2001, fornecendo mais de 90% da demanda nacional de energia. A energia da biomassa era utilizada principalmente para cozinhar e aquecer ambientes e um maior desenvolvimento do setor de energia renovável contribuiu para melhorar a subsistência das comunidades rurais pobres. A agricultura, principal fonte de renda e emprego em Uganda, ainda dependia de tecnologias e técnicas defasadas para plantio, colheita e processamento. Com a concepção e adaptação de tecnologias adequadas de energia renovável, foi possível modernizar a agricultura ugandense (TURYAREEBA, 2001). Apesar da energia renovável ser viável economicamente e ter o potencial de desempenhar um papel importante no fornecimento de energia com sustentabilidade às vastas populações dos países, existiam barreiras técnicas, de mercado, políticas e regulatórias que impediam a sua penetração no mercado (PAINULY, 2001).

A União Europeia (UE) já vinha demonstrando o seu compromisso com a promoção das energias renováveis, porém o papel potencial da biomassa e dos resíduos na política da UE só foi apresentado com clareza em 2002 (SIEMONS, 2002). Além da biomassa, tecnologias promissoras e implantações comerciais de sistemas de geração à energia oceânica começaram a ser desenvolvidas como fruto de pesquisas em conversão de energia térmica oceânica, energia das ondas, energia das marés e energia eólica offshore. Essas alternativas apresentaram potencial de aliviar a ameaça da mudança climática global. No entanto, esse tipo de fonte renovável deve ser explorado sem prejudicar o meio ambiente

marinho, com projetos bem localizados e dimensionados de forma adequada, seguindo as diretrizes ambientais (PELC; FUJITA, 2002). Já se dizia que o desenvolvimento de energias renováveis está intimamente relacionado ao crescimento do mercado, à inovação e à política (GROSS; LEACH; BAUEN, 2003).

Nos EUA, a transição de combustíveis fósseis não renováveis pelos recursos de energia renovável não ocorreu de modo expressivo em 2003. No entanto, ainda assim, um grande número de fatores causou uma expansão significativa da indústria de energia renovável nos anos posteriores. Os fatores extrínsecos foram as reduções na oferta de gás natural e petróleo bruto. Os fatores intrínsecos foram o aquecimento global e os incentivos e mandatos específicos do governo, como o portfólio renovável e os padrões de combustível, que exigiram o uso comercial de recursos de energia renovável (KLASS, 2003). A introdução dos créditos de energia renovável negociável permitiu que os atributos de energia verde fossem vendidos ou comercializados separadamente da unidade física de energia, sendo uma ferramenta eficiente para o atendimento ao padrão de portfólio renovável exigido por diferentes estados norte-americanos (MOZUMDER; MARATHE, 2004).

Em 2004, oportunidades de investimento em energia renovável foram exploradas nas Ilhas Maurício. *Magnum Power*, uma empresa de engenharia indiana que promove tecnologias de energia renovável, conduziu um estudo de viabilidade técnica e econômica para identificar as possibilidades de investimentos em várias tecnologias como biomassa, eólica e solar fotovoltaica. Um cenário de geração de energia foi analisado, levando em consideração projetos eólicos em implementação, o status de cada um deles, as barreiras e as tecnologias adequadas para um investimento promissor. Logo, foi proposto um investimento em um parque eólico de 10 MW de potência instalada, diretriz útil para investimentos no mercado de energia (PALANICHAMY; SUNDAR BABU; NADARAJAN, 2004). Para Taiwan, nação insular subtropical que possui 97% de sua energia fornecida por combustíveis importados, foi elaborada uma política de desenvolvimento energético que subsidiaria o investimento de \$100 milhões anuais em fontes alternativas. Energias solar, eólica e do biogás foram julgadas as mais atraentes pela Comissão de Energia do Ministério de Assuntos Econômicos. O governo do país anunciou que a meta do plano era atingir 6.500 MW de energia renovável até 2020, o que aumentaria a capacidade instalada em mais de 10% (TSAI, 2005).

Na África do Sul, o investimento em energia renovável e eficiência energética foi importante para reduzir os impactos negativos nos âmbitos econômico, social e ambiental para a produção e consumo de energia. No ano de 2005, a energia renovável contribuía de

modo inexpressivo para a energia primária e ainda menos para o consumo de energia comercial. Políticas de incentivos tarifários foram analisadas, as quais estabeleciam condições locais de fornecimento, promovendo o uso da energia elétrica por meio de fontes renováveis (WINKLER, 2005). Em contrapartida, a participação de fontes renováveis na produção de eletricidade na Croácia correspondia a cerca de 50% em 2006, com perspectiva de um aumento ainda mais desse percentual. Contudo, assim como para a África do Sul, o custo de implantação dessas fontes renováveis ainda era superior ao das fontes convencionais. Mecanismos de apoio compatíveis com a filosofia de mercado livre deveriam ser adotados (VRHOVČAK; TOMŠIĆ; DEBRECIN, 2006).

Com o intuito de reduzir a grande dependência de combustíveis fósseis importados e a elevada poluição ambiental, promovendo segurança energética e econômica, o potencial de produção de hidrogênio foi avaliado para Hong Kong em 2006. Para isso, analisou-se o desenvolvimento de tecnologias que pudessem associar as energias solar, eólica e a biomassa à produção significativa de hidrogênio. Um sistema composto por turbinas eólicas e módulos fotovoltaicos acoplados a eletrolisadores foi um dos arranjos propostos no estudo, que se demonstrou promissor. A biomassa de resíduos orgânicos também se constitui em uma fonte econômica e ecológica para a produção de hidrogênio sustentável. Estimava-se que a produção de energia do hidrogênio alcançaria até 40% do consumo total de energia no transporte (NI et al., 2006).

Uma pesquisa foi realizada em fazendas na Nova Escócia, Canadá, para avaliação do uso de fontes de energia eficientes e renováveis. Aproximadamente 78% dos agricultores indicaram interesse em implementar sistemas desse tipo. As opções de eficiência energética mais utilizadas eram relacionadas a questões comportamentais no uso da energia, ao isolamento térmico e à iluminação. O interesse de cada um deles variou de acordo com o tipo e tamanho do sistema, sendo as opções de eficiência mais relevantes a iluminação (60,8%) e o isolamento (43,7%), enquanto o desenvolvimento de energia eólica (55,5%) e de aquecimento solar (24,5%), constituindo as principais opções renováveis. Verificou-se uma relação positiva entre a preocupação dos agricultores com o meio ambiente e a sua perspectiva de adesão a essas tecnologias (BAILEY et al., 2008).

Modelos empíricos de consumo e receita de energia renovável foram estimados para um conjunto de países com economias emergentes. O aumento do crescimento econômico e da demanda por energia criou, em 2009, uma oportunidade para que esses países aumentassem o uso de energia renovável. Estimou-se que o aumento de 1% na renda real per capita provocava um aumento no consumo de energia renovável per capita de 3,5%

dentro desse panorama (SADORSKY, 2009). Em 2011, para alguns países islâmicos, foram avaliados os status das aplicações de energia renovável, suas estratégias de implementação e os obstáculos. As estratégias adotadas foram: estabelecimento de programas de educação e de capacitação, criação de um mercado de energia renovável e de mecanismo para financiamento, melhorias nas políticas energéticas apropriadas, elaboração de banco de dados e colaboração internacional para promoção de tecnologias de energia renovável (SOPIAN; ALI; ASIM, 2011).

O setor de energia do Quirguistão foi caracterizado por crise energética dramática que privou uma parte substancial da população de acessar a energia em meados de 2012. Logo, as fontes de energia renováveis não tradicionais surgiram como uma alternativa promissora no fornecimento de serviços básicos de energia em áreas rurais pobres. Entrevistas qualitativas de 11 famílias locais e de cinco planejadores de projetos foram utilizadas para avaliação de impactos, de limitações e de barreiras no setor. A orientação de programas e políticas integrados, juntamente com esquemas de financiamento alternativos e aumento da conscientização, foram urgentemente necessários para alavancar o desenvolvimento da energia sustentável na área rural do Quirguistão (LIU; PISTORIUS, 2012).

Uma abordagem política da China para as energias renováveis foi realizada a fim de avaliar a eficácia entre a política de energia renovável e a política industrial de energia renovável. Constatou-se que as conquistas e os problemas no setor de energia solar fotovoltaica e eólica durante 2005-2012 foram resultados da priorização do desenvolvimento da indústria de manufatura de energia renovável. Portanto, foi necessária a proposição de um equilíbrio entre as duas políticas a fim de promover ideias de desenvolvimento sustentável, liderança de baixo carbono e inovação local (ZHANG et al., 2013). Enquanto isso, para a eletricidade no Brasil, foram avaliados o custo energético médio e as emissões de CO<sub>2</sub>, utilizando um conjunto de fontes e considerando os perfis representativos das rotas de geração. Como a capacidade instalada brasileira é composta por usinas hidrelétricas, gás natural, termelétricas, óleo combustível e carvão, usinas de cogeração de biomassa, usinas nucleares e parques eólicos, um processo de cálculo iterativo foi utilizado para levar em consideração as interações cíclicas dos combustíveis processados e a eletricidade gerada (FLÓREZ-ORREGO; SILVA; OLIVEIRA JR., 2014).

O governo brasileiro tem visado a universalização do acesso à eletricidade desde o ano de 2003. A iniciativa nacional de eletrificação rural forneceu serviços a mais de 14 milhões de pessoas até 2015 por meio da extensão da rede. Entretanto, áreas remotas na

Amazônia não foram beneficiadas, haja vista as condições do programa para projetos de geração de energia de pequena escala não conectados à rede. Com a proposição de novas regras, projetos com uma capacidade instalada de até 100 kW foram inseridos nessa política. Benefícios foram proporcionados para comunidades isoladas, no que diz respeito à redução do custo nivelado da eletricidade, ao favorecimento de tecnologias de energias renováveis e à contribuição na redução das emissões de CO<sub>2</sub> (GÓMEZ; TÉLLEZ; SILVEIRA, 2015).

O consumo de energia renovável em três grandes economias em desenvolvimento, Brasil, China e Índia, foi investigado utilizando modelos de séries temporais no período 1971-2014. A partir de quatro testes realizados, foi observado que o consumo de energia renovável é um processo de raiz unitária no Brasil, isto é, não estacionário; enquanto que para a China e Índia foi considerado estacionário (GOZGOR, 2016). A relação entre energia renovável per capita, agricultura e emissões de CO<sub>2</sub>, junto com produção e energia não renovável, foi avaliada para países do BRICS (Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul) entre 1992-2013. Os testes de raiz unitária do painel indicaram que todos os dados da série temporal foram estacionários na primeira diferença, e os testes de cointegração do painel comprovaram a existência de relações de cointegração entre as variáveis. Tanto a produção per capita quanto a energia renovável desempenharam papéis negativos nas emissões, enquanto a energia não renovável per capita e a agricultura exerceram efeitos positivos. Logo, as políticas dos países do BRICS teriam de incentivar o consumo de energia renovável e fortalecer a gestão da agricultura para que o aquecimento global fosse contido (LIU; ZHANG; BAE, 2017).

Analisar a experiência do progresso de energia renovável em países desenvolvidos pode ser importante para fornecer referência e orientação para sua adoção em outros países. Foram comparadas e resumidas as definições de geração distribuída em 18 países e organizações líderes em energia renovável. Em 2018, através de uma análise empírica, foi observado o desenvolvimento distribuído e centralizado de energias renováveis na Alemanha, sendo 95% da geração fotovoltaica e 85% da geração eólica distribuídas (WANG et al., 2018). Um índice de atividade de política foi utilizado para examinar o desenvolvimento histórico das energias renováveis de 1998 a 2015, em cinco países americanos: Argentina, Brasil, Canadá, México e Estados Unidos. Objetivo, escopo, integração, orçamento, implementação e monitoramento foram os seis indicadores avaliados. Constatou-se que os EUA têm a política mais densa, seguido por Canadá, México, Brasil e Argentina. E que, no geral, as políticas no Brasil e Canadá foram mais intensas, mostrando que os países podem estar desperdiçando recursos na produção de um conjunto

de políticas que não possui coordenação entre os diferentes níveis de governo (PISCHKE et al., 2019).

A China tornou-se o maior produtor e consumidor mundial de energia, e ocupa o primeiro lugar em potência instalada das energias eólica e solar na atualidade. Problemas no desenvolvimento e utilização da energia renovável têm surgido nesse país nos últimos anos. Equilíbrio de energia, desempenho de regulação, capacidade de transmissão e nível de carga são os fatores-chave que mais têm afetado na capacidade da energia gerada. Para solucionar esse problema, foram propostos o desenvolvimento centralizado e distribuído, a flexibilidade de regulação da carga de pico da energia térmica, o aumento da proporção de turbinas a gás, o armazenamento de energia hidrelétrica bombeada, a construção de canais de transmissão, implantação de redes inteligente e usinas virtuais (LIU et al., 2020).

A 21<sup>a</sup> Conferência das Partes (COP 21), realizada em Paris no ano de 2015, propôs limitar o aumento médio da temperatura global a um máximo de 2°C. O Brasil possui programas para a redução dos gases de efeito estufa por meio de suas contribuições nacionalmente determinadas no setor de energia. O uso de energias renováveis como eólica, solar e cogeração para produção de eletricidade tem crescido, consideravelmente, a fim de reduzir a dependência da geração hidrelétrica e evitar a compensação pela energia termelétrica, que por sua vez aumenta as emissões. O crescimento da energia eólica, por exemplo, foi resultado do investimento em políticas públicas por meio do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) e projeta-se uma potência instalada de 20 GW até 2024. As iniciativas no seguimento de energia solar refletiram na criação de uma indústria solar fotovoltaica no país e a partir daí uma expansão acelerada no uso desta energia. Os processos de cogeração têm também contribuído positivamente para indústrias, tanto no atendimento de demandas internas quanto de externas. A diversificação da matriz energética por essas fontes alternativas é uma meta a ser alcançada com o intuito de torná-la menos vulnerável às mudanças climáticas (LIMA et al., 2020).

O potencial energético brasileiro a partir do esterco animal e esgoto doméstico foi estimado a partir de registros de plataformas governamentais para quantidade de bovinos, frangos, ovinos, suínos, búfalos e equinos; de suas respectivas produções médias de resíduos e dos dados de coleta de esgoto dos municípios brasileiros. Modelos matemáticos baseados em regressões lineares múltiplas foram elaborados e os potenciais de geração de eletricidade obtidos para as regiões centro-oeste, norte, sul, sudeste e nordeste foram de 20,582, 13,731, 11,327, 10,296 e 8,793 TWh por ano, respectivamente. A energia total anual correspondente a esses potenciais foi de 64,73 TWh e seria capaz de atender a 13,63% do consumo brasileiro

em 2018, enfatizando que o reaproveitamento energético dos resíduos pode contribuir para maior segurança energética de uma nação (OLIVEIRA et al., 2020).

Processos de causalidade cumulativa espacialmente diferenciados e questões estruturais relacionadas ao “círculo vicioso” da subutilização do potencial de energia renovável da biomassa agrícola como os “nós górdio” de omissões e políticas públicas foram analisados. A matriz de quadro conceitual integrou a abordagem dos pontos de inflexão e a aplicou na inter-relação entre quebrar internamente a subutilização do potencial de energia renovável da biomassa agrícola e cortes Alexandrinos que criaram as condições para uma absorção de baixo para cima de culturas energéticas e energias renováveis derivadas de biomassa agrícola em áreas rurais periféricas. Os resultados obtidos para uma amostra de 2.191 agricultores indica que uma interação de processos de causalidade cumulativa e questões estruturais relacionadas “apertam” o círculo vicioso, tornando os nós górdio reciprocamente “impossíveis de desemaranhar” (MYNA; DOBROWOLSKI, 2021).

Um estudo investigou algumas forças motrizes potenciais para implantação de energia renovável através de uma análise de dados de 118 países em todo mundo de 1995 a 2015. Resultados apontam que países que são mais vulneráveis às mudanças climáticas e têm economias menos intensivas em carbono empregam porções maiores de energia renovável em seu consumo total de energia. Porém, o imposto sobre o carbono é estatisticamente insignificante na implantação de energia renovável. Descobertas implicam que os países apoiam mais as energias renováveis quando suas economias estão menos interligadas com combustíveis fósseis e quando políticas relevantes estão em vigor para fornecer incentivos às energias renováveis (HAO; SHAO, 2021).

## **1.2 Objetivos e motivações**

O cenário energético sofreu inúmeras transformações no decorrer dos anos, conforme revisão bibliográfica. Fontes alternativas de energia foram inseridas nas matrizes energéticas e elétricas do Brasil e do mundo, com o intuito de promover a segurança no atendimento à demanda, à redução das emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera e à sustentabilidade. O meio rural possui grande potencial de geração de energia através de fontes alternativas, principalmente a partir de resíduos rurais. No entanto, ainda é uma das localidades que mais sofrem com o fornecimento de eletricidade e falhas na rede.

Considerando todos esses fatores, o objetivo dessa pesquisa de mestrado consistiu em metodologias capazes de realizar a estimativa e a avaliação do potencial de geração de

energia elétrica a partir de fontes renováveis de energia alternativas para a zona rural. Para constituir um estudo de caso, que represente os sistemas elétricos relativos pertinentes a uma zona rural, foi feita uma coleta de dados do município de São Francisco do Glória, Zona da Mata do estado de Minas Gerais. Os sistemas de geração investigados foram a biomassa e as energias solar e eólica. Modelagens matemáticas e ferramentas de otimização foram propostas para garantir a viabilidade técnica e financeira da inserção de componentes renováveis na geração de energia para a área de estudo.

### **1.3 Contribuições do trabalho**

As principais contribuições do trabalho consistiram na proposição de técnicas e modelos que podem ser aplicados como esquemas de soluções energéticas para qualquer base de dados, com o mesmo formato ou formato adaptado, de regiões do mundo com características similares às do município de estudo. Resultados promissores foram encontrados para uma área representativa estatisticamente. As ferramentas de apoio a tomada de decisões sobre as soluções energéticas propostas pelo estudo podem ser implementadas e utilizadas para obtenção de subsídios financeiros em políticas públicas.

### **1.4 Estrutura do trabalho**

Este capítulo apresentou um panorama sobre as energias renováveis no decorrer dos últimos anos, bem como objetivos, motivação e contribuições do trabalho. Além deste capítulo, o trabalho é composto por mais três capítulos e dois apêndices.

O capítulo 2 apresenta uma modelagem para estimativa e otimização do potencial energético de esterco animal e esgoto em fazendas de pequeno e médio porte.

O capítulo 3 apresenta uma análise e proposição de soluções de energias renováveis baseadas em inteligência artificial para produtores rurais.

No capítulo 4 são apresentadas as principais conclusões referentes à metodologia proposta, bem como sugestões de trabalhos futuros.

O apêndice A exibe os dados das propriedades rurais avaliadas neste trabalho.

No apêndice B são apresentadas informações das unidades compostas utilizadas para orçamentação de biodigestores.

No apêndice C são apresentados os resumos gráficos dos capítulos 2 e 3 e um exemplo esquemático de um biodigestor lagoa coberta.

## 2 MODELAGEM PARA ESTIMATIVA E OTIMIZAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE ESTERCO ANIMAL E ESGOTO DOMÉSTICO EM FAZENDAS DE PEQUENO E MÉDIO PORTE

### 2.1 Introdução

A demanda global por energia aumentou na última década devido à rápida globalização, ao desenvolvimento de tecnologias e ao crescimento populacional. Segundo dados do Ministério de Minas e Energia (MME, 2019), em 2018, 86% da demanda global de energia foi atendida por fontes não renováveis, principalmente petróleo e carvão. Esse uso promove o aumento dos níveis de gases de efeito estufa na atmosfera, intensificando diversos processos de degradação ambiental. Além disso, representa uma ameaça à segurança energética dos países, com o consequente esgotamento de fontes tradicionais de energia. Tais temas levantaram preocupações ambientais (CAO et al., 2020; DONASTORG; RENUKAPPA; SURESH, 2020; LUO et al., 2015; YUKSEL; OZTURK, 2017).

A mudança climática tem um impacto considerável em escala global, conforme discutido pela *International Renewable Energy Agency* (IRENA) (IRENA, 2020). Alguns fatores têm sido amplamente debatidos, relacionados à queima de combustíveis fósseis. O Regime Comunitário de Licenças de Emissão na União Europeia (*“Roadmap 2050: A practical guide to a prosperous, low-carbon europe”*, 2016) visa uma redução das emissões em pelo menos 40% até 2030. Atualmente, tendo em vista o aumento das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), inúmeras pesquisas estão focando em Fontes Renováveis de Energia (FRE), como energias eólica, geotérmica, solar e biomassa (ISHAQ; DINCER, 2020; TALAAT; FARAHAHAT; ELKHOLY, 2019; WELFLE; THORNLEY; RODER, 2020), cada vez mais integradas aos sistemas elétricos de potência. Portanto, para aumentar e divulgar o uso de FRE, os países estão criando novas regulamentações e estratégias para o mercado de energia (ALAM; MURAD, 2020).

A biomassa tem atraído, cada vez mais, atenção ao longo dos anos devido à sua ampla disponibilidade e ao seu custo decrescente (BOGGULA et al., 2020; FERREIRA et al., 2018; FREITAS et al., 2019). Essa fonte de energia renovável tem grande potencial no Brasil por se tratar de um país economicamente forte na produção agrícola e de proteína animal, atividades que geram uma grande quantidade de resíduos que podem ser reaproveitados energeticamente. Pode-se destacar que a biomassa, em 2018, representava 9% da matriz elétrica brasileira. Hoje, a biomassa corresponde a uma parcela equivalente a 9,8% da

capacidade instalada renovável total entre as fontes renováveis e alternativas (REN21, 2018). O Plano Brasileiro Decenal de Energia (BRASIL - MME - EPE, 2019) prevê uma evolução na matriz de energia elétrica até 2029, cujo aumento em todas as fontes de energia é ilustrado na Figura 1. De acordo com este estudo, espera-se que sejam inseridos 2,4 GW de potência instalada provenientes de sistemas de geração a biomassa nos próximos 10 anos.

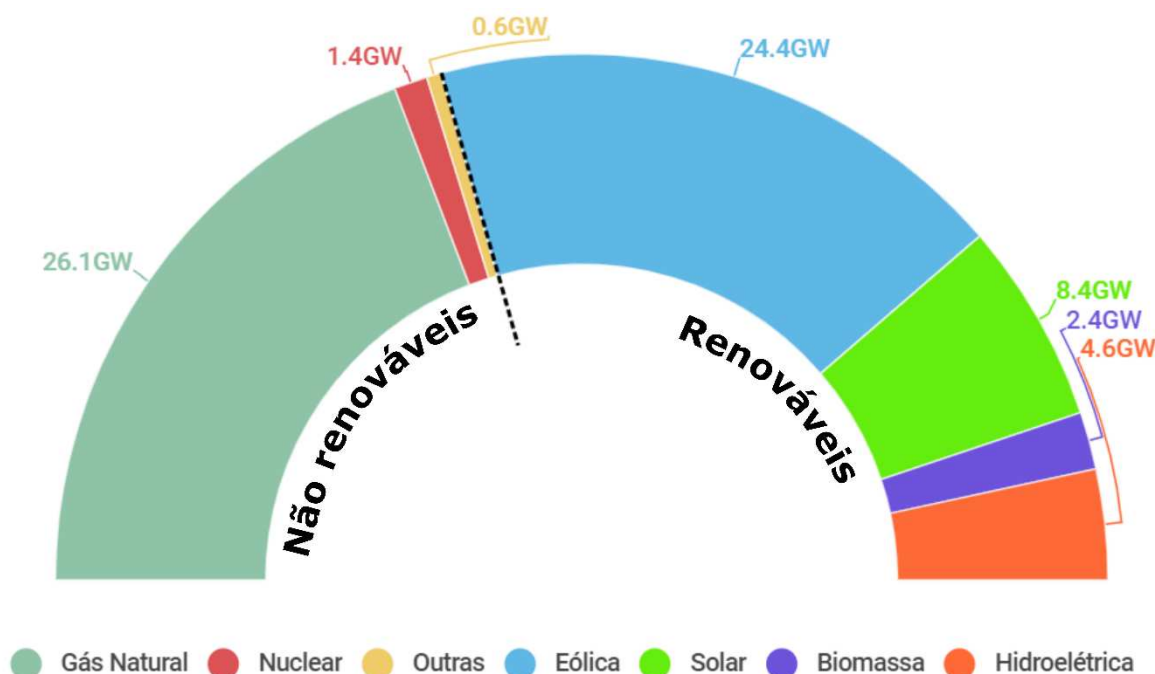


Figura 1 - Expansão da Eletricidade Brasileira 2020-2029.

Fonte: (BRASIL - MME - EPE, 2019).

Recentemente, atenção tem sido dada à eletricidade a partir de biomassa, como uma fonte promissora para diversificar a matriz elétrica brasileira, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e impactando positivamente as mudanças climáticas (WELFLE, 2017). O aproveitamento e uso da bioeletricidade também favorece a descentralização do sistema elétrico, seguindo, portanto, a tendência de atendimento de cargas via geração distribuída. Considerando a importância de estudos voltados para a geração de energia a partir de fontes renováveis e as diversas vantagens e fontes alternativas de biomassa no Brasil, observam-se estudos como de OLIVEIRA et al. (2020), em que se avalia o potencial brasileiro de geração de eletricidade a partir de dejetos animais e esgoto.

Porém, vale ressaltar que ainda há muito apelo na literatura para o avanço dessa área de pesquisa. Apesar da biomassa tradicional já ter expressão significativa no abastecimento energético do país, principalmente a partir de termelétricas a bagaço de cana (HOFSETZ; SILVA, 2012; ZANDERSONS et al., 1999), ainda existe um grande potencial de resíduos agrícolas e agroindustriais que ainda não foi exaustivamente analisado na literatura.

Uma região do país que se destaca nessa produção é a região Sudeste, que em 2017 produziu cerca de 11 bilhões de litros de leite, com destaque para o estado de Minas Gerais, responsável por uma participação equivalente a 77,8% desse total (8,9 bilhões litros) (EMBRAPA, 2019). O estado de Minas Gerais possui um rebanho total de gado leiteiro e de corte com cerca de 5,4 milhões de animais (SEAPA, 2020). E o grande volume da produção desses alimentos de origem animal gera uma grande quantidade de resíduos orgânicos, principalmente esterco. Nos últimos anos, pesquisadores têm utilizado o esterco animal como substrato para a produção de eletricidade. Dentre esses processos, foi investigada a influência do lodo ativado e do esgoto doméstico no aumento da formação de biofilme anódico e a geração de eletricidade a partir de esterco de gado (XIE et al., 2017).

O esterco animal é uma biomassa que pode ser tratada por biodigestão anaeróbia. Além do biogás, uma fração líquida digerida é produzida no biodigestor. Essa porção pode ser utilizada como um biofertilizante de excelente qualidade (MELIKOGLU; MENEKSE, 2020). A digestão anaeróbia do esterco é importante para evitar o descarte inadequado ou, como em muitos casos, o armazenamento para aplicação como fertilizante. Portanto, em vez de se decompor lentamente no solo (aerobiamente no campo ou anaerobiamente em aterros ou lixões comuns), liberando GEE, essas matérias-primas podem ser coletadas e processadas para gerar eletricidade por meio de processos biológicos convencionais. Portanto, é essencial avaliar o potencial bioenergético para a caracterização da matéria-prima, tanto qualitativa quanto quantitativamente, e explorar o potencial de substituição de combustíveis fósseis e a redução associada de emissões de GEE (PORTUGAL-PEREIRA et al., 2015).

Um fato relevante é que a grande maioria dos municípios do estado de Minas Gerais é pouco povoada e com extensa zona rural, e o espaço amostral utilizado neste estudo é fiel a essa tendência. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 2019, havia apenas 48 municípios brasileiros com população acima de 500 mil habitantes, que concentram quase um terço da população (31,7%), isto é, 66,5 milhões de pessoas. Em Minas Gerais, apenas quatro municípios fazem parte desse grupo: Belo Horizonte (2.512.070), Uberlândia (691.305), Contagem (663.855) e Juiz de Fora (568.873) (IBGE, 2019a).

Logo, em decorrência dessas circunstâncias, o objetivo principal deste capítulo foi estimar e otimizar a geração de energia elétrica a partir da biomassa residual em um pequeno município da Zona da Mata mineira. Os objetivos específicos foram:

- Disponibilizar dados sobre esterco animal e esgoto em pequenas e médias propriedades, estatisticamente representativos para o Estado de Minas Gerais.

- Aplicar uma modelagem capaz de estimar o potencial energético de dejetos animais e esgoto doméstico.
- Introduzir uma ferramenta interativa de base matemática como proposta para otimização dos recursos energéticos disponíveis na região em estudo.

## 2.2 Material e métodos

### 2.2.1 Coleta de dados e pré-processamento

Foi realizada uma revisão da literatura sobre o uso de esgoto e esterco animal com o objetivo de reunir informações sobre o uso desses tipos de substratos como fonte de energia. As palavras-chave, esterco animal, esgoto e resíduos, combinadas à descarbonização da matriz energética, energia renovável e energia de biomassa, têm servido de base para a recuperação de literatura na *Web of Science* e no banco de dados do *Google Scholar* desde 1995. O conjunto de dados aqui elaborados contém informações sobre rebanhos, moradores, consumo de energia elétrica, renda e localização geográfica em estabelecimentos agropecuários do município de São Francisco do Glória. Detalhes seguem no Apêndice A.

O município de São Francisco do Glória (20 ° 46' 23" S, 42 ° 17' 58" O), em 2020, possuía uma população estimada em torno de 4.800 habitantes e uma área total de 16.459 hectares, sendo 12.644 hectares de área rural. A economia do município é representada, expressivamente, por uma parcela destinada à produção de café e à pecuária leiteira. Essa realidade é comum no estado de Minas Gerais, pois dos 853 municípios pertencentes a essa unidade federativa, 668 e 476 têm menos de 20.000 e 10.000 habitantes, respectivamente (IBGE, 2019b).

### 2.2.2 Metodologia proposta para estimativa do potencial energético

De acordo com o número de animais em cada um dos rebanhos das fazendas, é possível estimar a quantidade de esterco produzida e, conseqüentemente, seu potencial energético. A Tabela 1 apresenta os fatores de conversão de energia que foram utilizados para compor as Equações 1 e 2, de acordo com a metodologia proposta por OLIVEIRA et al. (2020).

$$GM_{esterco} = 365 \cdot P_{animal} \cdot G_{esterco} \cdot A_{esterco} \cdot Y_{metano} \quad (1)$$

$$P_{esterco} \left( \frac{kWh}{ano} \right) = \frac{GM_{esterco} \cdot PCI \cdot \eta_1 \cdot D}{860} \quad (2)$$

Em que:  $GM_{esterco}$  é a quantidade de metano gerado ( $m_{CH_4^3} \text{ ano}^{-1}$ );  $P_{animal}$  é o número de animais;  $G_{esterco}$  é a produção diária de esterco de um determinado animal ( $kg_{esterco} \text{ d}^{-1}$ );  $A_{esterco}$  é o fator de disponibilidade de esterco animal fresco (%);  $Y_{metano}$  é a produção de metano a partir de esterco animal fresco ( $Nm_{CH_4^3} \text{ kg}_{esterco}^{-1}$ );  $P_{esterco}$  é a potencial energético estimado para o esterco ( $kWh \text{ ano}^{-1}$ );  $PCI$  é o poder calorífico inferior do  $CH_4$  de 11.781 kcal  $kg^{-1}$  (GHOSH et al., 2019);  $\eta_1$  é o valor de eficiência de conversão de 0,28 que é o resultado da combinação entre a eficiência do motor a gás (30–40%) e gerador (80%) (FREITAS et al., 2019); 860 é o fator de conversão de kcal para kWh;  $D$  é a massa específica do metano de aproximadamente 0,657  $kg \text{ m}^{-3}$  (MELIKOGLU; MENEKSE, 2020).

Tabela 1 - Fatores de conversão de energia para esterco animal.

Origem	Massa de substrato fresca ( $kg_{esterco} \text{ d}^{-1}$ )	Fator de disponibilidade (%)	Produção de metano ( $Nm_{CH_4^3} \text{ kg}_{esterco}^{-1}$ )
Bovinos	27,8 ± 7,6	47,3 ± 23,0	0,0221 ± 0,0088
Ovinos e Caprinos	1,45 ± 0,21	11,5 ± 2,1	0,0621 ± 0,0199
Aves	0,0275 ± 0,0247	80,0 ± 0,0	0,0708 ± 0,0330
Suínos	2,96 ± 0,15	89,5 ± 13,4	0,0180 ± 0,0062
Búfalos	40,0 ± 0,0	50,0 ± 0,0	0,0210 ± 0,0000
Muare e Equinos	13,8 ± 0,0	29,0 ± 0,0	0,0146 ± 0,0000
Referências	R1	R2	R3

Referências: R1 - (ABDESHAHIAN et al., 2016; AFAZELI et al., 2014; MAKARA; KOWALSKI, 2018; MELIKOGLU; MENEKSE, 2020; NGWABIE; CHUNGONG; YENGONG, 2018; NRCS, 1995; OLIVEIRA et al., 2020; PINDOZZI et al., 2013; QLD, 2018; ZHENG et al., 2019); R2 - (AVCIOĞLU; TÜRKER, 2012; ERSOY; UGURLU, 2020; MELIKOGLU; MENEKSE, 2020; MEYER; EHIMEN; HOLM-NIELSEN, 2018; MOREDA, 2016; OLIVEIRA et al., 2020; ZAREEI, 2018); R3 - (ANGELIDAKI; ELLEGAARD, 2003; AWASTHI et al., 2019; BURG et al., 2018; ERSOY; UGURLU, 2020; OLIVEIRA et al., 2020; SCARLAT et al., 2018; SELVAGGI et al., 2018; TIŞMA et al., 2018).

Além do esterco animal, o esgoto, embora em pequenas proporções, pode ser utilizado para reaproveitamento de energia. A existência de sistemas de tratamento de esgoto no meio rural é muito rara, sendo esse resíduo, como os demais citados, um passivo

ambiental. Do espaço amostral das 111 fazendas avaliadas, apenas uma realiza tratamento com fossas sépticas biodigestoras e isso demonstra como ainda existe um potencial energético promissor a ser explorado. A Equação 3, adaptada de OLIVEIRA et al. (2020), é utilizada para estimar a quantidade de esgoto produzida, em média, por cada indivíduo no município de São Francisco do Glória.

$$TGE = (\beta_0 + \beta_1 \cdot POP + \beta_2 \cdot PIB)/POP \quad (3)$$

Em que:  $TGE$  é a taxa de geração de esgoto ( $m^3 d^{-1} hab^{-1}$ );  $POP$  é a população (hab.);  $PIB$  é o PIB per capita ( $\$ hab^{-1}$ );  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  e  $\beta_2$  são as constantes de ajuste.

A Tabela 2 apresenta o modelo para previsão do volume de esgoto e mostra os valores utilizados para as constantes de ajuste, que são apresentadas na primeira coluna. A segunda coluna possui a estimativa, a terceira tem os dados da estatística de teste T e a quarta tem o p-valor. Com o valor médio de esgoto por habitante do município, definido pela Equação 3, foi possível estimar o potencial energético desse resíduo ( $P_{esgoto}$ ) para cada fazenda, por meio das Equações 4 e 5 (OLIVEIRA et al., 2020).

Tabela 2 - Modelo para estimativa do volume de esgoto para a região sudeste.

Constantes de ajuste	Estimativa	Estatística t de Student	p-valor
$\beta_0$	89,155	0,42528	0,6707
$\beta_1$	0,050585	128,14	0
$\beta_2$	0,0051108	0,87752	0,3804
Número de observações: 1338		Número de graus de liberdade: 1335	
$EM$ : -0,0005932%		$R^2$ : 0,925	
Estatística F em relação ao modelo constante: $8,28 \times 10^3$		p-valor: $1,53 \times 10^{-224}$	

Fonte: (OLIVEIRA et al., 2020).

$$GM_{esgoto} \left( \frac{tonCH_4}{ano} \right) = 365 \cdot (TGE \cdot N \cdot DBO_5 \cdot \eta_2 \cdot NMEF - R) \quad (4)$$

$$P_{esgoto} \left( \frac{kWh}{ano} \right) = \frac{1000 \cdot GM_{esgoto} \cdot PCI \cdot \eta_1}{860} \quad (5)$$

Em que:  $GM_{esgoto}$  é a quantidade de metano gerada anualmente pelo tratamento de esgoto ( $ton_{CH_4} ano^{-1}$ );  $N$  é o número de habitantes que vivem na propriedade estudada (hab.);  $DBO_5$  é a taxa de geração média de DBO de  $0,00035 ton_{DBO_5} m^{-3}$  ( $0,0002-0,0005 ton_{DBO_5} m^{-3}$ ) (VON SPERLING, 2014);  $\eta_2$  é a eficiência do reator (75% para lagoa coberta) (BLEY JÚNIOR et al., 2009);  $NMEF$  é o fator de emissão de metano ( $0,6 ton. CH_4 ton. DBO_5^{-1}$ ) (THE OFFICE OF THE FEDERAL REGISTER NATIONAL ARCHIVES AND

RECORDS ADMINISTRATION, 1999);  $R$  é a quantidade de metano recuperada e nesta pesquisa, foi considerada igual a zero.

### 2.2.3 Dimensionamento e orçamentação de sistemas de geração à biomassa

Para a conversão de resíduos em energia, um biodigestor anaeróbio deve ser projetado. A escolha do tipo de biodigestor e seu respectivo dimensionamento depende das condições climáticas locais, além da disponibilidade e qualidade da matéria orgânica utilizada como substrato. Depende também da facilidade de obtenção, preparo e armazenamento do substrato bem como da fácil remoção e aproveitamento do biofertilizante.

Devido à simplicidade construtiva, neste trabalho, foi adotado o modelo de lagoa coberta para as fazendas estudadas, conforme Figura 18 do Apêndice C. O volume de resíduo utilizado para dimensionamento foi dado pela Equação 6. Também foi levado em consideração que, no caso de esterco animal, a proporção de matéria orgânica e água deveria ser de 1 para 1 (CARVALHO, 2014; VELOSO, 2011). O dimensionamento dos biodigestores ocorreu de forma iterativa, conforme apresentado no fluxograma da Figura 2.

$$V_w = \left( 2 \cdot \frac{M_{esterco}}{\rho_{esterco}} + V_{esgoto} \right) \cdot TDH \quad (6)$$

Em que:  $M_{esterco}$  é a massa diária de esterco ( $\text{kg d}^{-1}$ );  $\rho_{esterco}$  é a massa específica do estrume de  $850 \text{ kg m}^{-3}$  (estimada por teste);  $V_{esgoto}$  é o volume diário de esgoto ( $\text{m}^3 \text{ d}^{-1}$ );  $V_w$  é o volume diário de resíduos ( $\text{m}^3 \text{ d}^{-1}$ );  $TDH$  é o tempo de detenção hidráulica de 35 dias.

A etapa inicial do fluxograma inclui a definição dos parâmetros, e a proporção de fase gasosa ( $p \leq 0,4$ ) adotada para as propriedades ( $np$ ) foi igual a 0,4. Em seguida, há uma condição que limita o valor do raio da bolsa plástica a 3 metros. Posteriormente, existe uma etapa de incremento das variáveis raio da bolsa plástica ( $r$ ) e comprimento do biodigestor ( $L$ ) a cada iteração, até que o volume total do biodigestor ( $V_t$ ) seja maior que ou igual ao volume total de resíduos ( $V_w$ ).

Durante o processo de otimização, a metodologia proposta por (RIBEIRO, 2011), composta pelas Equações 7 a 17, é aplicada, em que  $P_r$  é o perímetro transversal total (m),  $C$  é a circunferência da bolsa plástica (m),  $r$  é o raio da bolsa plástica (m),  $A$  é a porcentagem do perímetro transversal destinado ao arco,  $p$  é a proporção de fase gasosa desejada ( $p \leq 0,4$ ),  $a$  é menor largura da fossa (m),  $b$  é maior largura da fossa (m),  $h$  é a profundidade da fossa (m),  $A_f$  é a área transversal da fossa ( $\text{m}^2$ ),  $A_t$  é a área transversal total ( $\text{m}^2$ ),  $A_g$  é a área da

seção transversal da campânula ( $m^2$ );  $L$  é o comprimento do biodigestor ( $m$ );  $V_t$  é o volume total do biodigestor ( $m^3$ );  $V_f$  é o volume da fossa ( $m^3$ );  $V_g$  é o volume de biogás ( $Nm^3$ ).

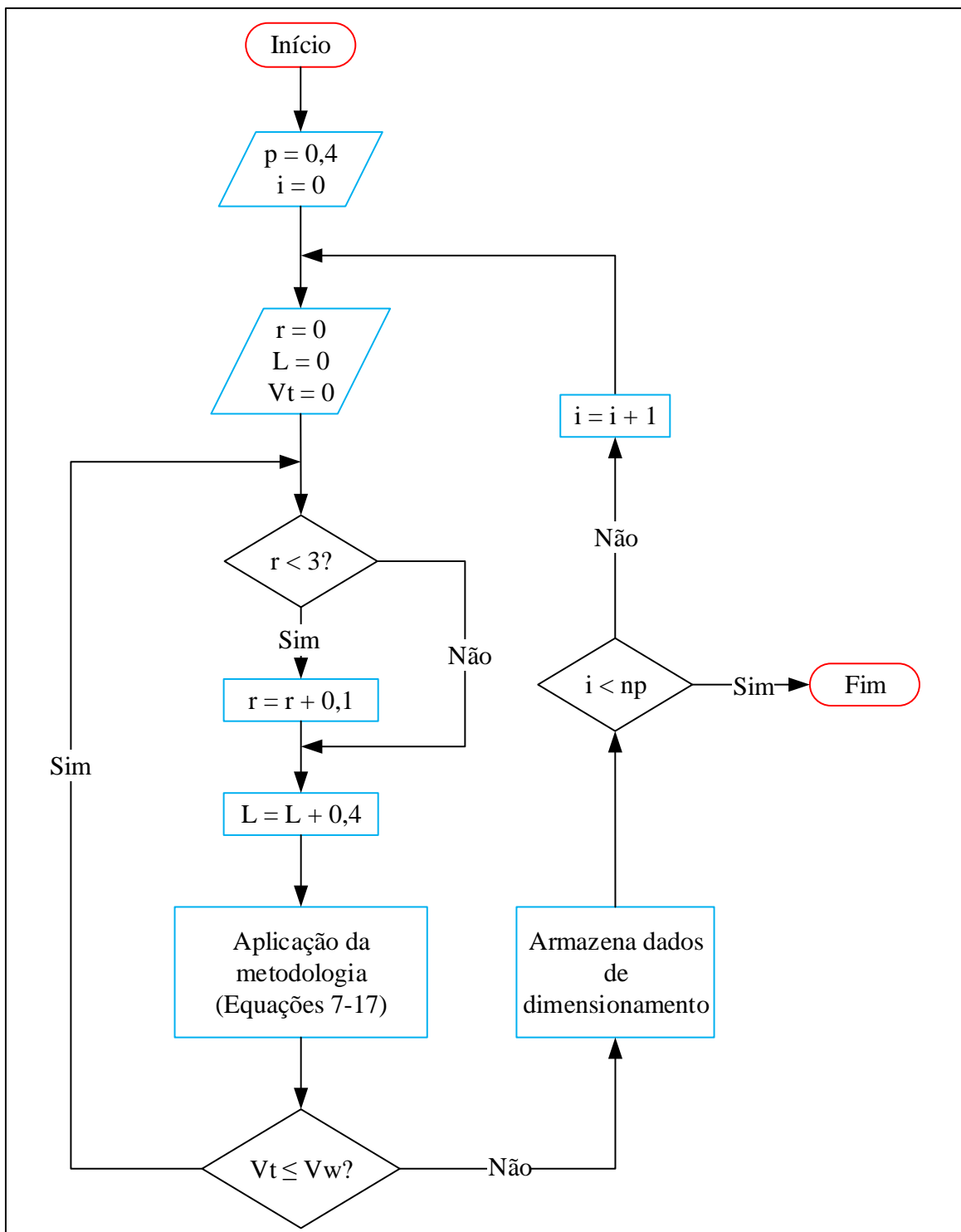


Figura 2 - Fluxograma para dimensionamento iterativo de biodigestores.

$$P_r = C = 2 \cdot \pi \cdot r \quad (7)$$

$$A = 0.621 \cdot p^2 - 0.042 \cdot p + 0.352 \quad (8)$$

$$b = (1/3) \cdot (1 - A) \cdot P_r \quad (9)$$

$$a = 1.618 \cdot b \quad (10)$$

$$h = 0.951 \cdot b \quad (11)$$

$$A_f = 0.4755 \cdot (a + b) \cdot b \quad (12)$$

$$A_t = A_f / (1 - p) \quad (13)$$

$$A_g = A_t - A_f \quad (14)$$

$$V_t = A_t \cdot L \quad (15)$$

$$V_f = A_f \cdot L \quad (16)$$

$$V_g = A_g \cdot L \quad (17)$$

Uma vez realizada a conversão da matéria orgânica em biogás, é necessário converter o biogás em energia elétrica por meio de um moto gerador a gás. A potência dessa unidade geradora foi determinada pela Equação 18, em que  $P_{mg}$  é a potência do moto gerador (kVA),  $t_{op}$  é o tempo de uso diário do sistema de 10 h e  $fp$  é o fator de potência de 0,8.

$$P_{mg} = \frac{\sum P_{esterco} + P_{esgoto}}{365 \cdot t_{op} \cdot fp} \quad (18)$$

Os orçamentos dos biodigestores foram feitos por meio de unidades compostas (Apêndice B), seguindo dados do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI). A Tabela 3 mostra os custos por unidade para cada atividade.

Tabela 3 - Orçamento estratificado para um projeto de biodigestor do tipo lagoa coberta.

Atividade	Formulação	Custo (\$)
Limpeza Inicial	$1,5 \cdot L \cdot a$	$1,75 \text{ m}^{-2}$
Escavação	$V_f + (4/35) \cdot V_w$	$24,45 \text{ m}^{-3}$
Alvenaria	$(a + b) \cdot h + L \cdot \left( b + \sqrt{(a - b)^2 + 4 \cdot h^2} \right) + 1,515 \cdot V_w^{2/3}$	$31,68 \text{ m}^{-2}$
Revestimento	$(a + b) \cdot h + L \cdot \left( b + \sqrt{(a - b)^2 + 4 \cdot h^2} \right) + 1,515 \cdot V_w^{2/3}$	$17,18 \text{ m}^{-2}$
Pavimentação	$b \cdot L + 0,576 \cdot V_w^{2/3}$	$17,27 \text{ m}^{-2}$
Instalação de membrana	$(a + b) \cdot b + 2 \cdot A_b + P_r \cdot L$	$10,22 \text{ m}^{-2}$
Instalação de tubos de PVC	$(L + 2) \cdot \sqrt{(h/2)^2 + 1}$	$19,28 \text{ m}^{-1}$
Tubulação de biogás	$2 \cdot r$	$5,58 \text{ m}^{-1}$
Limpeza final	$1,5 \cdot L \cdot a$	$0,30 \text{ m}^{-2}$

Para a orçamentação dos grupos geradores, foi utilizada uma planilha com dados de potência e custo (Tabela 4) e uma técnica de programação linear foi aplicada. A combinação de geradores capaz de suprir a demanda do sistema com o mínimo de investimento é selecionada. Os valores em dólares americanos apresentados tanto no capítulo 2 quanto no 3 foram obtidos considerando a variação cambial em 2020: 1 USD = 5 ~ 6 BRL.

Tabela 4 - Dados de potência e custo para geradores de biogás.

Potência (kVA)	Custo (\$)	Potência (kVA)	Custo (\$)
2,5	472,24	12,5	4.400,00
3,5	709,02	20,0	4.700,00
5,0	911,60	37,5	6.500,00
6,5	1.123,39	50,0	8.220,00
8,0	976,06	62,5	8.600,00
10,0	2.000,00	75,0	9.100,00

Fonte: (ALIBABA, 2020; AMAZONAS, 2020).

#### 2.2.4 Modelagem financeira dos sistemas de geração de energia à biomassa

A partir dos dados de geração e investimento dos sistemas, foi possível realizar uma análise financeira. O fluxo de caixa é movimentado pelo investimento inicial, economia de energia elétrica (Equação 19), depreciação dos equipamentos (Equação 20) e manutenção (1% do investimento em equipamentos por ano). O Valor Presente Líquido (*VPL*) é definido pela Equação 21 e o tempo necessário para que o mesmo chegue a zero é considerado o tempo de retorno do investimento, denominado *Payback* Simples (*PBS*) quando desconsiderados os descontos. Quatro casos de simulação foram realizados alterando a vida útil e a inserção ou não da depreciação na metodologia de análise.

$$BGEE = PEE \cdot TEE \quad (19)$$

$$Dp_a = \frac{V_i - V_f}{n} \quad (20)$$

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1+j)^t} \quad (21)$$

Em que: *BGEE* é benefício com a geração de eletricidade (\$ ano<sup>-1</sup>); *PEE* é a eletricidade produzida (kWh ano<sup>-1</sup>); *TEE* é a tarifa de eletricidade (\$ ano<sup>-1</sup>); *V<sub>i</sub>* é o preço de compra do equipamento (\$); *V<sub>f</sub>* é o valor da sucata em \$ (10% do valor inicial); *n* a vida útil de 30 ou

40 anos para o sistema de biogás;  $FC_t$  é o fluxo de caixa no ano  $t$  (\$);  $t$  é o ano correspondente ao fluxo de caixa;  $j$  é a taxa de juros anual (6,5 %) (ENGENHARIA, 2021).

O  $PBS$  pode ser modelado de acordo com o potencial de geração de energia do projeto ( $P$ ). Para isso, quatro modelos foram escolhidos para teste. As formulações são encontradas nas Equações 22 a 25, em que  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  e  $\beta_3$  são as constantes de ajuste, mencionadas anteriormente. O modelo que melhor representa os dados foi escolhido devido ao coeficiente de correlação ajustado ( $\overline{R^2}$ ) e a raiz do erro padrão da média ( $RMSE$ ), que combinados resultaram em uma nota dada pelo *software CurveExpert Professional*.

$$PBS = \beta_0 - \beta_1 \cdot e^{-\beta_2 \cdot P^{\beta_3}} \quad (22)$$

$$PBS = e^{\beta_0 + \beta_1/P + \beta_2 \cdot \ln P} \quad (23)$$

$$PBS = \frac{\beta_0 \cdot \beta_1 + \beta_2 \cdot P^{\beta_3}}{\beta_1 + P^{\beta_3}} \quad (24)$$

$$PBS = P \cdot (\beta_0 + \beta_1 \cdot P^{\beta_3})^{-1/\beta_3} \quad (25)$$

Definido o melhor modelo e considerado um  $PBS$  máximo de 5 anos, estimou-se o potencial mínimo para viabilização do projeto ( $P_{min}$ ). O  $PBS$ , apesar da ampla utilização em franquias, pôde garantir maior disponibilidade de informações para obtenção de modelagens mais precisas. O  $P_{min}$  defini a disponibilidade do recurso para alocação de micro usinas.

## 2.2.5 Otimização do uso de resíduos para alocação de micro usinas de biogás

A formulação do algoritmo de otimização consiste em minimizar a distância das fazendas até o ponto ótimo de implantação das micro usinas (Equação 26) e as restrições de distância máxima e potência mínima, dadas pela Equação 27 e 28, respectivamente.

$$\min \sum_i DFOP_i \quad (26)$$

$$DFOP_i \leq D_{max} \quad (27)$$

$$P_{min} \leq \sum_i P_i \quad (28)$$

Em que:  $i$  é o índice de representação das unidades agrícolas;  $DFOP_i$  é a distância das fazendas até o ponto ótimo;  $P_i$  é o potencial de geração das fazendas;  $D_{max}$  é a distância máxima entre a fazenda e o ponto ótimo de instalação no status atual do procedimento.

A Figura 3 apresenta o fluxograma do processo de otimização do algoritmo determinístico construtivo para alocação de micro usinas. Segue a descrição das etapas:

- (i) Os dados de entrada das propriedades rurais são lidos e um vetor  $F$  com valores unitários é criado. O vetor  $F$  controla a seleção de fazendas. Após cada seleção, zero é atribuído à posição correspondente à fazenda em  $F$ .
- (ii) A fazenda com maior potencial energético é sempre a primeira a ser selecionada para compor a cooperativa. Após a seleção, o potencial é armazenado na variável potencial total  $TP$  e zero é inserido na posição correspondente à fazenda no vetor potencial  $P$ .
- (iii) No ponto ideal  $OP$  da planta, os dados geográficos,  $GD$ , da primeira fazenda selecionada são inicialmente atribuídos. As distâncias de outras fazendas até este ponto são calculadas e a mais próxima é selecionada.
- (iv) Tendo atingido a restrição de distância máxima ( $D_{max}$ ), o  $TP$  é incrementado pelo potencial da fazenda selecionada e o  $OP$  é recalculado por meio de uma média aritmética ponderada pelo potencial.  $D_{max}$  é a distância média das  $np$  fazendas ao centro de potência da área de estudo. Este centro de potência é a média dos dados geográficos (latitude e longitude) ponderados pelo potencial. Vale ressaltar que os dados geográficos das propriedades correspondem à localização da sede.
- (v) Após inserção na cooperativa e realização dos demais cálculos, nos vetores  $P$  e  $F$  são inseridos zero nas posições correspondentes à propriedade rural, a fim de evitar dupla seleção.
- (vi) O algoritmo permanece em ciclo até que  $TP$  alcance  $P_{min}$ . Assim, os dados  $TP$  e  $OP$  da micro usina são armazenados nos vetores  $PP$  e  $PPOP$ , respectivamente. Depois disso, é iniciado o processo de implantação de uma nova micro usina.

Algumas considerações foram inseridas no processo para evitar possíveis erros de convergência e também para torná-lo mais consistente, tais como:

- (i) Adicionar um valor alto (10.000 km) na posição do vetor  $DFOP$  correspondente a uma fazenda que já foi selecionada. Esse artifício impede que esta propriedade seja sempre detectada e que o algoritmo não convirja para a seleção de outra. O critério de parada é implementado nesta fase e o processo termina quando todas as posições de  $DFOP$  são iguais a 10.000 km.
- (ii) Aceitar a criação de plantas com potenciais abaixo do mínimo quando todas as fazendas já estiverem alocadas. Após o término do processo mostrado na Figura 3, essas plantas com potenciais inviáveis são desfeitas e as propriedades que a elas pertenciam são realocadas nas usinas mais próximas.

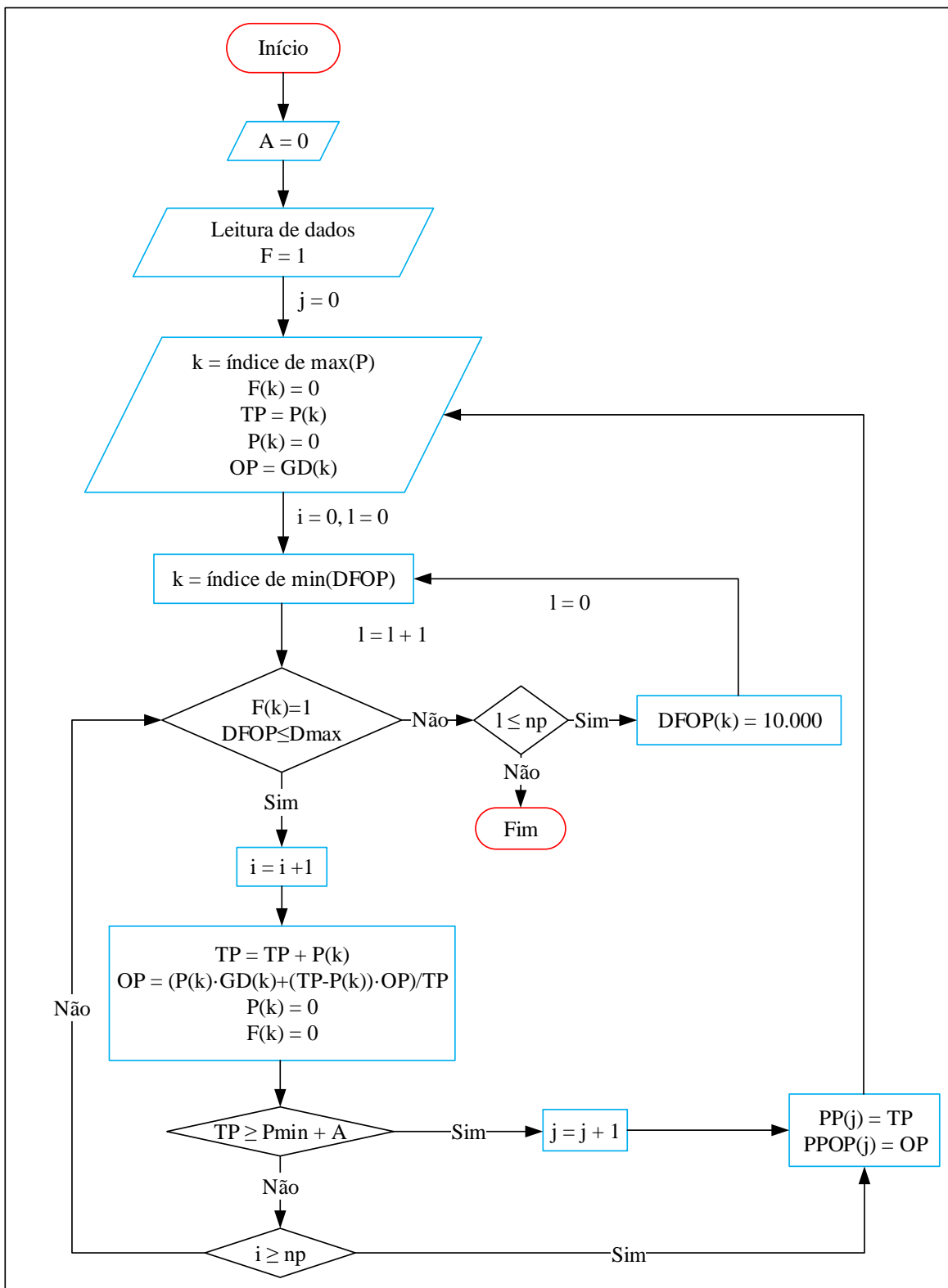


Figura 3 - Fluxograma do processo de alocação de micro usinas.

Todos os casos de simulação que possibilitaram a alocação das plantas foram apresentados em mapas com as demarcações do município de estudo, para uma melhor avaliação da distribuição espacial e variabilidade no processo. Esse mapeamento foi realizado usando o software de georreferenciamento gratuito denominado QGIS.

### 2.2.6 Modelagem do potencial energético

A fim de relacionar o potencial energético ( $P$ ) com o consumo de eletricidade anual ( $C_e$ ) e o balanço financeiro ( $B_f$ ) da propriedade rural, foi proposto um modelo matemático de superfície de resposta de segunda ordem, conforme Equação 29 (PISANI JUNIOR; CASTRO; COSTA, 2018). Esse modelo permite estimar a quantidade de energia que pode ser produzida em fazendas com menos informações. O modelo é considerado válido para cenários semelhantes a este estudo e  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$  e  $\beta_5$  foram suas constantes de ajuste.

$$P = \beta_0 + \beta_1 \cdot C_e + \beta_2 \cdot B_f + \beta_3 \cdot C_e^2 + \beta_4 \cdot B_f^2 + \beta_5 \cdot C_e \cdot B_f \quad (29)$$

Além disso, como neste trabalho discutiu-se orçamentação e investimento em sistemas de geração, uma análise de variância foi realizada para avaliar as perspectivas de investimento de produtores rurais em energia renovável. Os tratamentos investigados foram os graus de instrução dos produtores. Implementaram-se dois casos de simulação (CS):

- (i) CS-A: a influência direta do nível de escolaridade na perspectiva de investimento, ou seja, sem relação com nenhuma outra variável.
- (ii) CS-B: a influência do nível de escolaridade na constante de ajuste  $\beta_1$  dos seguintes modelos (Equações 30 e 31), que relacionam a perspectiva de investimento ( $I_p$ ) com o consumo de energia ( $C_e$ ) da propriedade rural.

$$I_p = \beta_0 + \beta_1 \cdot C_e \quad (30)$$

$$I_p = \beta_1 \cdot C_e \quad (31)$$

As simulações foram realizadas seguindo um delineamento completamente causalizado ao nível de 5% de significância, seguindo a metodologia apresentada na Tabela 5. As formulações de alguns dos parâmetros calculados, como soma de quadrados e correção, podem ser verificadas nas Equações 32 a 35.

Tabela 5 - Análise de variância para um delineamento completamente causalizado.

Causas da variação	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	F calculado
Tratamentos	$I - 1$	$SS_{trat}$	$\frac{SS_{trat}}{I - 1}$	$\frac{MS_{trat}}{MS_{res}}$
Resíduo	$k - I$	$SS_{res}$	$\frac{SS_{res}}{n - I}$	
Total	$k - 1$	$SS_{total}$		

Fonte: (CECON et al., 2012).

$$SS_{total} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^r x_{ij}^2 - C \quad (32)$$

$$SS_{trat} = \sum_{i=1}^I \frac{T_i^2}{r_i} - C \quad (33)$$

$$SS_{res} = SS_{total} - SS_{trat} \quad (34)$$

$$C = \frac{1}{\sum_{i=1}^I r_i} \left( \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^r x_{ij} \right)^2 \quad (35)$$

Em que:  $I$  é o número de tratamentos;  $k$  é o número de amostras;  $r_i$  é o número de repetições do tratamento  $i$ ;  $x$  é a perspectiva de investir em energia renovável (\$);  $T_i$  é a soma dos investimentos no tratamento  $i$ ;  $C$  é a correção.

## 2.3 Resultados

### 2.3.1 Potencial energético

Aplicada à metodologia de conversão de energia proposta neste trabalho, foi encontrado um potencial energético total de 1,913 GWh ano<sup>-1</sup> no município de estudo. 99,533% (1,904 GWh ano<sup>-1</sup>) desse potencial vem do esterco animal. O potencial restante de 8,933 MWh ano<sup>-1</sup> (0,467%) está relacionado ao esgoto. A Figura 4a mostra a distribuição das fazendas avaliadas em quatro faixas de potencial de geração. Constata-se que 51 fazendas, uma parcela correspondente a 45,94% do total, têm capacidades de geração entre 1 e 10 MWh ano<sup>-1</sup>. Cerca de 21 (18,92%), 36 (32,43%) e 3 (2,70%) fazendas têm potenciais energéticos abaixo de 1 MWh ano<sup>-1</sup>, entre 10 e 100 MWh ano<sup>-1</sup> e acima de 100 MWh ano<sup>-1</sup>.

O potencial energético do esterco animal distribuído de acordo com sua origem segue na Figura 4b. 94,86% do potencial está relacionado à produção de biogás a partir de esterco bovino (1,806 GWh ano<sup>-1</sup>). Estrume de ovinos e caprinos, aves, suínos, búfalos, e muares e equinos contribuíram com 0,0605% (1,152 MWh ano<sup>-1</sup>), 0,255% (4,847 MWh ano<sup>-1</sup>), 4,088% (77,854 MWh ano<sup>-1</sup>), 0,203% (3,863 MWh ano<sup>-1</sup>) e 0,533% (10,157 MWh ano<sup>-1</sup>) no potencial de esterco animal, respectivamente. Avaliando a distribuição do potencial de geração de energia elétrica nas fazendas, verifica-se que grande parte está concentrada em apenas quatro empreendimentos agropecuários. Conforme Figura 4c, aproximadamente metade do potencial energético total é alocado em 107 fazendas, enquanto a outra metade

segue em quatro. Cerca de 95% das fazendas têm um pouco mais de 40% do potencial total, vide Figura 4d. Essas informações são relevantes para avaliação da geração distribuída.

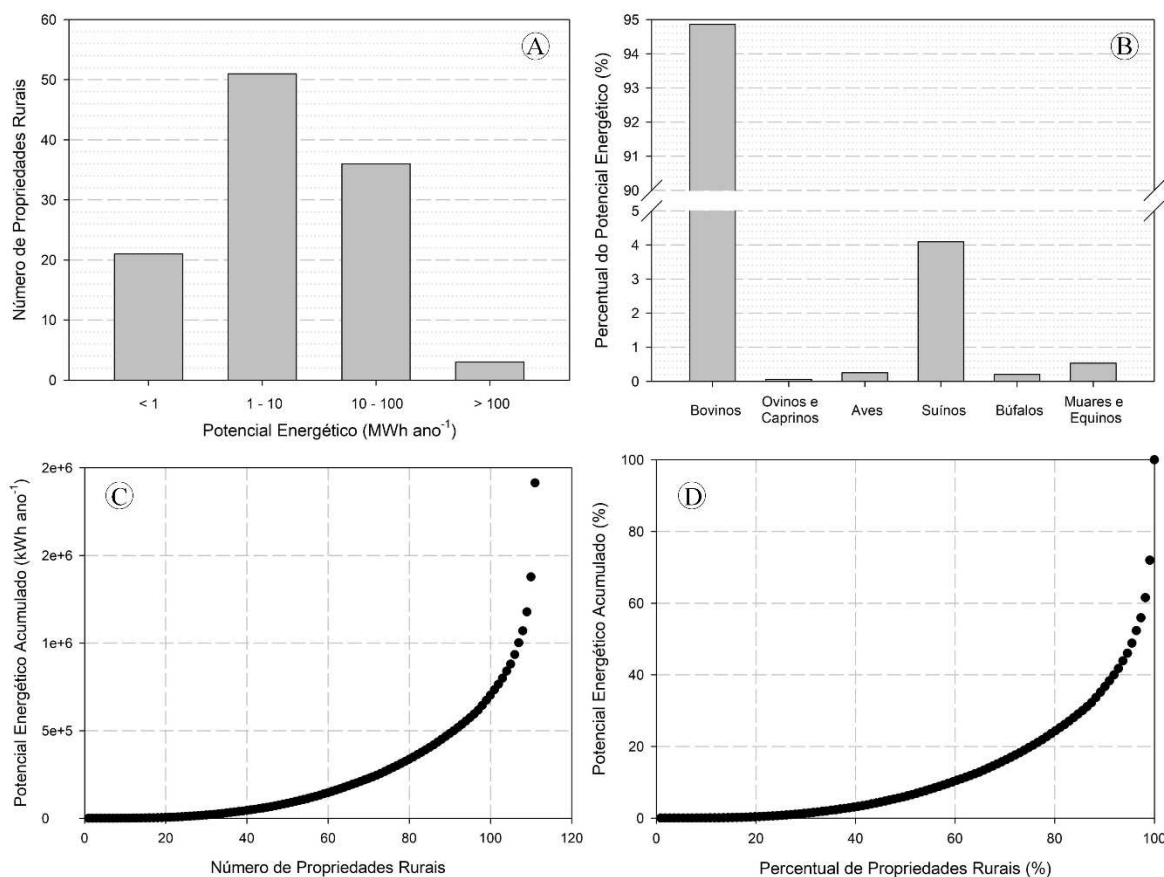


Figura 4 - Potencial energético do município e análise da distribuição nas fazendas.

O potencial médio de acordo com a origem do esterco foi de  $16.273,96 \pm 53.327,34$  kWh ano<sup>-1</sup> (gado),  $10,38 \pm 54,99$  kWh ano<sup>-1</sup> (ovinos e caprinos),  $43,67 \pm 62,81$  kWh ano<sup>-1</sup> (aves),  $701,39 \pm 6.240,86$  kWh ano<sup>-1</sup> (suínos),  $34,80 \pm 366,68$  kWh ano<sup>-1</sup> (búfalos) e  $91,51 \pm 182,29$  kWh ano<sup>-1</sup> (muare e equinos). A média dos potenciais do esgoto e total foi de  $80,48 \pm 72,76$  kWh ano<sup>-1</sup> e  $17.236,20 \pm 55.137,63$  kWh ano<sup>-1</sup>, respectivamente. O resultado é apresentado por média e desnível na distribuição de energia é validado nos desvios-padrão.

### 2.3.2 Sistema de geração de energia a biogás

Os sistemas de geração de energia elétrica dimensionados foram compostos por biodigestores e geradores movidos a biogás. A Tabela 6 mostra os dados médios de todos os parâmetros construtivos de um biodigestor que seria típico de fazendas de um município com as características do estudado. O comprimento ( $L$ ) e o raio ( $r$ ), que são os dados de entrada para efetuação dos cálculos de dimensionamento, apresentaram valores médios de

7,25 ± 8,18 e 1,59 ± 0,54 metros, respectivamente. A pequena variabilidade nos dados de  $r$  quando comparada à variabilidade dos dados de  $L$  se deve à limitação de  $r$  na implantação.

Tabela 6 - Parâmetros estimados do biodigestor para fazendas de pequeno e médio porte.

Variável	Valor	Variável	Valor
$L$ (m)	7,25 ± 8,18	$A_f$ (m <sup>2</sup> )	4,89 ± 3,46
$r$ (m)	1,59 ± 0,54	$A_b$ (m <sup>2</sup> )	3,26 ± 2,30
$P$ (m)	9,96 ± 3,37	$A_t$ (m <sup>2</sup> )	8,15 ± 5,76
$b$ (m)	1,88 ± 0,64	$V_f$ (m <sup>3</sup> )	52,54 ± 137,82
$a$ (m)	3,04 ± 1,03	$V_b$ (Nm <sup>3</sup> )	35,05 ± 91,88
$h$ (m)	1,79 ± 0,60	$V_t$ (m <sup>3</sup> )	87,56 ± 229,71

Quanto aos geradores de biogás, verifica-se que 100% das alocações ocorreram na faixa de potência aparente de 2,5 a 10 kVA (Tabela 7). O gerador mais adaptável à composição dos sistemas (40,25%) foi de 8 kVA, seguido pelo de 2,5 kVA (39,62%), 5 kVA (10,69%) e 3,5 (9,43%). Os demais equipamentos disponíveis não foram implantados devido à baixa relação custo benefício. A potência média teórica dos geradores dimensionados foi de 5,90 ± 18,88 kVA, enquanto a potência média instalada foi de 7,27 ± 18,71 kVA.

Tabela 7 - Dados de alocação de geradores em sistemas de geração de energia a biogás.

Gerador (kVA)	Percentual (%)	Gerador (kVA)	Percentual (%)
2,5	39,62	12,5	0,00
3,5	9,43	20,0	0,00
5,0	10,69	37,5	0,00
6,5	0,00	50,0	0,00
8,0	40,25	62,5	0,00
10,0	0,00	75,0	0,00

A orçamentação do biodigestor através das unidades compostas e do moto gerador pelos custos unitários resultaram em custos médios de US\$ 7.130,98 ± 12.697,48, biodigestor, e US\$ 1.066,23 ± 2.268,22, gerador. Assim, o custo médio de um sistema para regiões com a mesmas condições do ambiente de estudo seria de US\$ 8.167,21 ± 14.950,34.

### 2.3.3 Análise financeira e modelagem matemática

Neste trabalho, foram adotados quatro casos de análise financeira: (i) caso de simulação 1 (CS1): vida útil de 40 anos sem depreciação; (ii) caso de simulação 2 (CS2):

vida útil de 40 anos com depreciação; (iii) caso de simulação 3 (CS3): vida útil de 30 anos sem depreciação e (iv) caso de simulação 4 (CS4): vida útil de 30 anos com depreciação. A Tabela 8 mostra os dados de *VPL* e *PBS* para cada um desses casos. O *VPL* diminuiu de  $70.353,77 \pm 239.799,33$  para  $43.543,46 \pm 163.121,06$  de CS1 para CS4, tendo em vista a redução da vida útil e a inserção de depreciação de equipamentos.

Tabela 8 - Dados de análise financeira de sistemas de geração para casos de simulação.

Caso de simulação	<i>VPL</i> (\$)	<i>PBS</i> (anos)	Sistemas viáveis (%)
1	$70.353,77 \pm 239.799,33$	$9,07 \pm 7,37$	82,88
2	$62.976,28 \pm 226.413,71$	$9,73 \pm 7,10$	77,48
3	$50.920,95 \pm 176.502,43$	$8,13 \pm 5,37$	80,18
4	$43.543,46 \pm 163.121,06$	$9,24 \pm 6,00$	72,97

O *PBS* dos sistemas viáveis aumentou (*PBS* menor que a vida útil), em média, de  $9,07 \pm 7,37$  para  $9,73 \pm 7,10$  de CS1 para CS2, devido à inserção da depreciação, e em relação a esses dois casos, em CS3 e CS4 houve uma redução para  $8,13 \pm 5,37$  e  $9,24 \pm 6,00$ , respectivamente. Frente a isso, há uma redução no número de sistemas viáveis, tanto pela redução da vida útil do sistema quanto pelo uso da depreciação na análise, que tem impacto nos dados apresentados. A parcela máxima referente ao número de sistemas viáveis foi de 82,88% (CS1) e a mínima de 72,97% (CS4).

Na Figura 5 são dispostos graficamente os dados de potencial energético pelo *PBS* dos sistemas que apresentaram viabilidade financeira. Verifica-se que não há, graficamente, grande variabilidade entre os casos CS1, CS2, CS3 e CS4 (Figuras 5a, 5b, 5c e 5d, respectivamente). Porém, como mostra a Tabela 8, entre um caso e outro existem diferenças significantes. Assim, os modelos descritos pelas Equações 22, 23, 24 e 25 foram ajustados, os dados para cada caso são mostrados nas Tabelas 9 (CS1), 10 (CS2), 11 (CS3) e 12 (CS4).

Para CS1 (Tabela 9), verifica-se que os modelos tiveram um excelente ajuste aos dados, uma vez que  $\overline{R^2}$  ficou na faixa de 0,930 a 0,948, ou seja, os modelos são capazes de explicar 93 a 94,8% da variação na variável resposta. Além disso, para CS1 o *RMSE* variou de 1,711 a 1,976 anos. Comparando com a média, há um erro padrão na estimativa do *PBS* de 19,53 a 21,82% e com o limite superior um erro entre 10,41 e 12,04%. O modelo com maior pontuação indicado pelo *CurveExpert* é o formulado pela Equação 22 (nota: 925).

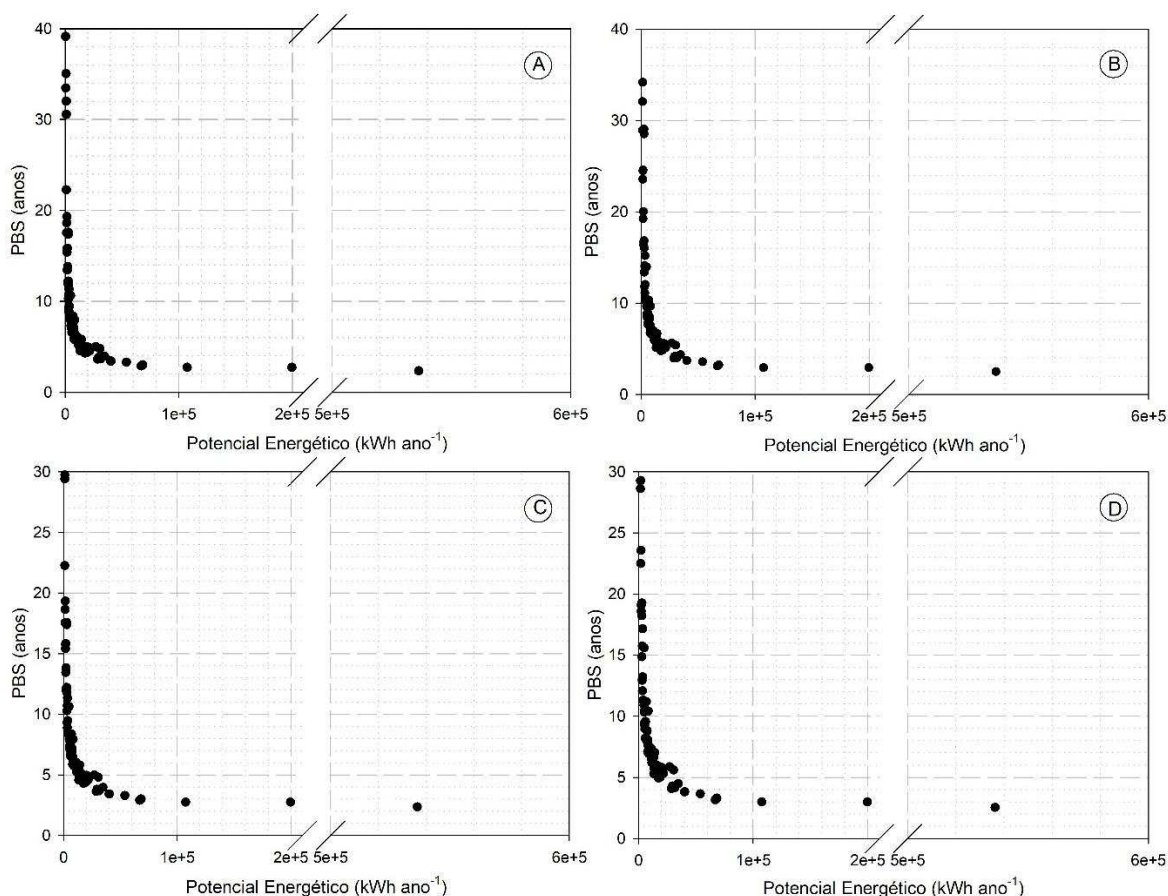


Figura 5 - Disposição dos dados de potencial de energia pelo PBS para os quatro casos de simulação (a) CS1, (b) CS2, (c) CS3 e (d) CS4.

Tabela 9 - Constantes de ajuste e análises estatísticas para o caso de simulação 1 (CS1).

Modelo	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\overline{R^2}$	$RMSE$	Nota
Eq. 22	4,35E+01	3,97E+01	1,01E+04	-1,34E+00	0,947835	1,710891	925
Eq. 23	7,73E+00	3,47E+01	-6,49E-01	-	0,929629	1,975944	905
Eq. 24	5,95E+01	1,06E+04	3,76E+00	1,38E+00	0,946232	1,736973	924
Eq. 25	-8,87E-01	1,43E+00	5,69E-02	-	0,932666	1,932835	908

No CS2 (Tabela 10), os modelos apresentaram  $\overline{R^2}$  inferior aos do CS1, mas com variação entre 0,884 e 0,893 e capacidade de explicar a variação da variável resposta de 88,4 a 89,3%, o que é satisfatório. O  $RMSE$  aumentou em relação ao CS1 e ficou na faixa de 2,370 a 2,451 anos e isso corresponde a um erro padrão de 24,35 a 25,19% da média e de 14,08 a 14,56% do limite superior do intervalo de ocorrência do  $PBS$  para CS2. Os modelos com as melhores avaliações para este caso de simulação foram aqueles descritos pela Equações 22 e 24 (nota: 860).

Tabela 10 - Constantes de ajuste e análises estatísticas para o caso de simulação 2 (CS2).

Modelo	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\overline{R^2}$	<i>RMSE</i>	Nota
Eq. 22	4,43E+01	4,05E+01	3,53E+04	-1,43E+00	0,892528	2,370039	860
Eq. 23	6,65E+00	8,75E+02	-5,19E-01	-	0,883679	2,450780	851
Eq. 24	7,16E+01	2,07E+04	3,69E+00	1,42E+00	0,892244	2,373174	860
Eq. 25	-1,97E+00	1,16E+00	1,65E-01	-	0,887461	2,410615	855

Os  $\overline{R^2}$  dos modelos para o CS3 ficaram na faixa de 0,841 a 0,934 (84,1 a 93,4%). Paralelamente a isso, o *RMSE* apresentou variação entre 1,529 e 2,360 anos. O modelo na Equação 25 foi o mais desatualizado em relação aos demais nos dois parâmetros estatísticos (Tabela 11). Comparando os erros com a média e o limite superior da faixa de ocorrência do *PBS*, foram obtidos os percentuais de 18,81 a 29,03% e 11,33 a 17,48%, respectivamente. O modelo apresentado pela Eq. 22 teve a nota mais alta (909) para CS3.

Tabela 11 - Constantes de ajuste e análises estatísticas para o caso de simulação 3 (CS3).

Modelo	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\overline{R^2}$	<i>RMSE</i>	Nota
Eq. 22	3,21E+01	2,84E+01	1,78E+04	-1,36E+00	0,934201	1,52912	909
Eq. 23	8,12E+00	-1,36E+02	-6,91E-01	-	0,913906	1,73904	887
Eq. 24	3,30E+01	2,80E+05	4,02E+00	1,68E+00	0,926220	1,6192	900
Eq. 25	-1,42E-01	2,57E+00	-2,19E-01	-	0,841414	2,36023	812

Por fim, no CS4 (Tabela 12) os modelos apresentam a  $\overline{R^2}$  entre 0,95608 e 0,95845, ou seja, tiveram um ajuste maior aos dados quando comparados aos demais casos de simulação. O *RMSE* variou de 1,238 a 1,281 anos. A dispersão dos parâmetros estatísticos entre os modelos foi praticamente insignificante neste caso. Os dados médios para  $\overline{R^2}$  e *RMSE* foram  $0,957 \pm 0,001$  e  $1,263 \pm 0,021$ , respectivamente. O percentual de erro padrão em relação ao *PBS* médio foi de 13,669%. O modelo de maior pontuação em CS4 foi o da Equação 25 (nota: 936).

Tabela 12 - Constantes de ajuste e análises estatísticas para o caso de simulação 4 (CS4).

Modelo	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\overline{R^2}$	<i>RMSE</i>	Nota
Eq. 22	1,10E+03	1,10E+03	1,58E+02	-1,18E+00	0,956101	1,280746	933
Eq. 23	4,91E+00	1,80E+03	-3,37E-01	-	0,957466	1,252565	934
Eq. 24	1,82E+03	9,73E+01	3,60E+00	1,18E+00	0,956083	1,281008	933
Eq. 25	-3,82E+00	8,99E-01	2,72E-01	-	0,958450	1,237985	936

Após o ajuste de todos os modelos, através deles foram determinados os potenciais mínimos para que a implantação dos sistemas de geração tivessem um *payback* simples de no máximo 5 anos. Os dados encontrados por meio de cálculo numérico em kWh por ano são apresentados na Tabela 13. As médias dos potenciais mínimos para os casos de simulação foram de  $13.066 \pm 448$  (CS1),  $17.763 \pm 406$  (CS2),  $12.882 \pm 647$  (CS3) e  $21.442 \pm 901$  (CS4). As médias desses potenciais para os modelos foram  $16.122 \pm 3.658$  (Eq. 22),  $16.284 \pm 4.939$  (Eq. 23),  $15.928 \pm 3.844$  (Eq. 24) e  $16.820 \pm 4.011$  (Eq. 25).

Tabela 13 - Potenciais energéticos mínimos para viabilizar os sistemas de geração de biogás.

Modelo	CS1	CS2	CS3	CS4
Eq. 22	13.226	17.455	13.112	20.696
Eq. 23	12.467	17.995	12.165	22.507
Eq. 24	13.037	17.388	12.591	20.694
Eq. 25	13.533	18.215	13.660	21.873

### 2.3.4 Alocação de micro usinas de biogás

A partir dos potenciais mínimos, as alocações de micro usinas foram feitas no município de estudo para as 16 combinações entre caso de simulação e modelo. A Tabela 14 mostra o potencial médio das plantas para cada combinação. Verifica-se que os resultados para CS1 ( $36.792 \pm 76.720$  para  $38.264 \pm 77.981$ ) e CS3 ( $36.792 \pm 76.737$  para  $38.264 \pm 77.981$ ) foram semelhantes e isso está ligado ao baixo impacto da redução da vida útil quando a depreciação para este tipo de sistema é desconsiderada na metodologia de análise financeira. Há uma diferença entre CS1 e CS3 apenas para o modelo da Equação 24. Porém, quando utilizada a depreciação, a redução na vida útil gera um impacto significativo, conforme CS2 ( $46.663 \pm 84.471$  para  $46.663 \pm 84.478$ ) e CS4 ( $51.708 \pm 87.951$  para  $54.663 \pm 89.919$ ). O impacto dos modelos em cada caso de simulação não foi tão significativo e isso está relacionado à baixa variabilidade dos potenciais mínimos discutidos anteriormente.

Tabela 14 - Potencial médio de usinas de biogás para cada combinação.

Modelo	CS1	CS2	CS3	CS4
Eq. 22	$37.514 \pm 77.371$	$46.663 \pm 84.478$	$37.514 \pm 77.371$	$51.708 \pm 87.951$
Eq. 23	$36.792 \pm 76.720$	$46.663 \pm 84.471$	$36.792 \pm 76.737$	$54.663 \pm 89.917$
Eq. 24	$37.514 \pm 77.371$	$46.663 \pm 84.478$	$36.792 \pm 76.720$	$53.377 \pm 90.206$
Eq. 25	$38.264 \pm 77.981$	$46.663 \pm 84.471$	$38.264 \pm 77.981$	$54.663 \pm 89.919$

A baixa variabilidade no potencial energético das plantas alocadas em cada caso de simulação está ligada à baixa variabilidade no número de micro usinas implementadas, vide Tabela 15. Para CS1 o número de plantas variou entre 50 e 52, em CS2 foi único e igual a 41, em CS3 na faixa de 50 a 52 e em CS4 de 35 a 37. Assim, uma forma complementar de avaliar a diferença dessas condições de simulação com a mesma média foi por meio do desvio padrão, como, por exemplo, em CS2 entre a Equações 22 e 23 (Tabela 14). Ressalta-se que o potenciais médios das plantas alocadas foram superiores aos potenciais mínimos determinados pelos modelos, devido a existência de propriedades com  $PBS \leq 5$  anos.

Tabela 15 - Número de plantas alocadas para cada combinação.

Modelo	CS1	CS2	CS3	CS4
Eq. 22	51	41	51	37
Eq. 23	52	41	52	35
Eq. 24	51	41	52	37
Eq. 25	50	41	50	35

A Tabela 16 mostra o número médio de fazendas implantadas em cada micro usina. Verifica-se que para CS1 este valor varia entre  $2,13 \pm 1,73$  e  $2,22 \pm 1,66$ , em CS2 não há variação dependendo dos modelos e é igual a  $2,71 \pm 2,05$ , em CS3 de  $2,13 \pm 1,73$  a  $2,22 \pm 1,59$  e para CS4 de  $3,00 \pm 2,48$  a  $3,17 \pm 2,42$ . Portanto, no geral, 2,13 a 3,17 fazendas são alocadas por usina e esses dados estão diretamente ligados ao número de fazendas que possuem um potencial energético entre 1 e 10 MWh ano<sup>-1</sup>, conforme mostrado na Figura 4a.

Tabela 16 - Número médio de fazendas implantadas em cada usina de biogás.

Modelo	CS1	CS2	CS3	CS4
Eq. 22	$2,18 \pm 1,85$	$2,71 \pm 2,05$	$2,18 \pm 1,85$	$3,00 \pm 2,48$
Eq. 23	$2,13 \pm 1,73$	$2,71 \pm 2,05$	$2,13 \pm 1,83$	$3,17 \pm 2,39$
Eq. 24	$2,18 \pm 1,85$	$2,71 \pm 2,05$	$2,13 \pm 1,73$	$3,00 \pm 2,48$
Eq. 25	$2,22 \pm 1,66$	$2,71 \pm 2,05$	$2,22 \pm 1,59$	$3,17 \pm 2,42$

Nas Figuras 6 e 7, é possível verificar a distribuição geográfica das centrais alocadas no município de estudo. Na Figura 6 é possível avaliar a influência dos modelos apresentados pela Eq. 22 a 25 (Figuras 6a a 6d) na espacialização dos empreendimentos e a variação devido aos casos de simulação em relação a cada um deles. Na Figura 7, é possível realizar a análise inversa, pois as Figuras 7a a 7d representam os casos de simulação de 1 a 4. Há uma maior influência dos casos de simulação na disposição das plantas quando comparados aos modelos matemáticos, reforçando as informações detalhadas nas tabelas anteriores.

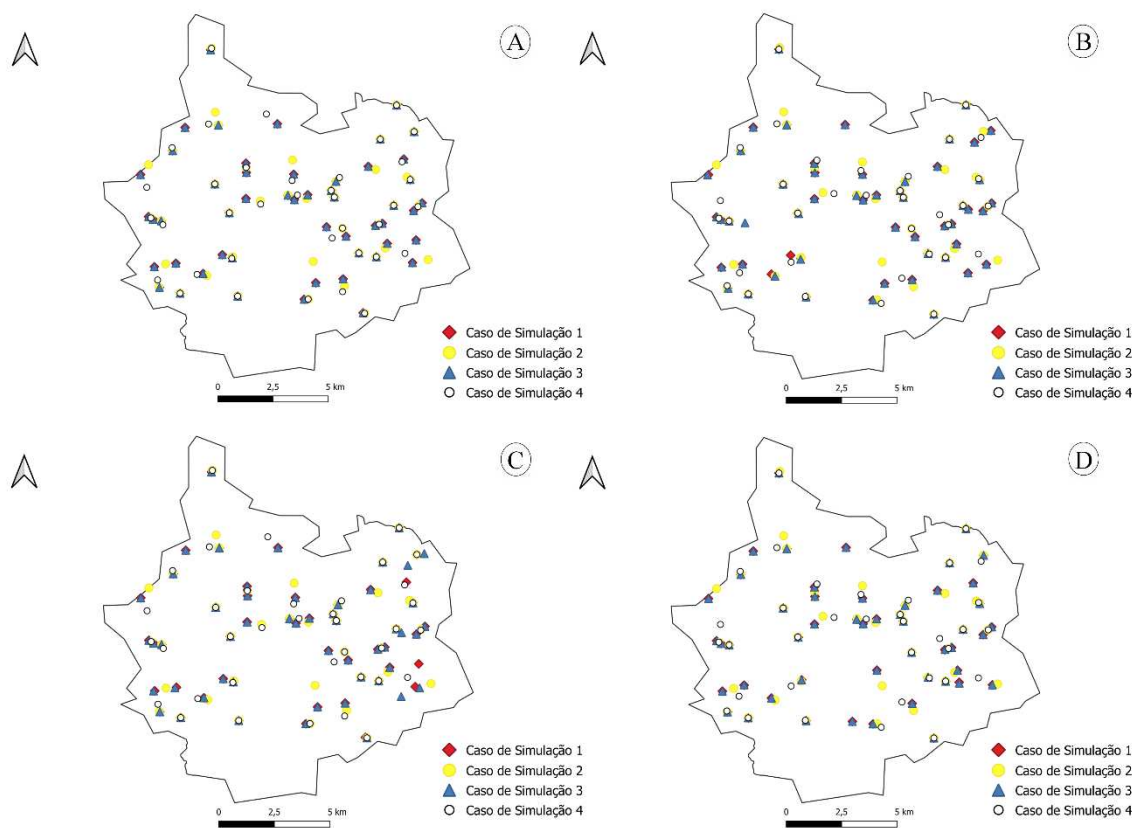


Figura 6 - Distribuição geográfica das micro usinas para os modelos adotados (Eq. 22 a 25).

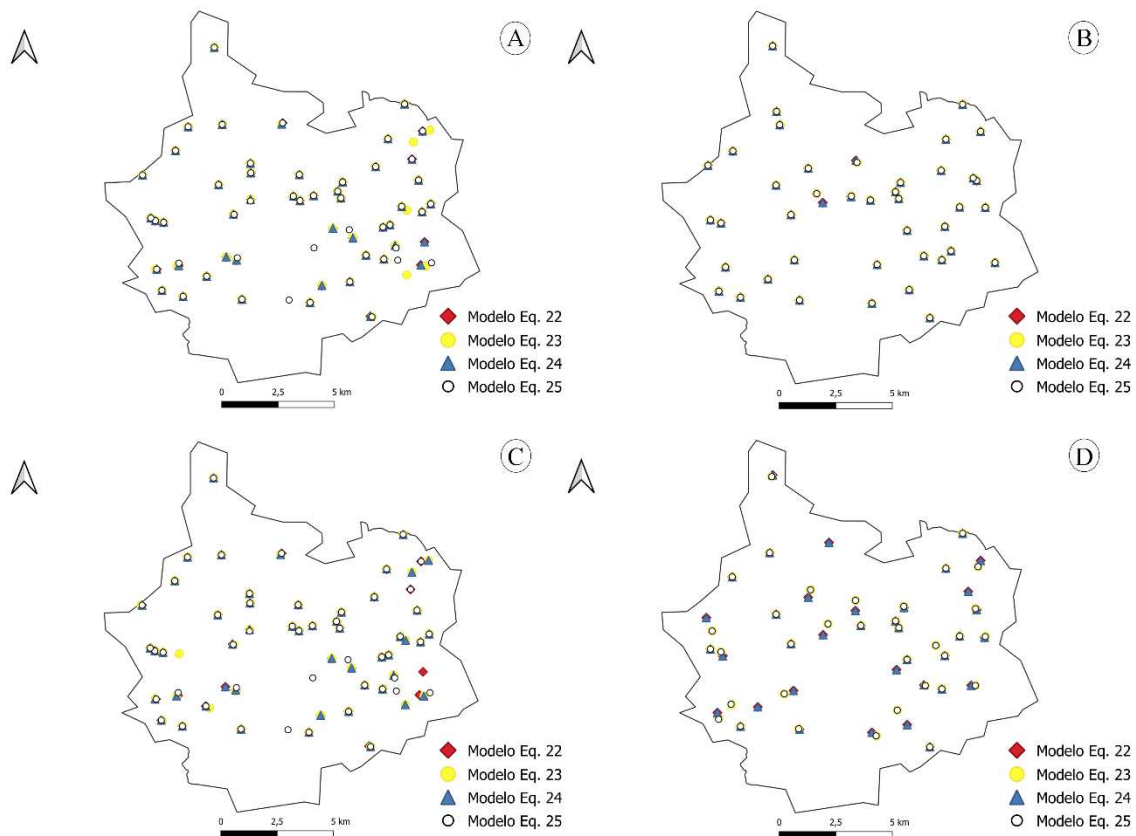


Figura 7 - Distribuição geográfica das micro usinas para os casos de simulação (CS1 a CS4).

### 2.3.5 Modelo de potencial de energia e análise de perspectiva de investimento

Para simplificar a estimativa do potencial energético das fazendas, o modelo descrito pela Eq. 29 foi ajustado aos dados coletados no município de estudo. A Tabela 17 mostra as constantes de ajuste e os parâmetros estatísticos. O  $\overline{R^2}$  foi de aproximadamente 0,924, ou seja, o modelo é capaz de explicar 92,4% da variação da variável resposta. O *RMSE* ficou em torno de 15.200 kWh ano<sup>-1</sup>, valor alto, porém justificado pela grande variabilidade dos dados e pela discrepância entre o potencial médio (17.236,20 kWh ano<sup>-1</sup>) e o máximo (536.390 kWh ano<sup>-1</sup>). Além disso, o modelo fornecido foi comparado com um modelo constante e a estatística de teste F foi igual a 270 (p-valor: 3E-58), isto é, a hipótese de nulidade (modelo constante) é rejeitada.

Se as constantes de ajuste  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$ ,  $\beta_4$  e  $\beta_5$  fossem retiradas do modelo, já que o p-valor de cada uma delas é maior que 5% de significância, teríamos um modelo com apenas  $\beta_0$ . Conforme já avaliado com o teste estatístico F, um modelo constante não é interessante para este caso e isso pode ser reafirmado após realização de um novo ajuste considerando apenas esta constante de ajuste. Os resultados encontrados para esta modificação no modelo foram  $\beta_0 = 17.236$  kWh ano<sup>-1</sup> e *RMSE* = 55.100 kWh ano<sup>-1</sup>. O *RMSE* foi 3,625 vezes superior ao do modelo completo (Equação 29).

Tabela 17 - Dados do modelo para previsão do potencial de energia.

Constantes de ajuste	Estimativa	Estatística de teste t	p-valor
$\beta_0$	5.948,9	2.038,3	0,004303
$\beta_1$	0,29102	0,28458	0,30884
$\beta_2$	0,292989	0,041614	0,18691
$\beta_3$	6,7383E-06	8,1744E-06	0,41163
$\beta_4$	-1,9774E-07	1,1319E-07	0,95053
$\beta_5$	-4,4497E-07	2,4208E-06	0,9724
Número de observações: 111		Número de graus de liberdade: 105	
<i>RMSE</i> : 1,52E+04		$\overline{R^2}$ : 0,924	
Estatística F em relação ao modelo constante: 270			p-valor: 3E-58

Por fim, avaliou-se a influência do grau de escolaridade dos produtores rurais em sua perspectiva de investimento em energias renováveis. As Tabela 18 e Tabela 19 mostram os dados para a análise de variância dos casos de simulação CS-A e CS-B. Para o CS-A, foi aceita a hipótese de nulidade, que diz que o nível de escolaridade não influencia diretamente

na perspectiva de investimento em sistemas de geração para a fazenda. Em resumo, o F calculado para CS-A foi de aproximadamente 1,7176, ou seja, inferior ao F crítico de 2,9738 tabulados ao nível de 5% de significância, o que resultou em um p-valor em torno de 0,2747 (27,47% de probabilidade > 5% de significância).

Tabela 18 - Dados da análise de variância para CS-A.

Causas da variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	F calculado
Tratamentos	8	9,8451E+08	1,2307E+08	1,7176
Resíduo	102	7,3083E+09	7,1648E+07	
Total	110	8,2930E+09		

Para o CS-B, a hipótese de nulidade foi rejeitada, visto que houve impacto significativo do nível de escolaridade na relação entre a perspectiva de investimento e o consumo de energia elétrica. No CS-B o F calculado foi de 14,1435, ou seja, superior ao F crítico de 4,9503 tabulado ao nível de 5% de significância, o que resultou em um p-valor de 0,000856 (0,0856% de probabilidade < 5% de significância). Portanto, apenas o conhecimento de uma determinada fonte e seu impacto positivo no meio ambiente não são suficientes para a tomada de decisão de investimento em sistemas de geração. Esta decisão de implementação é fortemente influenciada pelo impacto financeiro que o projeto proporciona ao produtor e isso está relacionado à sua economia de energia elétrica.

Tabela 19 - Dados da análise de variância para CS-B.

Causas da variação	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	F calculado
Tratamentos	5	83,2111	16,6423	14,1435
Resíduo	6	7,0601	1,1768	
Total	11	90,27055		

## 2.4 Discussão

O SINtegre é um portal colaborativo brasileiro que integra gestão da informação e relacionamento em um único canal de comunicação. Todos os produtos e sistemas existentes na área de acesso controlado do site do Operador Nacional do Sistema (ONS) e no Cadastro de Dados para Relacionamento Externo (CDRE) estão disponíveis neste portal. A Tabela 20 mostra os dados de carga e geração do Subsistema Sudeste/Centro-Oeste em 2019, onde as

siglas SE/CO, MG, TE/MG e TE/MG (Biomassa) referem-se ao Subsistema Sudeste/Centro-Oeste, estado de Minas Gerais (MG), termelétrica em MG e termelétrica em MG cujo combustível é biomassa, respectivamente (ONS, 2020).

Tabela 20 - Dados de geração e carga para o Subsistema Sudeste/Centro-Oeste em 2019.

Mês	Carga (GWh)	Geração (GWh)				
		SE/CO	MG	TE/MG	TE/MG (Biomassa)	Solar
1	32,176	30,316	4,983	128	27	117
2	28,258	27,446	4,506	268	68	90
3	30,188	28,601	4,005	289	118	93
4	29,116	27,940	3,969	295	264	89
5	29,074	26,636	3,423	391	384	90
6	26,787	24,407	3,011	381	379	90
7	27,146	25,051	3,742	515	415	99
8	27,600	26,282	4,836	615	436	106
9	28,383	27,941	5,901	577	399	119
10	30,303	30,159	6,432	655	414	124
11	28,550	27,077	5,421	552	340	104
12	28,825	29,989	5,493	352	181	115

Fonte: (ONS, 2020).

Pode-se verificar, na Tabela 20, que as cargas nas regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil foram superiores às gerações em 11 dos 12 meses avaliados em 2019. Nesse ano, a carga e a geração foram em média iguais a  $28.867,20 \pm 1.491,26$  e  $27.653,75 \pm 1.918,52$  GWh por mês, ou seja, havia um déficit aproximado de 1.213,45 GWh por mês, exigindo intercambialidade de potência ativa com os demais subsistemas do sistema interligado nacional. Assim, o incentivo às fontes alternativas é muito relevante, principalmente nesta região do país, onde está localizado o município de estudo. O déficit de geração apontado pelos dados do SINtegre pode ser resolvido com a implantação de micro usinas, conforme proposto neste trabalho e o potencial energético ( $1,913 \text{ GWh ano}^{-1}$ ), no caso de um município pequeno, foi considerável.

Minas Gerais teve uma geração média de  $4.643,50 \pm 1.049,13$  GWh por mês em 2019, sendo as termelétricas responsáveis por  $418,17 \pm 163,05$  GWh por mês, participação correspondente a 9% do total. As termelétricas são conhecidas pelo alto custo operacional e

pela emissão de gases poluentes, principalmente quando movidas a combustíveis fósseis. Porém, em Minas Gerais, 68,28% ( $285,42 \pm 148,87$  GWh por mês) da geração termelétrica utilizou biomassa como matéria-prima, com perspectiva de crescimento, já que o estado possui uma grande produção agrícola e o uso adequado dos resíduos pode auxiliar na reposição de gás natural por biogás.

Uma comparação entre a geração de energia solar fotovoltaica e termelétrica a biomassa, indica que a solar, apesar de ser mais popular, apresentou uma geração correspondente a apenas 36,14% da geração da termelétrica a biomassa ( $103 \pm 13$  GWh por mês). Além disso, os sistemas de biomassa se destacam pela produção de energia firme, derivada da capacidade de armazenamento e geração de energia elétrica despachável. Em contrapartida, a geração de energia solar é caracterizada pela produção intermitente, tornando-a não despachável para sistemas *on grid* (conectados à rede). Para armazenamento de energia solar, técnicas como banco de baterias são necessárias, e é mais caro (*off grid*).

Após avaliação do consumo de energia elétrica nas fazendas do município em estudo, obteve-se uma demanda total anual de 1,072 GWh. Este consumo de eletricidade corresponde a aproximadamente 56,04% da capacidade de geração e em média por fazenda foi de  $9.659,16 \pm 27.236,80$  kWh ano<sup>-1</sup>. Cerca de 36% das fazendas não tinham capacidade para atender às suas próprias demandas e a complementação pela concessionária seria em média  $5.224,29 \pm 9.550,60$  kWh ano<sup>-1</sup>. Porém, nos 64% das fazendas que conseguiram suprir o consumo, o excedente de geração foi de  $14.789,05 \pm 36.476,43$  kWh ano<sup>-1</sup>. Portanto, a alocação das plantas e a contribuição mútua entre as propriedades rurais possibilitam a resolução de alguns problemas de déficit, uma vez que existe um superávit médio geral igual a  $7.577$  kWh ano<sup>-1</sup>.

De acordo com os dados de potencial de geração e consumo de energia das fazendas associadas a cada usina, constatou-se que cerca de 77,92 a 83,78% das usinas apresentavam saldos energéticos positivos com superávit que variou de 24.866 a 34.335 kWh ano<sup>-1</sup>. Os balanços energéticos negativos ficaram na faixa de 12.801 a 22.249 kWh ano<sup>-1</sup>. A variação ocorre em função da combinação dos modelos matemáticos e dos casos de simulação. Portanto, a alocação das usinas, além de solucionar o problema financeiro da implantação dos sistemas, proporciona compartilhamento de energia entre os usuários. Muitas vezes, um produtor rural não possui uma quantidade significativa de esterco animal e esgoto, mas consome muita energia no cultivo de uma determinada cultura. A carência e o excedente de resíduos ao ser acoplados podem solucionar impasses energéticos e ambientais; e o benefício econômico pode ser levado para as parcelas de investimento nos empreendimentos.

O balanço energético de Minas Gerais informa que em 2017 o setor agrícola consumiu 3.803 de um total de 60.778 GWh no estado, uma parcela referente a 6,26%. Assim, o incentivo à geração distribuída de energia elétrica no meio rural, além de diversificar a matriz elétrica e promover a segurança energética, reduz a carga sobre os sistemas de geração, transmissão e distribuição. A implantação de usinas pode reduzir a extensão de linhas e aumentar os indicadores de continuidade no fornecimento de energia. Além de desenvolver o município ou região de forma sustentável devido à produção de energia limpa, o desenvolvimento socioeconômico é promovido, dada a necessidade de profissionais capacitados para instalar e manter os sistemas, gerando mais empregos.

Por fim, apesar do município do estudo ser considerado pequeno, houve grande variabilidade nos dados apresentados. Existem fazendas com perfis muito diferentes que influenciam nos potenciais de energia e no consumo de eletricidade. Assim, toda a metodologia proposta neste trabalho é consistente para aplicação em municípios com realidades semelhantes, em que a economia gira em torno da agricultura e pecuária familiar.

## 2.5 Conclusão

- Neste capítulo foi possível converter biomassa em energia e propor alternativas para resolução de problemas de viabilidade financeira de alguns sistemas de geração, bem como simplificar as análises através da criação de modelos e avaliação da possibilidade de investimento do produtor.
- Informações gerais de fazendas de um município típico do estado de Minas Gerais foram coletadas por meio de pesquisa de campo e empregada uma metodologia de conversão de energia que permitiu estimar o potencial de geração de energia de esterco animal e esgoto para esses estabelecimentos rurais.
- O potencial total estimado de geração de energia para o município de estudo foi de 1,913 GWh ano<sup>-1</sup>, sendo 99,533% desse valor referente a esterco animal e 0,467% de esgoto doméstico, resultando em uma média por fazenda de 17.236,20 ± 55.137,63 kWh ano<sup>-1</sup>.
- Cerca de 45,94% das fazendas avaliadas apresentavam potenciais energéticos entre 1 e 10 GWh ano<sup>-1</sup> e no geral a distribuição dos potenciais não foi linear, pois 60% da energia estava concentrada em apenas 5% das fazendas. Quase metade do potencial é proveniente de apenas quatro estabelecimentos rurais.

- Um modelo típico de biodigestor de lagoa coberta para fazendas de um município como São Francisco do Glória teria comprimento de  $7,25 \pm 8,18$  m e raio da bolsa plástica de  $1,59 \pm 0,54$  m. O volume total em média seria de  $87,56 \pm 229,71$  m<sup>3</sup> e o gerador para atender o potencial energético teria que ter pelo menos  $5,90 \pm 18,88$  kVA.
- O custo médio para construção do biodigestor e aquisição de geradores a gás seria de  $7.130,98 \pm 12.697,48$  e  $1.066,23 \pm 2.268,22$  dólares. O custo do sistema de geração ficaria em torno de  $8.167,21 \pm 14.950,34$  dólares e o *payback* simples de 8,13 a 9,73 anos conforme metodologia de análise financeira adotada.
- Os modelos matemáticos propostos para estimar o *PBS* a partir do potencial energético apresentaram um  $\overline{R^2}$  entre 0,8414 e 0,9584 e um *RMSE* de 1,238 a 2,451. O potencial mínimo obtido para que os sistemas tivessem um *PBS* máximo de 5 anos ficou na faixa de 12.165 a 22.507 conforme o caso de simulação.
- As usinas de biogás foram localizadas no município e o potencial médio variou entre 36.792 e 54.663 kWh ano<sup>-1</sup>. O número de usinas e a quantidade de fazendas localizadas por unidade de geração ficou na faixa de 35 a 52 e 2,13 a 3,17, respectivamente. Para cada combinação de modelo matemático e caso de simulação, foi obtido um resultado, sendo o caso de simulação o fator de maior influência.
- Um modelo foi ajustado para prever o potencial energético com base em dados de consumo de eletricidade e lucro das atividades agrícolas. Obteve-se um  $\overline{R^2}$  de 0,924, ou seja, o modelo é capaz de responder a 92,4% das variações da variável resposta.
- Constatou-se que o nível de escolaridade do produtor rural influencia significativamente, ao nível de 5%, na associação entre a perspectiva de investimento em energias renováveis e o consumo de eletricidade, obtido um p-valor de 0,0856%. E, de maneira geral, o município investigado, embora pequeno, apresentava inúmeros perfis de fazendas e produtores rurais, o que torna a metodologia ainda mais consistente e generalizada.
- O potencial de geração é capaz de suprir a demanda de energia de 64% das fazendas analisadas e o excedente médio é de 7.577 kWh ano<sup>-1</sup>. A implantação de unidades geradoras em zonas rurais reduz a sobrecarga do setor elétrico, proporciona segurança energética e o desenvolvimento socioeconômico e sustentável da região. Conclui-se que a alocação de micro usinas é uma abordagem interessante do ponto de vista financeiro para gerenciamento de resíduos reaproveitados energeticamente.

### **3 SOLUÇÕES ENERGÉTICAS RENOVÁVEIS BASEADAS EM INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA PRODUTORES RURAIS: ANÁLISE E PROPOSIÇÃO**

#### **3.1 Introdução**

A demanda de energia está aumentando mundialmente devido ao rápido crescimento populacional, juntamente com a evolução tecnológica e industrial (CAN ŞENER; SHARP; ANCTIL, 2018). As FRE's, que dependem de recursos naturais para gerar um fornecimento de energia sustentável e não poluente, são alternativas promissoras aos recursos energéticos convencionais baseados em combustíveis fósseis, não renováveis (não-FRE), e ganharam expressiva importância nos últimos séculos para superar a crise de energia (GUVEN; SULUN, 2017).

A busca por uma economia de baixo carbono em escala global resultou em um aumento no uso de FRE como alternativas aos combustíveis fósseis, que não são facilmente reabastecidos e se esgotam com o tempo. Por outro lado, as FRE's se reabastecem em um curto período de tempo e estão disponíveis gratuitamente na natureza (ADEDEJI et al., 2020). Entre todas as FRE's, em escala global, os recursos de energias eólica e solar estão abrindo caminho, embora a biomassa tenha sido reconhecida como tendo um potencial na produção de combustível líquido (OLATUNJI et al., 2020).

O processo de conversão da energia eólica ocorre por meio da energia cinética produzida a partir de grandes massas de ar que se movem pela superfície da Terra. A tecnologia de colheita recebe a energia cinética por meio das pás, e a eficiência de sua conversão depende em grande parte da eficiência da interação do rotor com o vento.

Nas últimas décadas, a energia eólica foi considerada uma das FRE's de crescimento mais rápido (GWEC, 2017) e muitos países aproveitam atualmente essa característica para a geração de energia devido à sua natureza gratuita, ecológica e inesgotável (MOHAMMADI et al., 2015). Enquanto os combustíveis fósseis têm um tempo finito pelo qual são abundantes para exploração em um determinado local, a energia eólica não sofre essa restrição. Além dos atributos mencionados, a eficiência da energia eólica é altamente dependente da localização geográfica da turbina eólica. Isso significa que uma localização ruim da tecnologia resulta em uma desvalorização do investimento.

A caracterização do recurso de energia eólica disponível é essencial para sua correta alocação, para determinar a abundância do recurso, sua persistência, disponibilidade e intermitência. A confiabilidade dos resultados das métricas de caracterização é bastante

dependente da resolução, integridade e atualidade dos dados. Por exemplo, uma métrica significativa para medir a confiabilidade da geração de energia é a persistência da densidade da energia eólica. Na caracterização dos recursos eólicos, espera-se que a variação entre os ciclos de *uptime* e *downtime*, também chamada de intermitência, seja determinada para uma região específica do vento. A intermitência integra a disponibilidade e a persistência do recurso eólico.

A energia solar, como recurso energético renovável, é uma espécie de energia limpa e inesgotável. A energia solar é convertida em energia comumente por meio de dois métodos: energia fotovoltaica (ESF) e energia solar concentrada (ESC). Enquanto o primeiro converte a energia solar diretamente em eletricidade, o segundo converte a energia solar primeiro em calor e depois em eletricidade utilizando uma máquina térmica (REN; SUGANTHAN; SRIKANTH, 2015). Nestes dois métodos de conversão, o índice de irradiação solar, que é a quantidade de energia solar que uma superfície recebe por unidade de área e tempo na terra, desempenha um papel vital. O índice de irradiação solar pode ser afetado pela hora do dia, localização espacial e cobertura de nuvem/neblina.

De acordo com a literatura, a irradiação solar pode ser categorizada em três: direta, difusa e global. A Irradiação Normal Direta (IND) é aquela que incide diretamente sobre uma superfície do sol. Por outro lado, a Irradiação Horizontal Difusa (IHD) é a irradiação solar espalhada. Finalmente, a irradiação horizontal global é o agregado do IND e do IHD. Na Figura 8 visualiza-se a representação desses tipos de irradiação solar. Como a energia solar também tem características intermitentes, essa energia não está disponível em uma quantidade explorável em grande escala em todas as partes do mundo, seja para tecnologias de conversão fotovoltaica ou ESC. Assim, uma classificação de adequação baseada na insolação anual, localização e características geoespaciais é necessária para a realização de um projeto de instalação e consequente sucesso no investimento deste tipo de energia (QIU; LI, 2019).

A biomassa consiste em materiais de origem animal e vegetal, ou seja, organismos vivos ou mortos recentemente. Diferente dos combustíveis fósseis, a biomassa não leva milhões de anos para se desenvolver e pode ser considerada o tipo de energia com maior taxa de crescimento. As plantas usam a luz solar, por meio da fotossíntese, para metabolizar o dióxido de carbono atmosférico e a água para crescer. Os animais, por outro lado, crescem obtendo alimento da biomassa. Desta forma, a biomassa é reprodutível e, portanto, considerada renovável e responsável por grande parte da matriz energética (BASU, 2013; WANG; BUI; ZHANG, 2020).

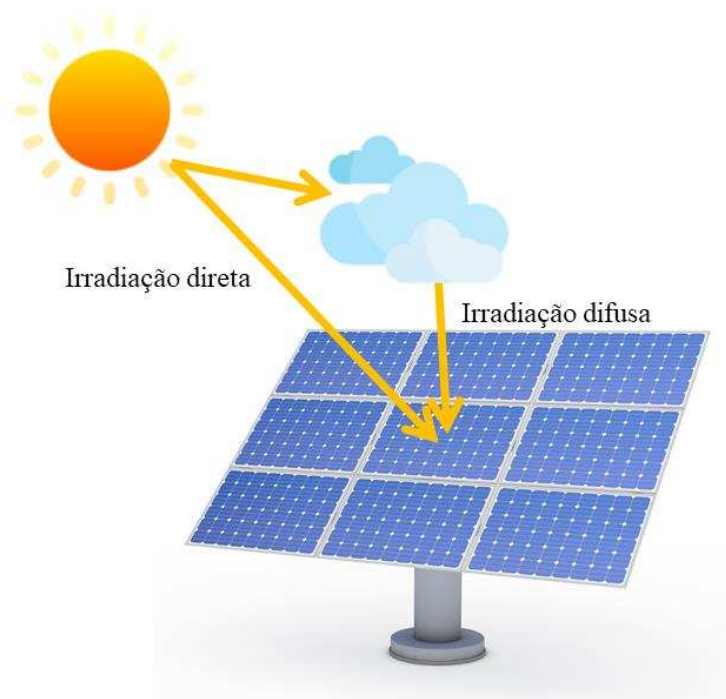


Figura 8 - Irradiação direta e irradiação difusa.

A biomassa é geralmente usada como fonte de calor e para gerar eletricidade a partir de alguns processos. Desta forma, existem três tipos principais de classificações de conversão de biomassa: termoquímica, bioquímica e físico-química. Esses processos de conversão resultam em uma ampla variedade de produtos de energia para a geração de calor, eletricidade e combustível. A conversão termoquímica é, em princípio, a conversão da biomassa em calor por meio da combustão, onde ocorre a decomposição térmica da biomassa e a subsequente combustão dos produtos resultantes do processo primário. A diferença entre os processos termoquímicos está associada à quantidade de oxigênio fornecida ao processo, analisada pelo cálculo estequiométrico, sendo classificada em combustão direta, pirólise e gaseificação (DINKELBACH, 2000).

A via de conversão físico-química da biomassa é aquela que se utiliza para disponibilização de lipídios por meio da compressão e trituração de materiais, extração vegetal e extração de óleos vegetais, que posteriormente sofrerão transformação química. As transformações químicas variam de acordo com o produto final a ser obtido (BRAZA; CRNKOVIC, 2014). Já a via bioquímica de conversão de biomassa é aquela que usa processos biológicos e químicos, incluindo digestão anaeróbia, fermentação/destilação e hidrólise. A fermentação/destilação e a hidrólise são rotas que apresentam as condições mais adequadas para a produção de combustíveis líquidos (etanol) derivados da biomassa, sendo a primeira tradicionalmente utilizada mundialmente para a produção de etanol, a partir de matérias-primas variadas, à base de conteúdos sacarídeos e amidos (SINGH; OLSEN, 2011).

Verifica-se que cada uma das fontes alternativas tem suas particularidades que influenciam diretamente na decisão de implantação de um sistema mais viável. Uma metodologia interessante consiste em utilizar ferramentas que levam em consideração vários indicadores, que variam de acordo com a situação do problema. Em FETANAT et al. (2021), métodos de tomada de decisão baseados em critérios de sustentabilidade foram usados para avaliar a recuperação de energia em tecnologias de tratamento de efluentes. Uma avaliação foi modelada por abordagens de análise de decisão multicritério com base na criação de um índice que visa investigar o consumo de energia e o potencial para implementação de programas de energia renovável no Mar Cáspio iraniano em PAMUČAR et al. (2020).

Essas ferramentas desenvolvidas com base em indicadores podem ser otimizadas por meio da utilização de recursos computacionais, como, por exemplo, redes neurais artificiais. A partir de um conjunto de atributos (entradas) e do resultado da tomada de decisão (saída) é possível treinar uma rede neural multicamadas para previsão da fonte de energia renovável mais viável para o cenário estudado. Trabalhos na literatura utilizam inteligência artificial para solucionar questões energéticas, como melhoria da produção de biogás por meio da reciclagem de resíduos (GOPAL et al., 2021), modelagem cinética e de eficiência em leitos de secagem (PERAZZINI et al., 2020) e energia das ondas do mar (BENTO et al., 2021).

Portanto, neste capítulo foi proposta uma metodologia de tomada de decisão baseada em redes neurais artificiais para previsão de soluções energéticas em função do perfil agro econômico de propriedades rurais. Os objetivos específicos foram:

- investigar o potencial e projetar sistemas de geração de eletricidade com base em fontes alternativas, como biomassa, solar e eólica;
- desenvolver uma ferramenta de decisão baseada em indicadores econômicos, ambientais, físicos e sociais;
- treinar e validar uma rede neural artificial para prever a fonte de energia alternativa mais viável em cada caso.

## **3.2 Material e métodos**

### **3.2.1 Coleta de dados**

Os dados utilizados no desenvolvimento deste capítulo também foram coletados na zona rural do município de São Francisco do Glória, Zona da Mata do estado de Minas Gerais, Brasil. Em suma, trata-se de um município típico da região, com extensa porção não

urbana, correspondente a 76,8% de sua área total, e rendimentos provenientes da agricultura e pecuária. A partir de uma amostragem espacial de propriedades rurais, foram obtidas informações em 111 estabelecimentos agropecuários, informações para dimensionamento e avaliação dos sistemas de geração a partir de três fontes alternativas: biomassa, solar e eólica.

Por meio de um levantamento de campo *in loco* foi elaborado um banco de dados contendo a coordenada geográfica do local, área total, tamanho dos rebanhos, número de moradores, consumo de energia elétrica, custo para manter as atividades e retorno financeiro em cada uma das propriedades (Capítulo 2). A localização do empreendimento foi utilizada para identificar as condições de irradiação solar e eólica nos atlas de potenciais do Centro de Referência em Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB) (CRESESB, 2020).

### 3.2.2 Sistemas de geração a biomassa

Ao contrário dos sistemas de geração solar e eólica que são projetados para atender a uma demanda de energia específica, os sistemas de geração a biomassa foram projetados para que toda a matéria-prima disponível fosse utilizada. Portanto, este sistema pode gerar energia capaz de suprir ou não o consumo energético local, visto que isso depende do potencial energético dos resíduos e da eficiência das tecnologias de conversão. Nesta seção, assim como no capítulo 2, foi proposto um sistema baseado em biodigestão anaeróbia de dejetos animais e de esgoto doméstico. A metodologia a seguir é um resumo da metodologia apresentada nas seções 2.2.2 e 2.2.3. Na Tabela 21 estão apresentados os fatores de conversão de energia utilizados para calcular a quantidade de metano (Equação 36) e o potencial energético (Equação 37) do esterco animal, de acordo com a metodologia proposta por OLIVEIRA et al. (2020).

$$GM_{esterco} = 365 \cdot P_{animal} \cdot G_{esterco} \cdot A_{esterco} \cdot Y_{metano} \quad (36)$$

$$P_{esterco} \left( \frac{kWh}{ano} \right) = \frac{GM_{esterco} \cdot PCI \cdot \eta_1 \cdot D}{860} \quad (37)$$

Em que:  $GM_{esterco}$  é a quantidade de metano gerado ( $m^3 CH_4 \text{ ano}^{-1}$ );  $P_{animal}$  é o número de animais;  $G_{esterco}$  é a produção diária de esterco para um determinado animal ( $kg_{esterco} d^{-1}$ ) (ABDESHAHIAN et al., 2016; AFAZELI et al., 2014; MAKARA; KOWALSKI, 2018; MELIKOGLU; MENEKSE, 2020; NGWABIE; CHUNGONG; YENGONG, 2018; NRCS, 1995; OLIVEIRA et al., 2020; PINDOZZI et al., 2013; QLD, 2018; ZHENG et al., 2019);  $A_{esterco}$  é o fator de disponibilidade do esterco animal fresco (%) (AVCIOĞLU; TÜRKER, 2012; ERSOY; UGURLU, 2020; MELIKOGLU; MENEKSE, 2020; MEYER; EHIMEN;

HOLM-NIELSEN, 2018; MOREDA, 2016; OLIVEIRA et al., 2020; ZAREEI, 2018);  $Y_{metano}$  é a produção volumétrica de metano a partir da massa fresca de esterco animal ( $Nm^3 kg^{-1}$ ) (ANGELIDAKI; ELLEGAARD, 2003; AWASTHI et al., 2019; BURG et al., 2018; ERSOY; UGURLU, 2020; OLIVEIRA et al., 2020; SCARLAT et al., 2018; SELVAGGI et al., 2018; TIŞMA et al., 2018);  $P_{esterco}$  é o potencial energético estimado para o esterco ( $kWh ano^{-1}$ );  $PCI$  é o poder calorífico inferior do  $CH_4$  de  $11.781 kcal kg^{-1}$  (GHOSH et al., 2019);  $\eta_1$  é o valor de eficiência de conversão de 0,28 que é a combinação entre a eficiência do motor a gás (30-40%) e do gerador (80%) (FREITAS et al., 2019); 860 é o fator de conversão de kcal para kWh;  $D$  é a densidade do metano de aproximadamente  $0,657 kg m^{-3}$  (MELIKOGLU; MENEKSE, 2020).

Tabela 21 - Fatores de conversão de energia para esterco animal.

Origem	$G_{esterco}$	$A_{esterco}$	$Y_{metano}$
Bovinos	$27,8 \pm 7,6$	$47,3 \pm 23,0$	$0,0221 \pm 0,0088$
Búfalos	$40,0 \pm 0,0$	$50,0 \pm 0,0$	$0,0210 \pm 0,0000$
Muare e Equinos	$13,8 \pm 0,0$	$29,0 \pm 0,0$	$0,0146 \pm 0,0000$
Suínos	$2,96 \pm 0,15$	$89,5 \pm 13,4$	$0,0180 \pm 0,0062$
Ovinos e Caprinos	$1,45 \pm 0,21$	$11,5 \pm 2,1$	$0,0621 \pm 0,0199$
Aves	$0,0275 \pm 0,0247$	$80,0 \pm 0,0$	$0,0708 \pm 0,0330$

A quantidade de esgoto doméstico foi estimada por modelagem matemática da taxa de geração desse resíduo em função da população e renda *per capita* do município estudado. Por meio da geração média de resíduos, obteve-se a quantidade de metano anual (Equação 38) e, portanto, o seu potencial energético (Equação 39) (OLIVEIRA et al., 2020).

$$GM_{esgoto} \left( \frac{tonCH_4}{ano} \right) = 365 \cdot (TGE \cdot N \cdot DBO_5 \cdot \eta_2 \cdot NMEF - R) \quad (38)$$

$$P_{esgoto} \left( \frac{kWh}{ano} \right) = \frac{1000 \cdot GM_{esgoto} \cdot PCI \cdot \eta_1}{860} \quad (39)$$

Em que:  $GM_{esterco}$  é a quantidade de metano gerada anualmente pelo tratamento de esgoto ( $ton. CH_4 ano^{-1}$ );  $TGE$  é a taxa de geração de esgoto ( $m^3 d^{-1} hab^{-1}$ );  $N$  é o número de habitantes que vivem na propriedade avaliada ( $hab.$ );  $BOD_5$  é a taxa de geração média de DBO de  $0,00035 ton. DBO_5 m^{-3}$  ( $0,0002-0,0005 ton. DBO_5 m^{-3}$ ) (VON SPERLING, 2014);  $\eta_2$  é a eficiência do reator (75% para lagoa coberta) (BLEY JÚNIOR et al., 2009);  $NMEF$  é o fator de emissão de metano ( $0,6 ton. CH_4 ton. DBO_5^{-1}$ ) (THE OFFICE OF THE FEDERAL REGISTER NATIONAL ARCHIVES AND RECORDS ADMINISTRATION, 1999);  $R$  é a quantidade de metano recuperada e, nesta pesquisa, foi considerada igual a zero.

Como neste trabalho o processo de conversão de biomassa em energia foi a biodigestão anaeróbia, sistemas compostos por biodigestor e gerador a gás foram projetados. O tipo de biodigestor utilizado foi o lagoa coberta e a metodologia adotada para o dimensionamento foi proposta por RIBEIRO (2011). As dimensões do biodigestor foram encontradas iterativamente em função da proporção entre a fase gasosa e a fase líquida ( $p = 0,4$ ). O comprimento do biodigestor ( $L$ ) variou com um passo de 0,4 metros sem restrição de tamanho e o raio da bolsa plástica ( $r$ ) em 0,1 metros com um limite de extensão de 3 metros. O critério para interrupção do processo consistiu na obtenção de um biodigestor com um volume total ( $V_t$ ) maior que ou igual o volume de resíduos ( $V_w$ ), sendo  $V_w$  dado pela Equação 40.  $M_{esterco}$  é a massa diária de esterco ( $\text{kg d}^{-1}$ ),  $\rho_{esterco}$  é a massa específica do estrume de  $850 \text{ kg m}^{-3}$ ,  $V_{esgoto}$  é o volume diário de esgoto ( $\text{m}^3 \text{ d}^{-1}$ ) e  $TDH$  é o tempo de detenção hidráulica de 35 dias.

$$V_w = (2 \cdot M_{esterco} \cdot \rho_{esterco}^{-1} + V_{esgoto}) \cdot TDH \quad (40)$$

A potência do gerador a gás ( $P_{mg}$ ) foi determinada por meio da Equação 41, que leva em consideração, além dos potenciais energéticos de dejetos e esgoto animal, um período de operação do equipamento ( $t_{op}$ ) de 10 horas diárias e um fator de potência ( $fp$ ) de 0,8. Os moto-geradores foram selecionados de forma que atendessem a  $P_{mg}$  a um custo menor, por meio de uma otimização por programação linear inteira. As informações de potência e custo dos equipamentos seguem na Tabela 22.

$$P_{mg} = \frac{\sum P_{esterco} + P_{esgoto}}{365 \cdot t_{op} \cdot fp} \quad (41)$$

Tabela 22 - Dados de potência e custo para geradores a biogás.

Potência (kVA)	Custo (\$)	Potência (kVA)	Custo (\$)
2,5	472,24	12,5	4.400,00
3,5	709,02	20,0	4.700,00
5,0	911,60	37,5	6.500,00
6,5	1.123,39	50,0	8.220,00
8,0	976,06	62,5	8.600,00
10,0	2.000,00	75,0	9.100,00

Fonte: (ALIBABA, 2020; AMAZONAS, 2020).

Para o orçamentação do biodigestor, unidades compostas (Apêndice B) foram elaboradas para estimar o custo de cada uma das atividades realizadas durante a construção, tais como, limpeza inicial ( $1,75 \text{ \$ m}^{-2}$ ), escavação ( $24,45 \text{ \$ m}^{-3}$ ), alvenaria ( $31,68 \text{ \$ m}^{-2}$ ),

revestimento (17,18 \$ m<sup>-2</sup>), pavimentação (17,27 \$ m<sup>-2</sup>), instalação de membrana (10,22 \$ m<sup>-2</sup>), instalação de tubulação de PVC (19,28 \$ m<sup>-1</sup>), tubulação de biogás (5,58 \$ m<sup>-1</sup>) e limpeza final (0,30 \$ m<sup>-2</sup>) (FEDERAL, 2020).

### 3.2.3 Sistemas de geração fotovoltaicos

O primeiro passo no dimensionamento de sistemas fotovoltaicos foi a obtenção da potência de instalação. Para esse cálculo, conforme a Equação 42, além das informações de consumo de energia elétrica existentes no banco de dados, foi necessária a realização de um mapeamento de estações de medição da irradiação solar no próprio município de estudo e até mesmo nos municípios vizinhos. Os dados usados para o projeto de um determinado sistema foram coletados na estação de medição mais próxima (Tabela 23).

Tabela 23 - Estações de medição de irradiação solar em kWh m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>.

Estação	Município	Latitude	Longitude	Média	Desvio Padrão
1	São Francisco do Glória	20,801°	42,249°	4,79	2,35
2	Miradouro	20,801°	42,349°	4,66	2,22
3	Miradouro	20,901°	42,349°	4,73	2,35
4	Fervedouro	20,701°	42,249°	4,78	2,35
5	Pedra Dourada	20,801°	42,149°	4,75	2,37
6	Eugenópolis	20,901°	42,249°	4,77	2,34
7	Fervedouro	20,701°	42,349°	4,59	2,18
8	Carangola	20,701°	42,149°	4,83	2,18

Fonte: (CRESESB, 2020).

$$P_{inst}(kWp) = \frac{CEE \cdot GC - 12 \cdot CM}{365 \cdot IM \cdot \eta_{sfv}} \quad (42)$$

Em que:  $P_{inst}$  é a potência de instalação calculada para o sistema fotovoltaico (kWp);  $CEE$  é o consumo anual de eletricidade (kWh);  $GC$  é a geração baseada em 100% do consumo, isto é, geração capaz de suprir 100% do consumo;  $CM$  é o consumo mínimo de energia elétrica que é cobrado pela concessionária de acordo com o tipo de instalação principal (trifásica - 100 kWh, bifásica - 50 kWh, monofásica - 30 kWh) (CEMIG, 2021);  $IM$  é a irradiação média da estação de medição mais próxima do local de instalação (kWh m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>);  $\eta_{sfv}$  é o rendimento do sistema fotovoltaico de aproximadamente 80% (NARIMATU; CRIBARI; GUIMARÃES, 2018).

De acordo com a potência da instalação, foi possível selecionar a quantidade de módulos que seriam necessários para implementação do sistema de geração através da Equação 43, onde  $n_{mod}$  é a quantidade de módulos e  $P_{mod}$  é a potência do módulo em kWp. Neste trabalho, foi avaliada a possibilidade de utilização de três módulos com potências de 270, 335 e 405 Wp e valores de aquisição de 116,80, 122,45 e 147,22 dólares, respectivamente. A alternativa escolhida para cada caso foi a que melhor atendeu a  $P_{inst}$  a um menor custo, adotando novamente ferramentas de otimização por programação inteira.

$$n_{mod} = \frac{P_{inst}}{P_{mod}} \quad (43)$$

O  $n_{mod}$  deve ser um número inteiro maior que o calculado, para que a potência de pico do sistema ( $P_{pico}$ ) seja maior que a potência da instalação ( $P_{inst}$ ). A partir do  $P_{pico}$ , foi selecionado o inversor fotovoltaico responsável por transformar a corrente contínua (CC) gerada pelos módulos em corrente alternada (CA), garantindo a segurança do sistema e medindo a energia produzida e injetada na rede da concessionária. Para minimizar o custo deste equipamento, a otimização também foi realizada por meio de técnicas de programação inteira. A potência e o custo dos inversores utilizados neste processo seguem na Tabela 24.

Tabela 24 - Dados de potência de pico e custo para inversores fotovoltaicos.

Potência de Pico (kWp)	Custo (\$)	Potência de Pico (kWp)	Custo (\$)
1	424,52	8	1.981,13
2	471,70	12,5	2.594,34
3	849,06	15	2.641,51
5	1.132,08	25	3.113,21
6	1.603,77	75	6.981,13

Fonte: (SOLAR, 2020).

Além dos custos com equipamentos, no orçamento de um sistema fotovoltaico, devem ser considerados os custos de cabos e dutos, instalação, projeto, frete e transporte. As empresas de energia solar estimam esses adicionais em função do custo total dos equipamentos (módulos e inversores). Os percentuais para aquisição de cabos e dutos, mão de obra de instalação, projeto e transporte foram de 7, 15, 12 e 5%, respectivamente (ENGENHARIA, 2021), totalizando em 39%.

### 3.2.4 Sistemas de geração eólicos

Para o dimensionamento de sistemas de geração eólica, inicialmente foram utilizados os dados de velocidade do vento e parâmetros de forma e escala fornecidos pelo CRESESB (CRESESB, 2020). Os dados contidos na base de dados são trimestrais e para os cálculos efetuados neste capítulo foi utilizada a média anual. Como os dados fornecidos são para uma altura de 50 metros e a velocidade do ar varia com a altitude, a rugosidade média do terreno ( $\varepsilon$ ) foi determinada de forma a encontrar a velocidade do vento na altura de instalação do sistema (aproximadamente 7,5 metros). Para isso, foi utilizada uma série de velocidades em diferentes alturas adquiridas em (“Earth :: um mapa global dos ventos”, 2019) e a Equação 44, em que  $V(z)$  é a velocidade na altura  $z$  e  $V(z_r)$  é a velocidade na altura de referência  $z_r$  (BOOPATHI et al., 2021).

$$V(z) = V(z_r) \left( \frac{z}{z_r} \right)^\varepsilon \quad (44)$$

A determinação do potencial eólico em uma região pode ser feita com o auxílio de modelos numéricos que permitem a extrapolação de resultados em uma área relativamente grande e requerem registros a cada 10 minutos durante anos. Portanto, como é impraticável trabalhar com todos esses dados, são utilizados modelos probabilísticos que os reproduzam de forma compacta estatisticamente. Para isso, funções de distribuição de probabilidade, como a *Weibull*, são adotadas (Equação 45) (SILVA; GUEDES; ARAÚJO, 1999).

$$f(V) = \frac{k}{c} \cdot \left( \frac{V}{c} \right)^{k-1} \cdot \exp \left[ - \left( \frac{V}{c} \right)^k \right] \quad (45)$$

Em que:  $f(V)$  é a probabilidade de ocorrer uma determinada velocidade do vento;  $V$  é a velocidade do vento ( $\text{m s}^{-1}$ );  $k$  é o fator de forma (adimensional e  $k > 0$ );  $c$  é o fator de escala (expresso em  $\text{m s}^{-1}$  e  $c > 1$ ).

Assim, como as velocidades do vento têm probabilidade de ocorrência, foi criado um intervalo entre a velocidade mínima e a velocidade máxima registrada durante os quatro trimestres do ano. Este intervalo foi dividido em 15 partes e para cada velocidade contida nele foi calculada a probabilidade de ocorrência levando em consideração os parâmetros médios anuais de forma e escala. Todos esses dados foram divididos em três cenários (C1, C2 e C3) com suas respectivas velocidades e probabilidades:

- C1: a velocidade do vento é a velocidade média ponderada pela probabilidade e a probabilidade de ocorrência é a probabilidade média ponderada pela velocidade do vento.

- C2: a velocidade encontrada em C1 divide o intervalo em duas partes e para todas as velocidades inferiores a velocidade de C1 e suas respectivas probabilidades foram calculadas novas médias ponderadas, assim como realizado para C1.
- C3: com as velocidades superiores à velocidade de C1 e suas respectivas probabilidades, calcula-se também a velocidade média ponderada pela probabilidade e a probabilidade média ponderada pela velocidade.

Por meio da velocidade do vento e sua probabilidade de ocorrência em cada cenário, foi calculada a velocidade de dimensionamento ( $V_{dim}$ ) do sistema de geração eólica, sendo  $V_{dim}$  a velocidade média dos cenários ponderada pela probabilidade. Como cada gerador eólico possui uma curva de geração, que é a potência em função da velocidade do vento, a partir de  $V_{dim}$  obteve-se, por técnicas de interpolação, a potência que cada um geraria. Curvas de geração de 11 equipamentos com potências entre 280 W e 50 kW foram utilizadas e seguem na Figura 9 (ENERGYBRAS, 2021). O processo consistiu nas seguintes etapas:

- obtenção da potência de operação ( $P_{op}$ ) de cada gerador eólico em  $V_{dim}$  utilizando interpolações cúbicas das curvas de geração, visto que a energia eólica é diretamente proporcional ao cubo da velocidade (BOOPATHI et al., 2021);
- conversão da potência de geração em energia elétrica, considerando que o sistema opere por um intervalo de tempo correspondente à parcela de horas que representa a soma das probabilidades de ocorrência dos três cenários durante o dia (24 horas);
- seleção do conjunto de geradores que, juntos, sejam capazes de suprir a demanda de energia com menor custo por meio da ferramenta de programação inteira. Os potenciais e custos dos equipamentos seguem na Tabela 5;
- cálculo do custo final do sistema eólico, considerado o acréscimo de 39% que cobre os custos de projeto, cabos e estrutura, instalação e transporte, análogo ao solar.

Tabela 25 - Dados de potência e custo para geradores eólicos.

Potência (W)	Custo (\$)	Potência (W)	Custo (\$)
280	360,01	5.000	1.037,74
400	464,70	10.000	1.547,17
500	516,98	20.000	2.358,49
1.000	555,18	30.000	3.726,42
2.000	763,45	50.000	5.094,34
3.000	911,32		

Fonte: (ENERGYBRAS, 2021).

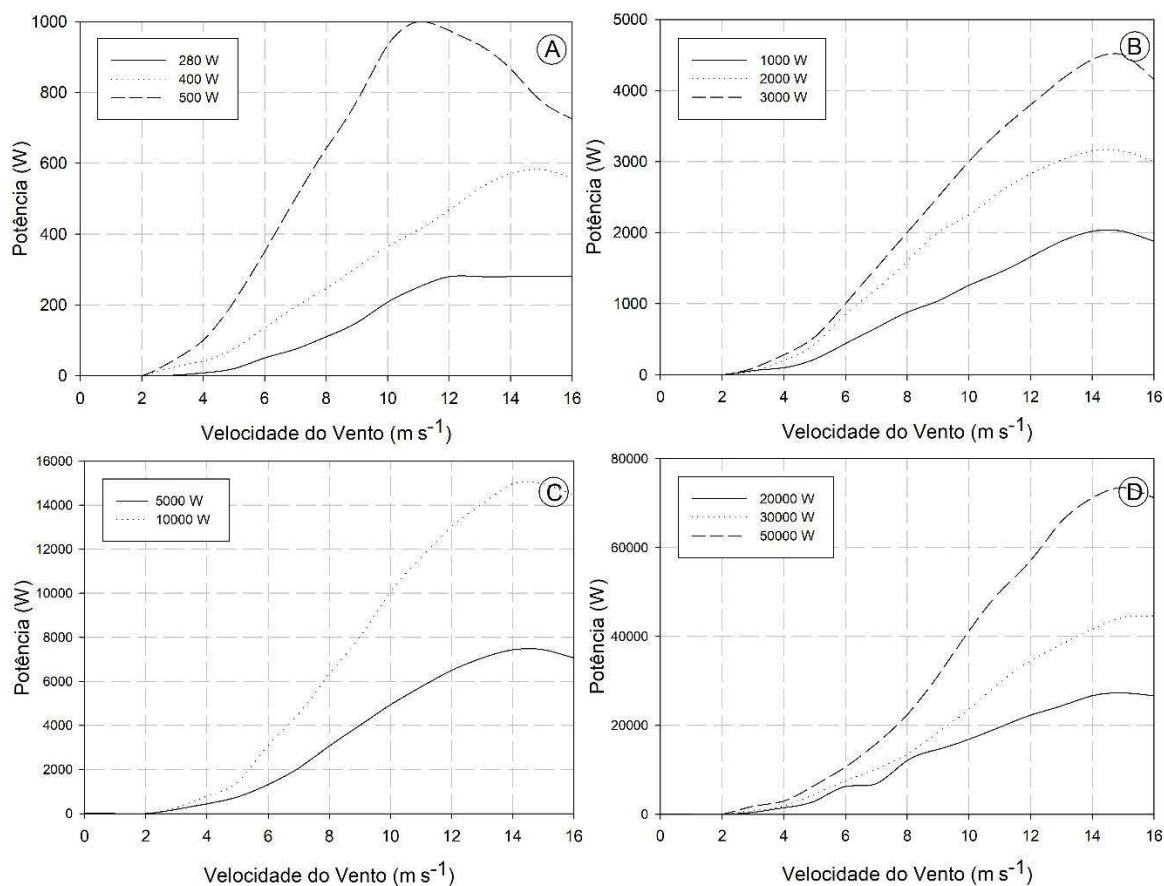


Figura 9 - Curvas de geração para geradores eólicos.

### 3.2.5 Ferramenta de tomada de decisão

Neste capítulo, foram avaliadas três alternativas de sistemas de geração de energia para pequenas e médias propriedades rurais, de acordo com as metodologias apresentadas nas seções 3.2.2, 3.2.3 e 3.2.4. Assim, o fornecimento ao produtor rural de um direcionamento da melhor fonte alternativa de energia de acordo com o perfil de sua propriedade é relevante. Porém, uma boa escolha não é feita de forma trivial, mas levando em consideração diversos indicadores e suas variáveis. Neste caso, foi implementada uma ferramenta de tomada de decisão baseada em indicadores financeiros, ambientais, sociais e físicos.

#### 3.2.5.1 Indicador financeiro

Um indicador financeiro é um parâmetro que permite visualizar a realidade financeira de um projeto de forma direta e quantitativa. Este indicador está sendo abordado neste

trabalho devido ao fato de que uma das principais barreiras para a implantação de sistemas de geração é o investimento e o tempo de retorno. Portanto, as variáveis utilizadas foram investimento inicial ( $x_1$ ), valor presente líquido ( $x_2$ ) e *payback* simples ( $x_3$ ).

O investimento inicial ( $V_i$ ) é o valor que deve ser pago pelo proprietário para compra dos equipamentos e acessórios e custeio da mão de obra de projeto e instalação, ou seja, sem este valor não é possível concluir a construção de um sistema. O valor presente líquido (*VPL*), definido pela Equação 46, é o saldo descontado acumulado resultante do fluxo de caixa (*FC*) durante o período correspondente à vida útil do sistema ( $n$ ). O *FC* leva em consideração  $V_i$ , a economia de energia elétrica (Equação 47), a depreciação do equipamento (Equação 48) e o custeio da manutenção (1% ao ano do valor de investimento em equipamentos). O *payback* simples (*PBS*) é o tempo decorrido para que *VPL* deixe de ficar negativado, excluindo descontos devido à taxa de juros anual ( $j$ ).

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1+j)^t} \quad (46)$$

$$BGEE = PEE \cdot TEE \quad (47)$$

$$Dp_a = (V_i - V_f) \cdot n^{-1} \quad (48)$$

Em que:  $FC_t$  é o fluxo de caixa no ano  $t$  (\$);  $t$  é o ano correspondente ao fluxo de caixa;  $i$  é a taxa de juros anual ou custo de oportunidade (6,5 %); *BGEE* é benefício com a geração de eletricidade (\$ ano<sup>-1</sup>); *PEE* é a eletricidade produzida (kWh ano<sup>-1</sup>); *TEE* é a tarifa de eletricidade (\$ ano<sup>-1</sup>);  $V_i$  é o preço de compra do equipamento (\$);  $V_f$  é o valor da sucata em \$ (10% do valor inicial);  $n$  é a vida útil de 30 anos;  $Dp_a$  é a depreciação.

### 3.2.5.2 Indicador ambiental

Os indicadores ambientais são estatísticas selecionadas que representam alguns aspectos do estado do meio ambiente, recursos naturais e atividades humanas relacionadas. Atualmente, existem diversos artigos publicados na literatura da área que enfatizam a diversificação da matriz energética e elétrica, porém com a utilização de fontes renováveis de energia e sistemas de conversão que apresentam baixa carga poluente, ou seja, que tenham balanço de CO<sub>2</sub> neutro ou negativo. Em LIN e RAZA (2020) indicadores são utilizados para avaliar a segurança energética e prever o aumento das emissões de CO<sub>2</sub> em 2040 devido ao alto consumo de combustível, e em HABIBOLLAHZADE e HOUSHFAR (2020) é proposta uma usina de transformação de resíduos em energia que reutiliza 65% do CO<sub>2</sub>, por exemplo.

A resolução normativa do Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM) nº 217 (DN COPAM 217), de 6 de dezembro de 2017, estabelece critérios para a classificação de empreendimentos e atividades quanto ao seu porte, potencial poluidor e localização para processos de licenciamento ambiental no estado de Minas Gerais (MINAS GERAIS, 2017). Assim, os estabelecimentos com grande carga poluente são obrigados a dar uma destinação apropriada aos resíduos produzidos. Embora as propriedades de pequeno e médio porte analisadas neste trabalho não se enquadrem no cenário exposto, é interessante que seja feito um reaproveitamento de passivos ambientais de forma a contribuir com o saneamento rural e gerar subprodutos de valor agregado, como a energia.

Outro fator que deve ser abordado do ponto de vista ambiental é a gestão dos recursos hídricos. Na era atual, a água é um recurso importante para o crescimento socioeconômico e a manutenção de ambientes saudáveis e, se devidamente gerenciada, pode ser considerada uma parte vital do desenvolvimento. A modelagem ambiental integrada com base no engajamento participativo e uma abordagem sistêmica-relacional da ética ambiental são ferramentas importantes para efetuar mudanças nas políticas de clima e água e efetuar o equilíbrio de valores na gestão dos recursos hídricos (DE WET; ODUME, 2019; IWANAGA et al., 2020).

O ruído pode ser considerado um critério ambiental ou social para avaliação de sistemas de energia. A poluição sonora dos sistemas de energia consiste em um som desagradável criado por máquinas que interrompem a atividade ou o equilíbrio da vida humana ou animal. Não só leva a efeitos ambientais, mas também prejudica a saúde fisiológica e psicológica humana. A exposição crônica ao ruído na área de trabalho de usinas de energia pode causar perda auditiva induzida e esse fator é importante ainda mais quando o sistema é instalado próximo a áreas residenciais (WANG et al., 2009). Os sistemas avaliados neste capítulo apresentam os seguintes níveis de ruído: (i) biomassa: 60 a 80 ~ 70 dB (MANITEC, 2020); (ii) fotovoltaico: sem impacto acústico; (iii) eólico: 67,6 a 75,2 ~ 70,92 dB (SILVA; ABRANTES, 2019). Assim, as variáveis relacionadas ao volume de efluente tratado ( $x_4$ ), à quantidade de água utilizada ( $x_5$ ) e ao nível de ruído emitido ( $x_6$ ) pelos sistemas de geração analisados foram inseridas no processo de tomada de decisão.

### **3.2.5.3 Indicador social**

Os aspectos sociais foram definitivamente os critérios mais importantes para a aceitação dos sistemas de energia pelas pessoas nas últimas décadas. Inúmeras variáveis

foram avaliadas em pesquisas científicas, como impacto visual (WANG et al., 2009), desenvolvimento local (AL-FALAHÍ; JAYASINGHE; ENSHAEI, 2017), conflitos com outras aplicações e oportunidades de participação privada (KUMAR et al., 2017), segurança econômica (UPADHYAY; SHARMA, 2014) e custo de carbono social (ROJAS-ZERPA; YUSTA, 2015). Devido ao contexto em que esta análise está inserida, neste trabalho, questões relacionadas à geração de empregos ( $x_7$ ) e ao desenvolvimento pessoal ( $x_8$ ) foram utilizadas para apontar a melhor fonte alternativa.

É evidente que todo sistema de geração de energia necessite de mão de obra qualificada para sua instalação. No entanto, nas redondezas das cidades do interior existe um monopólio das empresas que trabalham com energia solar. Em torno do município em estudo (São Francisco do Glória), existem cerca de 18 empreendimentos que realizam esse tipo de serviço, diferente do que ocorre com a biomassa e a eólica (somente nas capitais). Um conjunto de fatores justifica essa popularização, entre eles: valorização imobiliária, fonte inesgotável, manutenção mínima, fácil instalação e sem produção de resíduos.

Porém, a possibilidade de implantação de sistemas que utilizem, além da energia solar, biomassa residual e eólica nas propriedades rurais pode alavancar o comércio na região, trazendo novos nichos de trabalho e gerando mais empregos para profissionais qualificados e que atualmente estão ociosos no mercado. Em Muriaé, município localizado a 50 km de São Francisco do Glória, possui um campus do Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais que anualmente entrega à sociedade inúmeros profissionais capacitados para atuar em projetos agroecológicos, eletrotécnicos e mecânicos. Oportunidades de inserção de recém-formados no setor de energia podem surgir com a diversificação dos sistemas de geração conectados à rede. Portanto, os sistemas de geração a biomassa e eólica devem ser melhor avaliados qualitativa e quantitativamente do que os sistemas fotovoltaicos para a variável discutida.

Nos sistemas de geração a biomassa, é necessário que um indivíduo capacitado seja o responsável pela operação dos equipamentos, haja vista a necessidade de conhecer o processo de conversão para que o fornecimento de matéria-prima ao biodigestor ocorra de forma satisfatória, sem prejudicar a sua eficiência. Como o objeto de estudo é a área rural de um município, na grande maioria dos casos, caberá ao próprio produtor rural o exercício dessa função. A partir dos dados da pesquisa de campo realizada, foi constatado que 68,5% dos produtores não possuem ensino médio completo, destacando-se a baixa escolaridade recorrente no meio rural. Portanto, qualquer forma de levar conhecimento a esse público deve ser considerada.

Um projeto de cooperação entre os governos do Brasil e da Alemanha estruturou um processo de capacitação sobre o aproveitamento energético do biogás de estações de tratamento de esgoto. Inúmeros profissionais e multiplicadores de conhecimento foram treinados. Foi desenvolvida uma grade curricular inédita capaz de nortear o processo formativo sobre o tema no Brasil (MOREIRA et al., 2018) e o mesmo pode ser feito no cenário avaliado. Assim, sob a ótica do desenvolvimento pessoal, os sistemas de biomassa devem possuir uma melhor avaliação qualitativa e quantitativa quando comparados aos sistemas fotovoltaicos e eólicos.

#### 3.2.5.4 Indicador físico

O indicador físico busca avaliar o impacto da inserção de sistemas de geração no local de sua instalação. Este indicador será representado nesta tomada de decisão pela variável área útil ( $x_9$ ). Para sistemas de biomassa, deve-se selecionar um local com terreno adequado e próximo às caixas de coleta de resíduos da propriedade, com a área útil demarcada pelas bordas do biodigestor acrescidas em 20%. No sistema fotovoltaico, considerando a instalação dos módulos em telhados, foi utilizada uma área útil nula. Para os sistemas eólicos, a área útil ( $A_{se}$ ) foi calculada em função da quantidade ( $n_{ge}$ ) e do diâmetro ( $d_{ge}$ ) dos geradores, conforme Equação 49 (MME, 2008).

$$A_{se} = n_{ge} \cdot (2,5 \cdot d_{ge}) \cdot (9 \cdot d_{ge}) \quad (49)$$

#### 3.2.5.5 Índice de seleção de sistema

Uma vez definidos os indicadores e a forma como cada um seria avaliado, foi realizada uma padronização para comparação dos critérios por meio de uma escala padrão. A escala de *Phrase completion* elaborada por HODGE e GILLESPIE (2003), possui uma sequência de inteiros de zero a 10, contendo 11 pontos divididos em três grupos, em que o valor nulo está associado à ausência do atributo, enquanto o valor 10 está relacionado à sua presença máxima (Tabela 26). A normalização de uma variável ocorre sempre em relação ao valor máximo dentre os três sistemas avaliados, de forma que o valor máximo recebe uma pontuação igual a 10 e os demais seguem uma proporção em relação a ele.

Além disso, em uma tomada de decisão, nem todas as variáveis são igualmente importantes. Para diferenciá-las, pesos diferentes são atribuídos. Para isso, foi utilizado um

método de análise hierárquica, baseado na opinião de 10 especialistas da área, e quanto menor o índice de inconsistência de cada análise, mais satisfatória ela é, devido ao grande número de variáveis. Opiniões individuais foram combinadas por média geométrica e julgamentos seguiram uma escala de conversão de 1 a 9 para comparação paritária entre critérios, em que 1 é preferência igual, 3 é preferência moderada, 5 é preferência forte, 7 é preferência muito forte e 9 é preferência absoluta. Os números pares (2, 3, 6 e 8) estão associados a julgamentos intermediários e não entraram no quadro de julgamento (KRÓL-BADZIAK et al., 2021). A análise comparativa final foi adaptada para uma escala de 0 a 5 em relação ao peso máximo, vide Tabela 27. O resultado da tomada de decisão foi obtido através da Equação 50.

Tabela 26 - Escala de *Phrase completion*.

Intensidade presença	Níveis de comparação	Valor numérico
Muito significativo	Perfeito	10
	Excelente	9
	Muito bom	8
Razoavelmente significativo	Bom	7
	Satisfatório	6
	Adequado	5
	Tolerável	4
	Pobre	3
Pouco significativo	Muito pobre	2
	Inadequado	1
	Inútil	0

Tabela 27 - Pesos atribuídos às variáveis avaliadas.

Variável	Tipo	Peso	Variável	Tipo	Peso
$x_1$	Positivo	1,825	$x_6$	Positivo	1,360
$x_2$	Negativo	2,281	$x_7$	Negativo	3,874
$x_3$	Positivo	2,644	$x_8$	Negativo	2,783
$x_4$	Negativo	4,733	$x_9$	Positivo	1,158
$x_5$	Positivo	5,000			

$$I_{SS} = \sum_{l=1}^9 x_l \cdot w_l \quad (50)$$

Em que:  $I_{SS}$  é o índice de seleção do sistema,  $x_l$  é o valor da variável  $l$  e  $w_l$  é o peso correspondente à variável  $l$ .

Ressalta-se que o tipo de sistema de geração de energia que obtiver o menor valor para o  $I_{SS}$  será o selecionado. Além disso, cada uma das variáveis possui contribuições que podem ser positivas ou negativas, conforme apresentado na Tabela 27. Portanto, quanto maior o valor das variáveis  $x_2$ ,  $x_4$ ,  $x_7$  e  $x_8$ , melhor avaliado é o sistema. Para as outras variáveis, a análise é oposta.

### 3.2.6 Redes neurais artificiais

As redes neurais artificiais são sistemas paralelos distribuídos constituídos por unidades de processamento simples (nós), cuja função é o cálculo de certas funções matemáticas, geralmente, não lineares. Essas unidades são colocadas na forma de uma ou mais camadas e ligadas entre si por um grande número de uniões, a maioria delas unidirecionais, conforme apresentado na Figura 10 (LOPEZ-GARCIA; CORONADO-MENDOZA; DOMÍNGUEZ-NAVARRO, 2020). Na maioria dos modelos, essas conexões estão relacionadas a pesos que, por sua vez, armazenam o conhecimento representado no modelo e ponderam a entrada atribuída a cada um dos neurônios (elementos responsáveis por aprender e processar as informações de entrada e parâmetros de saída) da rede. O principal atrativo de uma rede neural é aprender por meio de exemplos e generalizar as informações adquiridas (BRAGA; CARVALHO; LUDERMIR, 2003).

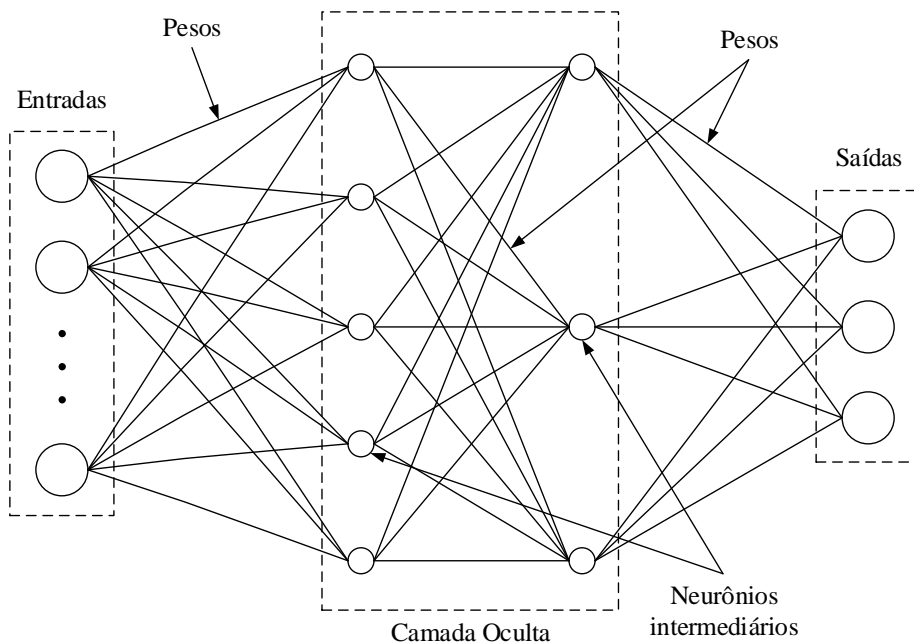


Figura 10 - Estrutura básica de uma rede neural artificial.

Existem dois tipos de redes neurais: com aprendizagem supervisionada e com aprendizagem não supervisionada. As redes neurais de aprendizagem supervisionada procuram determinar uma variável dependente com base em variáveis independentes. A característica elementar desta aplicação é que os dados usados para treiná-la contêm a resposta necessária, ou seja, uma variável dependente que é o resultado das variáveis independentes assistidas. Exemplos de problemas de engenharia que podem ser analisados na forma de um problema de aprendizado supervisionado são classificação e reconhecimento de padrões, predição de séries temporais, identificação de sistemas, controle de processo e projeto de filtros para processamento de sinais (HONDA; FACURE; YAOHAO, 2019).

Já a aprendizagem não supervisionada é caracterizada por não haver supervisor para avaliar o desempenho da rede em relação aos dados de entrada. Portanto, a rede se adapta às regularidades estatísticas nos dados de entrada e desenvolve a capacidade de criar representações internas que codificam as características dos dados de entrada, o que a torna capaz de identificar em quais classes os novos padrões estão inseridos. Na gama de técnicas mais abordadas para resolver problemas de aprendizagem não supervisionados estão agrupamento *k-means*, máquina de suporte vetorial e agrupamento hierárquico.

Neste trabalho, foi utilizada uma rede neural com aprendizagem supervisionada, por se tratar de um problema de reconhecimento e classificação de padrões. As entradas consistiram em informações que traçavam um perfil agro econômico da propriedade rural e foram normalizadas de 0 a 1. Inicialmente, foram avaliadas oito entradas e uma saída, que é o tipo de sistema de geração mais adequado para os estabelecimentos rurais. As entradas foram: ( $I_1$ ) quantidade total de bovinos e bubalinos; ( $I_2$ ) quantidade total de suínos, aves, equinos e caprinos; ( $I_3$ ) área total da propriedade; ( $I_4$ ) custo para manutenção das atividades; ( $I_5$ ) retorno financeiro; ( $I_6$ ) consumo de eletricidade; ( $I_7$ ) irradiação solar; ( $I_8$ ) velocidade média anual do vento. Testes foram realizados a fim de encontrar a melhor combinação entre os descritores (parâmetros de entrada) a fim de se obter o menor erro possível na previsão da saída. A porcentagem de dados usados para treinamento da rede variou de 30 a 70%.

Os *softwares* utilizados para simulação da rede neural artificial foram o *Matlab* e o *Orange Canvas*. A caixa de ferramentas “*nprtool*” do *Matlab* foi empregada para realização dos testes da rede em várias configurações. O método de treinamento adotado foi baseado em um algoritmo de gradiente conjugado (CHARALAMBOUS, 1992). No *Orange Canvas*, a validação cruzada foi realizada usando as funções de ativação linear retificada (ReLU) e tangente hiperbólica (Tanh). O método de treinamento foi o *Adam*, um algoritmo de otimização da taxa de aprendizagem adaptativa (KINGMA; BA, 2014). Para visualizar o

desempenho da rede, foi utilizada uma matriz de confusão (Tabela 28) e a entropia cruzada ( $J$ ) (SHEPPERD, 1997) foi calculada (Equação 51), onde  $N_a$  é o número de amostras,  $M$  é o número de camadas,  $S^m$  são as dimensões de cada camada e  $y$  são as saídas.

$$J = \sum_{n=1}^{N_a} \sum_{i=1}^{S^m} \ln \left[ (y_{i,n}^M)^{S_{i,n}} (1 - y_{i,n}^M)^{1-S_{i,n}} \right] \quad (51)$$

Tabela 28 - Matriz de confusão para previsão de três sistemas alternativos.

		Classificação real		
		Sistema 1 (S1)	Sistema 2 (S2)	Sistema 3 (S3)
Classificação esperada	Sistema 1 (S1)	Verdadeiro S1	Falso S1	Falso S1
	Sistema 2 (S2)	Falso S2	Verdadeiro S2	Falso S2
	Sistema 3 (S3)	Falso S3	Falso S3	Verdadeiro S3

Outras métricas também foram utilizadas, tais como: (i) Área sob a curva (AUC): área abaixo da curva ROC (que representa a taxa de verdadeiros positivos dada pela sensibilidade e a taxa de falsos positivos equivalente à especificidade) e indica o desempenho dos modelos principalmente para casos de classes balanceadas; (ii) Acurácia (CA): taxa de acerto geral, ou seja, proporção das previsões corretas em relação ao tamanho do conjunto de dados; (iii) *F-score* (F1): média harmônica entre precisão e sensibilidade; (iv) Precisão (P): porcentagem de padrões classificados como pertencentes à classe positiva e que realmente pertencem à classe positiva; (v) Sensibilidade (Recall): proporção de padrões de classes positivas identificados corretamente e indica o quão bom o classificador é na identificação de classes positivas.

### 3.3 Resultados

#### 3.3.1 Sistemas de geração a biomassa

Conforme apresentado na metodologia, os sistemas de geração de energia a biomassa são dimensionados com base na disponibilidade de resíduos agrícolas e seu potencial de conversão em energia por meio da produção de metano. Na Tabela 29 mostra-se a produção média de resíduos, metano e energia, por propriedade rural, levando em consideração a origem animal. Cerca de 75,96% dos resíduos gerados diariamente são oriundos de rebanhos bovinos, assim como 77,34% do metano e do potencial energético. Vale ressaltar que nem todas as fazendas possuem parcelas de resíduos de todas as origens e que em 83,78; 6,31;

81,08; 64,86; 41,75 e 0,90% dos estabelecimentos existem criações de bovinos, ovinos e caprinos, aves, muares e equinos, suínos e búfalos, respectivamente.

O volume médio de esgoto doméstico gerado em cada propriedade rural foi de  $0,365 \pm 0,331 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ , sendo a quantidade de metano estimada para esse resíduo de aproximadamente  $0,0875 \pm 0,0795 \text{ Nm}^3 \text{ d}^{-1}$ . Embora a quantidade de metano gerada por esta fonte corresponda a apenas 0,32% da quantidade total diária, ao final dos 35 dias de detenção hidráulica, haveria um montante de  $3,06 \text{ Nm}^3$ . O uso do esgoto doméstico, além de solucionar um problema de saneamento no meio rural, também contribui para a diluição dos resíduos, evitando o desperdício de recursos hídricos.

Tabela 29 - Valores médios de volume de esterco, volume de metano e potencial energético.

Origem	Volume de esterco ( $\text{m}^3 \text{ d}^{-1}$ )	Volume de metano ( $\text{Nm}^3 \text{ d}^{-1}$ )	Potencial energético ( $\text{kWh ano}^{-1}$ )
Bovinos	$1,124 \pm 3,344$	$21,117 \pm 62,815$	$554,96 \pm 1650,81$
Ovinos e Caprinos	$0,00339 \pm 0,00330$	$0,179 \pm 0,174$	$4,704 \pm 4,591$
Aves	$0,000973 \pm 0,00119$	$0,0585 \pm 0,0715$	$1,539 \pm 1,878$
Suínos	$0,104 \pm 0,640$	$1,597 \pm 9,799$	$41,970 \pm 257,53$
Búfalos	$0,235 \pm 0,000$	$4,200 \pm 0,000$	$110,378 \pm 0,000$
Muares e Equinos	$0,0123 \pm 0,0185$	$0,153 \pm 0,229$	$4,031 \pm 6,019$

O potencial energético do esterco animal estimado em média por propriedade rural foi de  $17.155,72 \pm 55.120,03 \text{ kWh ano}^{-1}$  e somado ao potencial energético médio de esgoto doméstico de  $80,48 \pm 72,76 \text{ kWh ano}^{-1}$ , resultou em um potencial total médio de  $17.236,20 \text{ kWh}$ . Um sistema de geração para produzir essa quantidade de energia seria composto por um biodigestor com comprimento e raio da bolsa plástica iguais a 7,25 e 1,59 metros, respectivamente, o que resultaria em um volume total médio de  $87,50 \text{ m}^3$ .

Os equipamentos para conversão de metano em eletricidade (geradores a gás) mais adequados para pequenas e médias propriedades devido ao custo-benefício seriam de 2,5 (39,62%), 8,0 (40,25%), 5,0 (10,69%) e 3,5 kVA (9,43 %). A potência média deste equipamento para as fazendas avaliadas foi de 5,90 kVA. A seleção de vários equipamentos com baixa potência ao invés de equipamentos com altíssima potência é viável do ponto de vista financeiro e de projeto. Diversos equipamentos em operação reduzem as chances de falha total do sistema de geração e, conseqüentemente, a probabilidade de a produção de metano ficar estagnada no biodigestor. Um resumo dos dados médios para esse tipo de sistema é mostrado na Tabela 30.

Tabela 30 - Dados técnicos médios para sistemas de geração a biomassa.

Dados técnicos	Valor	Dados técnicos	Valor
Comp. do biodigestor (m)	7,25 ± 8,18	Raio da bolsa (m)	1,59 ± 0,54
Gerador 2,5 kVA (unid.)	63	Gerador 5,0 kVA (unid.)	17
Gerador 3,5 kVA (unid.)	15	Gerador 8,0 kVA (unid.)	64
Volume total médio (m <sup>3</sup> )	87,50 ± 229,70	Potência média (kVA)	5,90 ± 18,88

O custo médio dos biodigestores dimensionados para a área rural do município de estudo foi de  $7.130,98 \pm 12.697,49$  dólares, podendo ser estratificado em custos preliminares ( $70,08 \pm 129,95$ ), de execução ( $7.048,89 \pm 12.545,44$ ) e de acabamento ( $12,01 \pm 22,28$ ). O custo médio para aquisição de geradores a gás foi de  $1.066,23 \pm 2.268,22$  dólares, resultando em um custo médio total de  $8.197,21 \pm 14.950,34$  dólares. Os equipamentos de conversão do biogás em eletricidade representam 14,95% do custo dos equipamentos de conversão de biomassa em biogás. Essas informações foram dispostas em suma a fins de comparação.

### 3.3.2 Sistemas de geração fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos são projetados para atender a demanda energética do empreendimento, ou seja, a quantidade de energia consumida pela unidade. A área rural do município de São Francisco do Glória consome uma quantidade de energia equivalente a 1,072 GWh por ano. Isso corresponde a um consumo de aproximadamente 9,659 MWh por ano em cada fazenda. Assim, a potência média de pico de um sistema fotovoltaico estimado para este cenário foi de  $6,64 \pm 19,55$  kWp.

Dentre os três tipos de módulos fotovoltaicos avaliados, aquele com 335 Wp foi economicamente viável para 54 instalações, seguido pelo de 405 Wp em 45 e 270 Wp em 12. Cada tipo de módulo foi selecionado por ser economicamente viável dependendo do tamanho do sistema. Os módulos de 270 Wp foram implementados em sistemas que demandaram em média de  $1,33 \pm 0,49$  unidades do produto. Já os módulos de 335 e 405 Wp foram implementados em sistemas com uma média de  $9,65 \pm 9,27$  e  $30,60 \pm 73,46$  unidades, respectivamente. Existe uma correlação positiva entre potências dos módulos e sistemas.

Como no dimensionamento da potência de pico dos sistemas analisados foi levada em consideração várias estações de medição de irradiação solar, uma varredura foi realizada na área rural do município e para cada local, selecionada a estação mais próxima. Portanto, foi estabelecida uma grade sobre a região em estudo e calculada a irradiação solar média

para cada mês do ano, conforme Tabela 31. A irradiação solar máxima foi de  $5,590 \pm 0,147$  e a mínima foi de  $3,657 \pm 0,038$  kWh m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> na área avaliada.

Tabela 31 - Irradiação solar média na área rural do município de estudo.

Mês	Irradiação solar (kWh m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	Mês	Irradiação solar (kWh m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )
Janeiro	$5,690 \pm 0,147$	Julho	$3,792 \pm 0,024$
Fevereiro	$5,949 \pm 0,105$	Agosto	$4,578 \pm 0,048$
Março	$4,866 \pm 0,094$	Setembro	$4,935 \pm 0,041$
Abril	$4,341 \pm 0,048$	Outubro	$4,987 \pm 0,081$
Mai	$3,772 \pm 0,042$	Novembro	$4,702 \pm 0,077$
Junho	$3,657 \pm 0,038$	Dezembro	$5,478 \pm 0,093$

Além da otimização na seleção dos módulos, também foi realizada a otimização na seleção dos inversores. Os inversores que apresentaram o maior custo-benefício para este cenário foram de 2 kWp (53,16%). Em contrapartida, os inversores de 6 e 8 kWp não foram viáveis em nenhum caso. A seleção de vários equipamentos com potências menores pode ser abordada de forma análoga à análise feita para geradores a gás. A porcentagem de seleção de equipamentos é mostrada na Tabela 32.

Tabela 32 - Dados de alocação de inversores em sistemas de geração fotovoltaicos.

Inversores (kWp)	Percentual (%)	Inversores (kWp)	Percentual (%)
1,00	16,46	8,00	0,00
2,00	53,16	12,50	1,90
3,00	7,59	15,00	1,90
5,00	12,66	25,00	4,43
6,00	0,00	75,00	1,90

Em média, o custo de aquisição de inversores é de  $2.417,90 \pm 7.106,32$  dólares. O custo dos módulos correspondeu a  $1.282,90 \pm 2.052,32$  dólares. Como são inúmeros os custos adicionais aos valores dos equipamentos, o custo médio dos sistemas fotovoltaicos foi de  $5.139,74 \pm 12.706,23$  dólares. Em geral, o custo dos módulos fotovoltaicos representou 53% dos gastos com inversores neste tipo de sistema.

### 3.3.3 Sistemas de geração eólicos

De acordo com os dados coletados no CRESESB, a velocidade média anual do vento na área rural do município de estudo é de  $5,049 \pm 0,275$  m s<sup>-1</sup> a 50 metros de altura, atingindo

valores máximos no terceiro semestre ( $5.357 \pm 0,426 \text{ m s}^{-1}$ ) e mínimos no primeiro ( $4.724 \pm 0,391 \text{ m s}^{-1}$ ). Os parâmetros de forma e escala também variam durante o ano e seus valores médios anuais registrados foram de 2.278 e  $5.691 \text{ m s}^{-1}$ . Os demais dados para as variáveis mencionadas acima, bem como a densidade de potência do vento, seguem na Tabela 33 (CRESESB, 2020).

Tabela 33 - Dados eólicos médios a 50 metros de altura na área rural do município de estudo.

Período	Velocidade ( $\text{m s}^{-1}$ )	Fator de forma (adimensional)	Fator de escala ( $\text{m s}^{-1}$ )	Densidade de potência ( $\text{W m}^{-2}$ )
1º trimestre	$4,724 \pm 0,391$	$1,991 \pm 0,020$	$5,330 \pm 0,441$	$126,568 \pm 34,995$
2º trimestre	$4,941 \pm 0,422$	$2,432 \pm 0,017$	$5,551 \pm 0,454$	$120,432 \pm 29,950$
3º trimestre	$5,357 \pm 0,426$	$2,481 \pm 0,034$	$6,042 \pm 0,483$	$152,396 \pm 39,404$
4º trimestre	$5,172 \pm 0,410$	$2,208 \pm 0,008$	$5,839 \pm 0,463$	$150,342 \pm 38,216$
Média	$5,049 \pm 0,275$	$2,278 \pm 0,225$	$5,691 \pm 0,018$	$137,435 \pm 16,306$

De acordo com os dados fornecidos por “*Earth* :: um mapa global dos ventos” (2019), a velocidade média do vento a 133 metros (1000 hPa) de altura é 28,85% superior a velocidade média do vento na superfície das propriedades rurais. A rugosidade média do terreno ( $\epsilon$ ) obtida para a área rural do município estudado foi igual a 0,0518. Portanto, a velocidade média a 7,5 metros, altura média de instalação do equipamento, corresponde a 90% da velocidade média a 50 metros de altura. Ressalta-se que houve um subdimensionamento para geradores eólicos que requerem torres com dimensões superiores a altura utilizada. As torres são proporcionais ao diâmetro do rotor e para geradores de 50 kW podem chegar a 18 metros, sendo a velocidade subestimada em 5,39%.

Tabela 34 - Dados sobre cenários de ocorrência de ventos na área rural do município.

Cenários	Velocidade média ( $\text{m s}^{-1}$ )	Probabilidade	Intervalo de ocorrência (h)
C1	$4,539 \pm 0,372$	$0,166 \pm 0,013$	$3,973 \pm 0,306$
C2	$4,375 \pm 0,360$	$0,166 \pm 0,013$	$3,985 \pm 0,306$
C3	$4,683 \pm 0,383$	$0,165 \pm 0,013$	$3,964 \pm 0,305$
Média	$4,532 \pm 0,154$	$0,166 \pm 0,000$	$3,974 \pm 0,000$

Ajustados os dados de velocidade, os três cenários de geração eólica foram obtidos. Conforme mostrado na Tabela 34, verifica-se que os cenários têm a mesma probabilidade de ocorrência, ou seja, normalizando em 100% cada cenário tem 33,33% de chance de ocorrer. Em um período de 24 horas, os três cenários juntos resultariam em uma disponibilidade média de recursos eólicos de aproximadamente 11,922 horas. Esse período

corresponde a 49,68% das horas diárias. A velocidade média entre os três cenários foi  $4,532 \pm 0,154$  e a probabilidade associada foi 0,166.

Tabela 35 - Dados de potência média, geração média e seleção de geradores eólicos.

Gerador eólico	Potência média (W)	Geração média (kWh ano <sup>-1</sup> )	Seleção (%)
280 W	$10,165 \pm 6,081$	$59,807 \pm 18,893$	2,51
400 W	$58,906 \pm 15,196$	$251,502 \pm 41,212$	2,51
500 W	$154,764 \pm 43,388$	$659,405 \pm 124,742$	8,04
1 kW	$158,777 \pm 53,892$	$673,987 \pm 160,991$	1,01
2 kW	$315,682 \pm 101,032$	$1.342,02 \pm 295,389$	9,05
3 kW	$410,575 \pm 110,541$	$1.751,85 \pm 303,10$	7,03
5 kW	$599,539 \pm 134,876$	$2.566,20 \pm 340,00$	13,57
10 kW	$1.113,90 \pm 330,37$	$4.747,97 \pm 919,00$	13,07
20 kW	$2,225.50 \pm 742,24$	$9.460,13 \pm 2.155,98$	36,18
30 kW	$3.186,57 \pm 1.030,85$	$13.530,85 \pm 3.154,98$	2,01
50 kW	$4.672,58 \pm 1.390,06$	$19.880,83 \pm 4.128,28$	5,03

Após avaliar os cenários de probabilidade de cada fazenda e obter uma média desses cenários, foram realizadas interpolações cúbicas nas curvas de potência dos aerogeradores para a velocidade de projeto. A potência de operação, geração média e o percentual de seleção de cada um dos equipamentos são apresentadas na Tabela 35. Pode-se observar que os aerogeradores de 500 e 1000 W possuem potências médias semelhantes para os casos avaliados. O gerador de 1 kW tem geração superior ao de 500 W em apenas 2,59%. Isso se deve à velocidade do vento nominal para os dois dispositivos. O gerador de 500 W tem velocidade nominal de  $7 \text{ m s}^{-1}$ , isto é, atinge sua potência nominal com velocidade inferior à velocidade nominal do gerador de 1 kW, que é  $9 \text{ m s}^{-1}$ .

O equipamento que possui a melhor relação custo benefício para os sistemas avaliados foi o gerador de 20 kW, com percentual de alocação de 36,18%. O de menor viabilidade foi o gerador de 1 kW, com apenas 1,01%. O custo dos equipamentos para as propriedades em estudo foi em média  $3.098,31 \pm 7.048,22$  dólares, sendo os custos máximo e mínimo iguais a 63.962,26 e 516,98 dólares, respectivamente. O custo médio final foi de  $4.306,64 \pm 9.797,03$  dólares, com um acréscimo de 39% sobre o valor dos equipamentos, conforme demonstrado na metodologia.

### 3.3.4 Resultados da tomada de decisão

A partir dos dados de dimensionamento dos três sistemas de geração, foram obtidos valores médios para cada uma das variáveis de tomada de decisão (Tabela 36). Nesta análise, o sistema 1 (S1) é o sistema de geração a biomassa, o sistema 2 (S2) é o sistema de geração fotovoltaica e o sistema 3 (S3) é o sistema de geração eólica. Os sistemas que obtiveram os menores valores para as variáveis  $x_1$ ,  $x_3$ ,  $x_5$ ,  $x_6$  e  $x_9$  foram S3, S2, S2 e S3, S2 e S2, respectivamente. Por outro lado, os sistemas que obtiveram os maiores valores para as variáveis  $x_2$ ,  $x_4$ ,  $x_7$  and  $x_8$  foram S2, S1, S1 e S3, e S1, respectivamente. Tendo em vista que quanto menor o  $I_{SS}$ , mais adequado é o sistema para a propriedade; quanto menores as variáveis positivas e maiores as variáveis negativas, melhor será a avaliação para um determinado sistema.

Tabela 36 - Valores médios das variáveis por sistemas de geração avaliados.

Variável	Sistema 1 (S1)	Sistema 2 (S2)	Sistema 3 (S3)
$x_1$ (\$)	8.197,21 ± 14.950,34	5.139,74 ± 12.648,86	4.306,64 ± 9.797,03
$x_2$ (\$)	14.092,06 ± 62.167,70	14.824,80 ± 48.824,83	8.329,87 ± 27.077,49
$x_3$ (anos)	15,120 ± 10,973	7,380 ± 3,745	7,787 ± 4,602
$x_4$ (m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )	1,368 ± 3,318	0,000 ± 0,000	0,000 ± 0,000
$x_5$ (m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )	1,003 ± 3,221	0,000 ± 0,000	0,000 ± 0,000
$x_6$ (dB)	70,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00	70,92 ± 0,00
$x_7$ (nota)	10,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00	10,00 ± 0,00
$x_8$ (nota)	10,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00
$x_9$ (m <sup>2</sup> )	228,048 ± 1.362,774	0,000 ± 0,000	2.261,141 ± 5.055,767

Tabela 37 - Dados médios do índice de seleção de sistemas.

Tomada de decisão	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3
Indicadores financeiros	37,054 ± 20,765	10,054 ± 10,330	17,024 ± 8,579
Indicadores ambientais	16,086 ± 0,000	0,000 ± 0,000	13,601 ± 0,000
Indicadores sociais	-66,574 ± 0,000	0,000 ± 0,000	-38,745 ± 0,000
Indicadores físicos	1,036 ± 0,996	0,000 ± 0,000	11,573 ± 0,000
Todos os indicadores	-12,398 ± 20,556	10,054 ± 10,330	3,457 ± 8,579

Analisando o resultado da tomada de decisão por indicador na Tabela 37, verifica-se que do ponto de vista financeiro ( $I_{SS} = 10,054$ ), ambiental ( $I_{SS}$  nulo) e físico ( $I_{SS}$  nulo), o melhor sistema seria o S2, em geral. Porém, sob a perspectiva social, o sistema mais indicado

seria o S1, com  $I_{SS} = -66.574$ . Considerando todos os indicadores simultaneamente, verifica-se que a ordem decrescente de prioridade na seleção dos sistemas seria biomassa, eólica e solar. Os percentuais de sistemas selecionados para as configurações avaliadas seguem na Tabela 38.

Tabela 38 - Porcentagem de seleção para cada tipo de sistema.

Tomada de decisão	Biomassa	Solar	Eólica
Indicadores financeiros	20,72	64,86	14,42
Indicadores ambientais	0,00	100,00	0,00
Indicadores sociais	100,00	0,00	0,00
Indicadores físicos	0,00	100,00	0,00
Todos os indicadores	62,16	15,32	22,52

### 3.3.5 Desempenho da rede neural artificial

Após a obtenção dos resultados da tomada de decisão, vários testes foram realizados para propor uma rede neural robusta e eficiente. Os testes foram divididos em quatro casos de simulação. As configurações de rede para cada caso foram simuladas no *Matlab*, sendo a validação cruzada realizada no *Orange*.

#### 3.3.5.1 Caso de simulação 1 (CS1)

No caso da simulação 1, foram utilizadas todas as entradas e amostras disponíveis, sem nenhum processamento de dados. Para cada configuração de porcentagem de treinamento e número de neurônios, a rede neural foi simulada 20 vezes. As porcentagens de previsões corretas apresentadas na Tabela 39 são valores médios das 20 simulações realizadas. O número de neurônios foi de 10 a 500 neurônios, causando um sobre ajuste proposital da rede. Assim, foi possível verificar uma eficiência máxima de 68,38% utilizando 70% dos dados para treinamento e uma rede com 300 neurônios. No geral, a acurácia média obtida foi de  $62,48 \pm 2,49\%$ , considerando todas as configurações possíveis.

A Figura 11 mostra os resultados da validação cruzada para CS1. Os valores médios das métricas foram AUC de (a)  $0,878 \pm 0,054$  e (b)  $0,892 \pm 0,053$ , CA de (a)  $0,744 \pm 0,054$  e (b)  $0,751 \pm 0,045$ , F1 de (a)  $0,723 \pm 0,079$  e (b)  $0,737 \pm 0,059$ , P de (a)  $0,726 \pm 0,070$  e (b)  $0,737 \pm 0,056$  e Recall de (a)  $0,744 \pm 0,054$  e (b)  $0,751 \pm 0,045$ . A função de ativação Tanh

(b) superou ReLU (a) em todas as métricas. Ressalta-se que os resultados da validação cruzada obtiveram acurácia superior à encontrada na seção de testes (Tabela 39), considerando a utilização de diferentes algoritmos para treinamento.

Tabela 39 - Acurária da rede neural para CS1.

Treinamento (%)	Número de neurônios							
	10	20	50	100	150	200	300	500
30	61,30	61,34	60,35	59,41	58,46	57,10	57,10	59,32
40	60,31	63,73	60,40	64,81	63,82	59,12	59,12	58,95
50	61,80	63,19	63,24	63,19	64,81	65,89	65,89	59,85
60	62,07	63,57	65,76	64,18	62,10	62,10	62,80	64,90
70	62,88	62,07	63,55	67,51	63,55	63,55	<b>68,38</b>	63,68

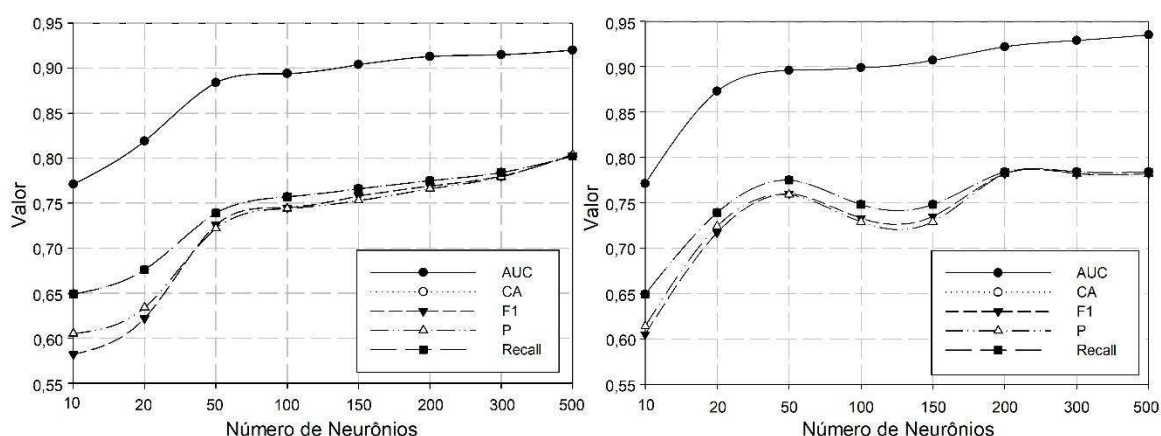


Figura 11 - Validação cruzada para CS1 com função de ativação ReLU (a) e Tanh (b).

### 3.3.5.2 Caso de simulação 2 (CS2)

No caso da simulação 2, foi realizada uma avaliação no banco de dados e, em seguida, foram retiradas duas propriedades, que apresentavam descritores com valores discrepantes (*outliers*) em relação às demais. Esses *outliers* fizeram com que grande parte da base de dados tivesse pequenas variações, dificultando o treinamento da rede e, conseqüentemente, um aumento da acurácia nas etapas de validação e teste do CS1. A Tabela 40 mostra os dados de acurácia média para as configurações de simulação do CS2. A acurácia média máxima de 80,79% ocorreu quando 70% do conjunto de dados foi utilizado para treinamento e a rede configurada com 50 neurônios. Para CS2, a acurácia média geral foi de  $74,67 \pm 2,85\%$ .

A Figura 12 mostra os resultados da validação cruzada para CS2. Os valores médios das métricas foram AUC de (a)  $0,868 \pm 0,058$  e (b)  $0,892 \pm 0,036$ , CA de (a)  $0,706 \pm 0,080$

e (b)  $0,739 \pm 0,050$ , F1 de (a)  $0,696 \pm 0,084$  e (b)  $0,734 \pm 0,050$ , P de (a)  $0,694 \pm 0,087$  e (b)  $0,739 \pm 0,045$  e Recall de (a)  $0,706 \pm 0,080$  e (b)  $0,739 \pm 0,050$ . Novamente, a função de ativação Tanh apresentou valores para as métricas superiores aos obtidos para o ReLU, isto é, a transformação não linear dos sinais de entrada pela Tanh foi mais eficaz em CS1 e CS2. Tabela 40 - Acurária da rede neural para CS2.

Treinamento (%)	Número de neurônios							
	5	8	10	15	20	30	50	100
30	68,68	71,80	70,34	71,66	72,43	73,77	74,41	75,38
40	70,28	73,90	72,02	72,72	72,21	73,98	72,24	75,50
50	72,81	72,84	72,90	73,72	74,15	75,60	77,86	78,63
60	72,79	76,01	75,10	76,93	77,25	77,48	79,23	79,17
70	73,40	74,49	73,99	75,72	78,58	75,63	<b>80,79</b>	80,54

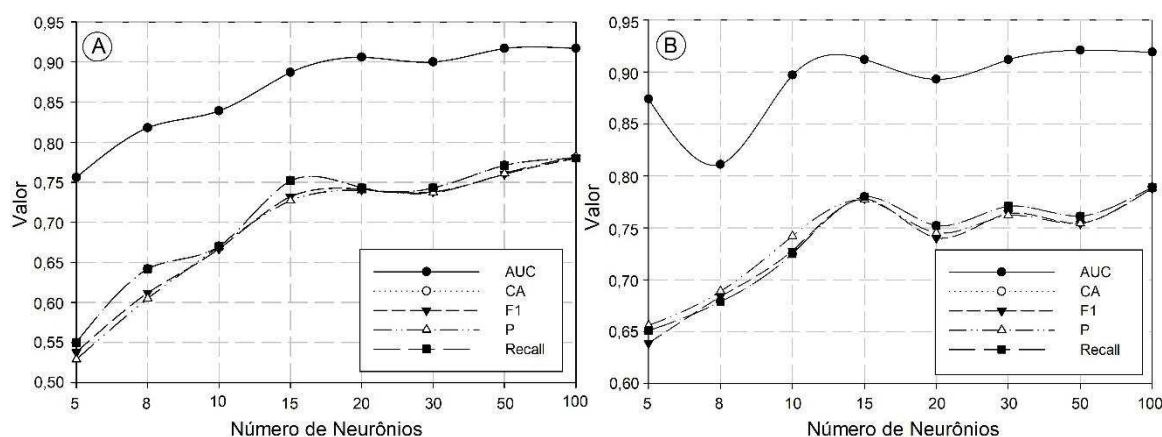


Figura 12 - Validação cruzada para CS2 com função de ativação ReLU (a) e Tanh (b).

Comparando os dados de validação cruzada de CS1 com CS2, não é possível afirmar claramente que houve uma melhoria no desempenho da rede neural, uma vez que os procedimentos ocorreram para quantidades distintas de neurônios. Porém, pelos gráficos pode-se perceber que para CS2 a rede atinge um nível de precisão considerável para um número de neurônios menor que CS1. No caso (a), por exemplo, seriam necessários 100 neurônios para que a rede atingisse uma precisão de 75% no CS1. Esse percentual de acerto foi obtido no CS2 com cerca de 30 neurônios, reduzindo o processamento necessário.

### 3.3.5.3 Caso de simulação 3 (CS3)

Na tentativa de reduzir o número de entradas e melhorar a precisão da rede, o método de regressão linear múltipla foi utilizado para a seleção de dados. Um modelo foi ajustado e

a estatística de teste t aplicada às constantes de ajuste, obtendo-se o p-valor. Os resultados seguem na Tabela 41. Quatro entradas com constantes de ajuste de menor p-valor foram selecionadas. O caso de simulação 3 consistiu em uma rede de quatro entradas e uma saída. Tabela 41 - Dados do modelo ajustados para as variáveis de entrada e saída da rede neural.

Entrada	Constante de ajuste	p-valor	Entrada	Constante de ajuste	p-valor
1	$\beta_1$	0,15045	5	$\beta_5$	0,42302
2	$\beta_2$	0,01031	6	$\beta_6$	0,98218
3	$\beta_3$	0,16402	7	$\beta_7$	0,68885
4	$\beta_4$	0,68711	8	$\beta_8$	0,07473

Com as entradas 1, 2, 3 e 8, os resultados foram obtidos para diversas condições de simulação de acordo com a Tabela 42. A acurácia média máxima aumentou para 81,80% e, como no CS2, ocorreu para treinamento com 70% dos dados de uma rede com 50 neurônios. Uma acurácia média de 80% também foi obtida para arquiteturas de rede com 8, 15, 20 e 30 neurônios, proporcionando uma relação interessante entre alta precisão e baixo processamento na operação de predição. No geral, o percentual médio de acertos foi de  $78,82 \pm 3,36\%$ . Verificou-se um aumento de 5,56% na acurácia da rede utilizando apenas a metade dos dados de entrada, ou seja, a outra metade estava causando distorções no treinamento e dificultando a validação da rede.

Tabela 42 - Acurácia da rede neural para CS3.

Treinamento (%)	Número de neurônios							
	5	8	10	15	20	30	50	100
30	77,07	76,00	77,25	75,68	76,46	76,42	76,92	76,05
40	76,70	77,99	78,87	77,81	78,67	78,76	79,42	76,88
50	79,37	78,90	79,98	80,61	79,26	79,22	80,38	78,67
60	79,59	79,32	79,37	79,69	80,83	79,87	79,28	79,74
70	79,68	80,00	79,31	80,51	80,24	80,28	<b>81,80</b>	81,24

Na Figura 13 mostra-se os resultados da validação cruzada para o caso da simulação 3. Os valores médios das métricas foram AUC de (a)  $0,915 \pm 0,027$  e (b)  $0,922 \pm 0,021$ , CA de (a)  $0,789 \pm 0,058$  e (b)  $0,807 \pm 0,032$ , F1 de (a)  $0,770 \pm 0,088$  e (b)  $0,820 \pm 0,080$ , P de (a)  $0,765 \pm 0,097$  e (b)  $0,794 \pm 0,067$  e Recall de (a)  $0,789 \pm 0,058$  e (b)  $0,807 \pm 0,032$ . Para as duas funções de ativação, melhores métricas foram obtidas para CS3 em comparação com CS2, com Tanh melhor do que ReLU. No CS3, todas as métricas apresentaram valores superiores a 80% a partir de 15 neurônios para (a) e (b).

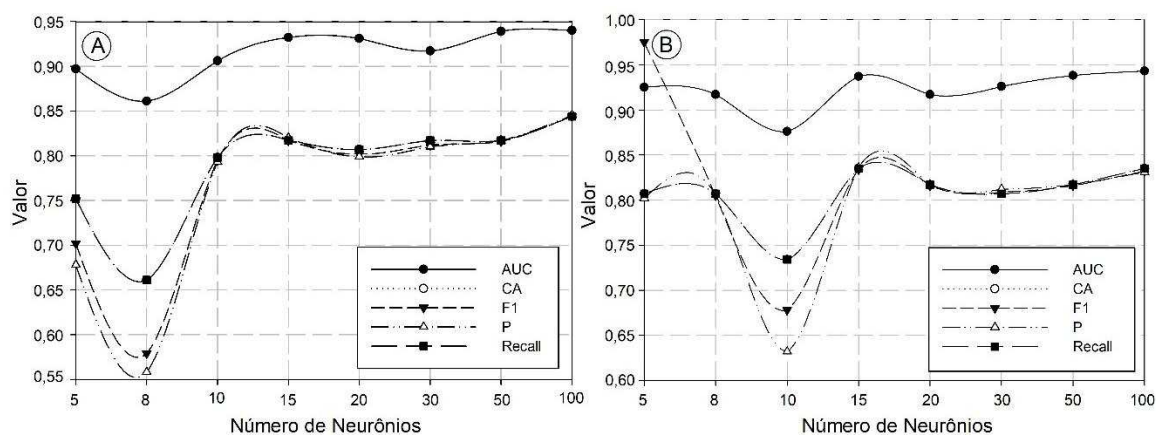


Figura 13 - Validação cruzada para CS3 com função de ativação ReLU (a) e Tanh (b).

### 3.3.5.4 Caso de simulação 4 (CS4)

A fim de reduzir ainda mais os dados de entrada, um caso de simulação 4 foi desenvolvido. CS4 consistiu em uma rede neural com duas entradas e uma saída. As entradas selecionadas foram 2 e 8, as duas com o menor p-valor associado à sua constante de ajuste. Na Figura 14 seguem os resultados da validação cruzada para este caso. Os valores médios para as métricas foram AUC de (a)  $0,727 \pm 0,085$  e (b)  $0,752 \pm 0,017$ , CA de (a)  $0,650 \pm 0,050$  e (b)  $0,652 \pm 0,033$ , F1 de (a)  $0,560 \pm 0,075$  e (b)  $0,581 \pm 0,053$ , P de (a)  $0,560 \pm 0,143$  e (b)  $0,580 \pm 0,093$  e Recall de (a)  $0,650 \pm 0,050$  e (b)  $0,652 \pm 0,033$ . Constatou-se que as duas entradas não apresentaram dados suficientes para um treinamento adequado e eficiente da rede, uma vez que os resultados da validação foram inferiores àqueles encontrados para CS1, CS2 e CS3. Assim, a realização de testes para as várias configurações da rede proposta no CS4 foi descartada, uma vez que por validação cruzada a arquitetura mais adequada foi a apresentada no CS3.

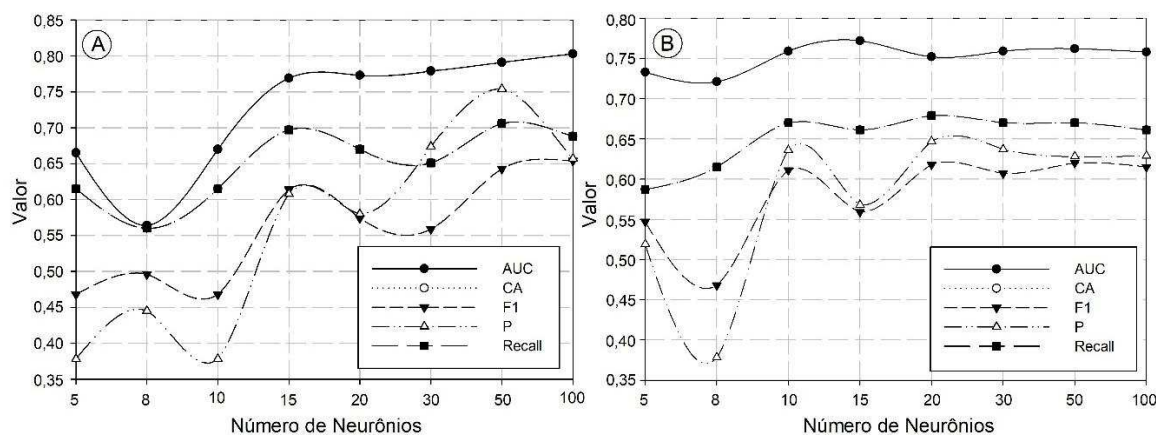


Figura 14 - Validação cruzada para CS4 com função de ativação ReLU (a) e Tanh (b).

### 3.3.5.5 Melhor configuração da rede

O melhor caso de simulação foi o CS3 e a melhor condição de operação da rede foi com a utilização de 70% do conjunto de dados para treinamento de uma arquitetura com 50 neurônios. A Tabela 43 mostra a matriz de confusão completa de um teste aleatório para esta configuração. Verifica-se que a acurácia encontrada, somando os percentuais de acertos da diagonal principal da matriz, foi de 81,70%. O valor obtido encontra-se dentro da faixa esperada para a acurácia média de  $81,80 \pm 3,36\%$ . As matrizes de confusão de treinamento, validação e teste apresentaram percentuais de acertos de 81,80, 81,30 e 81,30%, respectivamente. O método de treinamento adotado foi o algoritmo de gradiente conjugado.

Os resultados de entropia cruzada obtidos para treinamento, validação e teste no exemplo estudado foram 1,943, 3,659 e 3,862, respectivamente. Na Figura 15 há um gráfico da época versus entropia cruzada. É chamada de época de treinamento cada vez que uma amostra é apresentada para ajustar os pesos sinápticos e os limites da rede. O melhor desempenho de validação foi de 0,1507 para a época 29. Vale ressaltar que a rede neural proposta (SC3) tem uma faixa operacional definida por:  $0 \leq I_1 \leq 400$  cabeças,  $0 \leq I_2 \leq 350$  cabeças,  $0,08 \leq I_3 \leq 300$  hectares e  $4,41 \leq I_8 \leq 6,45$  m s<sup>-1</sup>. A confiabilidade dos resultados não é garantida para propriedades que não atendam a essas restrições.

Tabela 43 - Matriz de confusão completa para teste da melhor configuração da rede.

		Classificação real		
		Sistema 1 (S1)	Sistema 1 (S1)	Sistema 1 (S1)
Classificação esperada	Sistema 1 (S1)	55.05%	0.92%	3.67%
	Sistema 2 (S2)	1.83%	11.01%	3.67%
	Sistema 3 (S3)	4.59%	4.67%	15.60%

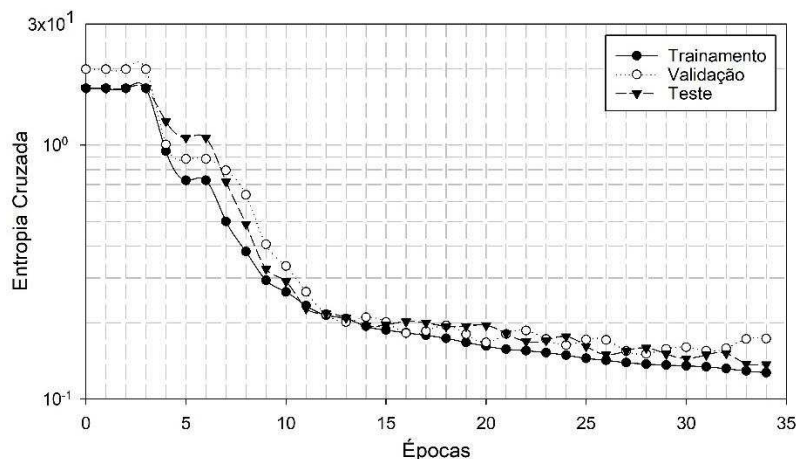


Figura 15 - Desempenho do teste aleatório para a melhor configuração de rede.

### 3.4 Discussão

De acordo com o Sistema de Informações Geográficas do Setor Elétrico (SIGEL), o Brasil possui 323.630 empreendimentos de geração distribuída, dos quais 323.399 (99,92%) têm como combustível a irradiação solar (ANEEL, 2021). Cerca de 7,39% dos empreendimentos pertencem à classe de abastecimento rural e aproximadamente 74,09% à classe residencial. Por meio das informações da Tabela 44, verifica-se uma popularização da energia solar, uma vez que sistemas que utilizam essa fonte alternativa fornecem vantagens ao proprietário do ponto de vista financeiro, conforme discutido previamente neste trabalho.

Por meio de uma análise paralela aos resultados obtidos para o indicador financeiro na tomada de decisão (Tabela 38), observa-se que 64,86% dos sistemas de geração selecionados para a área rural do município de estudo seriam movidos a energia solar. Este percentual é maior do que obtido para os sistemas a biomassa e energia eólica em 3,13 e 4,50 vezes. Porém, no atual cenário energético, a parte econômica não deve ser única e nem mesmo prioritária. Os pesos atribuídos por especialistas às variáveis enfatizam essa questão. As variáveis ambientais, sociais, financeiras e físicas foram ponderadas com pesos médios iguais a 3,70; 3,33; 2,25 e 1,16, respectivamente.

Tabela 44 - Número de empreendimentos de geração distribuída, por tipo de combustível e classe de fornecimento.

Combustível	Rural	Residencial	Industrial	Comercial	Pública	Total
Resíduo urbano	3	0	1	0	0	4
Irradiação solar	23.736	239.747	6.707	52.214	995	323.399
Potencial hidráulico	2	0	7	6	0	15
Vento	3	22	4	10	2	41
Licor negro	1	0	0	0	0	1
Casca de arroz	0	0	1	0	0	1
Biogás	152	0	3	4	1	160
Bagaço de cana	8	1	0	0	0	9

Fonte: (ANEEL, 2021).

A questão ambiental tem se tornado cada vez mais relevante no setor de energia. Muito se tem falado sobre a redução das emissões de dióxido de carbono por meio do uso de fontes de energia com baixo teor de carbono ou com o mínimo de emissões possível. Esse

processo de transição energética é conhecido como descarbonização e afeta diretamente a pegada de carbono de cada empresa, município ou país. Apesar de não apresentar um indicador ambiental satisfatório com base nas variáveis abordadas neste trabalho, os sistemas de biomassa têm sido importantes para o desenvolvimento de um mercado brasileiro de baixo carbono. Se os sistemas de biomassa selecionados para o município de São Francisco do Glória fossem implantados, aproximadamente 133,89 m<sup>3</sup> de resíduos seriam tratados diariamente. Esse montante corresponde a 88,19% da quantidade de resíduos produzidos pelas propriedades rurais avaliadas.

O fator de emissão de CO<sub>2</sub> pela matriz elétrica brasileira é de aproximadamente 0,406 toneladas por MWh de energia consumida (SILVA DOS SANTOS et al., 2018) e o consumo de energia na área rural do município é de 1,072 GWh por ano. Implantados os sistemas de geração propostos, a produção anual seria de 1,975 GWh. Há um excedente de energia, pois os sistemas de biomassa são projetados para aproveitar todos os resíduos disponíveis e para certos projetos o potencial é maior do que o consumo. Dessa forma, as emissões de CO<sub>2</sub> seriam reduzidas em 435,23 toneladas equivalentes por ano e ainda haveria um crédito de CO<sub>2</sub> injetado na rede de 366,62 toneladas. No balanço de emissões, foram consideradas apenas as fases de operação dos sistemas. O biogás é biogênico e não fóssil, portanto, o fator de emissão para sistemas que utilizam biomassa também foi nulo.

Pesquisadores investigaram a relação causal entre o consumo de energia de biomassa, emissões de CO<sub>2</sub> e PIB para os Estados Unidos de 1973 a 2016. Os resultados sugerem que o aumento de 1% no consumo de energia de biomassa causa uma redução de 0,65% nas emissões de CO<sub>2</sub> a longo prazo (KIM; CHOI; SEOK, 2020). Assumindo uma extensão desse cenário para o Brasil e sabendo que 62,16% dos sistemas propostos são a biomassa e correspondentes a um percentual de geração de 93,89%, uma redução nas emissões de CO<sub>2</sub> é estimada em 61,03% para a área analisada. Essa parcela inclui a geração de energia limpa e o sequestro de carbono da atmosfera. Ressalta-se que o valor encontrado direciona a análise, mas é superior ao real, uma vez que a matriz elétrica norte-americana possui fator de emissão igual a 0,694 toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub> por MWh. Cerca de 70% da energia elétrica gerada nos EUA é proveniente de recursos fósseis (KIM; DALE, 2005).

Em suma, a geração de eletricidade é responsável por 25% das emissões de gases de efeito estufa no mundo e uma transição energética global está em curso desde 2017, quando foram instalados quase 160 GW de energia renovável (sem considerar as grandes hidrelétricas) (FRANKFURT SCHOOL-UNEP CENTRE/BNEF, 2017). A queda nos custos de tecnologia impulsionou investimentos e tornou este tipo de energia mais atraente do que

os combustíveis fósseis em muitos países ao redor do mundo (RAM et al., 2018). Porém, os efeitos do novo sistema de energia não se restringem apenas à geração, mas também às consequências para toda a sociedade. As evidências apontam para uma correlação positiva entre uso de energia, crescimento econômico e emprego (CDC, 2016). Uma economia de baixo carbono resultará na criação, substituição e eliminação de diversos postos de trabalho.

Nas Américas Central e do Sul, com o crescimento econômico na maioria dos países, estima-se que o consumo de energia elétrica chegará a 2.420 TWh até 2050, ou seja, haverá um aumento de 105% em relação à demanda apresentada em 2015 (DE BARBOSA et al., 2017). Uma característica da geração de energia na América do Sul é a predominância da energia hidrelétrica e da bioenergia, que refletiu na triplicação da capacidade instalada de energia renovável entre 2006 e 2015 (REN21, 2017). No Brasil, a maior parte desse crescimento esteve relacionada à bioenergia e à energia eólica *onshore*; enquanto que, no Chile, Peru e Uruguai, a energia solar fotovoltaica aumentou significativamente (DE BARBOSA et al., 2017; RAM et al., 2017). Nessa perspectiva, empregos no setor têm sido gerados predominantemente por projetos de bioenergia e hidrelétricas, 827 mil até 2020 e 357 mil até 2025, respectivamente. No entanto, após o período de transição até 2030, a tendência é que o cenário mude para que a energia solar contribua para o surgimento de 930 mil empregos até 2050, junto com os 202 mil do setor de baterias (RAM; AGHAHOSSEINI; BREYER, 2020).

Na tomada de decisão deste trabalho, avaliou-se o impacto da implantação de sistemas de geração de fontes alternativas no desenvolvimento regional. A predominância de empresas fornecedoras de sistemas de energia solar no interior faz com que os sistemas de biomassa e eólica tenham um caráter inovador para o comércio local de equipamentos para o setor de energia. Em consequência disso, somente as gerações de empregos para esses dois tipos de sistemas tiveram pontuações contabilizadas para a variável  $x_7$ , refletindo diretamente no resultado final obtido. A implementação das soluções propostas será capaz de promover um cenário semelhante ao apresentado atualmente para o Brasil e o continente sul-americano.

Além dos contextos financeiro, ambiental e social abordados, ainda há uma lacuna para a discussão do contexto físico. Como nas propriedades estudadas a fonte de economia vem da agricultura e pecuária familiar, cerca de 99,39% da área existente é utilizada, seja para plantio de lavouras com produtos comercializáveis, disponibilidade de pastagem para gado e até cultivo de hortaliças para consumo próprio. A terra já possui um valor agregado para o produtor rural, informação que é difícil de ser quantificada e, portanto, não incluída

na análise financeira. Em face de um indicador físico, a variável área de instalação dos sistemas foi implementada na estrutura de decisão e, apesar de não ser prioritária em relação as demais, contribuiu para a seleção dos sistemas de geração fotovoltaica.

Metodologias de dimensionamento e seleção de sistemas foram propostas e analisadas neste trabalho. Porém, para que a implantação aconteça de forma efetiva, principalmente nas áreas rurais, onde ainda existe grande insegurança no uso de tecnologias, incentivos governamentais serão cada vez mais necessários. No Brasil, o primeiro incentivo à geração distribuída foi a norma regulamentadora 482 de 2012, que regulamentou a conexão dos sistemas à rede de distribuição da concessionária local e o registro do excedente de produção na forma de crédito (ANEEL, 2012). A segunda foi a isenção opcional de impostos no processo de compensação de energia, fornecendo a cada estado a opção de aderir e legislar sobre o tema (BRASIL, 2015). O terceiro foi a criação do Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD) pelo governo federal em 2015, para promover geração limpa e renovável de energia por unidades consumidoras (MME, 2015).

O ProGD prevê a aplicação de mais de 18,86 bilhões de dólares até 2030 e espera que o Brasil tenha cerca de 2,7 milhões de unidades consumidoras produzindo sua própria energia ao final desse período. O programa conta com diversas medidas de incentivo à indústria de equipamentos fotovoltaicos e instalação por pessoas físicas e jurídicas. No entanto, é interessante que esses benefícios sejam expandidos para outras fontes alternativas, como biomassa e eólica. O governo chinês desenvolveu uma política de incentivos com base em um plano quinquenal que abrange a energia eólica, solar fotovoltaica, pequenas hidrelétricas, biomassa e geotérmica. As quatro principais estratégias foram focadas em pesquisa e desenvolvimento, isenções de impostos e tarifas, conexão com a rede e desenvolvimento de mercado (ZHAO; CHEN; CHANG, 2016). Nos Estados Unidos, as políticas estaduais foram avaliadas para a produção de eletricidade e calor a partir da biomassa florestal. Regulamentação, fornecimento de informações, incentivos fiscais e de produção, financiamento de projetos e prioridade de fontes foram discutidos para o período de 2004 a 2013 (EBERS BROUGHEL, 2019). Em Ontário, província canadense, políticas fiscais, subsídios de custo de capital, impostos de propriedade e incentivos federais desempenharam um papel vital na viabilidade de projetos de geração distribuída baseados em energia eólica (ALBADI; EL-SAADANY, 2009). Para as regiões italianas, a capacidade de alguns governos regionais de direcionar fundos alocados pelo governo central ou pela Comissão Europeia para a produção eficiente de energia renovável foi investigada (CARFORA et al., 2017).

### 3.5 Conclusão

- Neste capítulo, foram avaliados os sistemas de geração a biomassa, energia solar e eólica para propriedades rurais de um típico município com economia baseada na agricultura e pecuária familiar.
- Os sistemas que utilizam biomassa como combustível foram projetados para aproveitar todos os resíduos gerados pela propriedade rural. Sendo esses, compostos por um biodigestor de lagoa coberta e um gerador a gás.
- Sistemas que usam energia solar e eólica foram projetados para atender demandas específicas de energia; e para sistemas eólicos, três cenários foram adotados para a velocidade do vento na área rural do município de estudo.
- O custo total médio necessário para a implantação dos sistemas de biomassa foi de  $8.197,21 \pm 14.950,34$  dólares, sendo o custo de aquisição do moto gerador equivalente a 14,95% do custo para construção do biodigestor.
- Em sistemas fotovoltaicos, os componentes mais caros e com maiores probabilidades de falha são os inversores. Os custos de aquisição dos módulos correspondem a 53% dos custos com inversores. O custo médio desse tipo de sistema corresponde a  $5.139,74 \pm 12.706,23$  dólares.
- Quanto aos sistemas eólicos, estima-se que os custos dos equipamentos sejam de  $3.098,31 \pm 7.048,22$  dólares. O custo médio final é 39% superior ao dos equipamentos, assim como nos sistemas fotovoltaicos.
- Uma ferramenta de tomada de decisão foi desenvolvida para avaliar o melhor sistema com base em indicadores financeiros, ambientais, sociais e físicos. Nove variáveis foram utilizadas e os pesos estimados utilizando o método de análise hierárquica.
- A variável mais relevante refere-se ao uso de água; e a menos relevante, a área de instalação ocupada. O sistema com maior percentual de seleção foi o sistema de biomassa, com 62,16%. Os sistemas que utilizam energia solar e eólica tiveram percentuais de seleção iguais a 15,32 e 22,52%, respectivamente.
- Os dados da tomada de decisão alimentaram a camada de saída de uma rede neural artificial. Os testes realizados foram divididos em quatro casos de simulação. CS3 teve a melhor acurácia com metade dos dados de entrada utilizados em CS1 e CS2.
- As entradas mais adequadas para o problema foram selecionadas usando um método de regressão linear múltipla. Número de animais, área e velocidade do vento na

fazenda foram as informações de entrada que forneceram mais acurácia na estimativa da melhor solução energética.

- A acurácia média máxima de  $81,80 \pm 3,36\%$  foi obtida para uma rede com 50 neurônios, na qual 70% dos dados foram utilizados para treinamento. Em teste realizado de forma aleatória, foi encontrada acurácia de 81,70%, comprovando a robustez e eficiência da arquitetura proposta.
- O consumo de energia na área rural do município é atualmente de 1,072 GWh e a geração estimada seria de 1,975 GWh por ano. Se todos os sistemas propostos fossem implantados, aproximadamente 435,23 toneladas de CO<sub>2</sub> deixariam de ser emitidas anualmente e o excedente de energia alternativa produzida corresponderia a um crédito de CO<sub>2</sub> de 366,62 toneladas anualmente.
- No Brasil, já existem alguns incentivos para implantação de sistemas de micro e minigeração, mas com foco na energia solar fotovoltaica. O ideal é que políticas e programas sejam ampliados para que fontes alternativas como biomassa e eólica tenham participação mais efetiva, como na China, por exemplo.
- Portanto, a metodologia proposta nesta etapa do trabalho pode ser considerada uma ferramenta robusta e precisa com capacidade de otimizar o processo de decisão para escolha da fonte alternativa de energia mais viável para um determinado local, sem a necessidade de uma grande quantidade de informações.

## 4 CONCLUSÃO

### 4.1 Conclusões Finais

Nesta dissertação foram propostas soluções energéticas para propriedades rurais de um pequeno município da Zona da Mata do estado de Minas Gerais. Trata-se de uma região em que a economia no campo é movida pela agricultura e pecuária familiar. Para tanto, utilizou-se de técnicas de otimização para que fosse encontrada a melhor fonte alternativa de energia para cada caso. A metodologia proposta foi dividida em duas etapas.

Na primeira foi avaliada como fonte alternativa de energia para as propriedades rurais somente a biomassa proveniente do esterco animal e esgoto doméstico. O potencial foi obtido por meio de uma metodologia de conversão energética e os componentes do sistema de geração dimensionados por meio de um processo iterativo. Neste cenário, somente o prazo de retorno de investimento foi utilizado como parâmetro para determinação da viabilidade do sistema. Quatro casos de análise financeira foram elaborados e quatro modelos foram ajustados aos dados obtidos em cada um deles. Um *payback* máximo de cinco anos foi utilizado na obtenção de potenciais mínimos que viabilizassem sistemas.

Propriedades rurais foram alocadas em usinas de biogás por meio de um algoritmo determinístico construtivo. O potencial energético total estimado para o município foi de 1,913 GWh ano<sup>-1</sup> e a geração média por propriedade igual a 17.236,20 kWh ano<sup>-1</sup>. O número de usinas alocadas variou entre 35 e 52 unidades. Além disso, um modelo de superfície de resposta de segunda ordem com  $\overline{R^2}$  de 0,924 foi obtido para a estimativa do potencial energético em função do consumo e lucro da propriedade. Verificou-se que o grau de instrução do proprietário rural influencia na interação entre perspectiva de investimento em energias renováveis e consumo de energia elétrica da fazenda. Dessa forma, um problema ambiental foi inicialmente solucionado por meio do reaproveitamento dos resíduos energeticamente, dando origem a um problema financeiro. Este foi contornado pela alocação de consórcios de geração e o ciclo de análises foi concluído pela avaliação da perspectiva de investimento nesses sistemas, mostrando o quão completa e eficiente a abordagem realizada.

Na segunda etapa foram avaliadas três fontes alternativas: biomassa, solar e eólica. A metodologia para dimensionamento de sistemas à biomassa foi a mesma da primeira etapa. Analogamente, os sistemas à energia solar e à energia eólica foram propostos com o intuito de selecionar equipamentos que apresentem uma melhor relação custo-benefício para o projeto. Para determinação do potencial de energia solar foi feito um mapeamento de locais

de medição irradiação solar ao redor do município e para obtenção do potencial de energia eólica foram propostos três cenários de probabilidade de ocorrência para velocidades do vento com base na distribuição *Weibull*.

A escolha da melhor fonte alternativa foi realizada por meio de uma ferramenta de tomada de decisão com nove variáveis correspondentes a indicadores financeiro, ambiental, social e físico. Os pesos das variáveis foram definidos através de um método de análise hierárquica. O indicador definido com maior prioridade foi o ambiental. Sistemas a biomassa foram selecionados para uma quantidade de propriedades rurais correspondentes a 62,16%. Os sistemas que utilizam energia solar e eólica foram viáveis para 15,32 e 22,52% dos casos, respectivamente. Com o perfil agro econômico de cada propriedade rural e sua melhor fonte alternativa, foi treinada uma rede neural artificial. Quadro casos de simulação foram realizados e a configuração mais robusta da rede foi com quatro entradas, 50 neurônios e utilizando 70% dos dados para treinamento. A precisão obtida foi em média de 81,80%. Logo, o uso de inteligência artificial pode ser consolidado no setor elétrico por simplificar processos de decisão, no que tange a metodologia e disponibilidade de dados.

Portanto, as modelagens e técnicas propostas neste trabalho apresentaram bons resultados para o cenário avaliado, contribuindo de forma significativa para a otimização de sistemas de energia renovável em pequenas e médias propriedades rurais. A metodologia apresenta potencial de utilização para regiões com características semelhantes às do município estudado em virtude da sua robustez matemática e adaptabilidade.

## 4.2 Trabalhos futuros

- Coletar dados em regiões com características similares ao município de São Francisco do Glória, a fim de validar a metodologia proposta.
- Avaliar outras rotas de conversão da biomassa em energia, como gaseificação e combustão direta para pequenas e médias propriedades rurais.
- Implementar mais variáveis para cada um dos indicadores utilizados na ferramenta de tomada de decisão a fim de torná-la mais completa e refinada.
- Testar demais métodos de inteligência artificial para reconhecimento de padrão e classificação, como treinamento por árvore aleatória e teoria dos jogos.
- Analisar os impactos no sistema de distribuição e transmissão da região caso fossem implementadas unidades geradoras a partir de fontes alternativas nas áreas rurais.

## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDESHAHIAN, P. et al. Potential of biogas production from farm animal waste in Malaysia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 60, p. 714–723, jul. 2016.

ABDOLI, S.; PAMULAPATI, M.; KARA, S. An investigation into the role of PV industry in meeting the growing energy demand towards absolute sustainability. **Procedia CIRP**, v. 90, p. 383–387, 2020.

ADEDEJI, P. A. et al. **Neuro-fuzzy resource forecast in site suitability assessment for wind and solar energy: A mini review** *Journal of Cleaner Production*, 2020.

AFAZELI, H. et al. An investigation of biogas production potential from livestock and slaughterhouse wastes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 34, p. 380–386, jun. 2014.

AL-FALAH, M. D. A.; JAYASINGHE, S. D. G.; ENSHAEI, H. A review on recent size optimization methodologies for standalone solar and wind hybrid renewable energy system. **Energy Conversion and Management**, v. 143, p. 252–274, jul. 2017.

ALAM, M. M.; MURAD, M. W. The impacts of economic growth, trade openness and technological progress on renewable energy use in organization for economic co-operation and development countries. **Renewable Energy**, 2020.

ALBADI, M. H.; EL-SAADANY, E. F. The role of taxation policy and incentives in wind-based distributed generation projects viability: Ontario case study. **Renewable Energy**, v. 34, n. 10, p. 2224–2233, out. 2009.

ALIBABA. **Electrical Equipment & Supplies**. Disponível em: <[https://www.alibaba.com/showroom/1+kva+biogas+generator.html?fsb=y&IndexArea=product\\_en&CatId=&SearchText=1+kva+biogas+generator&isGalleryList=G](https://www.alibaba.com/showroom/1+kva+biogas+generator.html?fsb=y&IndexArea=product_en&CatId=&SearchText=1+kva+biogas+generator&isGalleryList=G)>. Acesso em: 20 out. 2020.

AMAZONAS, S. **Geradores de Energia a Gás**. Disponível em: <<https://www.lojassgeradores.com.br/geradores-de-energia/geradores-de-energia-a-gas/partida-eletrica/gerador-de-energia-a-gas-monofasico-3-5-kva-partida-eletrica-lt3900eb-lpg-shanghai-amazonas>>. Acesso em: 20 out. 2020.

ANEEL, (NATIONAL ELECTRIC ENERGY AGENCY). **Normative Resolution nº 482, of April 17, 2012**, 2012.

ANEEL, (NATIONAL ELECTRIC ENERGY AGENCY). **Sistema de Informações Geográficas do Setor Elétrico**. Disponível em: <<https://sigel.aneel.gov.br/portal/home/index.html>>. Acesso em: 16 jan. 2021.

ANEEL, A. N. DE E. E. **Matriz Elétrica Brasileira**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 15 out. 2019.

ANGELIDAKI, I.; ELLEGAARD, L. Codigestion of Manure and Organic Wastes in Centralized Biogas Plants: Status and Future Trends. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 109, n. 1–3, p. 95–106, 2003.

ANILDO, B. et al. Renewable Energy Sources for Electricity Generation in the State of Rio Grande Do Sul (Brazil). In: **World Renewable Energy Congress VI**. [s.l.] Elsevier, 2000. p. 2603–2605.

AVCIOĞLU, A. O.; TÜRKER, U. Status and potential of biogas energy from animal wastes in Turkey. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 3, p. 1557–1561, abr. 2012.

AWASTHI, S. K. et al. Changes in global trends in food waste composting: Research challenges and opportunities. **Bioresource Technology**, v. 299, n. September 2019, p. 122555, 2019.

BAILEY, J. A. et al. Factors which influence Nova Scotia farmers in implementing energy efficiency and renewable energy measures. **Energy**, v. 33, n. 9, p. 1369–1377, set. 2008.

BASU, P. **Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory**. [s.l.: s.n.].

BENTO, P. M. R. et al. Ocean wave energy forecasting using optimised deep learning neural networks. **Ocean Engineering**, v. 219, p. 108372, jan. 2021.

BILGILI, F. et al. Can biomass energy be an efficient policy tool for sustainable development? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2017.

BLEY JÚNIOR, C. et al. **Agroenergia da biomassa residual: perspectivas energéticas, socioeconômicas e ambientais**. 2<sup>a</sup> ed. rev ed. Foz do Iguaçu/Brasília: Itaipu Binacional, Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, TechnoPolitik Editora, 2009.

- BOGGULA, R. R. et al. Methanation potential: Suitable catalyst and optimized process conditions for upgrading biogas to reach gas grid requirements. **Biomass and Bioenergy**, 2020.
- BOOPATHI, K. et al. Assessment of wind power potential in the coastal region of Tamil Nadu, India. **Ocean Engineering**, v. 219, p. 108356, jan. 2021.
- BRAGA, A.; CARVALHO, A.; LUDERMIR, T. Redes neurais artificiais. **Sistemas Inteligentes: Fundamentos e Aplicações**, 2003.
- BRASIL. **CONVÊNIO ICMS 16, DE 22 DE ABRIL DE 2015**. Disponível em: <[https://www.confaz.fazenda.gov.br/legislacao/convenios/2015/CV016\\_15](https://www.confaz.fazenda.gov.br/legislacao/convenios/2015/CV016_15)>. Acesso em: 17 jan. 2021.
- BRASIL - MME - EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2029** Empresa de **Pesquisa Energética**. [s.l: s.n.].
- BRAZA, C. E. M.; CRNKOVIC, P. M. Physical - Chemical characterization of biomass samples for application in pyrolysis process. **Chemical Engineering Transactions**, 2014.
- BURG, V. et al. Valorization of an untapped resource: Energy and greenhouse gas emissions benefits of converting manure to biogas through anaerobic digestion. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 136, p. 53–62, set. 2018.
- CAHYONO ADI, A. et al. Mitigation of carbon dioxide from Indonesia's energy system. **Applied Energy**, v. 56, n. 3–4, p. 253–263, mar. 1997.
- CAN ŞENER, Ş. E.; SHARP, J. L.; ANCTIL, A. **Factors impacting diverging paths of renewable energy: A review** **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2018.
- CAO, L. et al. Biorenewable hydrogen production through biomass gasification: A review and future prospects. **Environmental Research**, 2020.
- CARFORA, A. et al. Renewable generation across Italian regions: Spillover effects and effectiveness of European Regional Fund. **Energy Policy**, v. 102, p. 132–141, mar. 2017.
- CARVALHO, A. **Modelação matemática do processo de digestão anaeróbia**. [s.l.] Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 2014.
- CDC. **What are the Links between Power , Economic Growth and Job Creation ?** **Development Impact Evaluation Evidence**. [s.l: s.n.].
- CECON, P. R. et al. **Métodos Estatísticos**. Didática ed. Viçosa: Editora UFV, 2012.

CEMIG, (COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS). **Valores de Tarifas e Serviços**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://novoportal.cemig.com.br/atendimento/valores-de-tarifas-e-servicos/>>.

CHARALAMBOUS, C. Conjugate gradient algorithm for efficient training of artificial neural networks. **IEE Proceedings G Circuits, Devices and Systems**, v. 139, n. 3, p. 301, 1992.

CONTRERAS, A.; YIGIT, K. S.; VEZIROĞLU, T. N. Spanish energy planning towards a sustainable future. **Energy Conversion and Management**, v. 38, n. 5, p. 443–452, mar. 1997.

CRESESB, (CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO S. DE BRITO). **Potencial Solar e Eólico**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/>>.

DE BARBOSA, L. S. N. S. et al. Hydro, wind and solar power as a base for a 100% renewable energy supply for South and Central America. **PLoS ONE**, 2017.

DE WET, C.; ODUME, O. N. Developing a systemic-relational approach to environmental ethics in water resource management. **Environmental Science & Policy**, v. 93, p. 139–145, mar. 2019.

DINKELBACH, L. Thermochemical Conversion of Willow from Short Rotation Forestry. **ECNC--00-028 REGROW Guide, Energy research Centre of the Netherlands – ECN**, 2000.

DONASTORG, A.; RENUKAPPA, S.; SURESH, S. Evaluating critical success factors for implementing renewable energy strategies in the Dominican Republic. **Renewable Energy**, 2020.

**Earth :: um mapa global dos ventos**. Disponível em: <<https://earth.nullschool.net/pt/>>. Acesso em: 17 out. 2019.

EBERS BROUGHEL, A. Impact of state policies on generating capacity for production of electricity and combined heat and power from forest biomass in the United States. **Renewable Energy**, v. 134, p. 1163–1172, abr. 2019.

EMBRAPA, (BRAZILIAN AGRICULTURAL RESEARCH CORPORATION). **2019 Yearbook**. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br>>. Acesso em: 19 mar. 2020.

ENERGYBRAS. **Aerogeradores.** Disponível em: <<http://energybras.com.br/produtos/aerogeradores>>. Acesso em: 5 jan. 2021.

ENGENHARIA, G. **Energia Fotovoltaica.** Disponível em: <<http://www.gapengenharia.com/energia-fotovoltaica>>.

ERSOY, E.; UGURLU, A. The potential of Turkey's province-based livestock sector to mitigate GHG emissions through biogas production. **Journal of Environmental Management**, v. 255, p. 109858, fev. 2020.

FEDERAL, C. E. **Referências de Preços e Custos.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.caixa.gov.br/poder-publico/modernizacao-gestao/sinapi/referencias-precos-insumos/Paginas/default.aspx>>.

FERREIRA, L. R. A. et al. **Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018.

FETANAT, A.; TAYEBI, M.; MOFID, H. Water-energy-food security nexus based selection of energy recovery from wastewater treatment technologies: An extended decision making framework under intuitionistic fuzzy environment. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 43, p. 100937, fev. 2021.

FLÓREZ-ORREGO, D.; SILVA, J. A. M.; OLIVEIRA JR., S. DE. Renewable and non-renewable exergy cost and specific CO<sub>2</sub> emission of electricity generation: The Brazilian case. **Energy Conversion and Management**, v. 85, p. 619–629, set. 2014.

FRANKFURT SCHOOL-UNEP CENTRE/BNEF. Global Trends in Renewable Energy Investment 2018, <http://www.fs-uneFrankfurt School-UNEP Centre/BNEF>. (2017). Global Trends in Renewable Energy Investment 2018, <http://www.fs-uneep-centre.org> (Frankfurt am Main). <https://Europa.Eu/Capacity4dev/Unep/Docume>. **<https://europa.eu/capacity4dev/unep/documents/global-trends-renewable-energy-investment-2018>**, 2017.

FREITAS, F. F. et al. **The Brazilian market of distributed biogas generation: Overview, technological development and case study** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019.

GHOSH, P. et al. Assessment of methane emissions and energy recovery potential from the municipal solid waste landfills of Delhi, India. **Bioresource Technology**, v. 272, p. 611–615, jan. 2019.

GOLOVE, W. H.; SCHIPPER, L. J. Restraining carbon emissions: measuring energy use and efficiency in the USA. **Energy Policy**, v. 25, n. 7–9, p. 803–812, jun. 1997.

GÓMEZ, M. F.; TÉLLEZ, A.; SILVEIRA, S. Exploring the effect of subsidies on small-scale renewable energy solutions in the Brazilian Amazon. **Renewable Energy**, v. 83, p. 1200–1214, nov. 2015.

GOPAL, L. C. et al. Optimization strategies for improved biogas production by recycling of waste through response surface methodology and artificial neural network: Sustainable energy perspective research. **Journal of King Saud University - Science**, v. 33, n. 1, p. 101241, jan. 2021.

GOZGOR, G. Are shocks to renewable energy consumption permanent or transitory? An empirical investigation for Brazil, China, and India. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 66, p. 913–919, dez. 2016.

GROSS, R.; LEACH, M.; BAUEN, A. Progress in renewable energy. **Environment International**, v. 29, n. 1, p. 105–122, abr. 2003.

GUVEN, G.; SULUN, Y. **Pre-service teachers' knowledge and awareness about renewable energy** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017.

GWEC. **8th National Renewable Energy Forum, Global Wind Report 2016**. [s.l.: s.n.].

HABIBOLLAHZADE, A.; HOUSHFAR, E. Improved performance and environmental indicators of a municipal solid waste fired plant through CO<sub>2</sub> recycling: Exergoeconomic assessment and multi-criteria grey wolf optimisation. **Energy Conversion and Management**, v. 225, p. 113451, dez. 2020.

HAO, F.; SHAO, W. What really drives the deployment of renewable energy? A global assessment of 118 countries. **Energy Research & Social Science**, v. 72, p. 101880, fev. 2021.

HODGE, D. R.; GILLESPIE, D. Phrase completions: An alternative to Likert scales. **Social Work Research**, 2003.

HOFSETZ, K.; SILVA, M. A. Brazilian sugarcane bagasse: Energy and non-energy consumption. **Biomass and Bioenergy**, v. 46, p. 564–573, nov. 2012.

HONDA, H.; FACURE, M.; YAOHAO, P. **Os Três Tipos de Aprendizagem de Máquina**. Disponível em: <<https://lamfo-unb.github.io/2017/07/27/%0Atres-tipos-am/>>. Acesso em:

3 jun. 2019.

IBGE. **Estimativas da população residente no Brasil e unidades da Federação com data de referência em 1º de julho de 2019.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <[https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/media/com\\_mediaibge/arquivos/7d410669a4ae85faf4e8c3a0a0c649c7.pdf](https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/media/com_mediaibge/arquivos/7d410669a4ae85faf4e8c3a0a0c649c7.pdf)>.

IBGE, (BRAZILIAN INSTITUTE OF GEOGRAPHY AND STATISTICS). **IBGE Cities.** Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/panorama>>. Acesso em: 10 ago. 2019b.

IEA, I. E. A. **The Future of Petrochemicals.** Disponível em: <<http://www.iea.org/petrochemicals/>>. Acesso em: 21 maio. 2019.

IRENA. **10 years: Progress to action.** Disponível em: <<https://www.irena.org/publications>>. Acesso em: 19 jan. 2020.

ISHAQ, H.; DINCER, I. A comparative evaluation of OTEC, solar and wind energy based systems for clean hydrogen production. **Journal of Cleaner Production**, 2020.

IWANAGA, T. et al. A socio-environmental model for exploring sustainable water management futures: Participatory and collaborative modelling in the Lower Campaspe catchment. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 28, p. 100669, abr. 2020.

JANNUZZI DE MARTINO, G. Energy efficiency and restructuring of the Brazilian power sector. **Energy for Sustainable Development**, v. 4, n. 2, p. 17–22, ago. 2000.

KANAYAMA, P. H.; DOS REIS, L. B.; UDAETA, M. E. M. Solid urban wastes minimization and energy conservation—A challenge for the 21st century in Brazil. In: [s.l.: s.n.], p. 836–847.

KIM, G.; CHOI, S.-K.; SEOK, J. H. Does biomass energy consumption reduce total energy CO<sub>2</sub> emissions in the US? **Journal of Policy Modeling**, v. 42, n. 5, p. 953–967, set. 2020.

KIM, S.; DALE, B. E. Life cycle inventory information of the United States electricity system. **International Journal of Life Cycle Assessment**, 2005.

KINGMA, D. P.; BA, J. Adam: A Method for Stochastic Optimization. 22 dez. 2014.

KLASS, D. L. A critical assessment of renewable energy usage in the USA. **Energy Policy**, v. 31, n. 4, p. 353–367, mar. 2003.

KRÓL-BADZIAK, A. et al. Environmental and socio-economic performance of different

tillage systems in maize grain production: Application of Life Cycle Assessment and Multi-Criteria Decision Making. **Journal of Cleaner Production**, v. 278, p. 123792, jan. 2021.

KUMAR, A. et al. A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 69, p. 596–609, mar. 2017.

LARSON, E. D.; KARTHA, S. Expanding roles for modernized biomass energy. **Energy for Sustainable Development**, v. 4, n. 3, p. 15–25, out. 2000.

LIMA, M. A. et al. Renewable energy in reducing greenhouse gas emissions: Reaching the goals of the Paris agreement in Brazil. **Environmental Development**, v. 33, p. 100504, mar. 2020.

LIN, B.; RAZA, M. Y. Analysis of energy security indicators and CO<sub>2</sub> emissions. A case from a developing economy. **Energy**, v. 200, p. 117575, jun. 2020.

LIU, J. et al. Bottlenecks and countermeasures of high-penetration renewable energy development in china. **Engineering**, dez. 2020.

LIU, M. F. M.; PISTORIUS, T. Coping with the energy crisis: Impact assessment and potentials of non-traditional renewable energy in rural Kyrgyzstan. **Energy Policy**, v. 44, p. 130–139, maio 2012.

LIU, X.; ZHANG, S.; BAE, J. The nexus of renewable energy-agriculture-environment in BRICS. **Applied Energy**, v. 204, p. 489–496, out. 2017.

LOPEZ-GARCIA, T. B.; CORONADO-MENDOZA, A.; DOMÍNGUEZ-NAVARRO, J. A. Artificial neural networks in microgrids: A review. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 95, p. 103894, out. 2020.

LUO, X. et al. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. **Applied Energy**, 2015.

MAKARA, A.; KOWALSKI, Z. Selection of pig manure management strategies: Case study of Polish farms. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 187–195, jan. 2018.

MANITEC. **Geradores para Condomínios**. Disponível em: <<https://manitec.com.br/blog-manitec/geradores-para-condominios>>. Acesso em: 10 jan. 2021.

MELIKOGLU, M.; MENEKSE, Z. K. Forecasting Turkey's cattle and sheep manure based biomethane potentials till 2026. **Biomass and Bioenergy**, v. 132, p. 105440, jan. 2020.

MEYER, A. K. P.; EHIMEN, E. A.; HOLM-NIELSEN, J. B. Future European biogas: Animal manure, straw and grass potentials for a sustainable European biogas production. **Biomass and Bioenergy**, v. 111, p. 154–164, abr. 2018.

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa Copam nº 217 , de 06 de dezembro de 2017**. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=45558>>. Acesso em: 26 ago. 2020.

MME, (MINISTRY OF MINES AND ENERGY). **Manual de Implantação de Sistemas Híbridos Fotovoltaico-Eólico-Diesel para Geração de Energia Elétrica**. Belém - PA: Projeto BRA/99/011, Carta de Acordo 001/2007, 2008.

MME, (MINISTRY OF MINES AND ENERGY). **Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br>>. Acesso em: 17 jan. 2021.

MME, (MINISTRY OF MINES AND ENERGY). **Energia no Mundo 2015-2016**. [s.l: s.n.].

MME, (MINISTRY OF MINES AND ENERGY). **Brazilian Energy Review - Exercise 2018**.

MOHAMMADI, K. et al. Predicting the wind power density based upon extreme learning machine. **Energy**, 2015.

MOREDA, I. L. The potential of biogas production in Uruguay. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 1580–1591, fev. 2016.

MOREIRA, H. C. et al. Diretrizes de capacitação para o uso de biogás de esgoto no Brasil. **Revista DAE**, v. 66, n. 209, p. 134–150, 2018.

MOZUMDER, P.; MARATHE, A. Gains from an integrated market for tradable renewable energy credits. **Ecological Economics**, v. 49, n. 3, p. 259–272, jul. 2004.

MYNA, A.; DOBROWOLSKI, J. Renewable energy derived from agricultural biomass in peripheral rural areas: ‘Vicious circle,’ ‘Gordian knots,’ and turning points. **Journal of Rural Studies**, v. 82, p. 222–232, fev. 2021.

NARIMATU, B. R. S.; CRIBARI, F. A.; GUIMARÃES, W. T. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO COMERCIAL DE 14,56 kWp NO MUNICÍPIO DE SERRA. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**, 2018.

NGWABIE, N. M.; CHUNGONG, B. N.; YENGONG, F. L. Characterisation of pig manure for methane emission modelling in Sub-Saharan Africa. **Biosystems Engineering**, v. 170, p. 31–38, jun. 2018.

NI, M. et al. Potential of renewable hydrogen production for energy supply in Hong Kong. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 31, n. 10, p. 1401–1412, ago. 2006.

NRCS. **Animal manure management Previously reported in the Agricultural Waste Management Handbook (1992)**, 1995.

OLATUNJI, O. O. et al. Property-based biomass feedstock grading using k-Nearest Neighbour technique. **Energy**, 2020.

OLIVEIRA, A. C. L. DE et al. Evaluation of Brazilian potential for generating electricity through animal manure and sewage. **Biomass and Bioenergy**, v. 139, p. 105654, ago. 2020.

OLIVEIRA, A. C. L. DE; RESENDE, M. DE O.; RENATO, N. DOS S. Estudo do potencial de geração de energia elétrica através da biomassa residual de uma pequena propriedade rural da zona da mata mineira. **Revista Brasileira de Biomassa e Energia**, v. 42, n. [https://issuu.com/revistabiomassabr/docs/revista\\_biomassa\\_br\\_ed\\_42\\_-\\_low](https://issuu.com/revistabiomassabr/docs/revista_biomassa_br_ed_42_-_low), p. 4–8, 2019.

ONS, (NATIONAL SYSTEM OPERATOR'S). **Histórico da Operação - SINtegre**. Disponível em: <<https://sintgre.ons.org.br/>>. Acesso em: 23 out. 2020.

ÖZTOPAL, A. et al. On the regional wind energy potential of Turkey. **Energy**, v. 25, n. 2, p. 189–200, fev. 2000.

PAINULY, J. . Barriers to renewable energy penetration; a framework for analysis. **Renewable Energy**, v. 24, n. 1, p. 73–89, set. 2001.

PALANICHAMY, C.; SUNDAR BABU, N.; NADARAJAN, C. Renewable energy investment opportunities in Mauritius—an investor's perspective. **Renewable Energy**, v. 29, n. 5, p. 703–716, abr. 2004.

PAMUČAR, D. et al. Decision making to support sustainable energy policies corresponding to agriculture sector: Case study in Iran's Caspian Sea coastline. **Journal of Cleaner Production**, p. 125302, dez. 2020.

PELC, R.; FUJITA, R. M. Renewable energy from the ocean. **Marine Policy**, v. 26, n. 6, p. 471–479, nov. 2002.

PERAZZINI, H. et al. Artificial neural networks to model kinetics and energy efficiency in

fixed, fluidized and vibro-fluidized bed dryers towards process optimization. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, v. 156, p. 108089, out. 2020.

PILIFOSOVA, O. et al. Mitigation technologies and measures in the energy sector of Kazakstan. **Applied Energy**, v. 56, n. 3–4, p. 341–350, mar. 1997.

PINDOZZI, S. et al. Measurement and prediction of buffalo manure evaporation in the farmyard to improve farm management. **Biosystems Engineering**, v. 115, n. 2, p. 117–124, jun. 2013.

PISANI JUNIOR, R.; CASTRO, M. C. A. A. DE; COSTA, A. Á. DA. Desenvolvimento de correlação para estimativa da taxa de geração per capita de resíduos sólidos urbanos no estado de São Paulo: influências da população, renda per capita e consumo de energia elétrica. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, 2018.

PISCHKE, E. C. et al. From Kyoto to Paris: Measuring renewable energy policy regimes in Argentina, Brazil, Canada, Mexico and the United States. **Energy Research & Social Science**, v. 50, p. 82–91, abr. 2019.

PORTUGAL-PEREIRA, J. et al. Agricultural and agro-industrial residues-to-energy: Techno-economic and environmental assessment in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 81, p. 521–533, out. 2015.

QIU, Z.; LI, P. Solar Energy Resource and Its Global Distribution. In: [s.l: s.n.]. p. 1–30.

QLD. **Queensland government - department of agriculture and fisheries - manure production data**. Disponível em: <<https://www.daf.qld.gov.au>>. Acesso em: 2 nov. 2018.

RAM, M. et al. **Role of Solar PV Prosumers in Enabling the Energy Transition Towards a Fully Renewables Based Power System for India**. 1st International Conference on Large-Scale Grid Integration of Renewable Energy in India. **Anais...New Delhi: 2017** Disponível em: <<https://goo.gl/CQmYwB>>

RAM, M. et al. A comparative analysis of electricity generation costs from renewable, fossil fuel and nuclear sources in G20 countries for the period 2015-2030. **Journal of Cleaner Production**, 2018.

RAM, M.; AGHAHOSSEINI, A.; BREYER, C. Job creation during the global energy transition towards 100% renewable power system by 2050. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 151, p. 119682, fev. 2020.

RANNELS, J. The DOE office of solar energy technologies' vision for advancing solar technologies in the new millennium. **Solar Energy**, v. 69, n. 5, p. 363–368, 2000.

REIS, R. J. DOS; REIS, L. S. DOS. **Atlas of Biomass of Minas Gerais**. Belo Horizonte: Rona Gráfica e Editora, 2017.

REN, Y.; SUGANTHAN, P. N.; SRIKANTH, N. **Ensemble methods for wind and solar power forecasting - A state-of-the-art review** **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2015.

REN21. **Global Status Report, Renewable 2017**. [s.l: s.n.].

REN21. Renewables 2018: Global Status Report--A comprehensive annual overview of the state of renewable energy. **Renewable Energy Network for the 21st Century**, 2018.

RIBEIRO, D. D. S. DETERMINAÇÃO DAS DIMENSÕES DE UM BIODIGESTOR EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO GÁS/FASE LÍQUIDA. **HOLOS**, v. 1, p. 49, 9 mar. 2011.

Roadmap 2050: A practical guide to a prosperous, low-carbon europe. In: **Energy Accounts: Architectural Representations of Energy, Climate, and the Future**. [s.l: s.n.].

ROJAS-ZERPA, J. C.; YUSTA, J. M. Application of multicriteria decision methods for electric supply planning in rural and remote areas. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 557–571, dez. 2015.

SADORSKY, P. Renewable energy consumption and income in emerging economies. **Energy Policy**, v. 37, n. 10, p. 4021–4028, out. 2009.

SCARLAT, N. et al. A spatial analysis of biogas potential from manure in Europe. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 915–930, out. 2018.

SEAPA, (STATE SECRETARIAT OF AGRICULTURE LIVESTOCK AND SUPPLY OF MINAS GERAIS). **Beef and Dairy Cattle**.

SELVAGGI, R. et al. Assessing land efficiency of biomethane industry: A case study of Sicily. **Energy Policy**, v. 119, p. 689–695, ago. 2018.

SHEPPERD, A. **Second-Order Methods for Neural Networks Fast and Reliable Training Methods for Multi-Layer Perceptrons**. [s.l: s.n.].

SIEMONS, R. V. How European waste will contribute to renewable energy. **Energy Policy**, v. 30, n. 6, p. 471–475, maio 2002.

SILVA, L. S. DA; ABRANTES, R. D. C. C. **ANÁLISE DOS RUÍDOS GERADOS POR**

**AEROGERADORES NO COMPLEXO EÓLICO CANOAS E LAGOAS.** Anais XVIII ENANPUR 2019. **Anais...Natal** - RN: 2019Disponível em: <<http://anpur.org.br/xviiienanpur/anais%0D>>

SILVA DOS SANTOS, I. F. et al. Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: Impact on energy generation, use, and emissions abatement. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 131, p. 54–63, abr. 2018.

SILVA, P. DE C.; GUEDES, V. G.; ARAÚJO, M. R. P. DE. Otimização dos Parâmetros da Distribuição de Weibull. **XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica**, 1999.

SINGH, A.; OLSEN, S. I. A critical review of biochemical conversion, sustainability and life cycle assessment of algal biofuels. **Applied Energy**, 2011.

SINTON, J. E.; FRIDLEY, D. G. What goes up: recent trends in China's energy consumption. **Energy Policy**, v. 28, n. 10, p. 671–687, ago. 2000.

SOLAR, P. **O inversor solar**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/o-inversor-solar.html>>. Acesso em: 20 jul. 2020.

SOPIAN, K.; ALI, B.; ASIM, N. Strategies for renewable energy applications in the organization of Islamic conference (OIC) countries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 9, p. 4706–4725, dez. 2011.

SOUZA, C. R. G. DE; ANJOS, F. S. DOS. IMPACTO DOS PROGRAMAS DE ELETRIFICAÇÃO RURAL EM COMUNIDADES RURAIS DE ARROIO GRANDE, RS. **Extensão Rural**, 2007.

STANFORD, A. A vision of a sustainable energy future. **Renewable Energy**, v. 10, n. 2–3, p. 417–422, fev. 1997.

SUGANTHI, L.; WILLIAMS, A. Renewable energy in India — a modelling study for 2020–2021. **Energy Policy**, v. 28, n. 15, p. 1095–1109, dez. 2000.

TALAAT, M.; FARAHAT, M. A.; ELKHOLY, M. H. Renewable power integration: Experimental and simulation study to investigate the ability of integrating wave, solar and wind energies. **Energy**, 2019.

THE OFFICE OF THE FEDERAL REGISTER NATIONAL ARCHIVES AND RECORDS ADMINISTRATION. **The code of federal regulations of the United States of America: protection of environmentCode of Federal Regulations**, 1999.

TIŠMA, M. et al. Corn silage fungal-based solid-state pretreatment for enhanced biogas production in anaerobic co-digestion with cow manure. **Bioresource Technology**, v. 253, p. 220–226, abr. 2018.

TSAI, W.-T. Current status and development policies on renewable energy technology research in Taiwan. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 9, n. 3, p. 237–253, jun. 2005.

TURYAREEBA, P. . Renewable energy: its contribution to improved standards of living and modernisation of agriculture in Uganda. **Renewable Energy**, v. 24, n. 3–4, p. 453–457, nov. 2001.

TZVETANOV, P.; RUCHEVA, M.; DENISIEV, M. Scenarios of energy demand and efficiency potential for Bulgaria. **Applied Energy**, v. 56, n. 3–4, p. 287–297, mar. 1997.

UPADHYAY, S.; SHARMA, M. P. A review on configurations, control and sizing methodologies of hybrid energy systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 47–63, out. 2014.

VELOSO, A. V. **Aplicativo computacional para dimensionamento de um biodigestor piloto**. [s.l.] Universidade Federal de Sergipe, 2011.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. [s.l.: s.n.].

VRHOVČAK, M. B.; TOMŠIĆ, Ž.; DEBRECIN, N. Potential and use of renewable energy sources in Croatia. **Renewable Energy**, v. 31, n. 12, p. 1867–1872, out. 2006.

WANG, J.-J. et al. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 9, p. 2263–2278, dez. 2009.

WANG, X. et al. Quantitative analysis of distributed and centralized development of renewable energy. **Global Energy Interconnection**, 2018.

WANG, Z.; BUI, Q.; ZHANG, B. The relationship between biomass energy consumption and human development: Empirical evidence from BRICS countries. **Energy**, 2020.

WELFLE, A. Balancing growing global bioenergy resource demands - Brazil's biomass potential and the availability of resource for trade. **Biomass and Bioenergy**, 2017.

WELFLE, A.; THORNLEY, P.; RODER, M. A review of the role of bioenergy modelling

- in renewable energy research & policy development. **Biomass and Bioenergy**, v. 136, 2020.
- WINKLER, H. Renewable energy policy in South Africa: policy options for renewable electricity. **Energy Policy**, v. 33, n. 1, p. 27–38, jan. 2005.
- XIE, B. et al. Microbial community composition and electricity generation in cattle manure slurry treatment using microbial fuel cells: effects of inoculum addition. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 29, p. 23226–23235, 22 out. 2017.
- YU, X.; TAPLIN, R.; AKURA, T. A framework for energy policy-making in the Pacific Islands. **Energy Policy**, v. 25, n. 12, p. 971–982, out. 1997.
- YUKSEL, Y. E.; OZTURK, M. Energy and exergy analysis of renewable energy sources-based integrated system for multi-generation application. **International Journal of Exergy**, 2017.
- ZANDERSONS, J. et al. Studies of the Brazilian sugarcane bagasse carbonisation process and products properties. **Biomass and Bioenergy**, v. 17, n. 3, p. 209–219, set. 1999.
- ZAREEI, S. Evaluation of biogas potential from livestock manures and rural wastes using GIS in Iran. **Renewable Energy**, v. 118, p. 351–356, abr. 2018.
- ZHANG, S. et al. Interactions between renewable energy policy and renewable energy industrial policy: A critical analysis of China's policy approach to renewable energies. **Energy Policy**, v. 62, p. 342–353, nov. 2013.
- ZHAO, Z.-Y.; CHEN, Y.-L.; CHANG, R.-D. How to stimulate renewable energy power generation effectively? – China's incentive approaches and lessons. **Renewable Energy**, v. 92, p. 147–156, jul. 2016.
- ZHENG, L. et al. Spatiotemporal characteristics of the bearing capacity of cropland based on manure nitrogen and phosphorus load in mainland China. **Journal of Cleaner Production**, v. 233, p. 601–610, out. 2019.
- ZIEGELMANN, A.; MOHR, M.; UNGER, H. Net employment effects of an extension of renewable-energy systems in the Federal Republic of Germany. **Applied Energy**, v. 65, n. 1–4, p. 329–338, abr. 2000.

## APÊNDICE A

Na Tabela 45 seguem os dados coletados por amostragem nas 111 propriedades rurais do município de São Francisco do Glória. As colunas enumeradas de A até P representam as seguintes variáveis: (a) identificação da propriedade rural; (b) latitude; (c) longitude; (d) grau de instrução do produtor rural; (e) área total da propriedade (ha); (f) quantidade de bovinos; (g) quantidade de suínos; (h) quantidade de aves; (i) quantidade de bubalinos; (j) quantidade de muares e equinos; (k) quantidade ovinos e caprinos; (l) despesa da propriedade (\$ ano<sup>-1</sup>); (m) renda da propriedade (\$ ano<sup>-1</sup>); (n) investimento em energia renovável (\$ ano<sup>-1</sup>); (o) consumo de energia elétrica (kWh mês<sup>-1</sup>) e (p) tipo de instalação. O grau de instrução foi representado numericamente indicando que: (1) nunca estudou, (2) ensino fundamental incompleto, (3) ensino fundamental completo, (4) ensino médio incompleto, (5) ensino médio completo, (6) ensino superior incompleto, (7) ensino superior completo, (8) pós-graduação incompleta e (9) pós-graduação completa. O tipo de instalação também foi definido numericamente, em que: (1) sistema monofásico, (2) sistema bifásico e (3) sistema trifásico.

Tabela 45 - Banco de dados coletados nas propriedades rurais do município de São Francisco do Glória.

(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	(k)	(l)	(m)	(n)	(o)	(p)
1	20° 45' 11,1884"	42° 18' 42,55668"	2	71	70	0	60	0	2	0	3147,17	12373,58	943,40	216,83	2
2	20° 49' 18,02748"	42° 21' 2,5344"	2	6	0	0	6	0	0	0	764,15	10188,68	1886,79	405,46	2
3	20° 48' 47,507"	42° 14' 18,969"	5	42	0	0	0	0	0	0	18566,04	50264,15	6981,13	804,58	2
4	20° 45' 23,8125"	42° 13' 53,3676"	2	12	30	0	15	0	1	0	6792,45	11320,75	377,36	487,85	2
5	20° 47' 25,4814"	42° 18' 9,0288"	2	7,5	7	3	0	0	0	0	78,68	249,06	0,00	154,00	2
6	20° 46' 28,01964"	42° 20' 40,21296"	1	7	15	1	20	0	1	0	679,25	2374,34	0,00	163,69	2
7	20° 47' 4,17624"	42° 15' 40,50756"	2	1854	2000	0	0	0	30	0	425471,70	608490,57	56603,77	21000,00	3
8	20° 50' 6,61812"	42° 14' 52,93392"	5	300	150	0	15	0	4	0	26415,09	56603,77	8490,57	923,00	3

(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	(k)	(l)	(m)	(n)	(o)	(p)
9	20° 44' 39,76944"	42° 14' 2,8464"	2	180	250	0	50	0	2	0	14852,83	27871,70	0,00	148,08	2
10	20° 46' 53,7524"	42° 15' 45,4878"	3	66	116	2	65	0	5	0	2264,15	13488,30	4716,98	615,38	3
11	20° 46' 43,58"	42° 18' 48,17"	5	300	500	1500	0	0	2	0	377358,49	754716,98	56603,77	10000,00	3
12	20° 46' 36,6054"	42° 13' 41,44548"	5	156	250	22	50	0	2	40	6064,15	9245,28	3773,58	1076,00	3
13	20° 46' 12,98604"	42° 17' 44,65356"	2	6	0	0	30	0	0	0	0,00	0,00	0,00	283,69	1
14	20° 45' 35,26092"	42° 13' 6,6576"	2	7,5	0	0	25	0	0	0	943,40	2547,17	0,00	50,09	1
15	20° 43' 38,66161"	42° 19' 8,46876"	1	30	13	5	10	0	0	0	5830,19	14905,66	0,00	220,33	2
16	20° 47' 45,30912"	42° 14' 25,23372"	2	27	60	0	12	0	1	0	13080,00	27939,62	3207,55	539,92	3
17	20° 47' 24,2448"	42° 16' 28,58592"	5	133	20	0	0	0	1	0	14339,62	18490,57	4716,98	646,00	1
18	20° 49' 12,02196"	42° 19' 7,56048"	2	0,484	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	1886,79	577,00	1
19	20° 47' 32,4477"	42° 13' 51,58488"	3	8,58	18	2	15	0	1	0	2101,89	5443,02	0,00	173,00	2
20	20° 47' 30,58008"	42° 13' 39,27756"	2	2	12	0	10	0	1	0	2132,08	4686,79	1886,79	175,31	2
21	20° 47' 41,1864"	42° 20' 12,49512"	5	66	106	3	80	0	3	0	6339,62	16716,98	22641,51	2500,00	3
22	20° 42' 38,7471"	42° 19' 4,97748"	5	1	0	3	9	0	0	0	370,38	849,06	0,00	178,67	1
23	20° 45' 31,01796"	42° 19' 58,12068"	2	27	22	0	60	0	1	0	2514,15	5230,19	1886,79	141,75	2
24	20° 45' 27,3441"	42° 15' 43,055"	6	7,5	3	0	7	0	1	0	2264,15	10905,66	0,00	50,00	1
25	20° 45' 19,6567"	42° 13' 23,94336"	5	45	45	5	60	0	3	0	4113,21	6396,23	0,00	349,69	2
26	20° 45' 46,0872"	42° 16' 56,24436"	2	25,5	18	0	20	0	0	0	4716,98	17264,15	1509,43	236,33	2
27	20° 48' 17,66808"	42° 18' 15,37668"	5	4,5	8	2	20	0	0	0	1792,45	3018,87	0,00	107,70	3
28	20° 49' 23,32056"	42° 20' 40,5834"	1	12	0	0	20	0	0	0	15,85	0,00	0,00	194,92	1

(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	(k)	(l)	(m)	(n)	(o)	(p)
29	20° 49' 35,0864"	42° 19' 42,60252"	7	101	112	4	20	0	0	20	20754,72	31886,79	7547,17	2769,23	3
30	20° 46' 25,5648"	42° 17' 58,61688"	3	120	50	0	0	0	15	0	70905,66	106981,13	18867,92	644,77	3
31	20° 47' 13,1672"	42° 13' 22,74708"	2	48	36	0	20	10	2	40	9056,60	20886,79	0,00	765,50	2
32	20° 48' 31,825"	42° 15' 2,06388"	6	105	80	0	0	0	6	0	33962,26	67924,53	5660,38	916,25	2
33	20° 47' 32,7876"	42° 14' 18,09556"	3	9	0	5	20	0	0	5	4283,02	6603,77	377,36	227,00	1
34	20° 47' 0,47976"	42° 16' 22,4148"	2	64	60	2	30	0	2	0	16226,42	20188,68	1886,79	620,83	2
35	20° 45' 49,14396"	42° 13' 53,40036"	5	7	0	10	40	0	0	0	3773,58	10188,68	3773,58	195,69	1
36	20° 48' 19,485"	42° 19' 48,32256"	2	14	9	1	50	0	0	0	452,83	2852,83	3773,58	108,58	2
37	20° 47' 36,30948"	42° 13' 57,1422"	3	10,5	0	0	0	0	0	0	10943,40	20283,02	0,00	124,00	2
38	20° 47' 2,84928"	42° 17' 57,52392"	3	6	40	5	150	0	1	0	48679,25	91698,11	18867,92	5248,00	3
39	20° 45' 33,23664"	42° 14' 28,3776"	5	203	400	4	60	0	5	0	67924,53	67924,53	18867,92	2308,00	3
40	20° 47' 48,7518"	42° 14' 35,92492"	3	20,7	50	2	30	0	1	0	15849,06	16301,89	943,40	439,00	2
41	20° 48' 39,249"	42° 14' 9,19886"	2	18	10	0	0	0	0	0	18113,21	44905,66	2264,15	347,33	2
42	20° 44' 33,01188"	42° 16' 38,5086"	5	7	12	0	0	0	2	0	5825,47	10235,85	0,00	480,00	2
43	20° 45' 51,30504"	42° 19' 54,30108"	5	33	70	2	20	0	4	2	1547,17	7949,06	1886,79	615,00	2
44	20° 49' 0,27372"	42° 20' 31,55208"	2	12	4	0	15	0	0	0	6784,91	14150,94	1320,75	769,23	1
45	20° 48' 18,7804"	42° 18' 10,3554"	1	3	3	3	50	0	2	0	29,43	0,00	0,00	180,62	1
46	20° 48' 37,88424"	42° 14' 34,6074"	2	60	100	0	0	0	1	0	32490,57	60000,00	3773,58	1645,00	2
47	20° 46' 29,04096"	42° 20' 46,25052"	2	48	45	0	6	0	5	0	416,98	4516,98	0,00	237,50	2
48	20° 49' 14,40768"	42° 18' 38,0088"	7	18	7	0	40	0	1	0	6339,62	5811,32	660,38	305,17	3

(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	(k)	(l)	(m)	(n)	(o)	(p)
49	20° 46' 35,72075"	42° 14' 1,85352"	2	27	20	4	15	0	1	0	4905,66	6588,68	0,00	51,00	1
50	20° 45' 6,3905"	42° 19' 22,85004"	2	45	43	0	100	0	1	0	5898,11	11094,34	0,00	204,92	2
51	20° 49' 21,2898"	42° 19' 10,4592"	5	12	20	0	6	0	0	0	396,23	3803,77	0,00	122,00	2
52	20° 48' 16,911"	42° 14' 17,47824"	2	45	50	0	0	0	0	0	19245,28	38679,25	566,04	129,38	2
53	20° 49' 20,28612"	42° 20' 46,61088"	1	6	2	2	30	0	0	0	489,06	566,04	0,00	105,15	1
54	20° 49' 44,3586"	42° 16' 45,95556"	5	30	40	0	15	0	2	0	4150,94	7358,49	6792,45	229,33	2
55	20° 46' 42,21408"	42° 13' 59,30832"	2	3	0	0	0	0	1	0	528,30	2311,32	0,00	132,50	1
56	20° 45' 46,75896"	42° 13' 47,9046"	2	12	30	1	40	0	1	0	5509,43	11009,77	3207,55	491,75	2
57	20° 46' 18,72192"	42° 15' 19,51164"	2	15	30	2	120	0	3	0	1373,58	2830,19	0,00	223,38	1
58	20° 47' 17,0232"	42° 14' 7,34856"	5	79	110	0	50	0	2	0	20396,23	30094,34	9433,96	546,66	2
59	20° 47' 45,7515"	42° 20' 10,9158"	2	3	6	1	12	0	1	0	452,83	747,17	0,00	92,46	1
60	20° 48' 52,72416"	42° 20' 25,06092"	2	53	30	6	30	0	1	0	1660,38	12792,45	3962,26	792,31	2
61	20° 48' 50,3352"	42° 20' 17,35008"	2	27	10	0	25	0	0	0	4607,55	23113,21	5094,34	988,46	2
62	20° 46' 10,80408"	42° 17' 59,37252"	3	33	60	0	50	0	2	0	13283,02	25943,40	10754,72	1000,00	3
63	20° 49' 23,60712"	42° 18' 38,94616"	2	6	8	5	20	0	1	13	562,26	2852,83	0,00	119,33	2
64	20° 46' 9,78456"	42° 13' 36,1866"	2	6	0	0	0	0	0	0	5660,38	7169,81	0,00	69,00	2
65	20° 45' 56,0293"	42° 13' 34,10667"	2	6	6	2	10	0	1	0	1792,45	3169,81	1037,74	105,92	1
66	20° 48' 41,2074"	42° 18' 50,1624"	2	0,08	0	0	7	0	0	0	0,00	0,00	0,00	147,42	1
67	20° 49' 23,45196"	42° 20' 28,8708"	3	30	27	2	200	0	0	0	8603,77	22641,51	1415,09	308,17	2
68	20° 49' 58,9414"	42° 15' 17,13456"	5	21	18	0	10	0	1	0	8000,00	7335,85	1886,79	750,00	2

(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	(k)	(l)	(m)	(n)	(o)	(p)
69	20° 46' 19,05024"	42° 14' 0,8322"	2	12	24	6	50	0	2	0	6641,51	17740,75	3301,89	606,30	2
70	20° 49' 14,9808"	42° 21' 0,7884"	2	4,5	0	0	10	0	0	0	377,36	849,06	660,38	112,25	1
71	20° 47' 34,77084"	42° 20' 32,20404"	2	150	60	6	25	0	2	0	4952,45	14037,74	943,40	423,33	2
72	20° 48' 50,0688"	42° 18' 14,391"	1	3	0	0	350	0	0	0	1811,32	3858,49	9433,96	944,25	3
73	20° 48' 5,52384"	42° 15' 22,20552"	8	40	50	0	0	0	1	0	11,32	16981,13	8490,57	700,00	2
74	20° 47' 44,66112"	42° 18' 1,37988"	2	4,5	5	2	10	0	1	0	27,17	14345,66	943,40	356,17	3
75	20° 48' 33,62904"	42° 16' 33,54672"	5	33	17	60	6	0	4	0	3622,64	12124,53	2830,19	369,25	2
76	20° 45' 48,1035"	42° 13' 59,16792"	2	9	1	2	15	0	1	0	943,40	2641,51	0,00	123,00	2
77	20° 43' 10,65252"	42° 18' 53,30772"	2	129	128	5	50	0	2	0	21226,42	40094,34	1886,79	533,00	3
78	20° 47' 28,847"	42° 18' 25,34724"	3	50	150	0	0	0	2	0	4528,30	18867,92	6603,77	400,00	2
79	20° 48' 55,70496"	42° 19' 4,58076"	2	117	40	0	0	0	0	0	3647,80	5031,45	0,00	615,00	1
80	20° 44' 47,43161"	42° 17' 3,3854"	7	29	4	0	0	0	0	0	0,00	0,00	1886,79	115,00	1
81	20° 48' 27,118"	42° 19' 52,12236"	5	15	20	0	60	0	0	0	2452,83	3773,58	566,04	49,83	1
82	20° 48' 48,011"	42° 13' 27,05808"	2	10,5	25	15	40	0	3	0	10837,74	24056,60	0,00	468,17	2
83	20° 47' 36,67704"	42° 17' 59,163"	7	4	4	0	15	0	0	0	531,32	962,26	0,00	64,17	1
84	20° 49' 3,036"	42° 15' 26,05572"	5	18	32	1	20	0	1	0	8150,94	13584,91	1698,11	196,50	2
85	20° 48' 35,0888"	42° 12' 36,65556"	2	10,5	10	2	30	0	4	0	2173,58	2113,21	1037,74	89,02	1
86	20° 48' 39,25944"	42° 14' 44,82456"	2	6	11	0	20	0	0	0	2249,06	8483,02	0,00	129,69	2
87	20° 49' 39,6516"	42° 18' 12,31992"	5	117,5	200	9	60	0	1	0	46045,28	85584,91	11320,75	1846,00	3
88	20° 46' 28,241"	42° 16' 44,31756"	2	87	68	5	50	0	3	0	6396,23	4211,32	3773,58	230,76	2

(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	(k)	(l)	(m)	(n)	(o)	(p)
89	20° 47' 23,58024"	42° 13' 35,076"	2	19,5	40	0	50	0	0	0	6188,68	12924,53	0,00	160,69	2
90	20° 47' 34,05948"	42° 15' 35,87256"	5	37	32	12	40	0	0	0	19130,19	29221,70	943,40	107,62	3
91	20° 48' 13,25268"	42° 13' 8,20992"	2	9	0	1	25	0	1	0	1698,11	4528,30	1018,87	136,75	1
92	20° 49' 2,01396"	42° 19' 47,36388"	2	33	30	0	5	0	1	0	1254,72	11586,79	3301,89	159,07	1
93	20° 48' 49,7455"	42° 13' 36,64452"	2	10,5	18	2	50	0	2	0	2886,79	8573,58	4150,94	187,75	2
94	20° 48' 53,1644"	42° 20' 9,70224"	2	9	6	1	10	0	0	0	886,79	6528,30	2075,47	328,00	1
95	20° 49' 27,84"	42° 20' 4,48116"	2	24	45	0	20	0	0	0	3328,30	7075,47	0,00	54,58	1
96	20° 46' 58,43532"	42° 16' 52,15908"	5	54	33	0	50	0	1	0	12452,83	22718,49	377,36	169,20	2
97	20° 48' 55,66392"	42° 18' 23,57712"	5	3	5	0	12	0	0	0	726,42	943,40	566,04	100,77	1
98	20° 50' 16,44036"	42° 15' 42,88068"	2	22,5	15	0	30	0	2	0	1573,58	2830,19	0,00	207,31	1
99	20° 49' 43,47588"	42° 15' 51,89292"	2	6,04	12	3	30	0	3	0	1237,74	388,58	1037,74	234,33	2
100	20° 48' 26,39124"	42° 12' 41,78484"	2	9	12	0	20	0	4	0	1193,96	2716,98	0,00	107,70	2
101	20° 46' 12,55152"	42° 13' 36,13152"	2	13,5	0	1	2	0	0	0	9245,28	16603,77	0,00	265,92	2
102	20° 48' 41,7366"	42° 18' 20,73276"	2	18	40	6	100	0	2	1	2717,36	6249,06	0,00	283,24	2
103	20° 49' 24,62412"	42° 15' 27,72612"	2	22	25	3	10	0	1	0	4528,30	6418,87	0,00	144,50	2
104	20° 42' 46,9638"	42° 18' 45,2304"	2	10,5	0	0	10	0	0	0	1792,83	1301,89	0,00	82,00	1
105	20° 48' 9,14472"	42° 16' 11,42112"	4	10,5	30	3	20	0	1	0	3207,55	8558,49	3396,23	604,54	2
106	20° 48' 29,1744"	42° 18' 21,52944"	2	20	10	4	8	0	1	0	8339,62	13471,70	9433,96	970,00	3
107	20° 47' 39,01308"	42° 20' 25,08972"	3	90	60	0	0	0	10	0	12075,47	26415,09	11320,75	1500,00	3
108	20° 49' 44,89146"	42° 15' 56,12616"	2	17,05	20	13	60	0	2	0	5466,42	8932,08	1037,74	293,00	2

(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	(k)	(l)	(m)	(n)	(o)	(p)
109	20° 47' 1,30164"	42° 16' 53,47236"	5	57,58	65	0	30	0	2	0	11603,77	15056,60	2264,15	441,08	3
110	20° 45' 3,56904"	42° 17' 36,23784"	5	39	25	2	40	0	1	0	58113,21	71698,11	0,00	2037,82	3
111	20° 46' 39,5022"	42° 15' 37,85148"	9	81	75	0	0	0	2	0	34433,96	36792,45	26415,09	4424,62	3

## APÊNDICE B

Seguem nas Tabelas 46 a 54 as unidades compostas utilizadas para dimensionamento de sistemas de geração a biomassa. Além dos custos com materiais e mão de obra, também foram inseridos nos cálculos os benefícios, despesas indiretas e encargos sociais.

Tabela 46 – Limpeza inicial (\$ m<sup>-2</sup>).

Descrição	Unid.	Coef.	Valor (\$)		Total item
			Unid.	Total	
Servente	h	0,3	1,87	0,56	0,75
Benefícios e despesas indiretas		0,2635			0,37
Encargos sociais		0,8561			0,64
<b>Total</b>					<b>1,75</b>

Tabela 47 - Escavação do terreno (\$ m<sup>-3</sup>).

Descrição	Unid.	Coef.	Valor (\$)		Total item
			Unid.	Total	
Servente	h	4,2	2,4825	10,4275	10,43
Benefícios e despesas indiretas		0,2635			5,10
Encargos sociais		0,8561			8,93
<b>Total</b>					<b>24,45</b>

Tabela 48 - Alvenaria (\$ m<sup>-2</sup>).

Descrição	Unid.	Coef.	Valor (\$)		Total item
			Unid.	Total	
Areia	m <sup>3</sup>	0,036	17,50	0,63	0,63
Cimento	kg	7,2	0,12	0,81	0,81
Servente	h	0,3	2,48	0,75	0,75
Tijolos maciços	milhar	0,07	65,00	4,55	4,55
Pedreiro	h	1,5	3,38	5,07	5,07
Servente	h	1,8	2,48	4,47	4,47
Benefícios e despesas indiretas		0,2635			6,61
Encargos sociais		0,8561			8,80
<b>Total</b>					<b>31,68</b>

Tabela 49 - Revestimento (\$ m<sup>-2</sup>).

Descrição	Unid.	Coef.	Valor (\$)		Total item
			Unid.	Total	
Areia	m <sup>3</sup>	0,0253	17,50	0,44	0,44
Cimento	kg	7,7	0,11	0,88	0,88
Servente	h	0,22	2,48	0,55	0,55
Impermeabilizante	kg	0,25	1,60	0,40	0,40
Pedreiro	h	1	3,38	3,38	3,38
Servente	h	1	2,48	2,48	2,48
Benefícios e despesas indiretas		0,2635			3,58
Encargos sociais		0,8561			5,48
<b>Total</b>					<b>17,18</b>

Tabela 50 - Pavimentação (\$ m<sup>-2</sup>).

Descrição	Unid.	Coef	Valor (\$)		Total item
			Unid.	Total	
Cascalho rolado	m <sup>3</sup>	0,16	11,36	1,82	1,82
Cimento	kg	16	0,11	1,80	1,80
Pedreiro	h	0,5	3,38	1,69	1,69
Servente	h	1,5	2,48	3,72	3,72
Benefícios e despesas indiretas		0,2635			3,60
Encargos sociais		0,8561			4,63
<b>Total</b>					<b>17,27</b>

Tabela 51 - Instalação de membrana (\$ m<sup>-2</sup>).

Descrição	Unid.	Coef.	Valor (\$)		Total item
			Unid.	Total	
Membrana Lisa	m <sup>2</sup>	1	4,97	4,97	4,97
Demais materiais	m <sup>2</sup>	0,1	4,97	0,50	0,50
Bombeiro	h	0,25	3,31	0,83	0,83
Ajudante de bombeiro	h	0,25	2,34	0,59	0,59
Benefícios e despesas indiretas		0,2635			2,13
Encargos sociais		0,8561			1,21
<b>Total</b>					<b>10,22</b>

Tabela 52 - Instalação de tubulação de PVC (\$ m<sup>-1</sup>).

Descrição	Unid.	Coef.	Valor (\$)		Total item
			Unid.	Total	
Tubo de PVC 200mm	m	1	13,42	13,42	13,42
Conexões	unid.	0,12	7,44	0,89	0,89
Bombeiro	h	0,09	3,31	0,30	0,30
Ajudante de bombeiro	h	0,09	2,34	0,21	0,21
Benefícios e despesas indiretas		0,2635			4,02
Encargos sociais		0,8561			0,44
<b>Total</b>					<b>19,28</b>

Tabela 53 - Tubulação de biogás (\$ m<sup>-1</sup>).

Descrição	Unid.	Coef.	Valor (\$)		Total item
			Unid.	Total	
Tubo de PVC 50mm	m	0,6	4,56	2,73	2,73
Mangueira PVC flexível 40mm	m	0,4	2,18	0,87	0,87
Conexões	unid.	0,5	0,37	0,18	0,18
Bombeiro	h	0,06	3,31	0,20	0,20
Ajudante de bombeiro	h	0,06	2,34	0,14	0,14
Benefícios e despesas indiretas		0,2635			1,16
Encargos sociais		0,8561			0,29
<b>Total</b>					<b>5,58</b>

Tabela 54 - Limpeza final (\$ m<sup>-2</sup>).

Descrição	Unid.	Coef.	Valor (\$)		Total item
			Unit	Total	
Servente	h	0,0515	2,48	0,13	0,13
Benefícios e despesas indiretas		0,2635			0,06
Encargos sociais		0,8561			0,11
<b>Total</b>					<b>0,30</b>

### APÊNDICE C

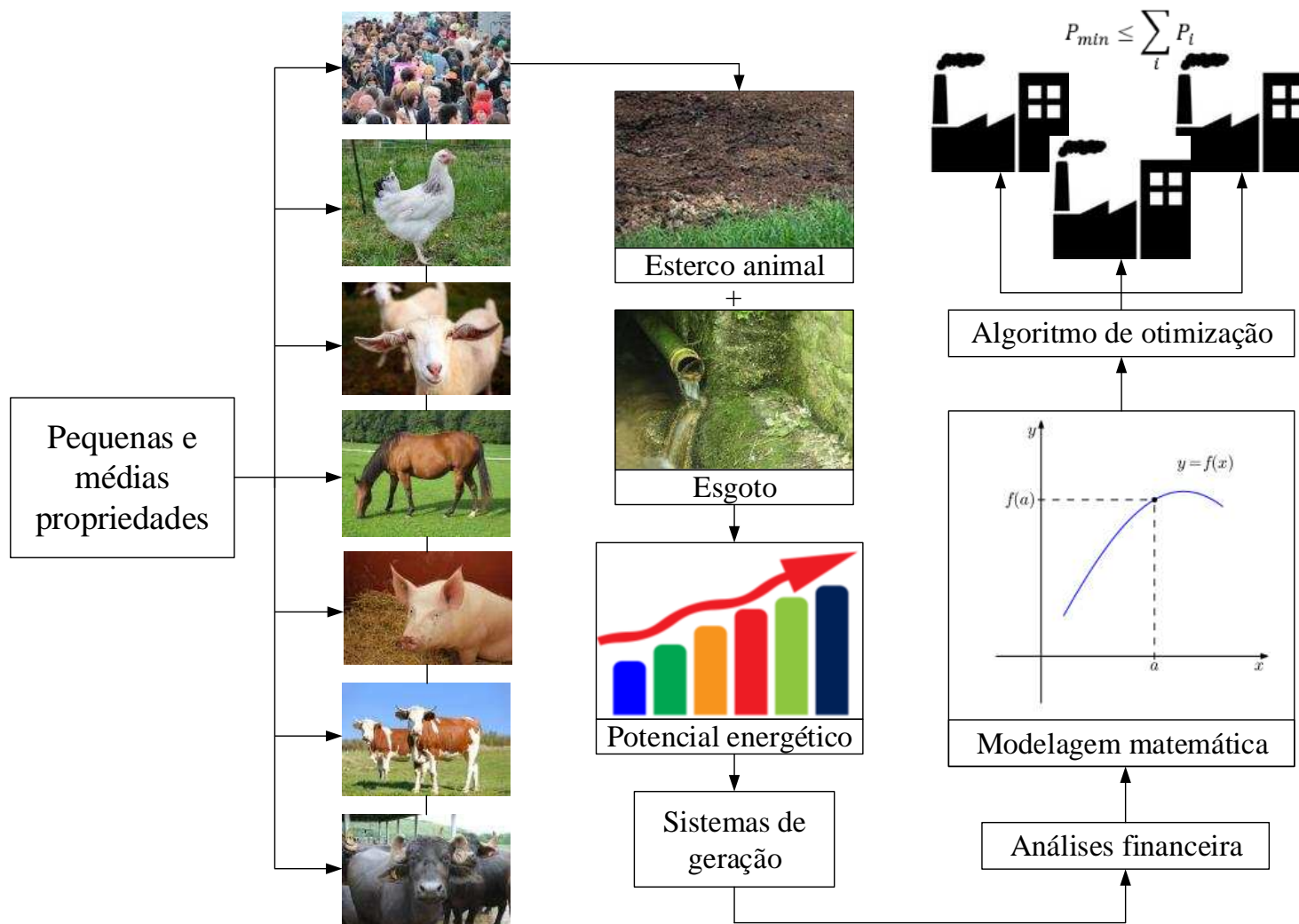


Figura 16 - Resumo gráfico do capítulo 2.

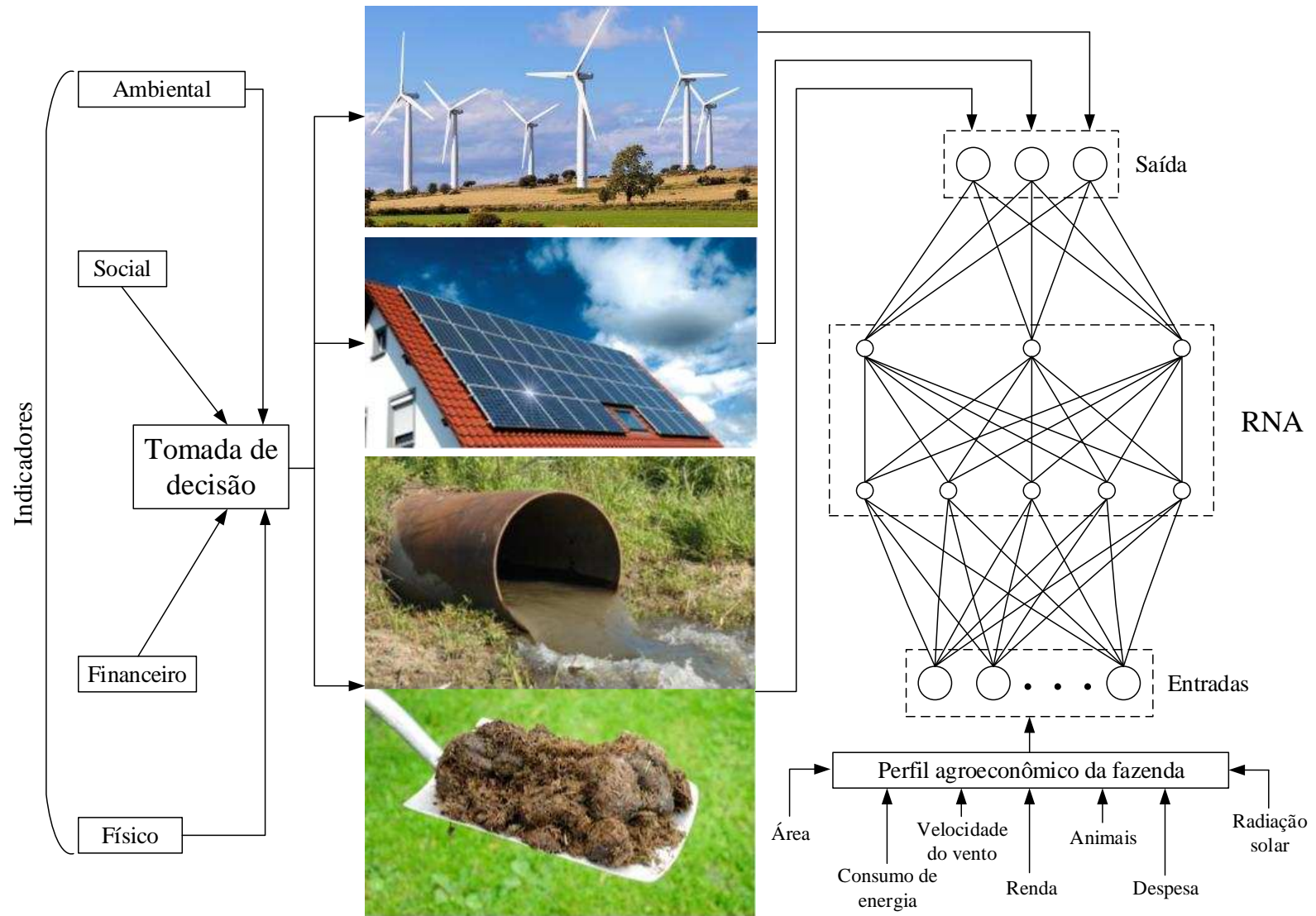


Figura 17 - Resumo gráfico do capítulo 3.

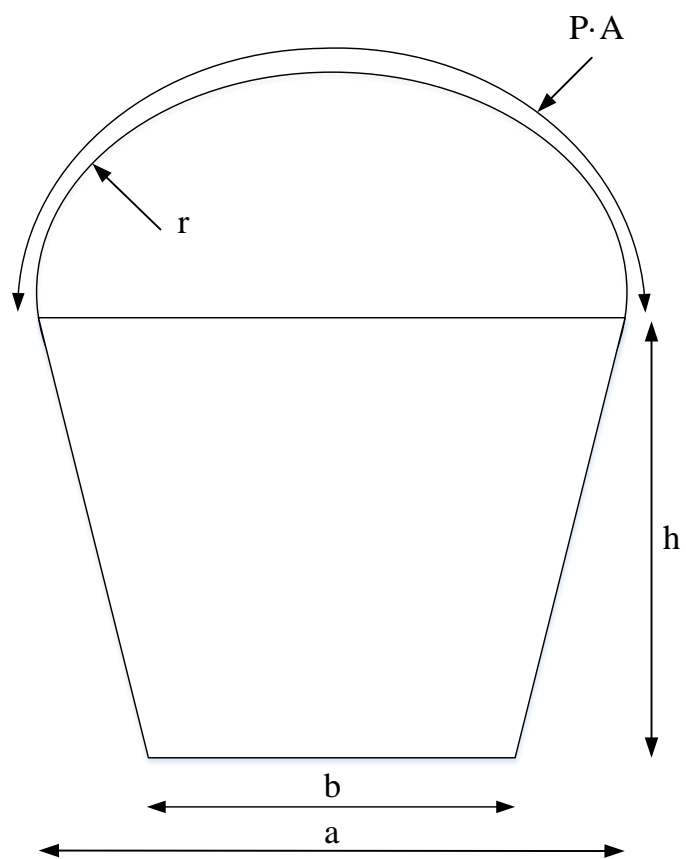


Figura 18 - Exemplo ilustrativo de corte transversal de um biodigestor.