



APRIMORAMENTO DO SISTEMA DE
INFORMAÇÃO PARA ENERGIA (SIENERGIA)

■ Evolução do potencial
técnico para o potencial
econômico ■

Índice

| | |
|--|----|
| Sobre | 4 |
| 1 Introdução | 5 |
| 1.1 Organização do documento | 6 |
| 2 Técnicas utilizadas | 8 |
| 3 Bases de dados | 11 |
| 3.1 Produção agropecuária | 11 |
| 3.2 Distâncias entre municípios | 12 |
| 3.3 Frete | 14 |
| 3.4 Demanda | 14 |
| 3.5 Dados de impactos sociais | 16 |
| 3.6 Dados de impactos ambientais | 16 |
| 3.7 População | 21 |
| 3.8 Sazonalidade da produção agrícola | 21 |
| 3.9 Sazonalidade da venda de combustíveis veiculares | 21 |
| 4 Algoritmo de otimização | 23 |
| 4.1 Elementos básicos do algoritmo | 23 |
| 4.2 Matrizes de alocação | 26 |
| 4.3 Dinâmica geral do modelo | 32 |
| 4.4 Análise de sensibilidade | 36 |
| 5 Resultados | 37 |
| 5.1 Paraná | 37 |
| 5.2 Brasil | 39 |
| 6 Impactos sociais e ambientais | 43 |
| 7 Sinergia Viewer | 44 |
| 8 Extensões deste projeto | 45 |
| 9 Referências citadas | 47 |
| Apêndice A: otimizador meta-heurístico | 48 |
| Apêndice B: Manual do SienergiaViewer - Módulo Simulador | 49 |

Sobre

Este relatório foi produzido pela R6 Consultoria. A última atualização do seu conteúdo foi feita em 19/02/24.

1 Introdução

A expansão da oferta de energia elétrica para acompanhar o crescimento do consumo, em todo o mundo, pode esbarrar em alguns obstáculos:

- danos ambientais e sociais, como a construção de hidroelétricas e a queima de combustíveis fósseis, gerando gases do efeito estufa;
- altos custos, como o custo variável dos combustíveis utilizados em termoelétricas;
- e intermitência das fontes, gerando instabilidade no sistema, como o caso da energia solar e eólica.

No Brasil, alguns estudos apontam a economicidade de aproveitar resíduos agropecuários para a geração distribuída de energia elétrica. Além disso, esses resíduos também podem ser utilizados para a geração de biometano como combustível veicular ou como combustíveis em indústrias como por exemplo as de cimento e carvão, substituindo a queima de combustíveis fósseis.

Essa solução apresenta desafios, como a dispersão geográfica dos resíduos e um considerável investimento logístico para coletá-los, processá-los e transportá-los até as usinas. Além disso, não é trivial determinar onde e quantas usinas devem ser construídas para que a solução seja não apenas lucrativa, mas também próxima ou igual de uma solução economicamente eficiente que maximize o lucro do agentes envolvidos.

Dado o potencial econômico e a redução de danos ambientais desse vetor de produção energética, é importante superar os desafios apresentados criando insumos que diminuem as incertezas de possíveis investimentos dos setores públicos e privados no aproveitamento da biomassa agropecuária para geração de bioenergia.

Para isso, este trabalho teve como meta os seguintes objetivos:

- Desenvolver e implementar de um algoritmo que defina soluções lucrativas para o aproveitamento de resíduos agrícolas para a geração de eletrecidade.

- Incluir no algoritmo o aproveitamento de resíduos pecuários.
- Sugerir e desenvolver visualizações das soluções e integrá-las à versão mais recente do Sienergia.
- Incluir na versão mais recente do Sienergia a funcionalidade de rodar o algoritmo desenvolvido.
- Incluir no algoritmo a geração de biogás para geração de eletricidade ou combustível veicular.
- Ajustar o algoritmo para limitar as soluções pelas demandas de eletricidade e de combustível veicular (diesel e gasolina).
- Considerar a sazonalidade da produção agrícola para ajustar os custos de armazenamento dos resíduos utilizados no algoritmo.
- Incluir o aproveitamento de resíduos agrícolas para co-firing.
- Estimação dos impactos ambientais, como emissões de gases do efeito estufa e consumo de recursos hídricos, além dos impactos sociais, como a geração de empregos, resultantes das soluções identificadas pelo algoritmo.

Este trabalho cumpriu com êxito todos os objetivos listados, criando um algoritmo que define onde, quantas e quais usinas devem ser construídas para o aproveitamento de resíduos agropecuários na geração distribuída de energia elétrica, na geração de biometano para aproveitamento como combustível veicular e como combustível no processo de co-firing. A caracterização produzida pelo algoritmo se dá de tal forma que o lucro gerado pela operação das usinas em um determinado período é ótimo ou quase ótimo a depender de questões computacionais.

1.1 Organização do documento

Este documento foi organizado em seções ordenadas, partindo dos elementos básicos da solução até o detalhamento da modelagem e suas consequências.

Na seção 2 descrevemos as tecnologias utilizadas.

Na seção 3 descrevemos os dados que alimentam o algoritmo e os procedimentos de tratamento e coleta.

2 Técnicas utilizadas

Nesta seção, descrevemos as tecnologias utilizadas no desenvolvimento do projeto. O principal objetivo aqui será dar uma visão geral de como o projeto foi organizado, além de definir nomenclaturas que utilizaremos ao longo da documentação.

A maior parte do projeto foi desenvolvido em [linguagem de programação R](#). Algumas configurações pontuais foram realizadas em outras linguagens ou software e no decorrer do texto descrevemos esses materiais. O **produto final** é constituído (a) bancos de dados compatíveis com SQLite e (b) por **scripts de R**, isto é, coleções de códigos com um objetivo claro. Os scripts foram organizados em [pacotes de R](#), que são coleções de scripts R organizados de maneira ótima para documentação, reprodução e compartilhamento.

Utilizamos a tecnologia [Git](#) em todas as versões construídas dos pacotes de R.

A seguir, listamos os repositórios e pacotes criados ao longo do projeto.

Repositórios

- `otimizadorCrotman`: contém o pacote com a implementação do algoritmo meta-heurístico sugerido por Bruno Crotman em sua dissertação de Mestrado (Crotman, 2019).
- `otimizadorDados`: contém o pacote para coleta e preparação dos dados utilizados no projeto.
- `otimizadorLinear`: contém o pacote com a implementação do algoritmo de avaliação da economicidade.
- `sienergiaViewer`: contém o pacote com o aplicativo Shiny do Sienergia.

Pacotes

- `otimizador Crotman`

- Implementa algoritmo meta-heurístico sugerido por Bruno Crotman em sua dissertação de Mestrado (Crotman, 2019).
 - Foi desenvolvido como a etapa inicial do projeto, antes de passarmos a utilizar o algoritmo de otimização linear.
 - O código do pacote `otimizadorCrotman` não é utilizado nos outros pacotes. Decorre desse fato que pacote `otimizadorCrotman` não é usado no painel.
 - Esse repositório não precisará ser mantido¹.
- `otimizadorDados`
 - Organiza o código responsável pela coleta, preparação dos dados e geração do banco de dados utilizado pelo otimizador e pelo módulo de simulação do Sienergia Viewer.
 - Novas fontes de dados deverão ser implementadas nele.
 - A preparação de alguns dados depende de recursos computacionais específicos como grandes servidores. Esse é o caso do cálculo de distâncias rodoviárias.
 - Poderá precisar de manutenção a depender de futuras atualizações nas fontes de dados.
 - Esse repositório deverá ser mantido.
 - `otimizadorLinear`
 - Implementa em formato portável e computacionalmente eficiente a modelagem matemática e algoritmo de otimização desenvolvido como solução deste projeto.
 - Seu código é altamente técnico e possui diversas regras de negócio, listadas e explicadas na Seção “O algoritmo”.
 - Possíveis novas rotas econômicas deverão ser implementadas nele.
 - Mudanças nas premissas do problema deverão ser implementadas nele.
 - Esse pacote deverá ser mantido.
 - `sinergiaViewer`
 - Possui o código responsável pelo aplicativo Shiny Sienergia Viewer.
 - Qualquer alteração no aplicativo deverá ser feita neste pacote.
 - Este pacote depende do `otimizadorLinear`.
 - Esse pacote deverá ser mantido.

Softwares de Otimização

O algoritmo proposto faz uso de conceitos de otimização e consequentemente o produto final depende da disponibilidade de solvers. solvers são softwares matemáticos capazes de resolver problemas lineares inteiros. Nosso produto final implementa o algoritmo proposto para as versões correntes de GLPK, CPLEX, GUROBI e COIN-OR.

3 Bases de dados

O algoritmo consome bases de dados de diversas fontes. Coletar, arrumar, organizar e documentar essas bases de dados foi parte fundamental das atividades realizadas neste projeto.

O produto final do processamento dos dados é um banco de dados [SQLite](#) denominado `SIEnergia_dados.sqlite`. Esse banco de dados alimenta o algoritmo construído e é necessário tanto para a sua execução local — a partir do pacote `otimizadorLinear` — quanto para a sua execução online — a partir do módulo *Simulador* do Sienergia, disponível no pacote `sienergiaViewer`.

Esse banco pode ser construído ou atualizado a partir do script `data-raw/bd_sienergia/atualizar_dados_bd-epe.R`, disponível no repositório `otimizadorDados`.

A seguir, descrevemos conceitualmente as informações presentes no banco de dados final, bem como as suas fontes e scripts relevantes para sua atualização.

3.1 Produção agropecuária

No início do projeto, fizemos o download dos dados de produção agropecuária brasileira a partir do [Sistema IBGE de Recuperação Automática \(SIDRA\)](#). Foram coletados os seguintes dados:

- Produção agrícola para todos os municípios brasileiros, de 1974 a 2022 ([tabela 5457](#)).
- Produção pecuária para todos os municípios brasileiros, de 1974 a 2022 ([tabela 74](#)).

Esses dados eram utilizados para o cálculo do energético disponível em cada município nos estágios iniciais de desenvolvimento. A versão final do banco de dados gerado neste projeto coleta os valores de energético diretamente do banco do SIEnergia, mantido pela EPE. Para

fins de completude e referência futura, mantivemos o script de coleta dos dados de produção agropecuária no `otimizadorDados`.

Em adição aos dados utilizados nos demais módulos do SIEnergia, o banco `SIEnergia_dados.sqlite` alimenta o módulo `Simulador` com informações relativas aos potenciais técnicos de aproveitamento dos resíduos agropecuários na tabela `carga_energia_brasil`. Essa tabela registra informações sobre os energéticos disponíveis, os combustíveis que podem ser produzidos em cada rota e as energias primárias contidas nesses combustíveis.

3.2 Distâncias entre municípios

Para calcular o lucro associado a uma solução, o algoritmo considera como um dos custos o transporte da biomassa agropecuária entre os municípios produtores e os municípios sedes (aqueles onde as usinas serão construídas). Para calcular o custo desse transporte, precisamos saber as distâncias entre os municípios da região sob análise (região escopo).

A base completa de todas as distâncias entre municípios dentre os 5570 municípios brasileiros é composta por $5570 \times 5570 = 31.024.900$ linhas, considerando que as distâncias de ida e de volta podem ser diferentes entre si. Neste projeto foram consideradas apenas as distâncias entre municípios dentro de um mesmo estado, e também municípios de estados vizinhos, pois o custo logístico de se transportar a biomassa inviabiliza soluções em que o município fornecedor e o município sede sejam muito distantes.

Sendo assim, a base de dados de distâncias entre municípios criada possui:

1. todas as distâncias entre municípios da mesma unidade da federação serão calculadas.
Isso resulta em 2.530.431 distâncias, ou 5.060.862 considerando ida e volta;
2. e todas as distâncias entre municípios de unidades da federação que fazem fronteira serão calculadas. Isso resulta em 1.480.610, ou 2.961.220 considerando ida e volta.

No total, das 31.024.900 distâncias possíveis, foram consideradas apenas 8.022.082.

Para o cálculo dessas distâncias utilizou-se o Open Source Routing Machine (OSRM) em uma máquina virtual com grande capacidade de processamento, devido à complexidade do problema. O OSRM é um motor de roteamento de alto desempenho, sob licença BSD de 2 cláusulas permissiva, implementada em C++ para realizar o cálculo de caminhos mais curtos em redes rodoviárias. A escolha dessa tecnologia dentre outras disponíveis se deu pelo fato de ela ser aberta, computacionalmente eficiente e passível de reutilização posteriormente. Além disso, o OSRM foi desenvolvido com importação flexível dos dados de mapas do OpenStreetMap, mantido pela comunidade de software livre e atualizado regularmente.

O motor de roteamento do OSRM é uma aplicação que atende por requisições REST para cálculo de distâncias entre coordenadas. Essa aplicação para ser disponibilizada necessita de:

1. Um arquivo de redes rodoviárias do Brasil, disponível em <http://download.geofabrik.de/south-america/brazil-latest.osm.pbf>;
2. Um servidor Linux com sistema operacional Ubuntu Server 20.04, ao menos 90GB de RAM, 150GB de HD e docker instalados;
3. Um arquivo de parametrização do OSRM que parametrize o procedimento de geração das rotas, como, por exemplo, excluir caminhos indesejados (balsas e estradas de terra etc.). Utilizamos uma parametrização personalizada validada com a equipe da EPE, cuja parametrização priorizava o uso de vias bem estruturadas e excluía percursos que possuíam transporte por balsa. A parametrização utilizada consta no arquivo `data-raw/distancia_entre_municipios/car-modified.lua`, disponível no repositório `otimizadorDados`.

Os passos a serem executados para disponibilizar a API de cálculo de distâncias no servidor Linux estão disponíveis no arquivo no arquivo `data-raw/distancia_entre_municipios/exemplo-osrm.BASH`, disponível no repositório `otimizadorDados`.

A partir da exposição da API na porta 5001, foi possível calcular as distâncias desejadas utilizando os scripts contidos na pasta `data-raw/distancia_entre_municipios` do repositório `otimizadorDados`.

3.3 Frete

Para os valores de frete, utilizamos o portal da [INFRA S.A.](#). Ele possui um simulador de custos de transporte rodoviário para granel sólido agrícola. A partir de um conjunto de simulações, identificamos que a fórmula de calcula utilizada pela ferramenta é parametrizada por:

$$frete = a + b * distância$$

sendo a um custo fixo em R\$/toneladas independente da distância percorrida e b um custo em R\$/toneladas/km. Os valores encontrados para a e b com base nos dados ferramenta do INFRA S.A. foram de 15,2709 e 0,1491, respectivamente. Eles são utilizados como padrão no algoritmo, mas podem ser modificados antes da otimização. Os cálculos para a obtenção desses valores estão disponíveis em [inst/documentacao-frete/documentacao_frete.html](#), disponível no repositório `otimizadorLinear`.

3.4 Demandas

Nas seções a seguir, descrevemos os dados de demanda, utilizados para deixar factível nossas estimativas de geração de energia elétrica e biometano.

3.4.1 Energia elética

Como um princípio que será explorado posteriormente na modelagem, pressupomos que a energia elétrica gerada com o aproveitamento de biomassa não pode ser maior do que a demanda por eletricidade nas áreas onde as usinas forem estabelecidas. Para produzirmos estimativas conservadoras pressupomos também que a demanda ficará constante para o futuro. Para incluir esse limite no algoritmo coletamos os dados de demanda energética das distribuidoras que atendem os municípios brasileiros.

Esses dados foram coletados do portal da ANEEL², no “Sistema de Acompanhamento de Informações de Mercado para Regulação Econômica”. Para cada distribuidora de energia

atuante em 2021 consideramos o consumo de energia elétrica referente ao ano de 2021 nas seguintes faixas de tensão:

- B1 - Residencial
- B1 - Residencial Baixa Renda
- B3 - Classe comercial
- B3 - Demais classes

Esses dados foram compatibilizados com informações oriundas de estudos internos da EPE, relativas à cobertura municipal de cada distribuidora. Ao final dessa compatibilização obtivemos uma base de dados de demanda de energia elétrica por município, onde o valor de demanda representa a demanda da distribuidora fornecedora de energia para o município.

3.4.2 Combustível

Assim como na energia elétrica, uma solução fornecida pelo algoritmo não pode sugerir uma produção de biogás maior do que a demanda pelo combustível veicular nos municípios em que as usinas foram instaladas.

Incorporamos essas informações no banco de dados final utilizando dados do consumo de gasolina e diesel oriundos da ANP e coletados pela EPE em formato .xlsx. A tabela considerada possui o consumo de gasolina e diesel por município brasileiro.

Para que seja possível comparar a produção projetada de biometano com o consumo de gasolina e diesel utilizamos como parâmetro a energia primária desses combustíveis a partir do Poder Calorífico Inferior tratado e registrado no SIEnergia. Sendo assim, além do consumo em litros registramos também a energia primária em MegaJoules equivalente ao total de combustíveis consumidos.

3.4.3 Co-firing

Dados da demanda por briquete ou pellets em plantas cimenteiras, siderúrgicas e usinas termelétricas já existentes foram tratados pela EPE e incorporados ao banco de dados final. A demanda total por combustíveis nessas operações foi convertida em energia primária em

MegaJoules para fins de comparação e avaliação da possibilidade de substituição por outros combustíveis.

3.5 Dados de impactos sociais

Com o objetivo de calcular os impactos sociais a partir das usinas previstas no simulador, foi necessário coletar dados e tratá-los com o objetivo de obter os fatores utilizados no cálculo dos impactos sociais. A seguir, serão descritas a forma de obtenção dos dados brutos usados para o cálculo dos fatores, porém apenas os fatores obtidos foram salvos no banco de dados.

3.5.1 Geração de empregos

Os dados são relativos ao número de empregos por fonte de energia no Brasil, no ano de 2022, e foram coletados na página [IRENA - International Renewable Energy Agency](#). Ao clicar em “Download Chart Data”, no canto superior direito do site, a tabela com os dados estará disponível.

3.6 Dados de impactos ambientais

Com o objetivo de calcular os impactos ambientais a partir das usinas previstas no simulador, foi necessário coletar dados e tratá-los com o objetivo de obter os fatores utilizados no cálculo dos impactos ambientais. A seguir, serão descritas a forma de obtenção dos dados brutos usados para o cálculo dos fatores, porém apenas os fatores obtidos foram salvos no banco de dados.

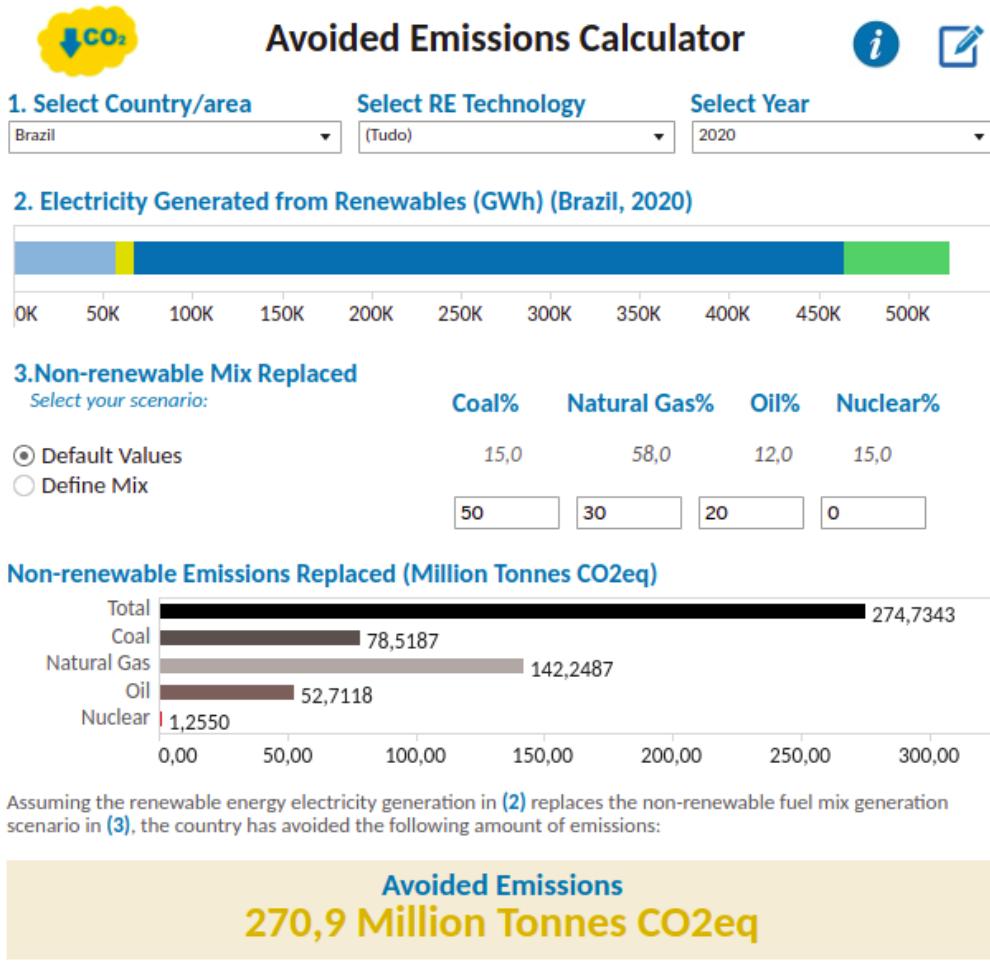
3.6.1 Emissões de CO₂

A tabela obtida apresenta, para cada fonte de energia renovável no Brasil, de 2000 a 2020, os seguintes dados:

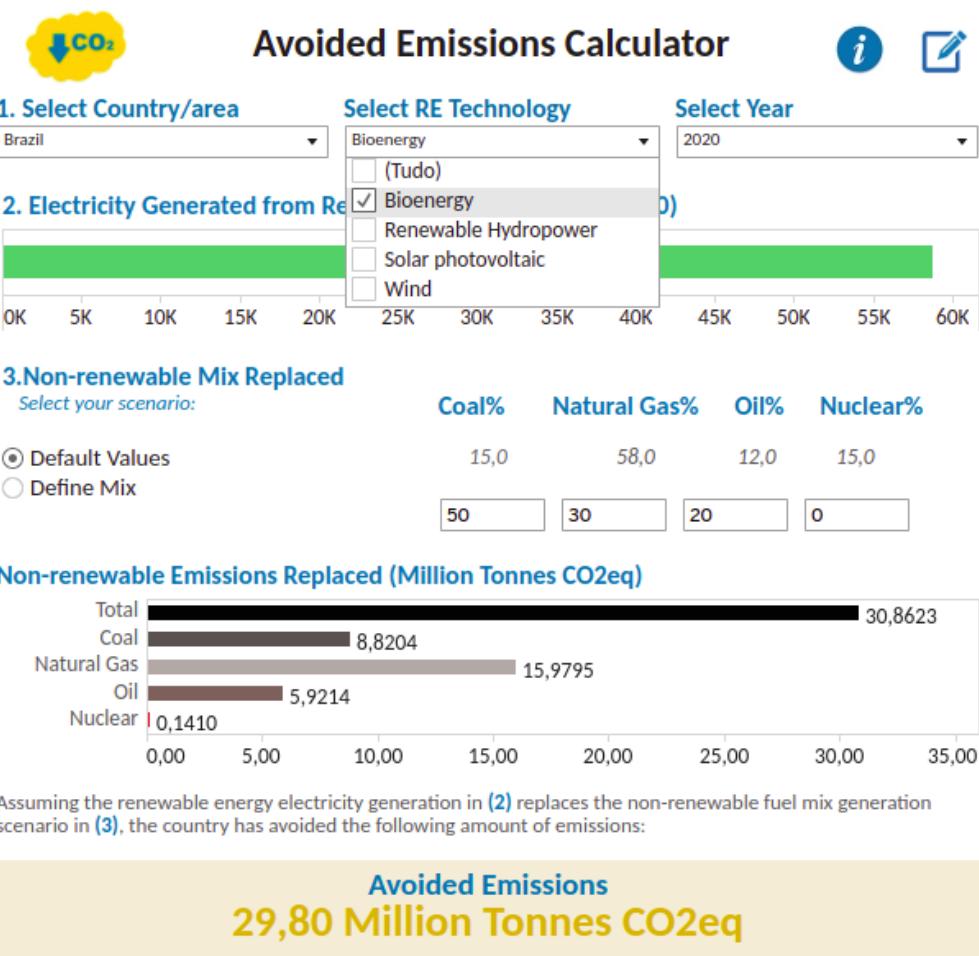
- A quantidade de emissões gerada (em Toneladas de CO₂ equivalentes).
- A quantidade de energia gerada, em MWh.

Os dados foram coletados em [Dashboard IRENA - Avoided Emissions Calculator](#). Nesse caso, não existia uma tabela disponível para download, de tal forma que a coleta dos dados foi manual. As imagens abaixo ilustram o procedimento de coleta:

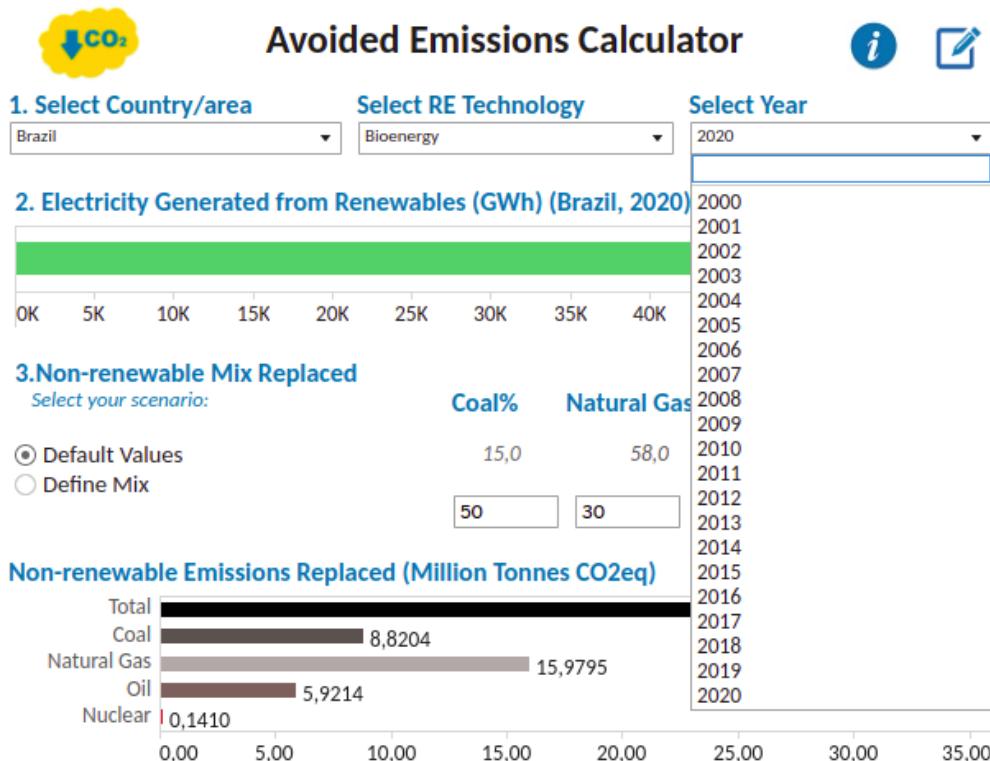
1 - Selecionar o país de interesse (no caso, Brasil).



2 - Selecionar uma fonte de energia de interesse.



3 - Selecionar um ano de interesse. No caso, fizemos a coleta de dados para todos os anos disponíveis (de 2000 a 2020)

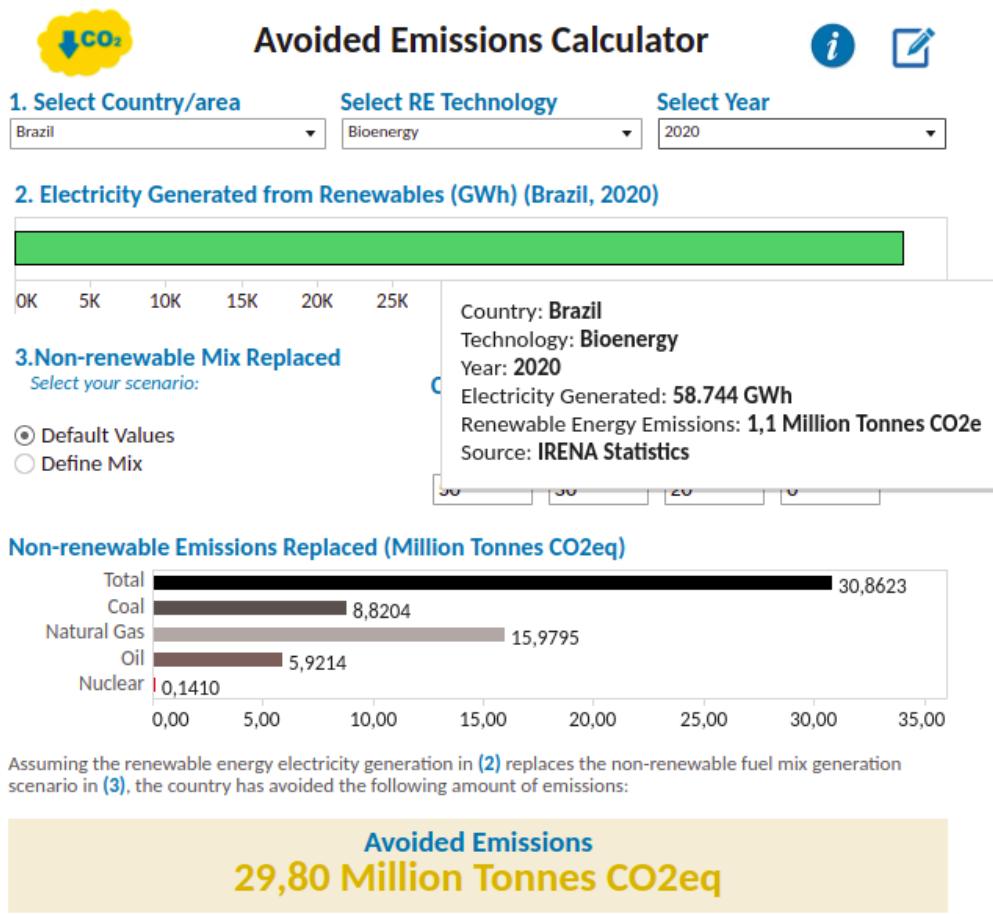


Assuming the renewable energy electricity generation in (2) replaces the non-renewable fuel mix generation scenario in (3), the country has avoided the following amount of emissions:

**Avoided Emissions
29,80 Million Tonnes CO2eq**

Note: This calculator provides an estimate of the emissions that have been avoided due to a country's uptake of renewables in a given year. This value will vary greatly depending on the non-renewable mix that has been replaced by renewables. It therefore can only be used to provide a general indication of avoided

4 - Ao passar o mouse na barra, no tópico 2. *Eleticity Generated from Renewables (GWh)*, são mostrados alguns dados que devemos coletar, são eles: “Eleticity Generated” (quantidade de energia gerada) e “Renewable Energy Emissions” (quantidade de emissões gerada).



Além da coleta, os dados disponíveis no site compreendiam apenas os anos entre 2000 e 2020. Para compatibilizar essa tabela com os demais dados, nós estimamos os valores referentes a 2022 através de modelos de séries temporais (ARIMA).

3.6.2 Consumo de água

Os dados relativos ao consumo de água foram obtidos a partir da dissertação de mestrado de Marcos Ribeiro Conde (Conde, 2013), na “Tabela 8 – Valores adotados para o indicador de consumo de água”.

3.7 População

Dados de população por município oriundos do IBGE e tratados pela EPE no SIEnergia foram incorporados ao banco de dados final. Essa etapa foi importante para garantir que o algoritmo seja capaz de considerar que municípios com poucos habitantes não sejam capazes de comportar usinas de aproveitamento de resíduos.

3.8 Sazonalidade da produção agrícola

Para sensibilizar os custos de armazenamento pela sazonalidade da produção agrícola construímos tabelas de distribuição da produção por cultura ao longo dos 12 meses do ano. Essas tabelas foram construídas a partir de bases compiladas e tratadas pela EPE, que contém dados da literatura e informações da CONAB. As tabelas finais apuradas estão disponíveis na Tabela 1 do manual do simulador.

3.9 Sazonalidade da venda de combustíveis veiculares

Essa base de dados apresenta a proporção de vendas de combustíveis considerando o mês, estado e produto. Os produtos presentes na base são: óleo diesel e gasolina C. Foi

considerado o ano de 2022. Dados obtidos no site da [Agência Nacional do Petróleo, gás natural e biocombustíveis.](#)

4 Algoritmo de otimização

4.1 Elementos básicos do algoritmo

Seguindo a sugestão original de @Crotman, neste projeto avaliamos a economicidade do aproveitamento de resíduos agropecuários projetando o maior lucro que pode ser obtido em certos modelos econômicos de aproveitamento. A esses modelos econômicos de aproveitamento daremos o nome de **rota econômica de aproveitamento de resíduos agrícolas** ou resumidamente **rota econômica**. Cada **rota econômica** é composta por dois elementos iniciais:

1. A **rota de aproveitamento do resíduo** ou resumidamente **rota de aproveitamento**, que consiste no processo físico-químico de geração de combustível utilizável em ciclos produtivos diversos. Seguindo a modelagem cristalizada no SIEnergia, este algoritmo considera que as rotas disponíveis para consideração são **Biodigestão** de resíduos agropecuários para geração de biometano; ou **Densificação** de resíduos agrícolas para geração de briquetes ou pellets.
2. Um mecanismo de **rentabilização**. Aqui se define, por exemplo, se o combustível obtido na rota de aproveitamento será comercializado diretamente para um consumidor final ou utilizado em alguma operação, como por exemplo geração de energia elétrica no modelo MMGD. A modelagem matemática dos mecanismos de rentabilização permitem avaliar as receitas e despesas da atividade econômica projetada.

As rotas econômicas avaliadas pelo algoritmo são:

- a. Densificação de biomassa agrícola para consumo de briquete ou pellet em termelétricas ainda não existentes;
- b. Biodigestão de biomassa agrícola para consumo de biometano em termelétricas ainda não existentes;
- c. Biodigestão de biomassa agrícola para consumo de biometano como combustível veicular;

24| 4 Algoritmo de otimização

- d. Densificação de biomassa agrícola para consumo de briquete em plantas cimenteiras, siderúrgicas e termelétricas já existentes;
- e. Biodegradação de biomassa pecuária para consumo de biometano em termelétricas ainda não existentes;
- f. Biodegradação de biomassa pecuária para consumo de biometano como combustível veicular.

Seguindo @Crotman para cada rota econômica re parametrizamos o Valor Presente do Lucro VPL da atividade econômica a partir de:

1. Uma matriz A_{re} de relações entre municípios que vão fornecer e consumir biomassas;
2. Um horizonte h em anos para avaliação do lucro da atividade econômica;
3. uma taxa de remuneração t ;
4. do seu fluxo de caixa anual projetado

$$Fluxo(ano) = Receita(ano) - Despesa(ano)$$

;

5. O custo de instalação da estrutura para consumir a biomassa $CAPEX(A_{re})$.

Outros elementos serão incluídos no decorrer do modelo, mas neste momento a fórmula abaixo expressa o parágrafo anterior matematicamente:

$$VPL(re) = \sum_{ano=1}^h \frac{Receita(A_{re}, ano) - Despesa(A_{re}, ano)}{(1+t)^{ano}} - CAPEX(A_{re}).$$

A modelagem proposta adota a perspectiva conservadora de que a produção será mantida constante por todo horizonte h . Sendo assim, o $VPL(re)$ de uma certa rota econômica poderá ser expresso como:

$$VPL(re) = (Receita(A_{re}, ano) - Despesa(A_{re}, ano)) \left(\sum_{ano=1}^h \frac{1}{(1+t)^{ano}} \right) - CAPEX(A_{re})$$

Como o fator $\left(\sum_{ano=1}^h \frac{1}{(1+t)^{ano}} \right)$ é uma constante que não depende da rota, podemos simplificá-lo como $F(t, h)$ e ele pode ser interpretado como um fator multiplicativo que

majora ou minora a receita anual a depender do tamanho da rentabilidade exigida do investimento e do horizonte de vida útil avaliado.

Essa é a equação base de avaliação de economicidade de todas as rotas, que são modificadas para incorporar as características de cada rota específica. Em linhas gerais o algoritmo de otimização proposto encontra as matrizes de oferta/aproveitamento de biomasssa entre municípios, aqui denominadas A_{re} , B_{re} , C_{re} , D_{re} , E_{re} , F_{re} para cada rota , que maximizam o lucro total:

$$VPL_{total} = VPL(A_{re}) + VPL(B_{re}) + VPL(C_{re}) + VPL(D_{re}) + VPL(E_{re}) + VPL(G_{re}).$$

Essa dinâmica impõe então que a biomassa será consumida em uma determinada rota apenas se ela for capaz de produzir lucro sobre certas premissas de receita e se outros destinos para a mesma biomassa não forem mais lucrativos dentre as opções mapeadas pelo algoritmo.

Para garantir que essa otimização seja realizada em tempo hábil o algoritmo se baseia na tradução da modelagem original para um problema de programação linear inteira (*Introduction to Linear Optimization*, Dimitris Bertsimas e John Tsitsiklis). O passo a passo dessa tradução está disponível [neste documento](#) que doravante será denominado **manual técnico**. Após essa camada de tradução da modelagem em operações lineares também implementamos a integração do modelo proposto em 4 solvers disponíveis no mercado: glpk (licença BSD 2), CPLEX (software proprietário da IBM), cbc (licença BSD 2 <https://github.com/coin-or/Cbc>) e Gurobi (software proprietário da empresa de mesmo nome <https://github.com/jeffreyhanson/rgurobi>).

Uma outra vantagem dessa formulação vis-a-vis a modelagem origional está no fato de otimizar o valor presente do lucro considerando restrições tanto nas relações de fornecimento e consumo de biomassas quanto na oferta de bens comercializáveis no mecanismo de rentabilização. As **restrições** são elementos importantes do modelo proposto e serão detalhados nas próximas seções, bem como os demais elementos apresentados nesta subseção.

Antes de prosseguir ressaltamos que neste documento apresentamos as fórmulas e premissas de modelagem com menos rigor matemático do que manual técnico. No manual buscamos criar as nomenclaturas e expressões que melhor se traduzissem em software para

computação científica, tendo como público alvo a equipe de desenvolvimento do algoritmo. Já neste documento buscamos explicitar de maneira tão clara e coesa quanto possível a modelagem e aspectos de sua implementação para outros públicos. Sendo assim na medida do possível vamos apontar neste documento os objetos matemáticos relevantes no manual técnico para facilitar as referências e verificações.

4.2 Matrizes de alocação

Para alimentar o algoritmo, cada rota parametriza as relações de fornecimento e consumo de biomassa para geração de energia como matrizes. Essas matrizes representam os municípios fornecedores nas linhas e os consumidores nas colunas. Cada célula representa a biomassa transportada do município i para o município j . Se fossem apenas 3 municípios sendo considerados a matriz seria:

| $a_{ij} =$ quantidade de biomassa fornecida de i para j | Consumidor 1 | Consumidor 2 | Consumidor 3 |
|---|--------------|--------------|--------------|
| Fornecedor 1 | a_{11} | a_{12} | a_{13} |
| Fornecedor 2 | a_{21} | a_{22} | a_{23} |
| Fornecedor 3 | a_{31} | a_{32} | a_{33} |

Se uma região possui 2 municípios, A e B, por exemplo, essa tabela terá quato linhas:

- A leva resíduo para B
- B leva resíduo para A
- A consome o próprio resíduo
- B consome o próprio resíduo

Para 10 municípios, esse tabela terá 100 linhas. Para 645 municípios (estado de São Paulo), essta tabela terá 416.025 e, para 5.570 municípios (Brasil), essa tabela teria cerca de 31 milhões de linhas se considerássemos todas as rotas entre municípios.

Sendo N o número de linhas dessas tabelas, o otimizador ainda precisa gerar matrizes (de restrição) com dimensões da ordem $N \times N$, o que no caso do Brasil seriam objetos com

centenas de gigabytes de tamanho, o que inviabiliza a execução do algoritmo mesmo em computadores muito bons³

Para resolver esse problema, implementamos no algoritmo uma maneira mais eficiente de representar as matrizes de restrição, que guardam não mais a posição e o valor de cada elemento da matriz, mas sim a posição e o valor dos valores que não são zero. Isso gera uma grande redução do tamanho dos objetos criados dentro do R graças ao fato da natureza dessas matrizes de restrição ser **esparsa**, isto é, a grande maioria dos seus valores é zero.

Assim, matrizes que originalmente ocupariam cerca de 100GB na memória RAM passam a ocupar menos de 30MB, possibilitando a execução do algoritmo em qualquer computador pessoal moderno.

4.2.1 Restrições sobre as matrizes de alocação

Para cada rota econômica é considerada uma matriz de alocações, sendo assim o algoritmo considera até 6 matrizes de alocação simultaneamente. Essas matrizes não podem variar livremente, já que as matrizes das rotas econômicas de aproveitamento de resíduos agrícolas por exemplo distribuem os mesmos recursos.

Sendo assim todas as matrizes de alocação testadas pelo otimizador estão sujeitas às seguintes restrições:

- O total de alocações de energético oriundo da produção **agrícola** de um município em todas as rotas precisa ser inferior ao total de energético **agrícola** produzido no ano de referência (vale para todas as rotas).
- O total de alocações de energético oriundo da produção **pecuária** de um município em todas as rotas precisa ser inferior ao total de energético **pecuário** produzido no ano de referência (vale para todas as rotas).

4.2.2 Receitas

O algoritmo considera que cada rota econômica provê bens à economia e promove sua rentabilização para remunerar os investidores. Abaixo relacionamos as receitas e bens de cada rota econômica:

- a. Densificação de biomassa agrícola para consumo de briquete ou pellet em termelétricas ainda não existentes. Aqui o bem rentabilizado é o briquete e a receita da solução é dada por

$$\text{Total de combustível produzido (ton)} \times \text{Preço de uma tonelada do combustível}$$
;
- b. Biodegradação de biomassa agrícola para consumo de biometano em termelétricas ainda não existentes. Aqui o bem rentabilizado é a energia elétrica e a receita da solução é dada por $\text{Total energia elétrica gerada (MWh)} \times \text{Preço de um MWh}$;
- c. Biodegradação de biomassa agrícola para consumo de biometano como combustível veicular. Aqui o bem rentabilizado é o biometano e a receita da solução é dada por

$$\text{Total de biometano produzido (m}^3\text{)} \times \text{Preço de um m}^3\text{ de biometano};$$
- d. Densificação de biomassa agrícola para consumo de briquete em plantas cimenteiras, siderúrgicas e termelétricas já existentes. Aqui o bem rentabilizado é o briquete e a receita da solução é dada por

$$\text{Total de combustível produzido (ton)} \times \text{Preço de uma tonelada do combustível}$$
;
- e. Biodegradação de biomassa pecuária para consumo de biometano em termelétricas ainda não existentes. Aqui o bem rentabilizado é a energia elétrica e a receita da solução é dada por $\text{Total energia elétrica gerada (MWh)} \times \text{Preço de um MWh}$;
- f. Biodegradação de biomassa pecuária para consumo de biometano como combustível veicular. Aqui o bem rentabilizado é o biometano e a receita da solução é dada por

$$\text{Total de biometano produzido (m}^3\text{)} \times \text{Preço de um m}^3\text{ de biometano};$$

Cada uma dessas receitas é parametrizada por um fator de preço que é passível de alteração para avaliação de diferentes cenários. As diferentes parametrizações, inclusive, podem inviabilizar certas rotas econômicas de exploração dos resíduos se houver alternativas muito mais lucrativas.

Para cada um dos bens de consumo rentabilizados os dados de demanda por esses mesmos bens foram utilizados para garantir que nunca seja considerado uma oferta de bens superior ao nível atual. Além disso, certas rotas econômicas competem pela mesma demanda por certos bens. A energia elétrica produzida nas rotas econômicas que rentabilizam esse bem, por exemplo, nunca pode exceder a demanda atual.

Essa limitação, entretanto, precisa se tornar um pouco mais concreta para ser enquadrada nos modelos de negócio considerados pelas rotas econômicas. Definimos então às seguintes premissas sobre os modelos de negócio:

- O biocombustível rentabilizado atende apenas a demanda do próprio município em que a usina está instalada.
- A geração de energia por MMGD é será no equipamento da distribuidora que atende o município sede, sem possibilidade de utilização por outras distribuidoras.

Com essas premissas sendo consideradas, todas as matrizes de alocação testadas pelo algoritmo se tornam sujeitas às seguintes restrições adicionais às anteriormente apresentadas:

- Sob a área de concessão de uma determinada distribuidora, o total **energia elétrica** produzido em virtude das alocações deve ser inferior à demanda por energia elétrica naquela distribuidora no ano de referência.
- Em cada município o total **biometano** produzido em virtude das alocações deve ser inferior à quantidade de biometano equivalente ao total de diesel e gasolina consumidos naquele município no ano de referência.

4.2.3 CAPEX

Para a instalação de uma usina considera-se um CAPEX em função da capacidade instalada da usina. Esse CAPEX é sempre uma função da potência instalada considerando a geração de energia elétrica ou, no caso das rotas econômicas de rentabilização de combustível veicular, na usina termelétrica equivalente com capacidade para consumir a mesma quantidade de biometano produzida. Nas rotas de rentabilização de biquelete ou pellet em usinas já existentes não se considera nenhum CAPEX nos parâmetros padrões do algoritmo.

O CAPEX é sempre uma equação linear cujos coeficientes lineares e angulares podem variar por rota econômica, já que os custos associados a instalar uma usina termelétrica a queima de briquete pode ser diferente de instalar uma usina termelétrica a queima de biometano.

Para o cálculo da potência de uma usina considera-se um fator de disponibilidade percentual que indica qual fração do ano a usina ficará efetivamente ligada. Além disso, também se

30 | 4 Algoritmo de otimização

considera um fator de eficiência energética da usina para avaliar quanto da energia primária dos combustíveis será conservada no processo de geração de energia elétrica.

Matematicamente a equação do CAPEX pode ser representada pelas seguintes relações:

$$CAPEX(\text{Potência (MW)}) = \alpha_{\text{rota econômica}} + \beta_{\text{rota econômica}} \times \text{Potência (MW)} =$$

$$\alpha_{\text{rota econômica}} + \beta_{\text{rota econômica}} \frac{\text{Energia elétrica da usina (MWh)}}{365 \times 24 \times \% \text{ de Disponibilidade}}$$

Os valores de referência para α e β em cada rota econômica foram obtidos seguindo o seguinte procedimento:

1. Obtivemos os percentis de 5% das potências instaladas usinas cujas fontes são Biogás - AGR (resíduos agroindustriais) e Casca de arroz da base de dados de [empreendimentos cadastrados na ANEEL](#). Os números são 0,2MW e 2,4MW respectivamente. Esse número será tomado como referência para calcular o menor CAPEX já realizado por algum empreendedor.
2. A partir dos custos fixos utilizamos a Tabela 13 do Caderno de Preços de Geração de 2021 da EPE para obter referências de CAPEX em R\$/MW. Os β foram obtidos pelas médias dos máximos e mínimos das colunas de mínimo e máximo de capex. Os alfas de termelétricas a biometano e a briquete/pellet foram obtidos multiplicando 0,2MW e 2,4MW pelos respectivos β encontrados.

4.2.4 Despesas

As despesas anuais são divididas em 3 categorias: custos de aquisição, custos de transporte e custos operacionais. Nas subseções seguintes detalhamos cada uma delas.

4.2.4.1 Custos de aquisição

Os custos de aquisição do energético, seja ele biomassa agrícola densificada ou biomassa pecuária como por exemplo esterco estão separados em 4 categorias, elencadas abaixo. Cada uma das biomassas aproveitadas, seja no próprio município de produção ou em outra sede, incorre nos custos abaixo:

- **Custo de coleta:** Custo de se coletar o resíduo e levar até 15km de distância (R\$/tonelada). É o valor ‘Colheita’ da equação 3.11 (Crotman, 2019).
- **Custo de armazenamento:** Custo de armazenamento (R\$/tonelada). É o valor ‘Armaz’ da equação 3.11 (Crotman, 2019).
- **Custo de carga e descarga do resíduo:** Custo de carga e descarga de todo o processo desde a coleta do resíduo na sua origem até a entrega na usina termelétrica (R\$/tonelada). É o valor ‘Carga’ da equação 3.11 (Crotman, 2019).
- **Prêmio para o produtor:** Prêmio oferecido ao produtor pelo fornecimento do resíduo em % no caso de percentual do custo logístico ou reais por tonelada no caso de percentual do valor de mercado. É o valor ‘Prêmio_c’ da equação 3.10 (Crotman, 2019).

Os valores de referência desses parâmetros foram obtidos corrigindo os valores registrados em (Crotman, 2019) pela inflação de 2019 a 2023.

4.2.4.2 Custos de transporte

O custo de transportar biomassa agrícola densificada ou biomassa pecuária como por exemplo esterco estão são calculado a partir de dois parâmetros:

- **Custo fixo de transporte:** Custo fixo de remuneração do transporte por 1 km. Essa quantidade representa a quantidade em R\$ por quilômetro que seria considerada para transportar valores muito pequenos de biomassa.
- **Custo de transporte:** Custo de transporte entre o município de origem do resíduo e o local onde está a usina termelétrica (R\$ por tonelada por quilômetro). É o valor ‘Transp’ da equação 3.11 (Crotman, 2019).

Esses parâmetros são utilizados para calcular um custo de transporte de uma certa quantidade de toneladas de biomassa entre dois destinos separados por uma certa distância seguindo a fórmula abaixo:

$$\text{Custo de transporte}(\text{toneladas de biomassa}, \text{distância}) =$$

$$(\text{Custo fixo de transporte} + \text{toneladas de biomassa} \times \text{Custo de transporte}) \times \text{distância}$$

4.2.4.3 Custos operacionais (OPEX)

O custo operacional da usina é uma despesa recorrente ao longo de toda a vida útil dos empreendimentos e no algoritmo ele foi considerado como um parâmetro de percentual do CAPEX. Sendo assim o OPEX de uma usina pode ser representado matematicamente por:

$$OPEX(\text{Potência (MW)}) = \text{Fator \% de OPEX} \times CAPEX(\text{Potência (MW)}).$$

O valor de referência desse % foi obtido de (Crotman, 2019).

4.3 Dinâmica geral do modelo

O algoritmo utiliza programação linear inteira para garantir que sempre seja possível obter estimativas de economicidade, independentemente das rotas consideradas e das parametrizações. Além disso, os resultados obtidos não dependem de heurísticas ou de características específicas de simetrias originadas em escolhas convenientes de parâmetros. Por outro lado uma desvantagem dessa abordagem reside no fato de, de certa forma, os resultados obtidos não possuírem uma interpretação direta.

Mesmo considerando que o resultado da otimização é obtido por um algoritmo fechado, nesta seção vamos ilustrar algumas dinâmicas que estão introjetadas no modelo, bem como a relação dessas dinâmicas e de certas parametrizações. O objetivo dessa seção é produzir um conjunto de análises e fatos estilizados que ajudem a compreender e qualificar os resultados fornecidos pelo algoritmo.

4.3.1 Restrições técnicas das soluções e ordens de grandeza

O primeiro fato que pode nos ajudar a interpretar os resultados do modelo são os limites irrestritos de comercialização e também as soluções que seriam obtidas se não houvessem custos para geração de energia.

O consumo de combustível a partir da densificação de resíduos agrícolas resulta em cerca de 160 milhões de MWh de energia por ano, enquanto para o mesmo resíduo o consumo de combustível obtido a partir da biodigestão resulta em cerca de 183 milhões de MWh, pois as

usinas termelétricas a biotetano tendem a ser mais eficientes energeticamente. Já o consumo do biometano resultante da biodigestão dos resíduos pecuários resultaria em cerca de 60 milhões de MWh.

A demanda por energia elétrica no brasil em 2021 foi de 202 milhões de MWh. Sendo assim pode-se concluir que tecnicamente os resíduos agropecuários são capazes de atender a demanda por energia elétrica brasileira, sendo necessário aproveitar tanto biomassa agrícola quanto pecuária para atingir esse número. De fato, é possível atender 120% da demanda por energia elétrica.

Caso os 202 milhões de MWh fossem atentidos pela indústria simulada pelo algoritmo seria possível obter uma receita de cerca de 100 bilhões de reais, caso o preço do MWh fosse fixado em R\$ 500,00 ou de cerca de 180 bilhões se o preço fosse fixado em R\$ 900,00. Sendo esse um faturamento anual, para calcular o seu valor presente em 30 anos será necessário aplicar um fator de majoração. Tomando um horizonte de 30 anos e uma taxa de 8%, o fator de majoração fica em torno de 11,25 vezes. Nesse caso o valor presente da receita desse fornecimento seria de cerca de 1,14 trilhões de reais.

O algoritmo estima a economicidade do aproveitamento econômico dos resíduos agropecuários a partir de descontos de custos sobre essa receita de 1,14 trilhões de reais, para parâmetros próximos dos considerados aqui. Essa quantidade precisa ser capaz de remunerar os investidores do setor de energia, os produtores que cederão seus resíduos, os custos de transporte e manuseio da biomassa etc.

De modo similar, os resíduos agropecuários são capazes de fornecer uma quantidade de biometano energeticamente equivalente a 145% do consumo de gasolina e diesel. Invertendo a conta, para atender 100% da demanda por gasolina e biometano seria necessário comercializar 54 bilhões de metros cúbicos de biometano. A R\$ 2,90 essa quantidade de biometano resultaria em uma receita anual de 157 bilhões de reais. Nesse exercício é importante notar que as ordens de grandeza não são muito diferentes entre a receita das duas rotas, sendo assim pequenas variações nos preços podem tornar uma ou outra rota mais atrativa financeiramente.

4.3.2 CAPEX com limite de geração de potência de usina

A principal dinâmica do modelo consiste em verificar se o atendimento de uma certa demanda é capaz de, ao longo de 30 anos, remunerar os investidores com uma quantidade de lucro. O CAPEX é um custo com ordem de grandeza significativa que pode afetar o lucro calculado pelas soluções, em particular pelo fato de restringirmos a potência instalada das soluções via MMGD a 5MW de potência instalada. Nesse caso um novo CAPEX é computado a cada nova usina instalada.

A fórmula do CAPEX considerada pelo algoritmo é composta por um componente fixo e um componente que varia com a potência instalada. O componente fixo, além de garantir maior flexibilidade à modelagem, é responsável por definir um faturamento mínimo que deve ser atingido por cada usina para que seja rentável instalar uma usina. Duas consequências são importantes nesse aspecto:

1. Localidades com demandas inferiores ao faturamento mínimo induzido pelo CAPEX fixo tendem a não ser instaladas, mesmo se houver sobra de biomassa. Por esse fato e pelo próximo que destacaremos na sequência, é comum que o modelo transporte biomassa para os centros com demanda mais próximos. Também é comum que quantidades ínfimas de biomassa sejam transportadas.
2. As usinas termelétricas devem operar sempre próximas de sua capacidade máxima, pois a redução de custos proporcionada pela instalação de uma nova usina pode não ser suficiente para superar o CAPEX fixo que será contabilizado no balanço do investimento. Sendo assim é comum que na presença de CAPEX fixo suficientemente grande todas as usinas instaladas tenham potência instalada próxima de 5MW.

4.3.3 Ordem de grandeza do custo de transporte

Conforme mencionado a questão que se coloca com relação a instalação de uma nova usina em virtude de baixa demanda é a comparação entre o custo de consumir a biomassa onde ela é coletada VS o custo de transportar a biomassa para outro lugar e eventualmente complete a potência de uma usina que não chegou a 5MW. Pelos parâmetros o custo de transporte dificilmente chega a 20 milhões, CAPEX fixo de referência das usinas

termelétricas à queima de briquete/pallet. Para simplificar os cálculos, vamos considerar que o custo de transporte em R\$/t/km seja de R\$ 0,2 = $2 * 10^{-1}$. Seja d a distância percorrida e t a quantidade de toneladas a ser transportada. O custo de transporte é dado pela fórmula:

$$2 * 10^{-1} * d * t$$

Se resolvemos a equação em d e t para encontrar produtos $d * t$ que resulte em 20 milhões vamos ter:

$$2 * 10^{-1} * d * t = 20 * 10^6 \implies d * t = 10^8$$

Sendo assim as ordens de grandeza de d e t precisam ser, por exemplo, iguais a 10^4 para bater os 20 milhões. Mas também é verdade que d nunca passa da ordem de grandeza de 10^3 , pois as maiores rodovias do Brasil tem cerca de $4.5 * 10^3$ kms de extensão. Sendo assim, apenas o transporte de mais de aproximadamente 10^5 toneladas fariam com que o custo logístico superasse o custo fixo de instalação. Logo, até quantidades razoavelmente grandes de energético poderiam ser transportadas, principalmente por distâncias menores.

Em outras palavras, essa dinâmica impõe que usinas de menos de 5MW desperdiçam os 20 milhões já pagos pelo seu custo inicial. Se isso causar desconforto, essa característica do modelo pode ser inteiramente removida se mudarmos a fórmula do CAPEX para, por exemplo, zerar o custo fixo e aumentarmos o multiplicador por MW de potência instalada.

4.3.4 Melhorias de performance

Implementamos no otimizador algumas melhorias que visam diminuir o tempo de execução, tornando possível executar o algoritmo de maneira tão eficiente quanto possível mesmo quando considera-se o Brasil como escopo total. Esses aprimoramentos estão listados a seguir.

- a possibilidade de desconsiderar municípios sedes cuja receita gerada em nenhuma hipótese superaria o seu próprio custo de implantação;
- a possibilidade de considerar para uma determinada sede apenas os municípios que aumentariam a receita da região gerada;
- a possibilidade de considerar, para cada município, apenas as n sedes para as quais ele daria mais lucro.

Todas as melhorias diminuem o número de variáveis de decisão do problema, reduzindo o assim o seu tempo de execução. As duas primeiras não desviam o algoritmo da solução ótima, enquanto a terceira leva a um limite inferior para a solução ótima. Uma análise de sensibilidade foi realizada para avaliar o impacto de alterar esse valor.

Também adaptamos o algoritmo para permitir a restrição do tamanho da usina, isto é, não permitir que a potência das usinas construídas em cada sede seja maior que um valor especificado, tendo em vista os limites praticados para o mercado de MMGD. Sendo assim, as usinas de geração de energia elétrica possuem uma limitação de potência parametrizável, a princípio em 5MW.

4.4 Análise de sensibilidade

Fizemos uma análise de sensibilidade para estudar o quanto a variação de cada parâmetro influencia no resultado encontrado pelo modelo. Em especial, essa análise mostrou que o aprimoramento de considerar para cada município, apenas as n sedes para as quais ele daria mais lucro, pode ser utilizado, pois reduz muito o tempo de execução do algoritmo, encontrando uma solução muito próxima da solução ótima. A análise está disponível no seguinte link: https://github.com/curso-r/otimizadorLinear/blob/main/data-raw/analise_sensibilidade.pdf.

5 Resultados

Abaixo, estão apresentados os resultados do algoritmo de otimização linear para as seguintes regiões escopo: Paraná e Brasil. A parametrização utilizada para obter os resultados foi a padrão do Sienergia Viewer.

Como o resultado da otimização é composto por diversas tabelas extensas, não é possível adicionar todas elas neste documento. Dito isso, o resultado apresentado abaixo é apenas uma versão resumida da solução apresentada no Sienergia Viewer.

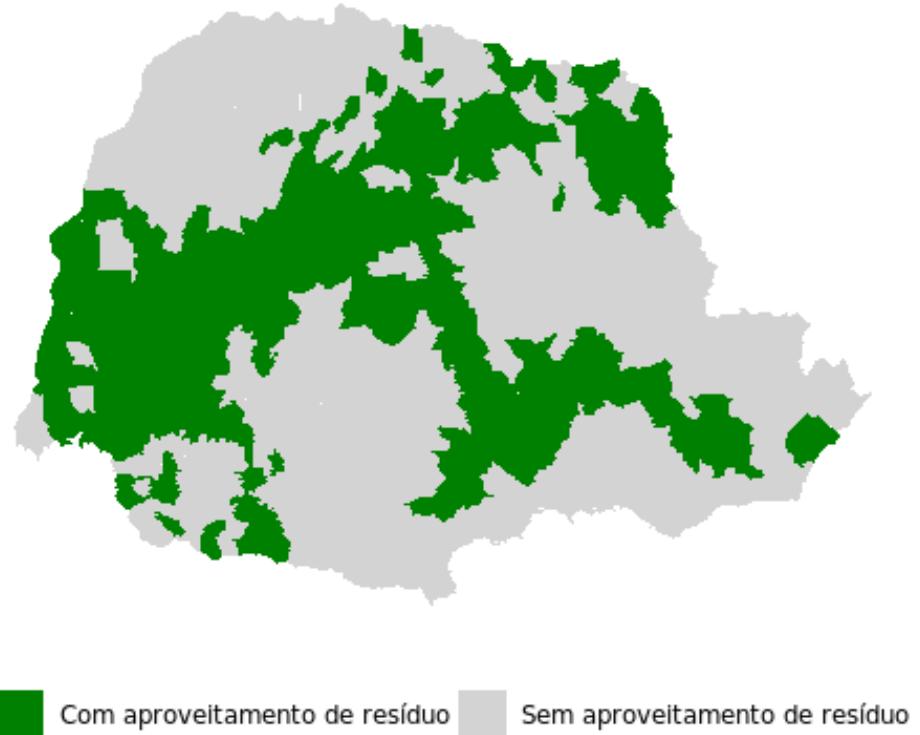
5.1 Paraná

```
readr::read_rds("res_documentacao/tab_parana.rds") |>  
  kableExtra::kable()
```

| Rota | Número de Usinas | % da Biomassa Aproveitada | % da Demanda Satisfeita | Valor Presente do Lucro |
|----------------------------------|------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Biodigestão - Resíduos agrícolas | | | | |
| Combustível - Biodigestão - | 20 | 41,7% | 42% | R\$31.482.563,840 |
| Combustível - Resíduos pecuários | 8 | 11,5% | 3,4% | R\$3.487.649,651 |

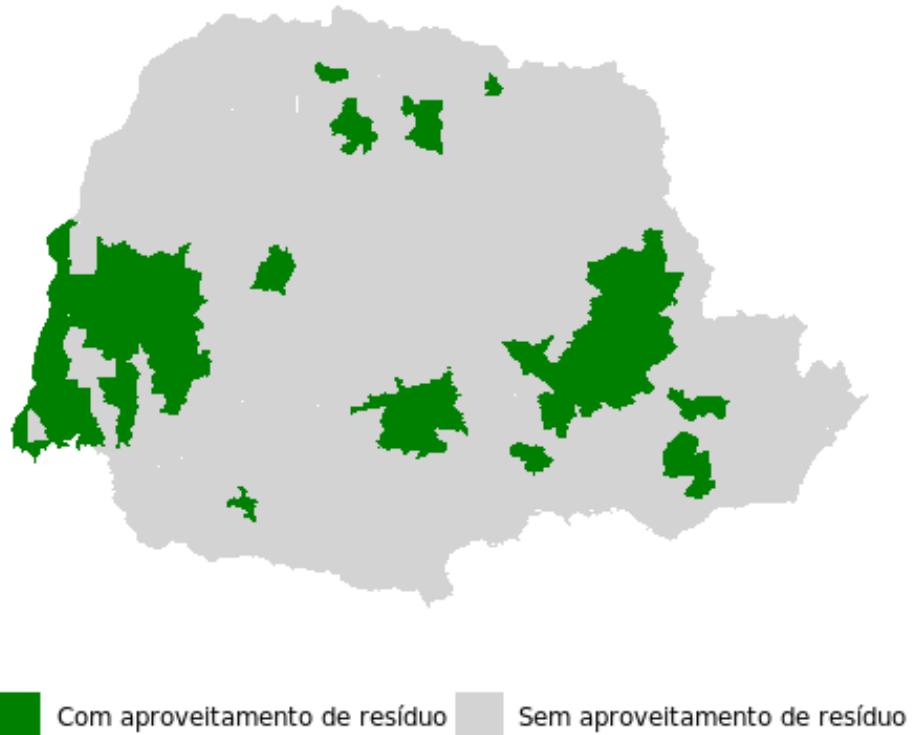
5.1.1 Mapa da solução obtida para a rota “Biodigestão - Combustível - Resíduos Agrícolas”

Biodigestão - Combustível (Res. Agrícola)



5.1.2 Mapa da solução obtida para a rota “Biodigestão - Combustível - Resíduos Pecuários”

Biodigestão - Combustível (Res. Pecuário)



5.2 Brasil

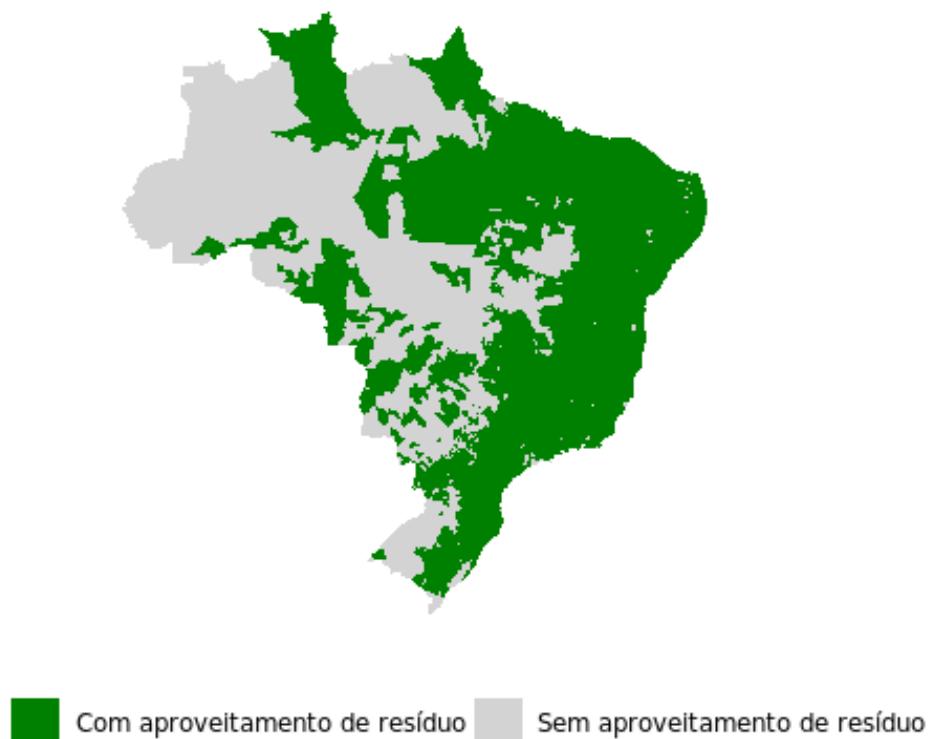
```
readr:::read_rds("res_documentacao/tab_brasil.rds") |>
  kableExtra:::kable()
```

| Rota | Número de Usinas | % da Biomassa Aproveitada | % da Demanda Satisfeita | Valor Presente do Lucro |
|--------------------|------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Biodigestão - | | | | |
| Combustível - | 253 | 56,1% | 41,2% | R\$217.368.366.396 |
| Resíduos agrícolas | | | | |
| Biodigestão - | | | | |
| Combustível - | | | | |

| Rota | Número de Usinas | % da Biomassa Aproveitada | % da Demanda Satisfeta | Valor Presente do Lucro |
|--------------------------------|------------------|---------------------------|------------------------|-------------------------|
| Resíduos pecuários | 154 | 8,6% | 3,1% | R\$21.931.175.196 |
| Co-firing - Resíduos agrícolas | 13 | < 1% | 10,9% | R\$575.530 |

5.2.1 Mapa da solução obtida para a rota “Biodigestão - Combustível - Resíduos Agrícolas”

Biodigestão - Combustível (Res. Agrícola)



5.2.2 Mapa da solução obtida para a rota “Biodigestão - Combustível - Resíduos Pecuários”

Biodigestão - Combustível (Res. Pecuário)



5.2.3 Mapa da solução obtida para a rota “Co-firing - Resíduos Agrícolas”

Cofiring (Res. Agrícola)



█ Com aproveitamento de resíduo Sem aproveitamento de resíduo

6 Impactos sociais e ambientais

A fim de avaliar os impactos ambientais e sociais da implementação do aproveitamento de resíduos agropecuários na geração de energia, construímos uma tabela com as seguintes informações:

- Quantidade estimada de empregos gerados por unidade de energia/combustível gerados (MWh, m³ ou tonelada), para cada rota.
- Quantidade estimada de emissões (em toneladas de CO₂ equivalente) por unidade de energia/combustível gerados (MWh, m³ ou tonelada), para cada rota.
- Quantidade estimada de água consumida por unidade de energia/combustível gerados (MWh, m³ ou tonelada), para cada rota.

A partir desses dados, implementamos uma função que estima a quantidade de empregos, emissões e consumo de água, para cada solução encontrada pelo otimizador. A estimativa dessas métricas é calculada de maneira proporcional aos valores presentes nos dados, com base nas quantidades de energia geradas. Por exemplo, se para produzir 1 MW de energia em 2022, foram gerados 10 empregos, caso uma solução aponte a geração de 2 MW de energia, a estimativa de número de empregos será 20.

A função `calcula_empregos_emissoes` está disponível em: https://github.com/curso-r/otimizadorLinear/blob/main/R/preparar_tabela_resultados.R

7 Sinergia Viewer

O Sienergia Viewer é aplicação web construída em Shiny pela equipe da EPE. O algoritmo desenvolvido neste projeto foi incorporado ao Sienergia Viewer dentro da aba/módulo “Simulador”.

A maioria dos parâmetros do modelo podem ser alterados a partir de inputs disponíveis no módulo “Simulador”. A execução do algoritmo acontece dentro de um módulo próprio. Neste módulo, também estão implementadas todos os outputs da página: os resultados da otimização no formato de valores, tabelas e mapas. Nenhum outro script ou módulo do Sienergia Viewer original (produzido pela EPE) foi alterado.

Para saber mais, consulte o manual elaborado especificamente para o Sienergia Viewer - Módulo Simulador, disponível no Apêndice B.

8 Extensões deste projeto

O algoritmo criado neste projeto, em sua forma atual, demonstra um considerável potencial para fornecer suporte a estudos sobre a viabilidade econômica da utilização de resíduos agrícolas e pecuários na produção de bioenergia no Brasil. Nesta seção, são apresentadas algumas possíveis expansões do algoritmo que poderiam ser desenvolvidas em projetos futuros, visando a ampliação de seu alcance investigativo.

Uma expansão de implementação relativamente simples seria incorporar os resíduos urbanos, dados já disponíveis no Sienergia, como uma via econômica adicional no otimizador. Nessa mesma linha, o algoritmo poderia ser adaptado para contemplar não somente outras formas de resíduos, mas também fontes energéticas alternativas, como o hidrogênio.

Alguns pressupostos estabelecidos neste estudo podem ser flexibilizados para aprimorar as estimativas econômicas. Por exemplo, a utilização do biogás na rota de biodigestão está atualmente limitada ao consumo no município onde é produzido. Ao incorporarmos dados de logística para o transporte do combustível, poderíamos viabilizar a sua venda em municípios próximos, expandindo assim os limites da demanda. Além disso, ao considerarmos informações de usinas já em operação, teríamos a possibilidade de integrá-las na otimização, reduzindo os custos associados à construção de novas instalações.

Os dados de produção agropecuária poderiam ser projetados ao longo do período de operação das usinas considerado na otimização, visando uma melhor previsão da disponibilidade de energia. Na abordagem atual, os valores permanecem fixos com base no último ano disponível (2022). Essa projeção ao longo do tempo poderia oferecer uma visão mais precisa e dinâmica das fontes de matéria-prima, permitindo uma melhor adaptação às variações sazonais ou de longo prazo na produção agropecuária.

O algoritmo desenvolvido considera as produções municipais para a avaliação da viabilidade econômica, utilizando a sede dos municípios como ponto de referência para o cálculo das distâncias, sem determinação dos locais exatos para a construção das usinas. No entanto,

ao utilizar dados de produção disponíveis no nível das propriedades rurais, obtidos a partir do CAR (Cadastro Ambiental Rural), e ao calcular as distâncias entre essas propriedades utilizando o mesmo procedimento descrito na Seção @*(distancias)*, as soluções geradas pelo algoritmo poderiam indicar com maior precisão os locais ótimos para a construção das usinas. Isso permitiria otimizar os custos logísticos, identificando de forma mais acurada os pontos de origem dos recursos agrícolas e pecuários, resultando em soluções mais eficientes e economicamente viáveis.

O painel Sienergia poderia ser expandido para se tornar um hub de aplicativos voltados para apoiar estudos econômico-energéticos e ambientais. A partir da consolidação do seu banco de dados, criação de novas visualizações interativas e reformulação da sua interface do usuário com um design moderno, seguindo as melhores práticas de experiência do usuário, o Sienergia teria a capacidade de abrigar diversos aplicativos especializados. Esses aplicativos poderiam agilizar a condução de pesquisas e oferecer maior clareza na comunicação para o público em geral, transformando o Sienergia em uma plataforma centralizada e acessível, facilitando a execução de estudos e promovendo uma compreensão mais ampla e eficaz dos dados e análises.

Por último, a solução desenvolvida poderia ser generalizada para outros países, enfrentando como principal desafio a coleta de dados relacionados à produção agropecuária, às distâncias entre os diferentes municípios e às demandas por energia elétrica e combustível.

9 Referências citadas

CROTMAN, BRUNO MAURICIO RODRIGUES. **Avaliação da geração de energia a partir de resíduos no Brasil usando otimização heurística.** 2019. Dissertação de mestrado. UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, Rio de Janeiro. Acesso em: <https://ppgi.uniriotec.br/download/3080/?tmstv=1703009394>

CONDE, MARCO RIBEIRO. **Incorporação de dimensão ambiental no planejamento de longo prazo da expansão da geração de energia elétrica por meio de técnicas multicritério de apoio a tomada de decisão.** 2013. Dissertação de mestrado. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, Rio de Janeiro. p. 63. Acesso em: https://www.ppe.ufrj.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/mestrado/Marcos_Ribeiro_Conde.pdf

Apêndice A: otimizador meta-heurístico

Na fase inicial do projeto, implementamos uma nova versão do algoritmo meta-heurístico sugerido pelo Bruno Crotman em sua dissertação de Mestrado. Essa versão se trata da reformulação do código feito pelo Bruno, organizando-o em um pacote R bem documentado e atualizando o código para o estado da arte da linguagem. Embora tenha sido importante para o entendimento inicial do problema e para um primeiro contato com as principais fontes de dados, o algoritmo meta-heurístico não continuou sendo desenvolvida a partir do terceiro mês do projeto.

O algoritmo meta-heurístico deu lugar ao otimizador linear sugerido pela R6 na sequência do desenvolvimento. O principal motivo foi eficiência: o otimizador linear gera soluções para a todos os estados brasileiros em segundos ou poucos minutos⁴, enquanto o algoritmo meta-heurístico levava várias horas para resolver um único estado.

O repositório `otimizadorCrotman` contém o código fonte documentado e organizado em um pacote R do algoritmo meta-heurístico desenvolvido neste projeto.

Esse pacote não é utilizado pelos demais pacotes desenvolvidos e não precisará ser mantido pela EPE para que os produtos finais do trabalho continuem funcionando.

Apêndice B: Manual do SienergiaViewer - Módulo Simulador

Introdução

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) é uma Empresa pública, vinculada ao Ministério de Minas e Energia, instituída nos termos da Lei nº 10.847, de 15 de março de 2004, a EPE tem por finalidade prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinadas subsidiar o planejamento do setor energético, tais como energia elétrica, petróleo e gás natural e seus derivados, carvão mineral, fontes energéticas renováveis e eficiência energética, dentre outras.

O Sistema de Informações para Energia (SIEnergya) é um sistema de informações desenvolvido pela EPE para auxiliar o planejamento energético nacional. O sistema é composto por um conjunto de ferramentas que permitem a visualização de dados sobre o potencial energético disponível no país, utilizando coprodutos da agropecuária, indústria e saneamento.

O SIEnergia apresenta vários módulos, como “Produto”, “Energético”, “Combustível”, “Energia” e “Simulador”.

Este manual tem como objeto servir de guia para o uso do módulo Simulador.

The screenshot shows the official website of SI Energia. The top navigation bar includes links for 'SI Energia', 'O que?', 'Como?', 'Diagrama', 'Modelo', 'Produto', 'Energético', 'Combustível', 'Energia', 'Simulador', and 'Glossário'. The main content area features the SI Energia logo with a stylized lightbulb and the text 'SISTEMA DE INFORMAÇÕES PARA ENERGIA'. Below the logo is a banner with the text 'COPRODUTOS DA AGROPECUÁRIA, INDÚSTRIA E SANEAMENTO' and 'Um enorme potencial energético disponível'. At the bottom of the page, there are logos for 'GOVERNO FEDERAL' and 'BRASIL UNIÃO E RECONSTRUÇÃO', along with copyright information and publication details.

Página inicial do SI Energia

Módulo Simulador

O **módulo Simulador** permite a simulação de cenários de geração de energia através das rotas de Densificação, Biodigestão, e Co-firing, utilizando produtos agropecuários. Os resultados são apresentados utilizando medidas-resumo, mapas e tabelas.

Para acessar o módulo Simulador, acesse o SI Energia, e clique na opção “Simulador” no menu lateral esquerdo:

The screenshot shows the SI Energia website interface. On the left, a vertical navigation bar lists various modules: SI Energia, O que?, Como?, Diagrama, Modelo, Produto, Energético, Combustível, Energia, Simulador, and Glossário. A blue arrow points from the "Simulador" link in the menu to the "Simulador" section of the main content area. The main content area features the SI Energia logo and the text "COPRODUTOS DA AGROPECUÁRIA, INDÚSTRIA E SANEAMENTO" and "Um enorme potencial energético disponível". Below this, there are sections for "Coordenação Executiva", "Desenvolvimento", and "Equipe Técnica". At the bottom, it shows the Ministry of Mines and Energy logo, the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE) logo, and the publication date "Publicação: 02/06/2023".

Para acessar o módulo Simulador, clique em “Simulador” no menu lateral esquerdo.

A tela inicial do módulo Simulador apresenta um conjunto de parâmetros de entrada, que podem ser configurados pelo usuário. Os parâmetros são divididos em três grupos: “Opções da simulação”, “Parâmetros das rotas econômicas” e “Parâmetros extras”, que serão detalhados nas seções seguintes (@sec-parametros).

Abaixo dos parâmetros de entrada, há um botão “Rodar otimizador”, que inicia o processo de simulação. Ao final do processo, os resultados serão apresentados na tela, que será detalhada na @sec-resultados.

The screenshot shows the "Simulador" module. At the top, there's a header with "Opções da simulação" and "Manual do simulador" and "Documentação do algoritmo" buttons. Below this, there are dropdown menus for "Rotas econômicas" (6 opções selecionadas), "Região escopo" (SP), "Produtos" (13 opções selecionadas), and "Número máximo de usinas por sede" (50). There are also fields for "Número máximo de cidades testadas" (100) and "População mínima para considerar uma sede" (100000). A checkbox "Considerar a sazonalidade da produção agrícola" is checked. On the right, there are "Limitadores" checkboxes for "Limitar por demanda" and "Limitar a produção de energia elétrica pelo tamanho da usina (MW)".

Below these settings, there are four summary boxes: "VALOR DA SOLUÇÃO R\$ 107.428.451.959", "NÚMERO DE USINAS 86", "BIOMASSA APROVEITADA 99,1% Resíduos agrícolas", and "BIOMASSA APROVEITADA 3,7% Resíduos pecuários".

At the bottom, there's a table titled "Rotas" with columns: "Rota", "Município sede", "Número de municípios", "Número de usinas", and "Potência (MW)". The table lists several entries, such as São Paulo (182 usinas, 1 MW), Campinas (21 usinas, 1 MW), Ribeirão Preto (33 usinas, 1 MW), São José do Rio Preto (31 usinas, 1 MW), São José dos Campos (10 usinas, 1 MW), Jundiaí (22 usinas, 1 MW), Sorocaba (26 usinas, 1 MW), Piracicaba (11 usinas, 1 MW), Limeira (12 usinas, 1 MW), and Atibaia (9 usinas, 1 MW). A "Procurar" button is also present in the table header.

Captura de tela da página SIEnergyia - Módulo Simulador

Configuração dos Parâmetros

A seguir, será detalhadamente explicado cada um dos parâmetros de entrada do módulo Simulador.

Opções da simulação

Os parâmetros de entrada do grupo “Opções da simulação” permitem configurar o escopo da simulação, ou seja, quais produtos serão utilizados, quais rotas econômicas serão simuladas, quais limitações serão aplicadas, entre outros.

Opções da simulação
As referências para os valores padrão dos filtros estão no [manual](#).

Manual do simulador Documentação do algoritmo

Rotas econômicas: 6 opções selecionadas | Região escopo: SP | Produtos: 13 opções selecionadas | N° máximo de usinas por sede: 50 | N° máximo de sedes testadas: 100 | Limitadores: Limitar por demanda Limitar a produção de energia elétrica pelo tamanho da usina (MW)

[Parâmetros das rotas econômicas](#) [Parâmetros extras](#) População mínima para considerar uma sede: 100000 Considerar a sazonalidade da produção agrícola

Captura de tela da página SIEnergyia - Módulo Simulador - Opções da simulação

Rotas econômicas

O parâmetro “Rotas econômicas” permite selecionar quais rotas serão simuladas. É necessário selecionar pelo menos uma rota, porém o filtro permite selecionar múltiplas rotas.

É possível selecionar as seguintes rotas econômicas:

- **Densificação - Energia elétrica - produtos agrícolas:** Simula a geração de energia elétrica através da rota de densificação de biomassa, utilizando resíduos de produtos agrícolas.
- **Biodigestão - Combustível - produtos agrícolas:** Simula a geração de combustível veicular através da rota de biodigestão, utilizando resíduos de produtos agrícolas.
- **Biodigestão - Combustível - Resíduos pecuários:** Simula a geração de combustível veicular através da rota de biodigestão, utilizando resíduos de produtos pecuários.

- **Biodigestão - Energia elétrica - produtos agrícolas:** Simula a geração de energia elétrica através da rota de biodigestão, utilizando resíduos de produtos agrícolas.
- **Biodigestão - Energia elétrica - Resíduos pecuários:** Simula a geração de energia elétrica através da rota de biodigestão, utilizando resíduos de produtos pecuários.
- **Co-firing - produtos agrícolas:** Simula a geração de insumos energéticos através da rota de co-firing, utilizando resíduos de produtos agrícolas.

| Rotas | Região escopo |
|--|---|
| 6 opções selecionadas | SP |
| <input type="checkbox"/> | |
| <input type="button" value="Selecionar todos"/> | <input type="button" value="Limpar seleção"/> |
| Densificação - Energia elétrica - Resíduos agrícolas | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Biodigestão - Combustível - Resíduos agrícolas | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Biodigestão - Combustível - Resíduos pecuários | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Biodigestão - Energia elétrica - Resíduos pecuários | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Biodigestão - Energia elétrica - Resíduos agrícolas | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Co-firing - Resíduos agrícolas | <input checked="" type="checkbox"/> |

Captura de tela da página SIEnergia - Módulo Simulador - Opções da simulação - Rotas

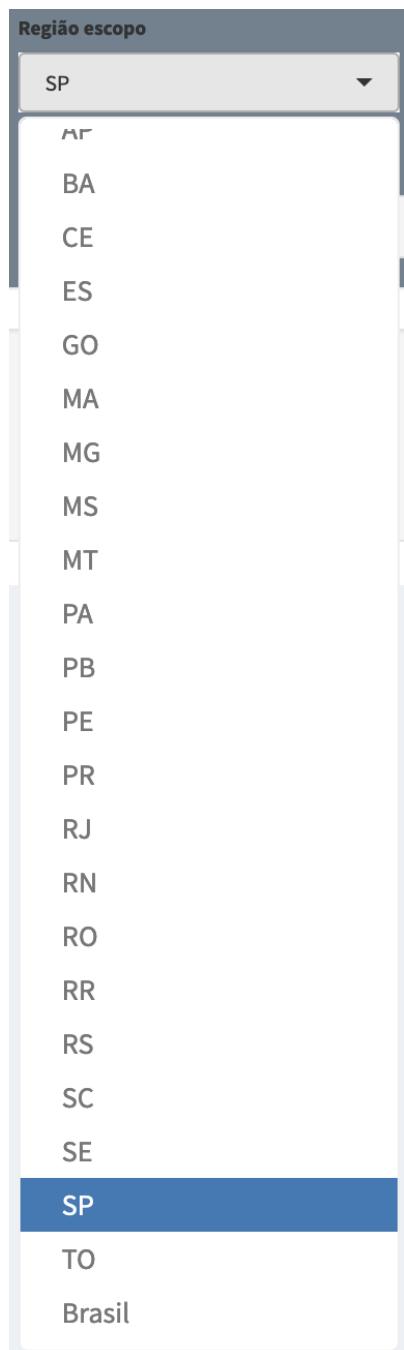
Região escopo

O parâmetro “Região escopo” permite selecionar quais regiões serão consideradas na simulação. O simulador considera a região selecionada como a região de origem dos produtos agropecuários. Por exemplo, se for selecionado o estado de São Paulo, o simulador considerará que os produtos agropecuários produzidos em São Paulo. Além disso, a região de escopo é importante para filtrar os dados relevantes para a simulação, como a demanda de energia elétrica e de combustível em cada município.

As opções são os estados brasileiros (selecionando a sigla da UF).

O valor padrão utilizado pelo simulador é “AC”, ou seja, o estado do Acre (por questões de ordem alfabética).

O simulador pode demorar alguns minutos para ser executado quando a região escopo abrange muitas regiões.



Captura de tela da página SIEnergyia - Módulo Simulador - Opções da simulação - Regiões

Produtos

Este parâmetro permite selecionar quais produtos serão utilizados na simulação. É necessário selecionar pelo menos um produto, porém o filtro permite selecionar múltiplos

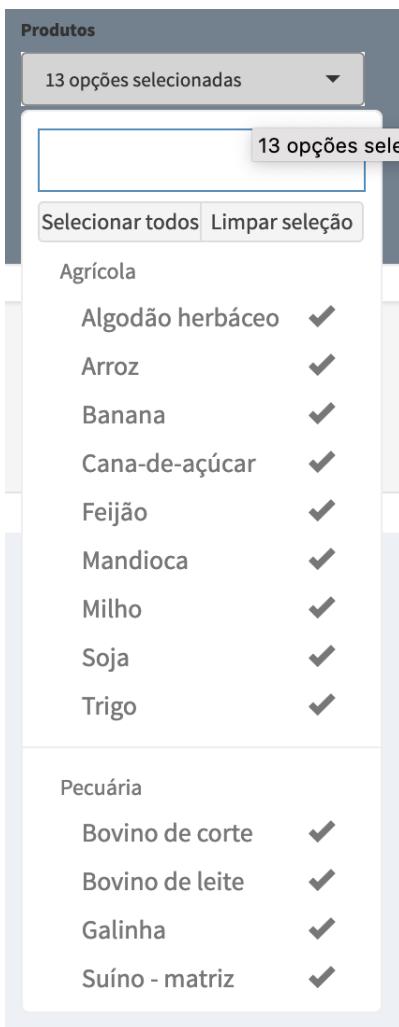
produtos.

Os produtos disponíveis são:

- Algodão herbáceo
- Arroz
- Banana
- Café
- Feijão
- Laranja
- Mandioca
- Milho
- Soja
- Trigo
- Bovino de corte
- Bovino de leite
- Galinha
- Suíno

Por padrão, todos os produtos são selecionados.

Para que os produtos selecionados sejam considerados no simulador, pelo menos uma rota que utilize resíduos dos produtos escolhidos deve ser selecionada. Em caso de dúvidas, consulte a [@sec-parametros-rotas](#).



Captura de tela da página SIEnergy - Módulo Simulador - Opções da simulação - Produtos

Número máximo de usinas por sede

Uma sede, no contexto do simulador, é uma região geográfica que pode abrigar uma ou mais usinas. Neste caso, cada sede é um município, chamado de “município sede” ou apenas “sede”.

O parâmetro “Número máximo de usinas por sede” permite limitar o número máximo de usinas que podem ser instaladas em uma mesma sede.

O valor padrão utilizado pelo simulador é de até 100 usinas por sede. Este valor pode ser alterado pelo usuário, mas é importante ressaltar que o aumento deste valor pode aumentar o tempo de execução do simulador.

Número máximo de sedes testadas

O parâmetro “Número máximo de sedes testadas” (`num_c`) permite limitar o número máximo de sedes que serão testadas pelo simulador. Por exemplo, caso `num_c` receba o número 5570 (o número de municípios do Brasil), o simulador poderá testar para cada município até 5570 possibilidades de fornecimento de energético. Ou seja, todas as possibilidades seriam contempladas.

Entretanto, é comum que a solução ótima esteja dentre as soluções mais lucrativas. O parâmetro `num_c` permite restringir essas comparações apenas às `num_c` relações de oferta de energético <-> consumo de energético que são mais lucrativas. Nossas análises de sensibilidade indicam que o valor `num_c = 100` é suficiente para a maior parte de cenários.

População mínima para considerar uma sede

O simulador considera que uma sede só pode ser construída em um município que possui uma população mínima. O valor padrão é 100.000 habitantes.

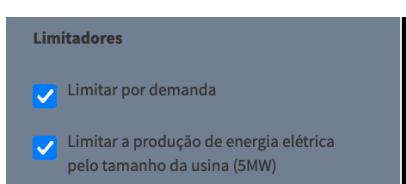
Considerar a sazonalidade da produção agrícola

Ao selecionar esta opção, o simulador irá considerar a sazonalidade da produção agrícola. A @tbl-sazonalidade apresenta os valores utilizados pelo simulador para cada combinação de produto, UF e mês.

Por padrão, esta opção está habilitada.

Limitadores

Os filtros na seção “Limitadores” permitem limitar os resultados da simulação, de acordo com as opções selecionadas.



Captura de tela da página SIEnergia - Módulo Simulador - Opções da simulação - Limitadores

Limitar por demanda

Ao selecionar esta opção, o simulador irá limitar a quantidade de energia ou combustível gerada, de acordo com: (a) a demanda energética da distribuidora de energia elétrica responsável pelo atendimento da região escopo ou (b) a demanda por combustíveis veiculares no município sede ou (c) a demanda por combustível para queima em cimenteiras, usinas siderúrgicas e UTEs já existentes.

Por padrão, esta opção está habilitada.

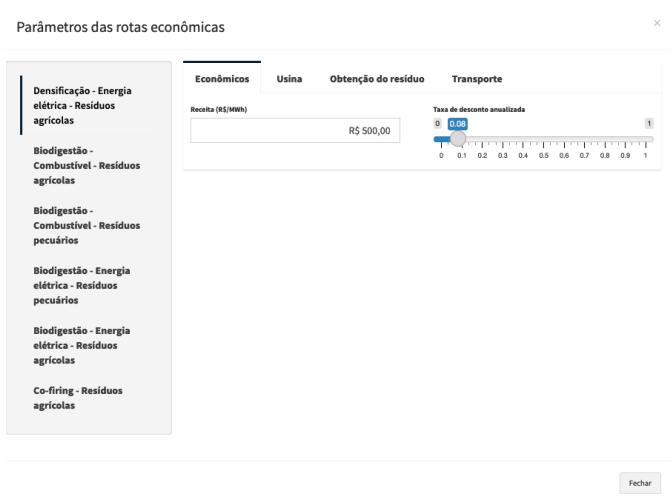
Limitar a produção de energia elétrica pelo tamanho da usina (5MW)

Ao selecionar esta opção, o simulador irá limitar os resultados de rotas que geram energia elétrica para que as usinas sejam de microgeração, tendo uma potência instalada de até 5 MW.

Por padrão, esta opção está habilitada.

Parâmetros das rotas econômicas

Os parâmetros das rotas econômicas são utilizados pelo simulador, e devem ser configurados para cada rota econômica. Os parâmetros são divididos em 5 grupos: econômicos, usina, obtenção do resíduo, transporte e demanda (este último apenas para a rota de co-firing).



Captura de tela da página SIEnergia - Módulo Simulador - Opções da simulação - Parâmetros das rotas econômicas

Econômicos

- **Receita:** Valor da receita obtida pela rentabilização: (a) nas rotas de energia elétrica, da energia elétrica gerada pela usina por compensação de energia gerada via MMGD; (b) nas rotas de combustível veicular da comercialização de biometano; ou (c) na rota de cofiring da comercialização do combustível.
- **Taxa de desconto anualizada:** Segundo (Crotman, 2019) esta taxa deve ser a taxa neutra a risco para uma efetiva avaliação do valor econômico de um ativo. A taxa neutra ao risco deve ser a soma da taxa livre de risco com um prêmio de risco. A estimativa do prêmio de risco depende de fatores como a aversão a risco específica do investidor e a quantidade de risco não diversificável do investimento. Assim, qualquer investidor candidato pode avaliar o potencial do aproveitamento de resíduos, levando em conta suas próprias premissas de prêmio de risco exigido.

Usina

- **Capex fixo:** Coeficiente linear da função Capex (função que transforma a potência de uma usina termoelétrica no seu custo). Veja equações 3.8 e 3.15 (Crotman, 2019).
- **Capex adicional:** Coeficiente angular da função Capex (função que transforma a potência de uma usina termoelétrica no seu custo). Veja páginas 36 e 39 (Crotman, 2019).

- **Percentual Opex:** Percentual do investimento inicial que representa o custo anual para operação e manutenção da usina. É o valor ‘fOpex’ da equação 3.12 (Crotman, 2019).
- **Eficiência da usina:** Eficiência da usina termelétrica, ou seja, a parcela de energia contida no resíduo que é efetivamente transformada em energia;
- **Vida útil da usina:** Número de anos de vida útil de uma usina.
- **Fator de disponibilidade da usina:** O fator de disponibilidade da usina termelétrica. Este fator representa qual fração de tempo uma termelétrica permanece funcionando durante um período longo. São descontados os períodos típicos de indisponibilidade não programada e manutenções programadas. Este parâmetro é adimensional.

Obtenção do resíduo

- **Custo de coleta:** Custo de se coletar o resíduo e levar até 15km de distância (R\$/tonelada). É o valor ‘Colheita’ da equação 3.11 (Crotman, 2019).
- **Custo de armazenamento:** Custo de armazenamento (R\$/tonelada). É o valor ‘Armaz’ da equação 3.11 (Crotman, 2019).
- **Custo de carga e descarga do resíduo:** Custo de carga e descarga de todo o processo desde a coleta do resíduo na sua origem até a entrega na usina termelétrica (R\$/tonelada). É o valor ‘Carga’ da equação 3.11 (Crotman, 2019).
- **Prêmio para o produtor:** Prêmio oferecido ao produtor pelo fornecimento do resíduo em % no caso de percentual do custo logístico ou reais por tonelada no caso de percentual do valor de mercado. É o valor ‘Prêmio_c’ da equação 3.10 (Crotman, 2019).

Transporte

- **Custo fixo de transporte:** Custo fixo de remuneração do tranposrte por 1 km. Essa quantidade representa a quantidade em R\$ por quilômetro que seria considerada para transportar valores muito pequenos de biomassa.

- **Custo de transporte:** Custo de transporte entre o município de origem do resíduo e o local onde está a usina termelétrica (R\$ por tonelada por quilômetro). É o valor ‘Transp’ da equação 3.11 (Crotman, 2019).

Demanda (apenas para Co-firing)

- **Demanda de termelétrica:** % da demanda por combustíveis de UTEs que poderia ser substituída por briquete ou pellets, valor entre 0 e 100%.
- **Demanda siderúrgica:** % da demanda por combustíveis de siderúrgicas que poderia ser substituída por briquete ou pellets, valor entre 0 e 100%.
- **Demanda cimenteira:** % da demanda por combustíveis de cimenteiras que poderia ser substituída por briquete ou pellets, valor entre 0 e 100%.

Parâmetros extras

Transporte

- **Considerar frete para ida e volta no cálculo do combustível consumido e distância percorrida** - Ao selecionar esta opção, o simulador irá considerar que o caminhão que transporta o resíduo irá retornar vazio para a origem, após descarregar o resíduo na usina, e portanto irá considerar o dobro da distância percorrida e do combustível consumido. Essa opção está habilitada por padrão.

Externalidades

- **Empregos:** fator de empregabilidade por unidade de energia gerada e fator de remuneração pessoal.
- **Consumo de água** - fator de consumo de água por unidade de energia gerada.
- **Emissões** - fator de emissões por unidade de energia gerada.

Execução do Simulador

Para realizar uma simulação, selecione os parâmetros desejados e clique no botão “Rodar Simulador”.

O simulador pode demorar alguns minutos para realizar a simulação, dependendo dos parâmetros selecionados. Durante a execução, o simulador irá exibir uma barra de progresso, indicando o andamento da simulação.

Após realizar a simulação, o simulador irá exibir os resultados na tela. Para mais informações sobre os resultados, consulte a [@sec-resultados](#).

Apresentação dos Resultados

Os resultados da simulação são apresentados em diferentes formas, como caixas com valores sumarizados, mapas e tabelas. A seguir, são descritos os principais resultados apresentados pelo simulador.

The screenshot shows the results page of the SIEnergia module. At the top, there are four summary boxes:

- VALOR DA SOLUÇÃO**: R\$ 107.428.451.959
- NUMERO DE USINAS**: 86
- BIOMASSA APROVEITADA**: 99,1% Resíduos agrícolas
- BIOMASSA APROVEITADA**: 3,7% Resíduos pecuários

Below these are two buttons: "Ver mapas" and "Baixar tabelas". The main content area contains several sections with tables:

- Potência anual**: Shows a table with 73 rows of data (1-10 of 73 registros).
- Biomassa aproveitada**: Shows a table with 73 rows of data.
- Demandas satisfeitas (%)**: Shows a table with 73 rows of data.
- Demandas satisfeitas (Energia elétrica)**: Shows a table with 73 rows of data.
- Demandas satisfeitas (Combustível)**: Shows a table with 73 rows of data.
- Demandas satisfeitas (Co-firing)**: Shows a table with 73 rows of data.
- Municípios fornecedores**: Shows a table with 73 rows of data.
- Geração de empregos**: Shows a table with 73 rows of data.
- Emissões anuais**: Shows a table with 73 rows of data.
- Consumo de água anual**: Shows a table with 73 rows of data.
- Distância percorrida**: Shows a table with 73 rows of data.
- Combustível consumido**: Shows a table with 73 rows of data.

At the bottom right, there are navigation buttons: Anterior, 1, 2, 3, 4, 5, ..., 8, Próximo.

Captura de tela da página SIEnergia - Módulo Simulador - Resultados

Caixas com valores sumarizados

A primeira seção de resultados apresenta alguns valores sumarizados em caixas, como:

- o valor da solução encontrada (em R\$);
- o número de usinas a serem construídas, segundo os resultados da simulação;
- a porcentagem de biomassa de resíduos agrícolas aproveitada;
- a porcentagem de biomassa de resíduos pecuários aproveitada.



Exemplo de Resultados apresentados como valores sumarizados: valor da solução e número de usinas.



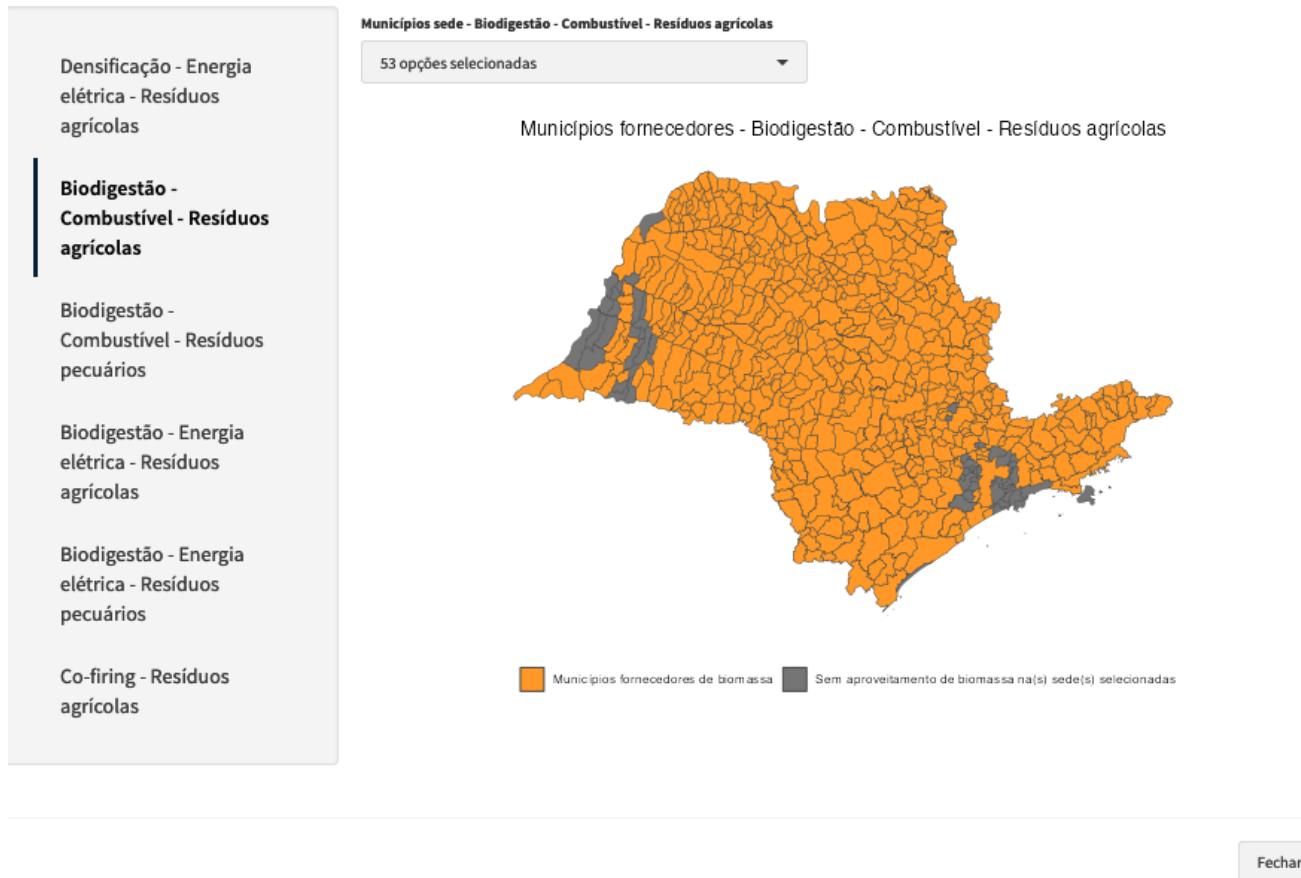
Exemplo de Resultados apresentados como valores sumarizados: Biomassa aproveitada.

Mapas

Para acessar os mapas, é necessário clicar em “Ver mapas”.

Os mapas apresentam os resultados da simulação, separados por rota econômica. No menu lateral da aba de Mapas, aparece uma opção para cada rota econômica.

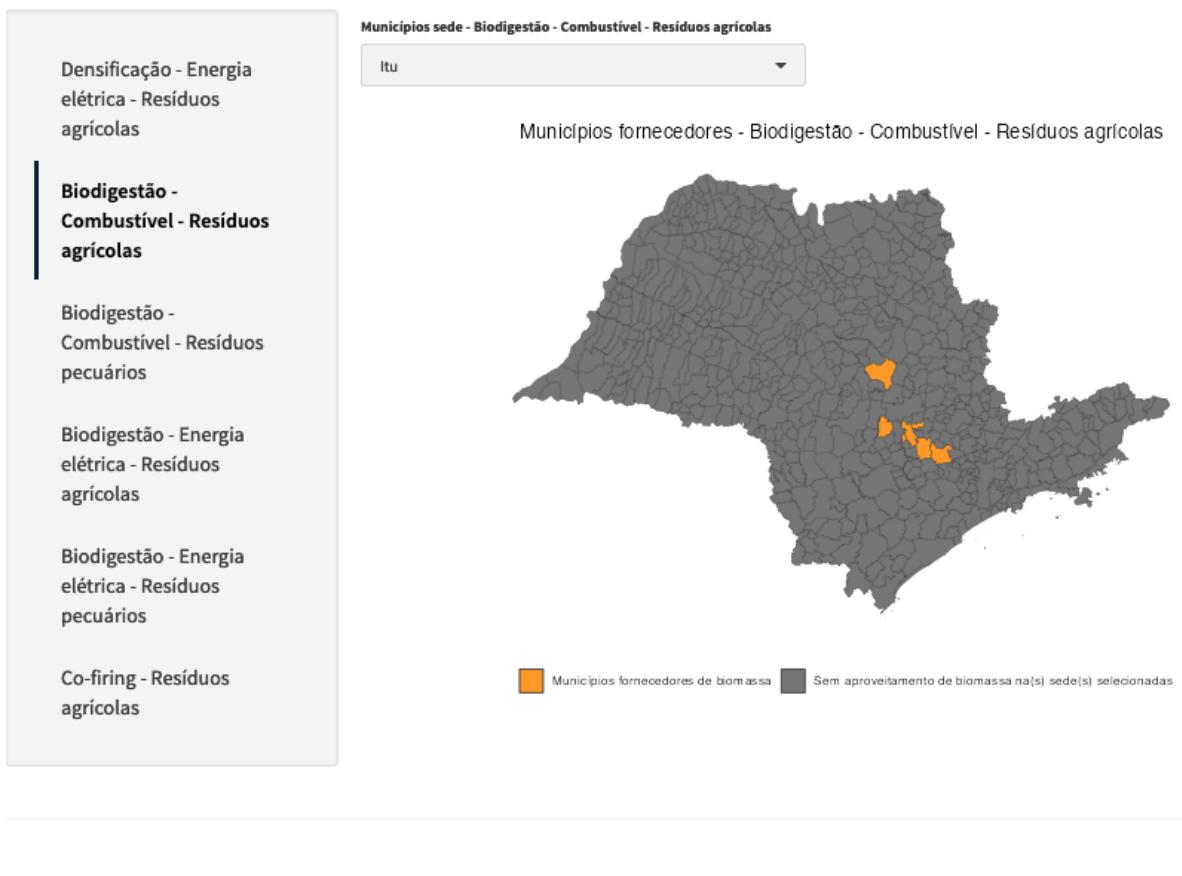
Mapas



Captura de tela da página SIEnergy - Módulo Simulador - Resultados - Mapas

No mapa por rota, há um menu com uma lista de nomes de municípios. Ao clicar em um município sede, o mapa irá exibir os municípios fornecedores de biomassa para a(s) sede(s) selecionada(s).

Mapas



Captura de tela da página SIEnergia - Módulo Simulador - Resultados - Mapas -
Selecionando apenas uma sede

Tabelas

É possível fazer download das tabelas com os resultados da simulação, clicando em “Baixar tabelas”.

As tabelas apresentam os resultados da simulação, considerando diversos aspectos, como:

- Potência instalada
- Investimentos
- Biomassa aproveitada
- Municípios fornecedores

- Demanda satisfeita (%), Demanda satisfeita (Energia elétrica), Demanda satisfeita (Combustível), Demanda satisfeita (Co-firing)
- Externalidades: Geração de empregos, Emissões anuais, Consumo de água anual
- Distância percorrida
- Combustível consumido

Fonte dos Dados

Existem várias fontes de dados utilizadas pelo simulador. A seguir, são listadas os principais dados utilizadas pelo simulador e suas respectivas fontes. Caso tenha dúvidas, acesse [@sec-suporte](#) e entre em contato com a equipe da EPE.

- Produção agropecuária: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), através do Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA)
- População municipal: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) [Confirmar: de onde a EPE busca os dados da fato_população]
- Distância entre municípios: dados obtidos usando a API do Open Source Routing Machine (ORSM).
- Demanda de energia elétrica: Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)
- Demanda de combustíveis (gasolina e diesel): Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP)
- Demanda de co-firing: Levantamentos realizados pela EPE
- Sazonalidade da venda de combustíveis: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP)
- Sazonalidade da produção agrícola: Levantamentos realizados pela EPE

Supporte e Contato

Em caso de dúvidas, entre em contato com a equipe de coordenação técnica do SIEnergia através do e-mail:

- **Luciano Basto Oliveira** - luciano.oliveira@epe.gov.br
- **Daniel Kühner Coelho** - daniel.coelho@epe.gov.br

Referências citadas

CROTMAN, BRUNO MAURICIO RODRIGUES. **Avaliação da geração de energia a partir de resíduos no Brasil usando otimização heurística.** 2019. Dissertação de mestrado. UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, Rio de Janeiro. Acesso em: <https://ppgi.uniriotec.br/download/3080/?tmstv=1703009394>

-
1. Isto é, não precisará de atualização ou manutenção para que o algoritmo ou continue funcionando adequadamente no futuro. ↵
 2. <https://portalrelatorios.aneel.gov.br/luznatarifa/cativo> ↵
 3. O R gera esses objetos na memória RAM do computador. Então para gerar um objeto com 100GB de tamanho, o computador precisaria ter pelo menos 100GB de memória RAM. Computadores pessoais atuais normalmente são vendidos com 8GB de memória RAM. ↵
 4. Considerando o conjunto padrão de parâmetros de otimização. Esse tempo pode variar a depender do conjunto de parâmetros escolhidos. ↵



R6
consultoria e
treinamentos