



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA

Avaliação da Viabilidade da Geração de Energia a Partir de Resíduos no Brasil Usando
Otimização Heurística

Bruno Maurício Rodrigues Crotman

Orientador

Prof. Dr. Márcio de Oliveira Barros

Co-orientador

Prof. Dr. Luciano Basto Oliveira

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
FEVEREIRO DE 2019

Avaliação da Viabilidade da Geração de Energia a Partir de Resíduos no Brasil Usando
Otimização Heurística

BRUNO MAURÍCIO RODRIGUES CROTMAN

DISSERTAÇÃO APRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENÇÃO
DO TÍTULO DE MESTRE PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFOR-
MÁTICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO (UNI-
RIO). APROVADA PELA COMISSÃO EXAMINADORA ABAIXO ASSINADA.

Aprovada por:

Prof. Dr. Márcio de Oliveira Barros — UNIRIO

Prof. Dr. Luciano Basto Oliveira — EPE

Prof. Dr. Glaysson de Mello Muller — EPE

Prof. Dr. Carlos Eduardo Ribeiro de Mello — UNIRIO

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
FEVEREIRO DE 2019.

Crotman, Bruno Maurício Rodrigues.

C951 Avaliação da Viabilidade da Geração de Energia a Partir de Resíduos no Brasil Usando Otimização Heurística

/ Bruno Maurício Rodrigues Crotman, 2019.

81

Orientador: Márcio de Oliveira Barros

Co-orientador: Luciano Basto Oliveira

Dissertação (Mestrado em Informática) - Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Informática, 2019.

1. Otimização Heurística 2. Energia 3. Biomassa

I. Barros, Márcio de Oliveira. II. Oliveira, Luciano Basto. III. Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro. Centro de Ciências Exatas e Tecnologia. Curso de Mestrado em Informática. IV. Título.

CDD - 004.678

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Márcio Barros, por tudo o que me ensinou nestes anos e pela forma justa, direta e honesta como faz suas críticas e colocações. Espero continuar nosso trabalho mais alguns anos e espero sempre evoluir com a sua ajuda.

Agradeço ao meu co-orientador, Prof. Dr. Luciano Basto Oliveira pela inspiração em busca da racionalização do uso dos recursos escassos e caros da natureza.

Agradeço aos meus gestores e amigos na Empresa de Pesquisa Energética, Cláudia Bento e Sérgio Miranda, pelo apoio de sempre.

Agradeço à Empresa de Pesquisa Energética, cujo programa de capacitação nos possibilita investir algumas de nossas horas nas nossas pesquisas.

Agradeço à minha companheira, Raquel, que sempre me dá força e me incentiva.

Agradeço a todos os homens e mulheres que desenvolveram o conhecimento humano até chegarmos ao nível em que estamos hoje. Os que me ajudaram mais diretamente estão citados nas referências, mas inúmeros outros, que ajudaram indiretamente, merecem menção.

Crotman, Bruno Maurício Rodrigues. **Avaliação da Viabilidade da Geração de Energia a Partir de Resíduos no Brasil Usando Otimização Heurística**. UNIRIO, 2019. 82 páginas. Dissertação de Mestrado. Departamento de Informática Aplicada, UNIRIO.

RESUMO

O Brasil possui um parque de geração de energia elétrica que precisa ser expandido continuamente para dar conta do crescimento do consumo. Existem obstáculos para expansão deste sistema: o aproveitamento do potencial hidrelétrico disponível hoje causaria danos sociais e ambientais, a expansão por usinas termelétricas levaria a um custo de geração alto por causa dos combustíveis necessários e as fontes alternativas são intermitentes, por isso o excesso delas causaria instabilidade ao sistema. Neste contexto, é necessário estudar se é possível aproveitar combustíveis que ainda não são utilizados em larga escala, como os resíduos agrícolas.

O aproveitamento dos resíduos agrícolas também traz dificuldades, em especial porque os resíduos agrícolas estão fragmentados no território nacional e exigem um custo logístico considerável. Alguns estudos já avaliaram a possibilidade de aproveitamento destes resíduos, mas não tentaram definir de forma sistemática a localização das usinas e das regiões de fornecimento a cada uma delas.

Este trabalho trata o problema de localização das usinas e das regiões de fornecimento de resíduos agrícolas como um problema de otimização combinatória, a ser resolvido por algoritmos de otimização meta-heurística. Foi criada uma metodologia para encontrar boas soluções para este problema com o uso do algoritmo *Iterated Local Search*. O *fitness* destas soluções é o valor presente do fluxo de caixa gerado pelo aproveitamento dos resíduos sob determinadas condições de preço e de custo. Foram avaliados diversos cenários, com diferentes taxas de desconto e diversos níveis de prêmio a ser pago ao produtor. O estudo mostra que o aproveitamento de resíduos agrícolas é viável em algumas situações.

Palavras-chave: Biomassa, Otimização heurística, Planejamento energético.

ABSTRACT

Brazil has an electric power generation park that needs to be continuously expanded to account for the growth in consumption. There are obstacles to expand this system: the use of the hydroelectric potential available today would cause social and environmental damage, expansion by thermoelectric plants would lead to high generation cost due to the cost of the fuels, and current alternative sources are intermittent, so their excess would cause system instability. In this context, it is necessary to examine whether it is possible to use fuels which are not yet used on a large scale, such as agricultural waste.

The use of agricultural waste also poses difficulties, mostly because they are dispersed throughout the land, leading to considerable logistics cost. Some studies have already evaluated the possibility of this use, but did neither attempt to systematically position the plants, nor define their supply regions.

This research work deals with the problem of locating the plants and determining the regions for biomass supply defining it as a problem of combinatorial optimization, to be solved by metaheuristic optimization algorithms. A methodology has been created in this work. This tool finds good solutions to the problem with the use of *Iterated Local Search*. The fitness of these solutions is the present value of the cashflow produced by using agricultural waste to generate electric energy under certain price and cost conditions. Several scenarios were evaluated with different discount rates and different premiums to be paid to the producer. The study shows that the use of agricultural waste to generate electric energy is feasible in some situations.

Keywords: Biomass, Heuristic optimization, Energy planning.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Contexto	1
1.2	Definição do problema	3
1.3	Objetivo da pesquisa	4
1.4	Questão de pesquisa	5
1.5	Contribuições esperadas	5
1.6	Metodologia de pesquisa	6
1.7	Estrutura do texto	8
2	Fundamentação Teórica e Trabalhos Relacionados	9
2.1	Biomassa como fonte de energia	9
2.2	Produção agrícola brasileira	10
2.3	Caracterização dos resíduos agrícolas	12
2.4	Análise dos custos logísticos no aproveitamento de resíduos agrícolas . .	17
2.5	Análise dos custos de investimento	21
2.6	Resultados encontrados na literatura	22
2.7	Recomendações para o melhor aproveitamento do potencial dos resíduos	25
2.8	Limitações dos estudos encontrados na literatura	26

2.9	Considerações finais	27
3	Proposta de solução	28
3.1	Modelagem do problema	28
3.1.1	Descrição formal de uma solução candidata	29
3.1.2	Descrição do cálculo do valor presente (<i>fitness</i>)	32
3.1.3	Cálculo incremental do valor presente (<i>fitness</i>)	38
3.2	Valores dos parâmetros e origem dos dados utilizados	39
3.2.1	Produção agrícola municipal	39
3.2.2	Características específicas dos resíduos das culturas	40
3.2.3	Custo de transporte	40
3.2.4	Custos de armazenamento, colheita e carga	41
3.2.5	Distâncias entre os municípios	41
3.2.6	Preço de venda da energia	42
3.2.7	Prêmio pago ao produtor	42
3.3	Algoritmos utilizados na otimização	43
3.3.1	Heurísticas para a solução inicial	46
3.3.1.1	Heurística H1	46
3.3.1.2	Heurística H2	46
3.3.1.3	Heurística HRand	47
3.3.2	Processamento após heurísticas e perturbações do ILS	47
3.3.3	<i>Hill Climbing</i>	49
3.3.4	<i>Iterated Local Search</i>	51
3.4	Ameaças à validade	55
3.5	Considerações finais	55

4	Resultados	57
4.1	Cenários	57
4.2	Escolha da parametrização e das heurísticas	60
4.2.1	Escolha do grau de perturbação da ILS	60
4.2.2	Escolha das heurísticas para a solução inicial	63
4.2.3	Escolha da quantidade de iterações da ILS	66
4.3	Resultados da avaliação	68
4.4	Considerações finais	71
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	72
5.1	Conclusões	72
5.2	Trabalhos futuros	73
	Referências Bibliográficas	74
A	Ferramenta de otimização: como usar	82

Lista de Figuras

1.1	Metodologia usada na Dissertação	6
2.1	Produção anual das culturas analisadas neste trabalho nos últimos anos no Brasil (em milhões de toneladas). Fonte dos dados: Sidra (IBGE) . . .	11
2.2	Densidade da produção agrícola das culturas analisadas neste trabalho em 2017. Fonte dos dados: Sidra (IBGE)	12
2.3	Produção e projeção anual das culturas analisadas neste trabalho nos últimos anos no Brasil (em milhões de toneladas). As linhas pontilhadas mostram a produção histórica observada e as linhas contínuas mostram a projeção segundo o MAPA [1]	13
2.4	Densidade da energia potencialmente gerada pelos resíduos considerados neste trabalho, dados disponibilidade, poder calorífero e produtividade. .	17
2.5	Fluxograma logístico genérico [2]	18
3.1	Exemplo de uma solução para o problema no território escopo de São Paulo, com regiões de fornecimento e suas sedes, onde se localizam as usinas.	29
3.2	Exemplo de uma solução para o problema no território escopo de São Paulo, com o município de Urânia destacado. Segundo a definição de solução, $S(\text{Urânia}) = \text{Barretos}$	31
3.3	Exemplo de uma solução para o problema no escopo de São Paulo, com o município de Ilha Solteira destacado. Segundo a definição formal de solução, $S(\text{IlhaSolteira}) = m_{\text{nulo}}$	31

3.4	Esquema simplificado do cálculo do valor presente de uma solução.	34
3.5	Exemplo de uma pesquisa de rota no GoogleMaps, que equivale à API Distance Matriz usada para coletar as distâncias entre municípios neste trabalho.	41
3.6	Esquema do algoritmo principal	45
3.7	Solução intermediária do algoritmo de <i>Hill Climbing</i> . O município em destaque, Itararé, vai mudar de região na próxima iteração do algoritmo, transformando esta solução na solução da Figura 3.8	50
3.8	Solução intermediária do algoritmo de <i>Hill Climbing</i> . O município em destaque, Itararé, mudou de região na última iteração do algoritmo, transformando a solução da Figura 3.7 nesta solução	51
3.9	Solução intermediária do algoritmo de <i>Hill Climbing</i> . O município em destaque, Apiaí, vai mudar de região na próxima iteração do algoritmo. Além disso, a sede de uma regiões vai ser alterada de Itaí para Piraju, transformando esta solução na solução da Figura 3.10	52
3.10	Solução intermediária do algoritmo de <i>Hill Climbing</i> . O município em destaque, Apiaí, mudou de região na última iteração do algoritmo. Além disso, a sede de uma regiões foi alterada de Itaí para Piraju, transformando a solução da Figura 3.9 nesta solução	53
3.11	Solução final de uma iteração do algoritmo de <i>Hill Climbing</i>	54
3.12	Solução mostrada na Figura 3.11 após o procedimento de perturbação	54
4.1	Avaliação do parâmetro $P_{Existente}$ para dois cenários. Quanto maior o valor do parâmetro, maior o impacto da perturbação. Os resultados mostram que valores menores do parâmetro apresentam melhor desempenho no Cenário 2, com diferenças estatisticamente significativas para alguns pares de valores. No Cenário 1, não há diferença estatisticamente significativa entre os pares.	63

4.2	Avaliação do parâmetro P_Nova para dois cenários. Quanto maior o valor do parâmetro, maior o impacto da perturbação. Os resultados mostram que valores menores para o parâmetro produzem melhores resultados no Cenário 1, com diferenças estatisticamente significativas para todos os pares de valores. No Cenário 2, não há diferenças estatisticamente significativas entre os pares de valores de parâmetros.	64
4.3	Avaliação das heurísticas como solução inicial do <i>Hill Climbing</i>	65
4.4	Trajetórias das heurísticas ao longo de 10.000 iterações	66
4.5	Trajetórias das heurísticas até a iteração 1.000	67
4.6	Trajetórias das execuções de 25.000 iterações usando a heurística H2 como geradora da solução inicial	68
4.7	Valores presentes das melhores soluções geradas pelo algoritmo nos cenários avaliados. São Paulo, preços de leilão.	69
4.8	Valores presentes das melhores soluções geradas pelo algoritmo nos cenários avaliados. São Paulo, preços sob a Resolução 482.	69
4.9	Valores presentes das melhores soluções geradas pelo algoritmo nos cenários avaliados. Paraná, preços de leilão.	70
4.10	Valores presentes das melhores soluções geradas pelo algoritmo nos cenários avaliados. Paraná, preços sob a Resolução 482.	70

Lista de Tabelas

2.1	Taxa de crescimento anual projetada da produção das culturas a serem avaliadas neste estudo para os próximos dez anos. Fonte: MAPA [1] . . .	12
2.2	Características dos resíduos. Adaptado do Inventário Energético de Resíduos Rurais da EPE [3]	17
2.3	Custos logísticos dos resíduos. Adaptado da dissertação de Oliveira [4] .	20
2.4	Sazonalidade da produção. Adaptado de Silva [5]	21
2.5	Armazenamento mensal da produção. Adaptado de Silva [5]	22
3.1	Características dos resíduos.	40
4.1	Parâmetros de perturbação da <i>Iterated Local Search</i> avaliados.	62
4.2	Diferença média no valor presente entre as UFs. Apenas os cenários para os quais as duas UFs têm valor presente diferente de zero	71

Lista de Abreviaturas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ARIMA	Autoregressive Integrated Moving Average
BIG	Banco de Informações de Geração
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CAR	Cadastro Ambiental Rural
CEPEA	Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCA	Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
ONS	Operador Nacional do Sistema
SIDRA	Sistema IBGE de Recuperação Automática
SIN	Sistema Interligado Nacional

1. Introdução

1.1 Contexto

Dentre as fontes de energia elétrica que podem ser exploradas com as tecnologias conhecidas pelo homem, é possível citar as usinas hidrelétricas, que utilizam quedas d'água para impulsionar suas turbinas; as usinas termelétricas, que dependem da queima de combustíveis; as usinas nucleares, que são um tipo especial de usina termelétrica cuja construção enfrenta discussões a respeito da possibilidade de grandes acidentes e a respeito do elevado custo que se observou nas experiências brasileiras anteriores [6]; e as fontes alternativas eólica e solar. Existem outras fontes sendo estudadas, como o aproveitamento da movimentação das marés, mas nenhuma é viável economicamente em grande escala no momento em que esta Dissertação está sendo escrita [7].

Hoje, os recursos hídricos mais acessíveis no Brasil, que são as quedas d'água localizadas em regiões de serra, já foram quase completamente utilizados para construção de hidrelétricas. Conforme relatado pela Empresa de Pesquisa Energética [8], o aproveitamento dos recursos hídricos atualmente disponíveis traz desafios de caráter ambiental, pois eles estão localizados em regiões planas, principalmente na região da Amazônia. A instalação de hidrelétricas nestes locais exigiria uma grande área alagada: em uma região plana, a área de um reservatório é maior do que a área de um reservatório de mesmo volume localizado em uma serra. O alagamento de uma grande área traz questões ambientais e sociais [9]: impactos negativos na biodiversidade, seja com relação à área alagada, seja quanto às espécies situadas no regime fluvial que a circunda; danos sociais significativos, como deslocamento de população indígena e ribeirinha; e liberação de gás metano, decorrente da decomposição de matéria orgânica. Muitas vezes, para mitigar o dano de alagar uma grande área, a opção é pela criação de usinas hidrelétricas a fio d'água. Fonseca [9] lembra que Belo Monte, por exemplo, uma grande usina hidrelétrica construída com a arquitetura a fio d'água há poucos anos na Amazônia, tem uma capacidade instalada de

11.233MW, mas opera a apenas 4.500MW em média, o que a torna uma das usinas de menor eficiência energética do país.

As usinas termelétricas não-nucleares dependem da queima de combustível, o que produz vapor para acionamento de suas turbinas. No caso das usinas nucleares, o calor é gerado pelo fenômeno de fissão nuclear do urânio. Os principais combustíveis que podem ser utilizados numa usina termelétrica têm um custo variável considerável, isto é, este custo aumenta conforme o montante de energia elétrica gerada. Estes combustíveis são o gás natural, óleo diesel e carvão, por exemplo. Além disso, eles provocam a emissão de gases do efeito estufa. A geração de energia elétrica do Brasil ainda caracteriza-se por ser realizada em um sistema hidrotérmico de grande porte, apesar do crescimento de usinas de fontes alternativas [8]. A geração termelétrica complementa a geração hidrelétrica, que é dependente das vazões afluentes e do nível de armazenamento dos reservatórios. Assim, o aproveitamento racional dos recursos hídricos depende da existência de usinas térmicas flexíveis que possam variar sua geração de eletricidade em função das condições dos reservatórios das usinas hidráulicas [10].

Outra opção de geração de energia elétrica que vem crescendo no Brasil são as fontes alternativas: a eólica e a solar. Apesar de estarem se tornando cada vez mais viáveis economicamente, estas fontes trazem uma desvantagem: são intermitentes. Pela própria característica do Sol, que não está disponível durante a noite e durante a passagem de nuvens e do vento, que sopra de forma inconstante, as usinas baseadas nestas fontes geram energia de forma oscilante. Esta intermitência causa transtornos à operação do Sistema Interligado Nacional (SIN), pois o Operador Nacional do Sistema (ONS) precisa manejar a geração do parque de usinas de forma que a oferta de energia se iguale instantaneamente à demanda. Como a geração de energia elétrica pelas fontes intermitentes não pode ser controlada, a margem de manobra para operação do sistema se restringe ao restante das fontes, e variações inesperadas na geração das eólicas e solares exigem ajuste constante. Este desafio se torna mais difícil à medida em que estas fontes se tornam mais relevantes na matriz energética. Castro et al. [11] afirmam que a intermitência da geração é uma questão que precisa ser examinada com atenção, porque pode trazer consequências nocivas e restritivas à segurança do suprimento de energia caso não seja gerida da forma correta. Castro et al. [11] afirmam que é preciso relativizar a argumentação que a expansão do setor elétrico poderia se processar inteiramente baseada em fontes renováveis de caráter intermitente.

Ainda que o preço da energia no país seja alto [12], o Brasil possui recursos que poderiam ser aproveitados para geração de energia elétrica, mas ainda não são, como os resíduos agropecuários. Neste cenário, é importante avaliar a possibilidade do aproveita-

mento de resíduos agropecuários para a geração de eletricidade. Nesta Dissertação, o foco está nos resíduos agrícolas, deixando de fora os resíduos pecuários. Os resíduos agrícolas são produtos secundários do cultivo de produtos que têm valor comercial, como a soja e o milho. São as cascas, palhas e ramas que são colhidos junto com o produto, mas acabam não sendo levados da fazenda, pois não possuem valor comercial. Hoje, eles não são aproveitados, mas poderiam servir como combustível de usinas termelétricas. Neste contexto, estes resíduos são chamados de biomassa. Um dos obstáculos para a utilização deste tipo de biomassa são os custos de logística, pois os resíduos agrícolas são produzidos de forma fragmentada pelo país.

A avaliação da economicidade do uso de resíduos para geração de energia no Brasil já foi realizada por Oliveira e pela Empresa de Pesquisa Energética [2–4]. Os trabalhos concluem que a competitividade com outras fontes de energia fica comprometida para venda em leilões públicos e para a venda no mercado livre. Contudo, há competitividade para os casos da autoprodução em nichos específicos. Apesar de fazerem uma caracterização completa da cadeia logística da biomassa e dos custos associados ao aproveitamento dos resíduos para geração de energia elétrica, estes trabalhos não desenvolvem um método para decidir onde construir as usinas e determinar qual a região que fornece biomassa para cada uma delas. Além disso, os cálculos dos custos logísticos utilizam distâncias médias entre os municípios e as regiões de fornecimento são escolhidas de forma arbitrária, o que implica em simplificações significativas no modelo usado na avaliação.

A decisão sobre onde construir usinas de modo a maximizar o uso dos resíduos agrícolas pode ser modelada como um problema de otimização. Afinal, o objetivo é maximizar a utilização da matéria prima e, ao mesmo tempo, minimizar os custos de transporte. O problema é mais complexo do que apenas construir usinas perto de onde estão as fontes de matéria-prima, pois cada usina tem um custo de construção e manutenção. Quanto mais usinas construídas, maior será o custo total do investimento inicial. Temos, portanto, um balanço de perdas e ganhos entre construir muitas ou poucas usinas. Este é o problema que esta Dissertação visa a analisar.

1.2 Definição do problema

A viabilidade do aproveitamento dos resíduos agrícolas para geração de energia elétrica é avaliada levando-se em conta:

- o custo de construção e manutenção das usinas termelétricas, que são usadas para

converter os resíduos em energia elétrica;

- o custo de obtenção dos resíduos;
- a receita que pode ser obtida com a venda da energia resultante.

Os resíduos são subprodutos da atividade agrícola que não são aproveitados como produto principal. São cascas, palhas, bagaços, entre outros. Estes resíduos podem ser queimados em usinas termelétricas de forma a esquentar água e produzir vapor que vai mover turbinas, gerando energia elétrica. O aproveitamento desta energia enfrenta obstáculos logísticos, pois há custo para transportar os resíduos do campo até a usina que vai convertê-los em energia e também para colher, armazenar e executar a carga e descarga deste material. Além disso, é necessário oferecer um prêmio para que o produtor agrícola permita a retirada deste material da sua fazenda. Como são produtos da atividade agropecuária, os resíduos estão espalhados pelo território do país. Além disso, o custo de construção das usinas varia com a sua capacidade de geração de eletricidade instantaneamente, isto é, sua potência.

Nesta Dissertação, a avaliação da viabilidade econômica do aproveitamento dos resíduos agrícolas é feita para cada configuração de posicionamento de usinas e de regiões que proverão biomassa a essas usinas. Definir uma configuração significa indicar o posicionamento das usinas e quais são as regiões que fornecem biomassa para cada uma delas. Se a escolha do posicionamento das usinas e das áreas de fornecimento for feita de forma inadequada, o valor econômico deste aproveitamento será subestimado: os custos podem ser maiores do que o necessário ou o aproveitamento de energia pode não atingir todo o seu potencial.

1.3 Objetivo da pesquisa

O objetivo deste trabalho é construir um modelo para avaliar a viabilidade do aproveitamento de resíduos agrícolas para geração de energia elétrica, modelando o assunto como um problema de otimização e aplicando algoritmos de otimização heurística para encontrar soluções para ele. É preciso escolher quantas usinas construir, em quais locais elas devem ser construídas e que região proverá resíduos para cada usina.

Trabalhos anteriores analisaram a economicidade deste aproveitamento mas não desenvolveram um método para produzir as configurações de usinas e regiões de fornecimento de forma a maximizar este resultado econômico.

A avaliação da viabilidade do aproveitamento, com uso da metodologia construída, é realizada para diversos cenários, de forma a possibilitar que um potencial investidor esteja apto a fazer a sua própria avaliação, levando em conta suas premissas específicas a respeito dos custos e receitas associados e seu grau de aversão a risco.

1.4 Questão de pesquisa

A questão de pesquisa a seguir foi derivada do problema apresentado na Seção 1.3, estabelecendo o escopo e as principais direções de investigação.

- QP1: É possível construir uma abordagem baseada em otimização heurística para estabelecer uma metodologia de avaliação da economicidade do aproveitamento de resíduos agrícolas, fragmentados geograficamente, para geração de eletricidade?

Após o estudo da literatura que versa sobre a questão da economicidade do aproveitamento de resíduos para geração de eletricidade, foi percebido que havia uma oportunidade de tratar este problema com o uso de algoritmos heurísticos de otimização para determinar as regiões de fornecimento e a localização das usinas. Esta oportunidade é flagrante quando levamos em conta que os resíduos agropecuários estão fragmentados geograficamente e que existe um número muito grande de configurações possíveis de localização de usinas e de regiões de fornecimento de biomassa para cada usina. Cada configuração leva a resultados de avaliação de economicidade diferentes. Neste contexto, abordaremos esta questão como um problema de otimização combinatória que possa ser resolvido eficientemente com uso de algoritmos heurísticos.

1.5 Contribuições esperadas

É possível destacar as seguintes contribuições desta Dissertação:

- Modelagem do problema de avaliação da economicidade da geração de energia elétrica a partir de resíduos agrícolas como um problema de otimização combinatória, aplicando conceitos que ainda não foram utilizados na análise deste problema. Este tipo de abordagem pode ser usado em outros tipos de problemas semelhantes, como a avaliação da economicidade de resíduos pecuários e urbanos;

- Atualização, consolidação e reavaliação da metodologia de avaliação de custos logísticos e receitas utilizados em trabalhos anteriores. Como exemplo de adequação da metodologia, podemos citar uma nova forma de determinar o prêmio pago ao produtor da biomassa. Nos trabalhos anteriores, usava-se uma fração do custo logístico. Neste trabalho, o prêmio tem como referência o preço do produto principal;
- Criação de uma metodologia para otimização da localização das usinas e das regiões de fornecimento de biomassa que possibilite a um analista executar sua avaliação usando suas próprias premissas de receita e custo. O usuário pode utilizar a ferramenta disponibilizada publicamente pelo autor para implementar a metodologia. As instruções para uso estão no Apêndice A.

1.6 Metodologia de pesquisa

A metodologia de pesquisa utilizada na execução deste trabalho pode ser resumida no esquema mostrado na Figura 1.1.



Figura 1.1: Metodologia usada na Dissertação

Inicialmente, foi realizada uma consulta na literatura disponível no Brasil sobre a avaliação da economicidade do uso de resíduos para geração de energia. Esta literatura revelou a oportunidade de aplicação de novas abordagens para este tipo de avaliação, em função das limitações de dados, localização de usinas e regiões de fornecimento utilizadas nos estudos anteriores.

Considerando a oportunidade de aplicar uma nova abordagem, foi construído um método que é constituído de um modelo de avaliação do valor econômico de cada configuração possível de usinas e regiões de fornecimento e um algoritmo de busca meta-heurística que tem como objetivo encontrar a melhor configuração para uma região sob análise.

O modelo se baseia em uma abordagem utilizada em finanças para determinar o valor econômico de um ativo: a identificação dos fluxos de caixa futuros que o ativo tem o potencial de gerar. Os fluxos de caixa futuros valem menos do que fluxos presentes e, por isso, são corrigidos por uma taxa de desconto que depende da taxa de investimento

livre de risco da economia e do grau de risco da atividade geradora desses fluxos. Nesta pesquisa, o ativo a ser avaliado é a atividade de aproveitamento de resíduos agrícolas para a geração de energia elétrica, com seus custos e receitas.

Em buscas meta-heurísticas, soluções quase-ótimas são procuradas em um espaço de busca de soluções candidatas. Esta procura é guiada por funções de utilidade ou *fitness*, que distinguem soluções melhores e piores, e depende de parâmetros dos algoritmos utilizados. Foram realizados experimentos com um pequeno número de cenários para escolher os melhores valores para os parâmetros dos algoritmos utilizadas na avaliação final, que contemplou um grande número de cenários.

Na avaliação final, foram consideradas duas Unidades Federativas do território brasileiro, diferentes taxas de desconto para os fluxos de caixa e diversos níveis de prêmio pagos ao produtor da biomassa. O resultado destas avaliações revelou a importância de cada variável que define os cenários analisados e os *breakevens* existentes para taxas de desconto e prêmios pagos ao produtor.

1.7 Estrutura do texto

Esta Dissertação está organizada em cinco capítulos. O primeiro capítulo compreende esta Introdução. O Capítulo 2 apresenta os fundamentos teóricos, discutindo a literatura existente sobre a avaliação da economicidade da geração de energia a partir de resíduos agrícolas. Esta literatura descreve, em detalhes, os custos logísticos e avalia esta economicidade usando seus próprios critérios.

No Capítulo 3 é apresentada a proposta de solução. A modelagem em forma de problema de otimização combinatória é descrita em detalhes. Também são discutidos os cálculos usados para determinar o valor presente das soluções, sendo este valor o usado como *fitness* do problema de otimização. O Capítulo 3 também apresenta os algoritmos utilizados, incluindo heurísticas criadas especialmente para este trabalho, o algoritmo de busca local e a meta-heurística *Iterated Local Search*.

O Capítulo 4 apresenta os resultados encontrados. Ele começa definindo os cenários para os quais o algoritmo será executado em busca de boas soluções para aproveitamento dos resíduos. Em seguida, são discutidos os testes executados a fim de selecionar a parametrização usada na avaliação dos cenários. Por fim, são apresentados os resultados da avaliação da economicidade do aproveitamento de resíduos agrícolas para geração de energia.

O Capítulo 5 fecha a Dissertação com as conclusões e perspectivas de trabalho futuro.

2. Fundamentação Teórica e Trabalhos Relacionados

Este capítulo apresenta os principais trabalhos da literatura referente à análise da economicidade do aproveitamento de resíduos agrícolas para geração de eletricidade. A Seção 2.1 introduz o conceito de biomassa como fonte de energia. A produção agrícola brasileira é tratada na Seção 2.2. Na Seção 2.3, é realizada uma caracterização dos resíduos agrícolas das culturas estudadas nesta Dissertação. Nas Seções 2.4 e 2.5 é feita uma análise a respeito dos custos incorridos na atividade de geração de eletricidade a partir de resíduos agrícolas, respectivamente do ponto de vista logístico e de investimento em usinas. Na Seção 2.6 são apresentados resultados da análise de economicidade da geração de energia elétrica a partir de resíduos agrícolas nos estudos consultados. As recomendações a respeito para o melhor aproveitamento do potencial dos resíduos agrícolas são descritas na Seção 2.7. Na Seção 2.8 são apresentadas as limitações dos estudos consultados e as indicações feitas por estes estudos a respeito de trabalhos futuros. Por fim, a Seção 2.9 apresenta as considerações finais deste capítulo.

2.1 Biomassa como fonte de energia

Biomassa é qualquer matéria orgânica que possa ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica. Este tipo de material foi, durante a maior parte da história, a principal fonte primária de energia para as atividades humanas. Somente a partir da revolução industrial ela foi substituída pelo carvão e posteriormente pelo petróleo, perdendo o status de principal fonte primária [4]. Ainda assim, a biomassa (principalmente lenha e a biomassa derivada da produção de cana-de-açúcar) produziu 24% da energia total gerada no Brasil em 2017, segundo o Balanço Energético Nacional publicado em 2018 pela Empresa de Pesquisa Energética [13]. Se considerarmos apenas energia elétrica, a geração a partir de biomassa (biogás, lixívia, bagaço de cana e lenha) somou 8% do total, ou aproximadamente 51TWh, segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia 2027 [8]. O

mesmo documento prevê que este montante aumentará para 95TWh em 2027, o que significa que sua participação na matriz aumentará para 10% do total da geração de energia elétrica. Vale lembrar que o Balanço Energético Nacional não considera a viabilidade de geração de energia elétrica em grande escala a partir de resíduos agrícolas diferentes do bagaço de cana, que é o tipo de aproveitamento estudado nesta Dissertação.

É possível dividir a biomassa quanto ao seu uso para conversão de energia em biomassa tradicional e biomassa moderna, como fazem Goldemberg e Coelho [14]. Os autores definem que a biomassa tradicional inclui usos não sustentáveis, como lenha para cozinhar alimentos e outros usos não comerciais. O conceito de sustentabilidade está ligado à continuidade da natureza e da sociedade [15]. No caso da lenha e de outros aproveitamentos não sustentáveis, o material é retirado da natureza e os estoques não são repostos. A expansão da civilização desde a época greco-romana induziu ao consumo de grandes quantidades de lenha para produzir calor e para construir edifícios, embarcações, armamentos e outros bens. A devastação foi tal que hoje praticamente não há florestas virgens na região do Mediterrâneo [16]. Por outro lado, a biomassa moderna, segundo Goldemberg e Coelho, é sustentável e inclui a geração de energia elétrica a partir de resíduos florestais, agropecuários e urbanos, além da produção de combustível automotivo.

Ao longo das últimas décadas, o uso de biomassa moderna vem ganhando espaço no Brasil, principalmente pelo aumento da oferta de energia elétrica e cinética gerada a partir de etanol e bagaço de cana [13]. Isso vem acontecendo também em diversos países, principalmente na forma de combustíveis líquidos, em complemento ou substituição a derivados de petróleo. Esta utilização tem sido incentivada e pode ajudar na transição em direção a uma economia menos intensiva em carbono e mais renovável.

2.2 Produção agrícola brasileira

A produção agrícola brasileira vem crescendo ano a ano e está espalhada em grande parte do território nacional. A maior cultura brasileira, tanto em produção quanto em área plantada, é a cana-de-açúcar. A análise dos resíduos que são produzidos por esta cultura não foi feita nesta Dissertação, pois o estágio de aproveitamento energético do resíduo já é alto em comparação ao das outras culturas. As maiores culturas de grãos brasileiras são a soja e o milho. Outras culturas importantes que foram incluídas neste estudo, seguindo o mesmo critério usado pela Empresa de Pesquisa Energética [3], são o algodão, o arroz, o feijão, a mandioca e o trigo. A Figura 2.1 permite a visualização da evolução da produção dessas culturas entre 1974 e 2017. No gráfico da Figura 2.1, os limites dos eixos y de cada

um dos múltiplos gráficos são idênticos. Isso permite a comparação entre as culturas. Soja e Milho se destacam, e as outras aparecem com valores bem menores. A Figura 2.2 mostra a densidade da produção de 2017 em toneladas por km quadrado.

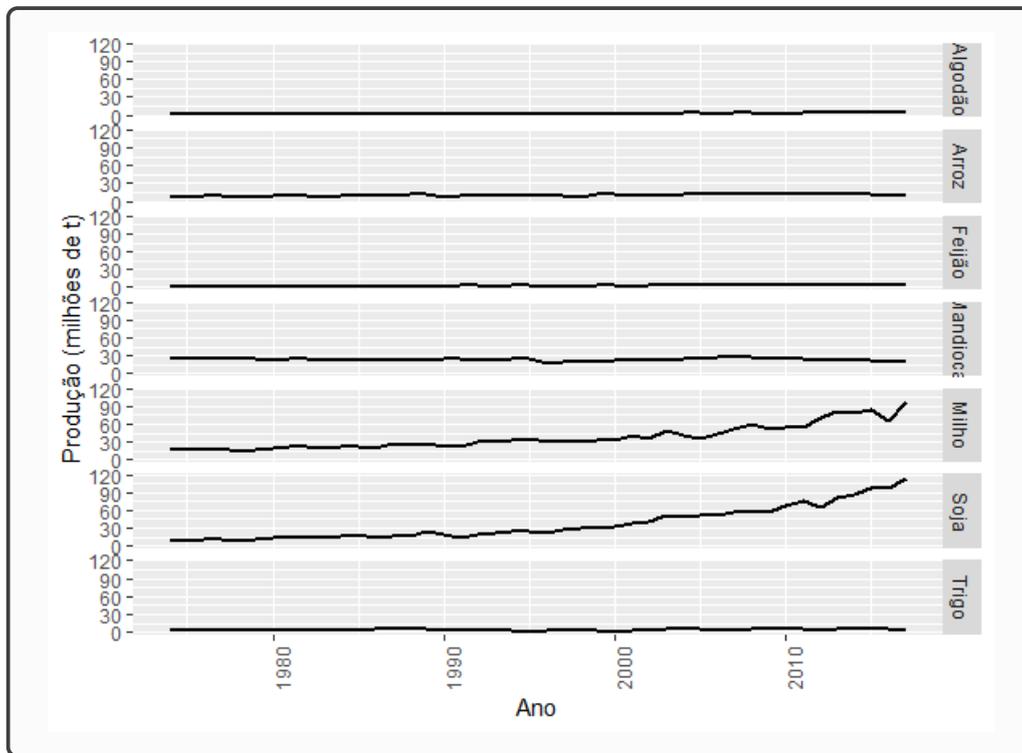


Figura 2.1: Produção anual das culturas analisadas neste trabalho nos últimos anos no Brasil (em milhões de toneladas). Fonte dos dados: Sidra (IBGE)

O Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) publicou, em 2018, uma edição do livro Projeções do Agronegócio [1], que estima a produção de um conjunto de culturas agropecuárias nos próximos dez anos. O trabalho foi realizado por um grupo de técnicos do Ministério da Agricultura e da Embrapa. O estudo das projeções nacionais do agronegócio consiste na análise de séries históricas com o uso de técnicas estatísticas de análise de séries temporais classificadas como de Passeio Aleatório, Box e Jenkins (ARIMA) e Espaço de Estados. A Figura 2.3 mostra estas projeções para os próximos dez anos. Diferentemente da Figura 2.1, os eixos x e y são ajustados para cada um dos gráficos múltiplos, possibilitando a melhor visualização da evolução da produção de cada cultura. Como podemos perceber no histórico de produção, a soja e o milho se destacam como culturas com um crescimento vigoroso. A Tabela 2.1 mostra a taxa de crescimento anualizada para os próximos dez anos segundo a estimativa do MAPA.

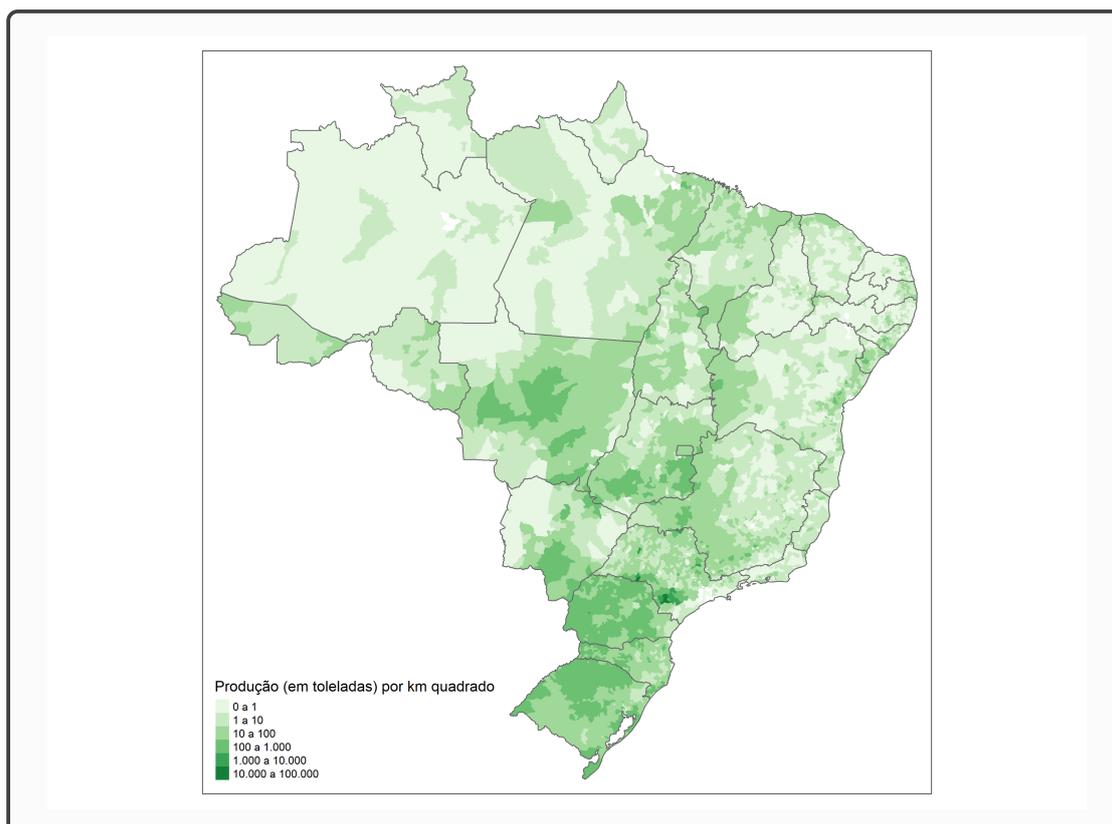


Figura 2.2: Densidade da produção agrícola das culturas analisadas neste trabalho em 2017. Fonte dos dados: Sidra (IBGE)

Tabela 2.1: Taxa de crescimento anual projetada da produção das culturas a serem avaliadas neste estudo para os próximos dez anos. Fonte: MAPA [1]

Produto	Taxa anual
Algodão	2.45%
Arroz	0.36%
Feijão	-0.92%
Mandioca	-0.85%
Milho	2.41%
Soja	2.91%
Trigo	2.72%

2.3 Caracterização dos resíduos agrícolas

A grande produção agrícola brasileira tem como consequência a produção de resíduos na mesma ordem de grandeza. A utilização energética destes resíduos é abordada em publicações como o Plano Nacional de Agroenergia [17] e o Atlas de Bioenergia do Brasil [18]. O aproveitamento de biomassa para geração de energia elétrica já é feito com sucesso no caso da cana-de-açúcar [19, 20]. A geração de eletricidade a partir do bagaço

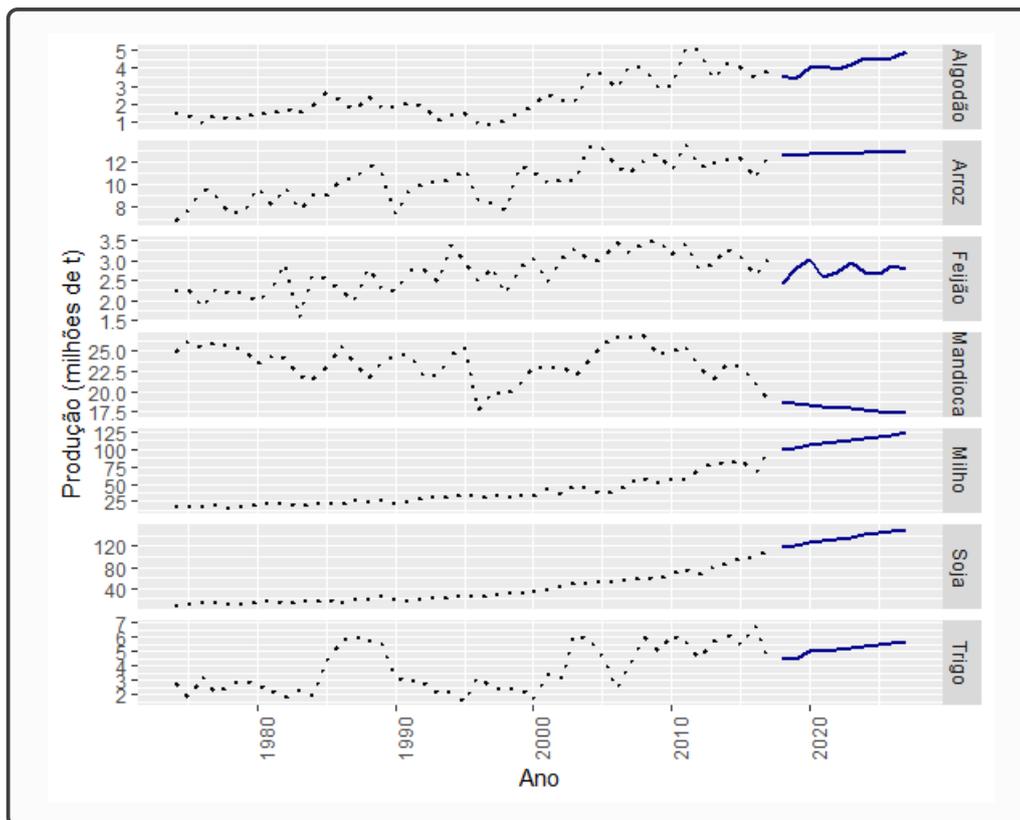


Figura 2.3: Produção e projeção anual das culturas analisadas neste trabalho nos últimos anos no Brasil (em milhões de toneladas). As linhas pontilhadas mostram a produção histórica observada e as linhas contínuas mostram a projeção segundo o MAPA [1]. Os limites dos eixos y foram ajustados a cada cultura para facilitar a visualização da evolução de cada uma delas.

de cana é feita em regime de cogeração, isto é, aproveitando a sinergia do processo de geração de energia por queima do bagaço de cana com o processo industrial de produção de açúcar e álcool. Outros tipos de resíduo agrícola ainda não são utilizados no Brasil para geração de energia elétrica, salvo de forma localizada e reduzida, como na experiência com casca de arroz no Rio Grande do Sul e Santa Catarina [4].

Apesar de já haver aproveitamento da agroeletricidade no caso do bagaço de cana, outras culturas são bastante relevantes no território do Brasil. O Inventário Energético de Resíduos Rurais, produzido pela EPE [3], analisou seis outras culturas agrícolas: soja, milho, arroz, trigo, mandioca, algodão e feijão. Essas também são as culturas analisadas nesta Dissertação. O Inventário concluiu que há um enorme potencial que explicita a necessidade da verificação da viabilidade econômica do aproveitamento dos resíduos.

Os resíduos agrícolas compreendem o material resultante das colheitas das culturas e produções agrícolas e sua retirada do terreno de cultivo para utilização em outros fins deve ser realizada de maneira racional, pois quando permanecem na zona de plantio exercem

importante papel, contribuindo para a proteção dos solos entre os períodos de colheita e novo plantio, retendo a umidade do solo, protegendo a biota, evitando a erosão e restaurando os nutrientes que foram extraídos pela planta [21]. Estes resíduos são constituídos folhas e as hastes das plantas, comumente chamados de palha [22].

A logística tem importância vital para o aproveitamento de resíduos para fim energético e é reconhecida como uma deficiência de infraestrutura da economia brasileira. Em um documento do BNDES [23], vários autores, sob a organização de Ana Cláudia Além e Fábio Giambiagi, discutem aspectos relativos ao desenvolvimento da economia brasileira. Em um dos artigos, são citados os maiores desafios para a logística brasileira: a matriz de transportes excessivamente concentrada no modal rodoviário; as deficiências de conservação das rodovias com menor volume de tráfego; os aeroportos operando próximos ao limite de sua capacidade; as rotas e bitolas ferroviárias inadequadas; e os portos sem calado e com acessos congestionados.

A seguir, são descritas as principais culturas cuja viabilidade de aproveitamento é avaliada nesta Dissertação:

- **Soja**

A soja pertence à família das leguminosas e destaca-se por ser muito rica em proteínas, lipídios (fração oleosa), fibras e sais minerais. Ela também contém vitaminas do complexo B, o que é raro em alimentos de origem vegetal.

Os grãos da soja são utilizados para muitos fins. No Brasil, os maiores usos são a produção de grandes volumes de farelo para as rações animais e a produção de óleo para a alimentação humana. A produtividade de grãos é função das condições de clima, tratamentos culturais e adaptabilidade às regiões e solos.

No caso da soja, é recomendado que cerca de 70% da palha permaneça no campo após a colheita [3]. Porém, vale ressaltar que uma quantidade superior destes resíduos poderia ser retirada do solo se substituídos por outros nutrientes [24].

- **Milho**

A cultura do milho se faz presente no Brasil em todas as Unidades da Federação, mas apenas oito Estados concentram quase 90% da produção nacional. Estes Estados são Paraná, Mato Grosso, Minas Gerais, Rio Grande do Sul, Goiás, São Paulo, Mato Grosso do Sul e Santa Catarina.

O milho é uma gramínea que pode ser cultivada em qualquer clima, solo ou altitude no mundo. É um dos cereais básicos para a nutrição humana e animal. Sua produtividade varia muito com relação à fertilidade de solo e à gerência das colheitas. A

cultura do milho produz resíduos na forma de colmo, sabugo, folha e palha [22]. No caso da palha, colmo e folha do milho, a recomendação é a de que 60% destes resíduos fiquem no solo [25].

- **Arroz**

O arroz é o cereal de maior importância alimentar no mundo. Desenvolve-se sob diversas condições climáticas sendo, contudo, muito exigente em umidade do solo. Necessita de 160 mm a 200 mm de água por mês e é o único cereal que pode ser cultivado em solos inundados. O arroz só se desenvolve normalmente quando sujeito a longo período de luz.

A cultura do arroz ainda é vista como alternativa para abertura de novas áreas na região Centro-Oeste. Em Mato Grosso, contudo, a Embrapa vem desenvolvendo variedades adaptadas às terras já “estabilizadas” ou “sistematizadas”, que poderão ser utilizadas em rotação com a soja, abrindo melhores perspectivas para o setor orizícola.

No caso da palha do arroz, a recomendação é de que 60% destes resíduos fiquem no solo [25].

- **Trigo**

O trigo possui ciclo anual e é uma planta cultivada durante o inverno e a primavera. Seu grão é utilizado na fabricação de pães, massas alimentícias, biscoitos e bolos. Quando não atinge a qualidade exigida para o consumo humano, é também usado como ração animal. Mais da metade do trigo consumido no Brasil é importado, principalmente da Argentina. O Paraná e o Rio Grande do Sul são responsáveis por mais de 80% da produção nacional.

A produção do trigo gera a palha como resíduo agrícola e é recomendado que 60% deste resíduo permaneça no local para que a qualidade do solo seja mantida [25].

- **Mandioca**

Apesar de ser cultivada em todo o território nacional, a mandioca concentra-se em apenas três Estados, o Pará, a Bahia e o Paraná, onde encontra-se aproximadamente metade da produção brasileira. Dentre os três, o Pará é o principal produtor. Apesar da quantidade relativamente grande de produção de mandioca no Brasil, a tecnologia da produção não sofreu modernizações de grande impacto, sendo que a maior parte da farinha paraense é oriunda da agricultura familiar artesanal. Os aumentos da produção nos últimos anos ocorreram principalmente em decorrência do crescimento da área plantada.

A parte aérea da mandioca é um dos subprodutos passíveis de aproveitamento energético. De acordo com Silva [26], é possível obter alta produtividade de massa verde se houver um manejo adequado das ramas da mandioca, também chamadas de parte aérea. O corte da parte aérea costuma ser feito manualmente, quebrando-se as hastes das plantas próximo ao solo. Porém, para grandes áreas, podem ser adaptados cortadores mecânicos, como costuma ser feito para outras culturas.

No caso da rama de mandioca, a recomendação é que 60% destes resíduos permaneçam no solo.

- **Feijão**

O feijão é cultivado em todo o território nacional. Contudo, são sete os Estados responsáveis por cerca de 75% do total produzido no País: Paraná, Minas Gerais, São Paulo, Bahia, Goiás, Mato Grosso e Ceará. O cultivo do feijão é efetuado em pequenas áreas. Para o feijão, a recomendação é que 60% destes resíduos permaneçam no solo.

- **Algodão**

Nos últimos anos, segundo dados do Comitê Internacional Consultivo do Algodão (Icac), o Brasil tem se sustentado entre os seis maiores exportadores do mundo, considerando as vendas externas dos países africanos somadas [27]. No caso do algodão, a recomendação é que 60% destes resíduos permaneçam no solo.

A Tabela 2.3, adaptada do Inventário da EPE [3], mostra uma consolidação das características dos resíduos. A tabela mostra o produto principal que gera o resíduo; o índice de produtividade, que estima quantas toneladas de resíduo seco são geradas para cada tonelada de produto principal; a disponibilidade para coleta, considerando a fatia dos resíduos que deve permanecer no local para manter a qualidade do solo; e o poder calorífico do produto, isto é, sua capacidade de gerar energia térmica.

Dadas as características dos resíduos e o volume de produção agrícola informado pelo IBGE para o ano de 2017, a Figura 2.4 mostra a energia potencial derivada da queima dos resíduos das culturas consideradas neste trabalho. Na figura, quanto mais escura a área, maior a quantidade de MJ por km quadrado. Essa energia potencial é calculada levando em conta a produção agrícola em cada município e as características listadas na Tabela 2.3: o índice de produtividade dos resíduos, a disponibilidade para coleta destes resíduos de forma a não prejudicar o solo e o poder calorífico. Estes montantes de energia potencial desconsideram as dificuldades logísticas e os custos inerentes ao aproveitamento energético destes resíduos.

Tabela 2.2: Características dos resíduos. Adaptado do Inventário Energético de Resíduos Rurais da EPE [3]

Produto	Resíduo	Índice de Produtividade (tbs/t)	Disponibilidade para coleta	PCI (GJ/t)
Algodão	Resíduos de Algodão	1.00	40%	14.6
Arroz	Casca de Arroz	0.18	40%	16.0
Arroz	Palha de Arroz	1.55	40%	16.0
Feijão	Palha de Feijão	1.16	40%	14.0
Mandioca	Rama de Mandioca	0.65	40%	16.0
Milho	Palha de Milho	1.68	40%	17.7
Soja	Palha de Soja	2.30	30%	14.6
Trigo	Palha de Trigo	2.90	40%	12.4

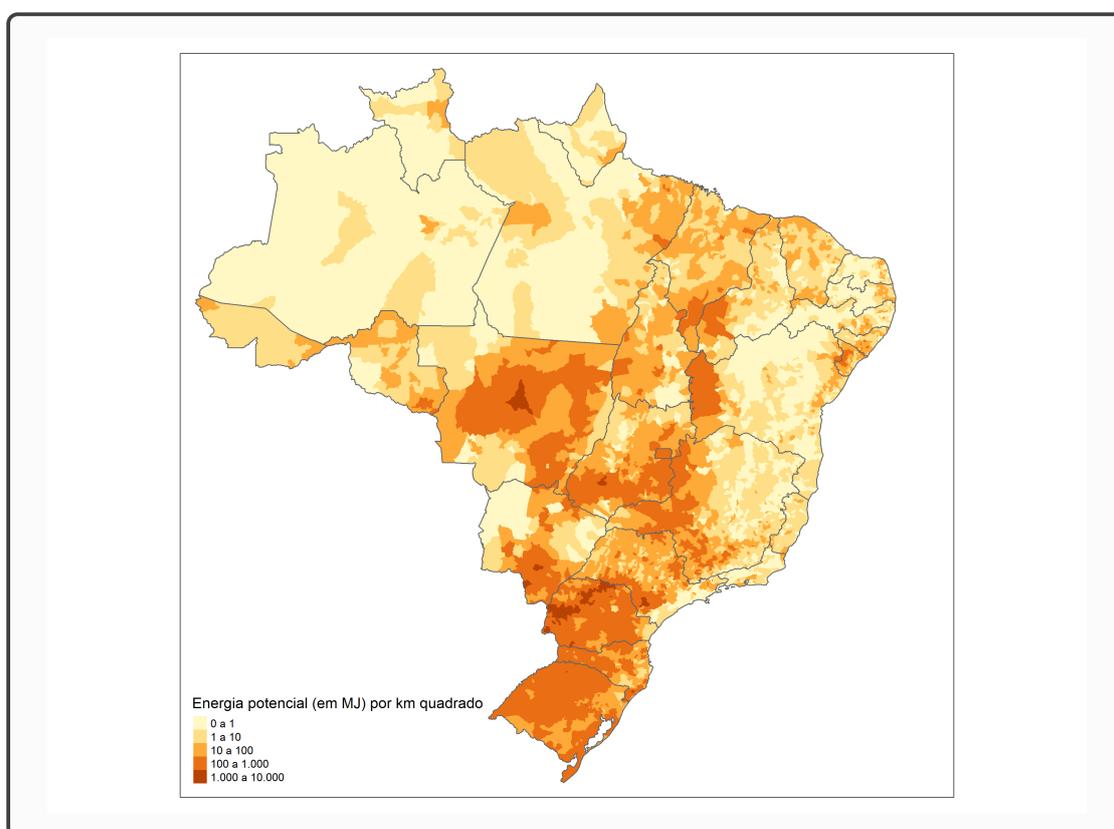


Figura 2.4: Densidade da energia potencialmente gerada pelos resíduos considerados neste trabalho, dados disponibilidade, poder calorífero e produtividade.

2.4 Análise dos custos logísticos no aproveitamento de resíduos agrícolas

A avaliação da possibilidade de aproveitamento energético dos resíduos agrícolas para geração de energia elétrica é abordada com detalhes por Oliveira [4]. O autor verificou a viabilidade do aproveitamento dos resíduos para geração de eletricidade em diferentes situações: leilões, autoprodução e comercialização no mercado livre. Posteriormente, a

Empresa de Pesquisa Energética (EPE) realizou um Inventário Energético de Resíduos Rurais [3], avaliando o potencial dos resíduos agrícolas, pecuários e agroindustriais com foco na disponibilização de biomassa energética. Em 2014, a EPE deu continuidade a este inventário com o documento Economicidade e Competitividade do Aproveitamento Energético de Resíduos Rurais [2]. Posteriormente, em um apanhado a respeito da energia termelétrica [10], vários autores, sob a coordenação de Tolmasquim, abordaram o aproveitamento de resíduos agrícolas para geração de eletricidade.

De modo geral, estes estudos fazem uma abordagem detalhada dos custos e das receitas potenciais desta atividade de aproveitamento. Eles destacam a importância dos custos logísticos para a viabilidade deste tipo de aproveitamento energético, analisando todas as fases do processo de aproveitamento dos resíduos.

A Empresa de Pesquisa Energética, no seu Inventário Energético de Resíduos Rurais [3], divide a cadeia de aproveitamento em duas partes principais: na primeira etapa do aproveitamento dos resíduos, é possível listar as fases de colheita, coleta, transporte e armazenamento dos resíduos. A segunda caracteriza-se pelo beneficiamento, como a secagem e redução de contaminantes, tendo como última etapa a conversão da biomassa. Pode haver ainda diferentes etapas se forem considerados diferentes beneficiamentos e diferentes produtos a serem usados na queima. A Figura 2.5 mostra esta visão da cadeia.

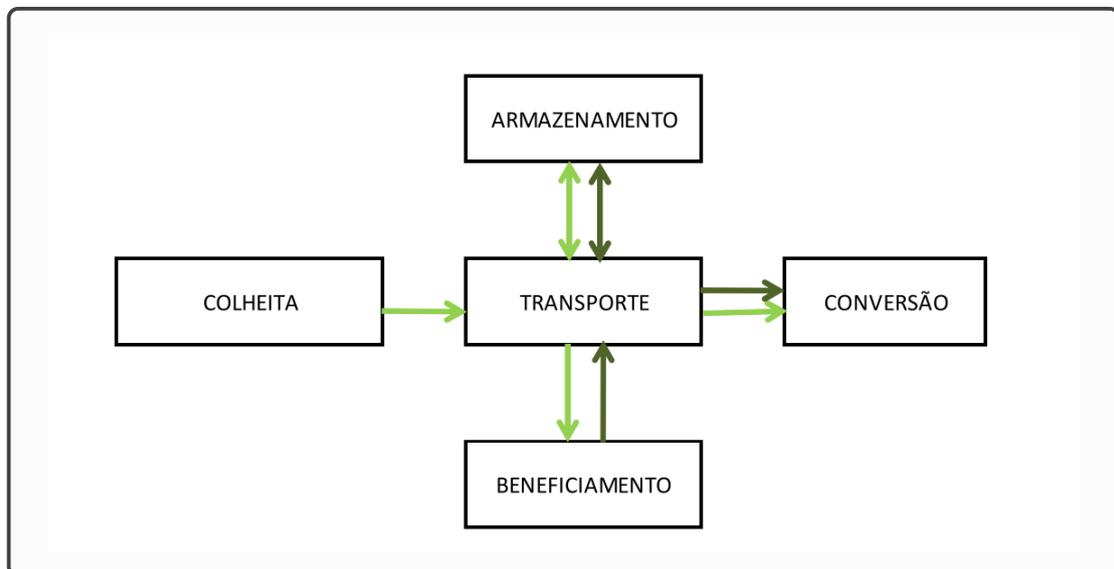


Figura 2.5: Fluxograma logístico genérico [2]

Segundo Lora [28], os custos para as plantas termelétricas podem classificar-se em custos de investimento e custos de geração. Os custos dos resíduos são compostos por fatores diversos, que vão desde o custo logístico do resíduo até o custo de oportunidade (caso exista), passando por eventual remuneração ao produtor destes resíduos [2]. Dentre

estes fatores, o mais importante é o custo da cadeia logística da biomassa até a usina. Esta variável, de extrema importância na viabilização da bioenergia [29, 30], pode ser descrita em quatro etapas antes da conversão: a colheita, o armazenamento, o transporte e o beneficiamento.

Na colheita, é preciso decidir a melhor forma de colher os resíduos dispostos no campo. Este problema tem diversas variáveis, que em muitos casos são de difícil mensuração e pouco conhecimento para o tomador de decisão, como a tecnologia a utilizar, o máximo que pode ser colhido, o impacto sobre o solo, o impacto no consumo de diferentes combustíveis, em especial o diesel, a escala mínima que possibilita esta colheita, entre outras variáveis. Todas essas variáveis são naturalmente barreiras para a implantação da colheita dos resíduos pelos produtores, que terão que ser “premiados” por estes riscos. Assim, essas variáveis são também fatores de custo para a biomassa.

A definição das etapas subsequentes à colheita já é por si um problema logístico que deve ser resolvido. Muitas vezes, a própria colheita pode não ser considerada a primeira etapa quando há o chamado armazenamento em campo. O armazenamento é mais uma etapa da cadeia logística, que pode ser considerado ou não dependendo do tipo do insumo ou da necessidade de disponibilidade do produto final. No caso da geração de energia elétrica a partir da biomassa, o armazenamento tem como principal objetivo regularizar diferentes sazonalidades, seja de safra e necessidade do setor elétrico, seja de custo de transporte no período de safra.

O armazenamento da biomassa pode ter diferentes classificações. Uma das classificações divide o armazenamento em passivo ou ativo: o estoque ativo tem como objetivo a continuidade mínima da operação e o passivo busca atender uma determinada demanda de tempo de operação. Outra classificação é feita de acordo com sua localização: na fazenda, em um ponto intermediário ou na usina [30]. Mais uma divisão é feita de acordo com o tipo de exposição ao tempo no qual a biomassa é deixada no próprio campo até atingir a umidade ideal, armazenamento em silos de biomassa e o armazenamento em silos mecanizados. Cada um tem suas respectivas vantagens e desvantagens, e qualquer tipo de armazenamento apresentará perdas, dadas pelo tipo de biomassa, tempo e condições de armazenamento.

A principal etapa da cadeia logística é o transporte [29–31]. Assim como o armazenamento, o transporte não tem uma hierarquia definida e pode ser utilizado entre diferentes etapas da cadeia logística. O transporte ainda tem a especificidade de poder utilizar diferentes modais. Os custos de transporte têm, como principais variáveis, o tipo de modal, a distância e a qualidade da biomassa transportada. Nos estudos de aproveitamento de

biomassa consultados [2, 4, 5], o transporte da biomassa foi considerado somente através do modal rodoviário.

O custo logístico tem como objetivo representar as diferentes condições da cadeia logística específica e é composto por custos de cada etapa logística: o custo da colheita; o custo de armazenamento; e os custos de transportes, interno à unidade produtora e para destinação externa. Oliveira [4] apresenta custos para cada uma das etapas, apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Custos logísticos dos resíduos. Adaptado da dissertação de Oliveira [4]

	Mínimo	Médio	Máximo	Fontes de Oliveira [4]
Colheita (R\$/t)	19,95	37,08	57,84	[24, 32–36]
Armazenagem (R\$/t)	5,69	13,81	22,73	[26, 36, 37]
Carga e Descarga (R\$/t)	3,69	7,84	13,88	[24, 31, 34–36, 38]
Transporte (R\$/(t · km))	0,05	0,18	0,40	[24, 31, 34–36, 38]

Os custos de colheita apresentados na Tabela 2.3 correspondem à colheita através de enfardamento (paralelepíedicos) e com transporte interno até 15km. Os custos de armazenamento correspondem a diferentes tipos de realidade, desde armazenamento de resíduos de biomassa crua até armazenamento de milho e soja. Nestes custos estão incluídos todos os custos administrativos, além de custos operacionais com secagem.

Os custos de carga e descarga dizem respeito às operações de carregamento e descarregamento de caminhões, antes e após o transporte. Por último, os custos de transporte representam custos de transporte rodoviário, através de caminhões, de resíduos em diferentes condições expostas na literatura referenciada. Estes custos tanto representam custos reais como custos obtidos através de simulações e representam diferentes condições logísticas.

O estudo realizado por Oliveira [4] estabelece um prêmio, destinado ao produtor, que também entra como custo do aproveitamento logístico. Segundo Oliveira, este custo serve como forma de remuneração ao produtor, pois como o produtor precisará de uma nova estrutura logística para colheita e destinação desta biomassa, o mesmo demandará um retorno por este uso, por mais que não seja ele o investidor desta estrutura. Este custo foi definido como 7,5% do restante do custo logístico (transporte, colheita, armazenamento e carga e descarga).

Estudos posteriores à dissertação de Oliveira [4], como a Nota Técnica da EPE de 2014 [2], o livro de Tolmasquim [10] e a dissertação de Silva [5] utilizam os custos logísticos de Oliveira [4] como referência. Para atualização dos custos de armazenamento, Silva [5] faz uma análise mais detalhada, para o Brasil, do que a de trabalhos anteriores.

Ele leva em conta a sazonalidade da produção das culturas mais importantes (cana-de-açúcar, soja, milho, arroz e trigo), conforme apresentado na Tabela 2.4 e adota como premissa um consumo constante da biomassa ao longo dos meses. A partir destas premissas de sazonalidade e consumo constante, é construída uma estimativa mensal de armazenamento da produção anual, como mostra a Tabela 2.5. Usando esta estimativa de armazenamento e dados de custo de armazenamento fornecidos pela Conab ¹, Silva chega ao custo de armazenamento do aproveitamento da biomassa [5].

Os custos de armazenamento, colheita, carga e descarga, transporte e prêmio ao produtor foram atualizados para o ano de 2018. Os custos de armazenamento foram atualizados levando em conta a dissertação de Silva [5] e o site da Conab; os custos de transporte foram retirados da tabela de frete implantada pelo governo federal com base na lei 13.703 de 8/8/2018; os custos de colheita foram obtidos a partir de planilhas da Conab; já os custos de carga e descarga, de menor monta, foram atualizados pelo IPCA a partir dos valores da dissertação de Oliveira [4]. Os preços de produtos usados como referência para o prêmio pago ao produtor foram retirados do site do Cepea. O prêmio pago por tonelada de resíduo ao produtor não é definido como sendo um percentual do custo logístico, como na dissertação de Oliveira [4], mas sim como um percentual do valor de mercado de uma tonelada do produto principal da cadeia (soja, milho etc.). A opção por utilizar o preço do produto como referência para o prêmio ao produtor, e não o custo logístico, é mais adequada. O custo logístico depende de fatores que não deveriam interferir no preço do resíduo quando retirado na própria fazenda onde ele é produzido, por exemplo o custo de transporte. Além disso, a negociação com os produtores a respeito do prêmio a ser pago a eles se daria em bases mais conhecidas por todos: o preço do produto principal.

Tabela 2.4: Sazonalidade da produção. Adaptado de Silva [5]

Cultura	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Cana	2%	1%	1%	4%	9%	13%	12%	16%	12%	13%	10%	7%
Soja	20%	30%	30%	20%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Milho	0%	1%	1%	1%	18%	31%	20%	18%	9%	0%	0%	0%
Arroz	17%	17%	29%	29%	9%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Trigo	30%	20%	15%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	15%	20%

2.5 Análise dos custos de investimento

Segundo a EPE [2], o custo de investimento de um projeto de produção de energia pode ser decomposto em custo direto (como terreno, obras civis, equipamento, monta-

¹Companhia Nacional de Abastecimento, empresa pública vinculada ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento: www.conab.gov.br

Tabela 2.5: Armazenamento mensal da produção. Adaptado de Silva [5]

Cultura	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Cana	0%	0%	0%	0%	0%	5%	9%	17%	20%	25%	27%	25%
Soja	12%	33%	55%	67%	58%	50%	42%	33%	25%	17%	8%	0%
Milho	0%	0%	0%	0%	10%	33%	44%	54%	55%	46%	38%	30%
Arroz	9%	18%	38%	58%	58%	50%	42%	33%	25%	17%	8%	0%
Trigo	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	7%	18%

gem e subestação); e custo indireto (como canteiro, acampamento e administração). As tecnologias dos ciclos a vapor com turbinas, tanto de contrapressão quanto de condensação e extração, têm seus processos de fabricação dominados pela indústria nacional. O despertar deste setor para o melhor aproveitamento do potencial energético da biomassa residual de sua produção, principalmente para geração de energia elétrica, serviu de impulso para a indústria nacional, que já conta com tecnologia e capacidade de produzir e instalar caldeiras de vapor de elevadas pressão e temperatura, nas faixas de 100 kgf/cm² e 500°C, utilizando a biomassa como combustível. O custo de investimento para usinas termelétricas, segundo o Inventário Energético de Resíduos Rurais da EPE [2] e o livro organizado por Tolmasquim [10], que se basearam na dissertação de Oliveira [4], era de US\$ 1.186 por kW de potência em dezembro de 2011. A cotação média do dólar durante o mês de dezembro de 2011 foi R\$ 1,82589375. Dessa forma, o custo em reais do investimento na construção de uma termelétrica em dezembro 2011 era de R\$ 2165,51 por kW de potência.

2.6 Resultados encontrados na literatura

A viabilidade da agroeletricidade apresenta diferentes dimensões. Entretanto, a viabilidade testada foi a econômica nos estudos consultados para o caso brasileiro. Esta viabilidade foi testada pela comparação do custo da energia elétrica produzida com o preço da energia elétrica para cada caso. Cabe destacar ainda que há a viabilidade ambiental, ou seja, é necessário verificar se os diferentes impactos ambientais causados pelo aproveitamento da agroeletricidade são menores, iguais ou maiores do que a não realização deste potencial. Todavia, esta análise ambiental ficou fora do escopo dos trabalhos consultados e desta Dissertação.

Como conclusão geral, estes estudos apontam que a atividade de aproveitamento é viável em alguns casos para autogeração e que o aproveitamento com o objetivo de venda nos leilões do mercado regulado é inviável em todos os casos.

Considerando os custos logísticos e de investimento, além das condições de comer-

cialização da energia, definidas pelo decreto 5.163/2004 e pela resolução normativa da ANEEL 482/2012, Oliveira [4] fez alguns estudos de caso avaliando o aproveitamento energético da biomassa residual agrícola e pecuária. Os casos simulados tiveram como unidade geográfica a microrregião. A seleção dos casos foi realizada pela disponibilidade de biomassa. Para seus estudos de caso, foram escolhidas as seguintes microrregiões: Campanha Ocidental (RS), Toledo (PR), Uberaba (MG), Alto Teles Pires (MT) e Santa Maria da Vitória (BA). Todas as regiões selecionadas possuíam consistente produção agrícola e grande potencial de evolução na produção, conforme indicavam as projeções. Além disso, com esta seleção foi possível cobrir boa parte das diversidades existentes nos cenários de aproveitamento de resíduos agrícolas, diferentes culturas, diferentes condições logísticas, experiência diversa no agronegócio, diversidade de área geográfica e diversidade de agentes. A distância considerada foi calculada a partir das médias das distâncias entre todos os municípios da microrregião. A seguir, são resumidos os resultados do estudo de caso em cada microrregião analisada por Oliveira [4].

- **Toledo (PR):** em nenhum cenário há competitividade da agroeletricidade em leilões de energia nova. Sob a ótica da competitividade através da comercialização livre, o aproveitamento era competitivo para clientes com tarifas acima de R\$/MWh 153,70 (a reais de 2011) no final do período de vida útil da usina;
- **Uberaba (MG):** para esta microrregião, o aproveitamento era competitivo tanto para autoprodução como para comercialização em clientes com tarifas acima de R\$/MWh 296,26 a reais de 2011, ou seja, cliente A3 com tarifação horossazonal verde ou com tarifa superior ²;
- **Santa Maria da Vitória (BA):** novamente o aproveitamento era competitivo para autoprodução. No caso da comercialização, o aproveitamento é competitivo para os clientes A3 verde e clientes com tarifas superiores;
- **Campanha Ocidental (RS):** para o caso da autoprodução, o aproveitamento era competitivo durante todo o período para clientes A3 verde ou com tarifas superiores. Para os casos de comercialização, o aproveitamento só se tornava competitivo em 2027 para clientes A3 verde ou com tarifação superior;
- **Alto Teles Pires (MT):** nesta microrregião, para os casos a autoprodução é competitiva desde o início do período para clientes A3 verde ou com tarifas superiores. Para os casos de comercialização de energia, o aproveitamento é competitivo durante todo o período para clientes A3 verde ou com tarifas superiores, se tornando

²Os tipos de tarifa, como a citada A3 horossazonal, são definidos na resolução normativa 414 da ANEEL: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf>

competitivo em 2029 e 2030 para cliente com tarifação azul e com tarifação convencional, respectivamente.

A partir dos resultados expostos na dissertação de Oliveira [4], o autor nota que, na maioria das situações, a agroeletricidade não é competitiva. No teste que leva em conta a competição com preços de usinas de biomassa contratadas em leilão, foi observado que em nenhum cenário simulado a agroeletricidade seria competitiva nos leilões da época (2011). Uma segunda análise de competitividade foi realizada contemplando a autoprodução em grandes consumidores. Estes se apresentam como alternativa interessante para casos específicos, principalmente para clientes ligados no grupo A4 em tarifa horossazonal verde. De maneira geral, é observado por Oliveira [4] que a agroeletricidade ainda não é competitiva nem ao consumidor final e nem em leilão, mas apenas em autoprodução. Entretanto, incentivos poderiam torná-la viáveis em curto e médios prazos.

A análise de viabilidade foi atualizada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em Nota Técnica de 2014 [2], produzida por uma equipe de técnicos que incluía Oliveira [4]. A análise usou como insumo a dissertação de Oliveira [4] e o Inventário de Resíduos Agrícolas feito pela EPE também em 2014 [3], dentre outros documentos. Os autores verificaram que a energia elétrica gerada com resíduos agrícolas não era competitiva nos leilões da época. Contudo, ela alcança competitividade em alguns nichos, principalmente para o caso da autoprodução. A Nota pondera, ainda, que existem barreiras naturais de investimento por estes tipos de agentes, principalmente os consumidores rurais e residenciais, seja por falta de financiamentos ou de conhecimento técnico.

A Nota [2] detalha que o aproveitamento começa a atingir competitividade quando são simulados os casos de autoprodução, que não necessitam de investimentos para conexão à rede e para os casos de biodigestão (que é diferente do tipo de aproveitamento por queima discutido nesta Dissertação) quando há venda do biofertilizante, podendo também ser entendida como custo evitado quando utilizado pelo próprio produtor rural que disponibilizou o resíduo de biomassa. A remuneração pelo biofertilizante em áreas rurais é bastante coerente, segundo a EPE [2], dada a necessidade local e o resíduo biodigerido ser mais uniforme que os resíduos urbanos.

A Nota [2] ainda faz uma análise da possível utilização da infraestrutura de usinas de processamento de cana-de-açúcar. Neste caso, não há competitividade em leilões mas há competitividade em diversas classes de consumo de diversas regiões. Assim, essa alternativa se mostrava interessante, podendo ter outras consequências, como aumento da garantia física das atuais usinas termelétricas a bagaço de cana para venda em leilões.

2.7 Recomendações para o melhor aproveitamento do potencial dos resíduos

Segundo Oliveira [4], é necessário entender o porquê do não investimento nestes potenciais, dado que alguns já são competitivos. Oliveira [4] e EPE [3] enumeram uma série de barreiras:

- a falta de conhecimento técnico local;
- a falta de identificação dos reais potenciais locais (inventários de biomassa);
- a competição pelo uso dos resíduos agrícolas (utilização como ração ou como insumos agronômicos);
- a falta de sistemas de colheita, coleta e logística adequados;
- a indisponibilidade de financiamentos acessíveis e baratos;
- custos de transação e barreiras do setor energético.

Os mesmos estudos sugerem caminhos para remoção destas barreiras. Em linhas gerais, a proposta de implementação das ações foi dividida em três grandes fases:

1. identificação do potencial e desenvolvimento tecnológico;
2. análise de viabilidade deste potencial em casos específicos, juntamente com o desenvolvimento da capacidade técnica da região;
3. implementação deste potencial viável aliado ao desenvolvimento da cadeia da agroeletricidade.

As três fases de implementação contêm ações de educação, suporte e desenvolvimento de capacidade técnica, essenciais segundo as experiências internacionais. Inúmeros países utilizam políticas de incentivo para energia renovável desde as décadas de oitenta e noventa do século XX. Contudo, foi a partir de 1998 que houve um crescimento substancial de países, estados e municípios que adotaram políticas de incentivo a fontes de energia renovável, e a partir de 2005 uma aceleração deste movimento. Em 2005, eram 55 países e em 2011 eram 119 que incentivavam energia renovável [30].

Em 2011, Oliveira [4] defendia a disponibilização de financiamentos, criação de mão de obra e conhecimentos locais, melhoria da infraestrutura logística (que já era integrante

da estratégia na época, através do PAC), inventários de biomassa (em parte já integrante da estratégia da época, através da política nacional de resíduos sólidos) e simplificação dos processos de autorização e comercialização de energia, como o sistema de compensação de energia criado pela Resolução Normativa ANEEL 482/2012, como principais medidas, assim como a necessidade de coordenação e acompanhamento do desenvolvimento deste programa em diferentes fases.

2.8 Limitações dos estudos encontrados na literatura

Como todo modelo, os estudos referenciados neste capítulo possuem limitações que devem ser conhecidas para que se possa entender os limites de generalização das suas conclusões e as condições que possam reverter o quadro apresentado por elas.

Primeiramente, os estudos não realizaram uma divisão otimizada das regiões de fornecimento e nem tentaram definir de forma ótima as localizações das unidades de conversão de biomassa, isto é, das usinas termelétricas a serem construídas. As distâncias utilizadas por estes estudos são distâncias médias entre os municípios, e as regiões de fornecimento escolhidas são as microrregiões em que o Brasil era dividido até 2017 pelo IBGE [39]. O local escolhido para posicionamento das usinas termelétricas nestes estudos foi o município da microrregião que possui a menor distância média em relação aos outros municípios.

A escolha da microrregião como região de fornecimento de biomassa para a usina e a escolha do município com menor distância média em relação aos outros como sede da usina não necessariamente são boas escolhas. A escolha da microrregião como região de fornecimento é arbitrária e não segue um critério que maximize o aproveitamento dos resíduos. A escolha do município onde se deve alocar a usina, por sua vez, usa a heurística citada de pinçar o município de menor distância média para os outros municípios da região. Esta heurística não necessariamente leva a uma escolha ótima, já que os municípios têm montantes de produção agrícola diferentes para cada uma das culturas.

Uma sugestão de próximos passos no estudo do aproveitamento de biomassa, que aparece tanto na dissertação de Oliveira [4] quanto na dissertação de Silva [5], é a consideração do aspecto geolocal. O desenvolvimento de um modelo georreferenciado também é citado na dissertação de Oliveira [4] como sugestão para trabalhos futuros. Um estudo que defina *clusters* de aproveitamento da biomassa é sugerido na dissertação de Silva [5], onde o autor explicita que o levantamento do potencial energético dos resíduos agrícolas naquele trabalho baseou-se na utilização de um valor de produção agrícola anual, em nível municipal de agregação. Ele diz que isso impediu um arranjo preciso da

biomassa no território e, por conseguinte, prejudicou a localização dos *clusters*. Assim, Silva recomenda, em sua dissertação, o aprofundamento do modelo de georreferenciamento a partir da utilização de mapas de uso do solo, partindo das regiões em que se identificou elevado potencial energético.

2.9 Considerações finais

Este capítulo apresentou um resumo dos principais trabalhos que analisaram o aproveitamento de resíduos agrícolas como fonte para geração de eletricidade. No próximo capítulo será apresentado o modelo proposto nesta Dissertação. O modelo tem o mesmo objetivo dos estudos aqui apresentados, porém apresenta soluções para algumas limitações dos estudos anteriores.

3. Proposta de solução

Este Capítulo descreve a proposta de solução para o problema de avaliação da viabilidade do aproveitamento dos resíduos da atividade agrícola para geração de energia em usinas termelétricas. A Seção 3.1 descreve a modelagem geral do problema, a estrutura das soluções candidatas e o cálculo do *fitness* atribuído a cada solução candidata. O cálculo do *fitness* envolve parâmetros extraídos da literatura e de repositórios variados de dados. A Seção 3.2 apresenta a origem destes dados. A escolha da melhor solução candidata é guiada por um algoritmo que utiliza heurísticas e buscas meta-heurísticas. Este algoritmo é descrito na Seção 3.3. A Seção 3.4 discute as ameaças à validade. Por fim, a Seção 3.5 apresenta as considerações finais a respeito da proposta de solução.

3.1 Modelagem do problema

O problema de otimização consiste em posicionar usinas termelétricas e determinar as regiões de fornecimento dos resíduos a essas usinas de forma que o valor econômico da configuração como um todo seja maximizado. Nesta modelagem, consideramos que o valor econômico é equivalente ao valor presente dos fluxos de investimento, de custos operacionais e de receita, calculados de acordo com a configuração da solução candidata.

O problema consiste em dividir os municípios de um **território escopo** em **regiões de fornecimento**. Território escopo é uma área territorial contígua que contém um conjunto de municípios. Esta área pode ser uma unidade da federação, um conjunto de unidades da federação ou mesmo o Brasil. O território escopo define o conjunto de municípios utilizados como elementos da otimização. **Regiões de fornecimento** são as subdivisões do território escopo que a solução candidata vai definir no território escopo. Cada região de fornecimento é composta por um subconjunto dos municípios e terá uma usina de geração de energia elétrica, que estará sediada em um de seus municípios. A usina receberá os resíduos dos municípios da região de fornecimento, gerando energia elétrica. Cada tone-

lada de resíduo gera uma quantidade de energia que depende do tipo de resíduo, já que cada tipo de cultura (arroz, feijão, soja etc.) gera uma quantidade de resíduos diferente e gera resíduos de poder calorífico diferente. Há um custo de transporte por tonelada de resíduos que é proporcional à distância entre os municípios entre os quais os resíduos são transportados. Há também custos associados à obtenção destes resíduos junto ao produtor, que são proporcionais à massa de resíduos e não dependem das distâncias. Outro custo considerado é o de construção e operação da usina de geração de energia.

A Figura 3.1 mostra um exemplo de solução para o problema. Neste caso, o estado de São Paulo é o território escopo do problema. A solução divide São Paulo em seis regiões de fornecimento de resíduos agrícolas. Cada uma das seis regiões conta com uma usina, localizada no município sede, que está indicado com um ponto preto e nomeado. A solução exemplificada determina que todos os resíduos resultantes de atividade agrícola das culturas consideradas por este trabalho são transportados para a usina localizada na sede, onde serão convertidos em energia. Alguns municípios não foram alocados em nenhuma sede. Eles estão espalhados pelo território e coloridos de verde.

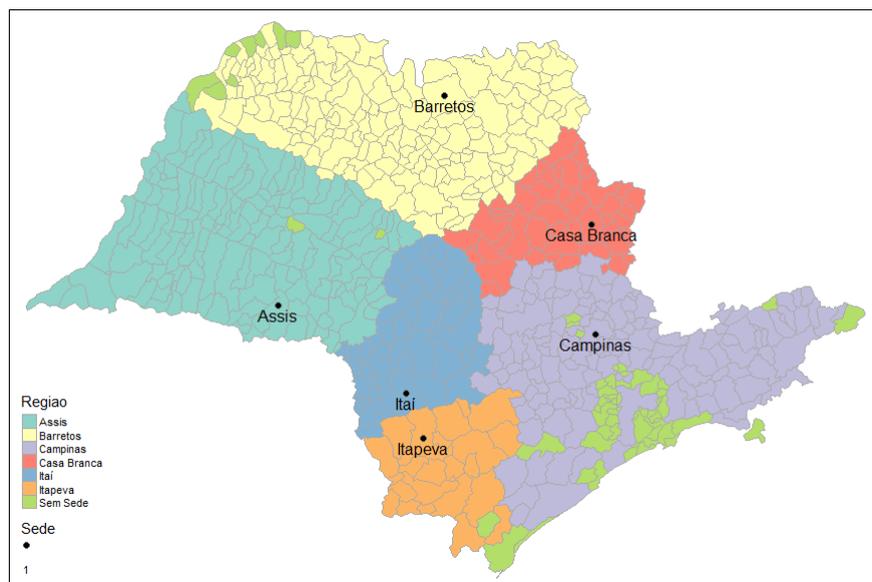


Figura 3.1: Exemplo de uma solução para o problema no território escopo de São Paulo, com regiões de fornecimento e suas sedes, onde se localizam as usinas.

3.1.1 Descrição formal de uma solução candidata

Como já foi descrito, uma solução candidata para este problema de otimização consiste na definição do número de usinas e das regiões de fornecimento de resíduos para cada usina, além da escolha de um município por região onde uma usina será instalada. Considera-se que a usina será instalada na sede do município. O local exato da sede é

determinado pela Câmara Municipal e é onde se encontra o Poder Executivo Municipal. Neste trabalho, uma solução candidata dentro de um território escopo pode ser definida:

1. Pela lista de usinas a serem construídas;
2. Pelos municípios que serão a localização de cada uma das usinas, também chamados de sedes;
3. Pela alocação de cada um dos municípios do território escopo. Um município pode ser alocado na região de fornecimento de resíduos de uma das usinas ou pode não fornecer resíduos para nenhuma usina.

Formalmente, podemos definir a *solução candidata* S como uma função que leva um município a uma sede à qual ele fornece resíduos agrícolas (ou a um elemento nulo, quando ele não fornece resíduos para nenhuma usina).

$$S: M \rightarrow M' \tag{3.1}$$

O conjunto M , domínio da função, é o conjunto de municípios contidos no território escopo da otimização.

O conjunto M' , contra-domínio da função, é formado pelo conjunto M acrescido de um elemento m_{nulo} , que representa uma sede nula.

A função S representa o conjunto de atribuições de sedes a cada município m contido no território escopo da otimização. A atribuição de uma sede a um município significa que este município m fornece resíduos para uma usina localizada no município $S(m)$, caso $S(m) \neq m_{\text{nulo}}$. Como alternativa a ser atribuído a uma sede, um município m pode não ser atribuído a nenhuma sede. Neste caso, a função S representa que este município não fornece resíduos para nenhuma usina e $S(m) = m_{\text{nulo}}$.

O conjunto imagem de S define o conjunto de municípios que vão possuir usinas instaladas em seu território. Portanto, define as sedes, que representam as regiões de fornecimento existentes e as localizações de suas usinas. A partir deste momento, chamaremos este conjunto imagem de S de R_S . Chamaremos também os elementos do conjunto R_S de r e o município que é sede de r de m_r . Todo município m dito pertencente à região r tem $S(m) = m_r$.

Na Figura 3.2, o município de Urânia é destacado. Ele pertence à região de fornecimento de resíduos para a usina localizada em Barretos. Portanto, $S(\text{Urânia}) =$

Barretos.



Figura 3.2: Exemplo de uma solução para o problema no território escopo de São Paulo, com o município de Urânia destacado. Segundo a definição de solução, $S(\text{Urânia}) = \text{Barretos}$

Já na Figura 3.3, o município de Ilha Solteira é destacado. Ele não fornece resíduos a nenhuma usina. Portanto $S(\text{IlhaSolteira}) = m_{\text{nulo}}$.



Figura 3.3: Exemplo de uma solução para o problema no escopo de São Paulo, com o município de Ilha Solteira destacado. Segundo a definição formal de solução, $S(\text{IlhaSolteira}) = m_{\text{nulo}}$

3.1.2 Descrição do cálculo do valor presente (*fitness*)

A métrica escolhida para representar o *fitness* de uma solução candidata foi o valor presente dos fluxos de caixa que serão promovidos pela atividade de aproveitamento dos resíduos das culturas consideradas neste trabalho. A métrica do valor presente foi escolhida por ser uma das abordagens mais utilizadas em finanças para avaliar o valor de um ativo. O ativo que está sendo avaliado neste trabalho é o potencial do conjunto de resíduos agrícolas das culturas escolhidas quando usados na atividade de geração de energia elétrica via queima em usinas termelétricas.

O valor presente de uma solução candidata S , ou seu *fitness*, é a soma dos fluxos de caixa futuros descontados pela taxa neutra ao risco e é dado por:

$$VP(S) = \sum_{r \in R_s} \max(-Inv_r + \sum_{t \in T} \frac{Rec_{r,t}}{(1+i)^t} - \sum_{t \in T} \frac{Cust_{r,t}}{(1+i)^t}, 0) \quad (3.2)$$

onde:

- S é uma solução candidata;
- R_s é o conjunto de regiões de fornecimento com uma usina geradora, definido pelo conjunto imagem da função S ;
- $VP(S)$ é o valor presente, ou *fitness*, de S ;
- t é o período relativo ao fluxo;
- T é o conjunto dos períodos que compõem a vida útil de uma usina termelétrica. Os períodos vão de 0 a $VidaUtil - 1$, onde $VidaUtil$ é o número de anos de vida útil de uma usina termelétrica que usa resíduos agrícolas como combustível;
- Inv_r é o investimento necessário para construção da usina na região r . Neste modelo, consideramos que ele é feito inteiramente em $t = 0$;
- $Rec_{r,t}$ é a receita anual, a cada período t , obtida com a venda da energia elétrica gerada na região r ;
- $Cust_{r,t}$ é o custo anual para manter a atividade de geração de energia elétrica na região r a cada período t ;
- i é a taxa de desconto anualizada. 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 estimação do prêmio de risco depende de fatores como a aversão a risco específica do investidor e a quantidade de risco não diversificável do investimento. Para este trabalho, a opção foi rodar cenários com vários prêmios de risco possíveis. Assim, qualquer investidor candidato pode avaliar o potencial do aproveitamento de resíduos, levando em conta suas próprias premissas de prêmio de risco exigido.

A Figura 3.4 mostra um esquema simplificado do cálculo do valor presente de uma solução. O valor presente da solução é a soma dos valores presentes relativos a cada região fornecedora. O valor presente de cada região é composto pela soma do investimento inicial na construção da usina termelétrica a ser instalada na sede da região fornecedora com o valor presente da receita anual e o valor presente do custo anual da atividade. O investimento inicial depende da capacidade da usina, que depende da quantidade potencial de energia elétrica a ser gerada pelos resíduos da região de fornecimento. A receita anual depende da quantidade de eletricidade a ser gerada e do preço de venda da energia elétrica. O custo é a soma do custo de operação da usina com o custo de obtenção dos resíduos e o prêmio pago ao produtor. O custo de obtenção é a soma do custo para transportar dos resíduos dos municípios até a usina com o custo de colheita, armazenamento e carga dos resíduos.



Figura 3.4: Esquema simplificado do cálculo do valor presente de uma solução.

O valor presente de cada região deve ser calculado de forma independente e depois somado. Pode haver regiões que possuem valor presente negativo, se os custos relativos à construção e manutenção da usina e à obtenção dos resíduos anularem a receita com a venda da energia. Se for o caso, não vale a pena executar a atividade de geração de energia a partir de resíduos nesta região. Por isso, só entram na soma final as regiões que possuem valor presente positivo.

A receita anual de uma região é determinada pelo valor de venda da eletricidade gerada com os resíduos disponíveis na região:

$$Rec_{r,t} = \sum_{m \in M_r} Rec_{m,t} \quad (3.3)$$

$$Rec_{m,t} = PMWh \cdot Energia_m \quad (3.4)$$

$$Energia_{m,t} = Efic \cdot \sum_{c \in C} PCI_c \cdot Resid_{m,c,t} \quad (3.5)$$

onde:

- $PMWh$ é uma estimativa do preço de venda da energia. É estimado que o preço de venda da energia, assim como todos os valores em Reais que são utilizados, evoluirá no mesmo ritmo médio de todos os preços da economia, isto é, da inflação geral. Por isso, os valores são mantidos constantes (a Reais de dezembro de 2018) e é usada uma estimativa para as taxas de desconto em termos reais e não nominais;
- M_r é o conjunto de municípios da região de fornecimento representada por r , com sede m_r , ou seja, o subconjunto de M , tais que $S(m) = m_r$;
- $Energia_{m,t}$ é a energia que pode ser obtida com os resíduos do município m no período t ;
- $Efic$ representa a eficiência da usina termelétrica, ou seja, a parcela de energia contida no resíduo que é efetivamente transformada em energia;
- C é o conjunto de culturas consideradas neste estudo: soja, milho, arroz, trigo, feijão, mandioca e algodão. A cana-de-açúcar não foi considerada porque já é bastante utilizada para geração de energia, devido à sinergia da produção de energia com a produção de açúcar e álcool;
- PCI_c é o poder calorífico do resíduo, ou seja, qual o poder de produção de energia térmica de uma determinada massa de resíduo da cultura c ;
- $Resid_{m,c,t}$ é o montante de resíduos a serem tratados, calculado conforme a Equação 3.6. A unidade é tonelada.

$$Resid_{m,c,t} = Prod_{m,c,t} \cdot TbsT_c \cdot Disp_c \quad (3.6)$$

- $Prod_{m,c,t}$ é a produção, em toneladas, da cultura c no município m no ano t ;

- $TbsT_c$ é a relação entre a massa do resíduo seco e a massa do produto colhido da cultura c . Este valor varia para cada cultura;
- $Disp_c$ é o fator que mostra qual parcela da produção de resíduo da cultura c pode ser retirado da área de plantio sem prejudicar as próximas safras, dado que parte dos resíduos é mantida no solo para preservá-lo úmido.

O fluxo que representa o investimento inicial, relativo à construção da usina termelétrica, depende da capacidade da usina. Esta capacidade depende da energia que ela pode gerar dada a produção de resíduos de sua região de fornecimento. Este custo inclui o investimento para se ligar a usina construída ao SIN:

$$Inv_r = Capex \left(\frac{Energia_r}{DispUTE} \cdot \frac{1}{24 \cdot 365} \right) \quad (3.7)$$

onde:

- $Capex$ é uma função que transforma a potência de uma usina termelétrica no seu custo. O valor do investimento por kW, R\$ 3.256,45 vem da literatura, conforme explicado na Seção 2.5, e foi corrigido pelo IPCA a fim de serem usados valores de dezembro de 2018. O custo fixo, de R\$ 4.493.905,00, foi obtido pelo custo de uma usina que tenha uma potência igual ao percentil 5% das potências das usinas existentes no Brasil que utilizam bagaço-de-cana e outros resíduos: 1.38MW. Os dados de potência das usinas existentes no Brasil foi obtido no BIG da Aneel¹. Isso foi feito para acomodar o fato de que existe um custo fixo na construção da usina que não é levado em conta quando calculamos o investimento considerando apenas o valor de R\$/kW como é feito em outros estudos. A função representada pela Equação 3.8 recebe um valor em MWh e retorna um valor em Reais. A função $Capex(Potência)$ segue a fórmula:

$$Capex(Potência) = 4.493.905,00 + 3.256,45 \times Potência \quad (3.8)$$

- $DispUTE$ é 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.

¹http://www2.aneel.gov.br/scg/consulta_empreendimento.asp. Consultado em 21/12/2018

Os fluxos relativos ao custo anual da atividade de aproveitamento em uma região incluem uma parcela referente aos custos de obtenção dos resíduos e uma parcela referente à operação da usina termelétrica (UTE), ou seja, à infraestrutura de conversão do resíduo em energia elétrica. Embora o tempo seja representado no lado esquerdo da equação, os valores são expressos em reais de dezembro de 2018 e a premissa é de que os custos subiram de acordo com a inflação durante a vida útil da usina. Assim, podemos descartar assim o efeito da inflação no tempo do lado direito.

$$\text{Custo}_{r,t} = \text{UTE}_r + \sum_{m \in M_r} \text{Obt}_m \quad (3.9)$$

O custo de obtenção inclui os passos necessários para retirar o resíduo da fazenda onde foi produzido e transportá-lo até a sede da região, onde está a usina termelétrica que vai converter o resíduo em energia elétrica. Ele é descrito pela Equação 3.10.

$$\text{Obt}_m = \sum_{c \in C} (\text{Aquisição} + \text{Prêmio}_c) \cdot \text{Resid}_{m,c} \quad (3.10)$$

e

$$\text{Aquisição} = \text{Colheita} + \text{Carga} + \text{Armaz} + \text{Transp} \cdot \text{Dist}_{m,m_r} \quad (3.11)$$

onde:

- Prêmio_c é o prêmio oferecido ao produtor pelo fornecimento do resíduo. A unidade deste parâmetro é Reais por tonelada. O valor deste parâmetro foi estimado tendo como referência o preço do produto principal da cultura considerada. Como este mercado de venda de resíduos ainda não existe, neste trabalho foram testados cenários com vários casos para avaliação. A unidade é Reais por tonelada;
- Colheita é o custo de se coletar o resíduo e levar até 15km de distância. Serve como uma aproximação do custo necessário para levar os resíduos até um ponto central no município de onde eles podem ser transportados para a sede da região fornecedora. A unidade é Reais por tonelada;
- Carga é o custo de carga e descarga de todo o processo desde a coleta do resíduo na sua origem até a entrega na usina termelétrica. A unidade é Reais por tonelada;

- *Armaz* é o custo de armazenamento. Como o volume da coleta dos resíduos é irregular por conta de questões sazonais e climáticas, o armazenamento é necessário para se conseguir uma produção de energia relativamente constante durante todo ano. A unidade é Reais por tonelada;
- *Transp* é o custo de transporte entre o município de origem do resíduo e o local onde está a usina termelétrica. A unidade é Reais por tonelada por quilômetro;
- $Dist_{m,m_r}$ é a distância entre o município de origem do resíduo e o município sede da região de fornecimento. A unidade é quilômetro.

O custo anual de manutenção da usina é dado por uma porcentagem do investimento inicial (Equação 3.7) para tornar a usina operante:

$$UTE_r = Inv_r \cdot fOpex \quad (3.12)$$

onde *fOpex* define qual o percentual do investimento inicial que representa o custo anual para operação e manutenção da usina.

3.1.3 Cálculo incremental do valor presente (*fitness*)

O cálculo do valor presente de uma solução *S*, como mostrado na Equação 3.2, é a soma do valor presente de todas as regiões definidas pelo conjunto imagem da função *S*. Para calcular o valor presente de cada região *r* de sede m_r , é necessário percorrer dados de cada município *m* tal que $S(m) = m_r$. Este cálculo obriga que todos os municípios que fazem parte do contradomínio de *S* sejam percorridos.

É recorrente, nos algoritmos, a necessidade de calcular o novo valor presente de uma região com a inclusão ou exclusão de apenas um município. Esta necessidade acontece nos algoritmos gulosos usados nas heurísticas citadas na Seção 3.3.1 e no algoritmo de *Hill Climbing* descrito na Seção 3.3.3. Nestes casos, não precisamos recalculamos o valor presente de forma completa; basta calcular diferença de valor presente com a inclusão ou a exclusão de um município *m* na região. No caso da inclusão de um município, o valor presente adicional é dado pela seguinte Equação:

$$VPA_{dic_m} = -Inv_{dic_m} + \sum_{t \in T} \frac{Rec_{m,t}}{(1+i)^t} - \sum_{t \in T} \frac{Obt_{m,t}}{(1+i)^t} \quad (3.13)$$

Os fluxos de receita e despesa são calculados como nas equações 3.4 e 3.10. O fluxo

de investimento é calculado segundo a equação abaixo.

$$\text{InvAdic}_m = \text{CapexAdic}(\text{PotênciaAdicional}) \quad (3.14)$$

Como o cálculo do custo de Capex é estimado por uma regressão linear do tipo $\alpha + \beta x$ cuja variável explicativa é a potência, podemos descartar o intercepto α e estimar o investimento adicional por $\beta \cdot \text{PotênciaAdicional}$. Portanto:

$$\text{CapexAdic}(\text{PotênciaAdicional}) = \beta \cdot \text{PotênciaAdicional} \quad (3.15)$$

onde:

$$\text{PotênciaAdicional} = \frac{\text{Energia}_m}{\text{DispUTE}} \cdot \frac{1}{24 \cdot 365} \quad (3.16)$$

3.2 Valores dos parâmetros e origem dos dados utilizados

Esta Seção apresenta as fontes dos dados utilizados para os cálculos de valor presente das soluções candidatas.

3.2.1 Produção agrícola municipal

A Produção Agrícola Municipal foi baixada do sistema Sidra do IBGE e corresponde ao ano de 2017. A produção anual de todas as culturas utilizadas neste trabalho pode ser consultada usando a interface do sistema². De forma alternativa, é possível refazer exatamente a consulta realizada para execução deste trabalho³. É possível usar uma biblioteca escrita para linguagem R, chamada sidrar⁴ [40], passando para o parâmetro API da função `get_sidra` o valor correspondente a esta consulta⁵. Vale notar que os dados podem ser corrigidos a qualquer momento, mesmo que se refiram a anos passados, como 2017. Os dados utilizados neste trabalho foram atualizados em 13/09/2019, conforme constava

²Link para a interface do sistema: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5457>

³Link para a consulta aos dados usados neste trabalho: <http://api.sidra.ibge.gov.br/values/t/5457/n6/all/v/214/p/last%201/c782/40099,40102,40112,40119,40122,40124,40127>. Consulta realizada em 12/11/2018

⁴<https://cran.r-project.org/web/packages/sidrar/index.html>

⁵Parâmetros: `t/5457/n6/all/v/214/p/last%201/c782/40099,40102,40112,40119,40122,40124,40127`

na página do Sidra. Este dado é referido na Equação 3.6 como $Prod_{m,c,t}$. O crescimento da produção, que é usado nos cenários em que a expansão da produção é considerada, usou as estimativas de crescimento de produção do MAPA [1], conforme foi explicado na Seção 2.2. Como o horizonte de projeção do MAPA não vai até o fim da vida útil de uma usina construída agora, o crescimento do último ano da janela projetada pelo MAPA foi usado para os anos para os quais não havia projeção.

3.2.2 Características específicas dos resíduos das culturas

As características específicas dos resíduos das culturas são:

- Fator de conversão do produto principal em resíduo, usada na Equação 3.6 como $TbsT_c$. A unidade deste fator é tbs/t, ou toneladas de bagaço seco por tonelada de produto principal;
- Fator de disponibilidade do resíduo, usada na Equação 3.6 como $Disp_c$: refere-se à parcela do resíduo que pode ser retirada sem que a qualidade do solo seja prejudicada, pois o resíduo é usado para cobrir o solo entre as safras para manter a sua umidade. Este fator é adimensional;
- Poder calorífico do resíduo, usado na Equação 3.5 como PCI_c : revela quanta energia pode ser extraída de uma quantidade específica de resíduo. A unidade é MJ/t.

Seus valores foram retirados da literatura [3] e estão representados na Tabela 3.1, com as siglas usadas nas Equações deste Capítulo 3.

Tabela 3.1: Características dos resíduos.

Produto	Resíduo	TbsT	Disp	PCI
Algodão	Resíduos de Algodão	1.00	0.4	14.6
Arroz	Casca de Arroz	0.18	0.4	16.0
Arroz	Palha de Arroz	1.55	0.4	16.0
Feijão	Palha de Feijão	1.16	0.4	14.0
Mandioca	Rama de Mandioca	0.65	0.4	16.0
Milho	Palha de Milho	1.68	0.4	17.7
Soja	Palha de Soja	2.30	0.3	14.6
Trigo	Palha de Trigo	2.90	0.4	12.4

3.2.3 Custo de transporte

O custo de transporte entre os municípios foi retirado da tabela de frete implantada pelo governo federal com base na lei 13.703 de 8/8/2018. Esta tabela foi reajustada pela

ANTT através da resolução 5.827, de setembro de 2018⁶. Esta informação é usada na Equação 3.11.

3.2.4 Custos de armazenamento, colheita e carga

Os custos de armazenamento, colheita e carga foram obtidos de acordo com o procedimento explicado na Seção 2.4.

3.2.5 Distâncias entre os municípios

As distâncias entre os municípios foram obtidas a partir da API do Google chamada Distance Matrix. Ela pode ser ativada por um script Python⁷ e retorna a menor distância entre duas coordenadas geográficas através de um meio de transporte especificado. As distâncias foram obtidas entre as sedes dos municípios.

A chamada à API Distance Matrix equivale à pesquisa de rotas que pode ser executada via GoogleMaps⁸. A Figura 3.5 mostra um exemplo de pesquisa de rota por meio de transporte rodoviário entre os municípios de Urânia e Barretos. Assim como a página do GoogleMaps, a API retorna a duração da viagem e a distância em quilômetros. Usamos para este trabalho sempre a distância mais curta entre os municípios.

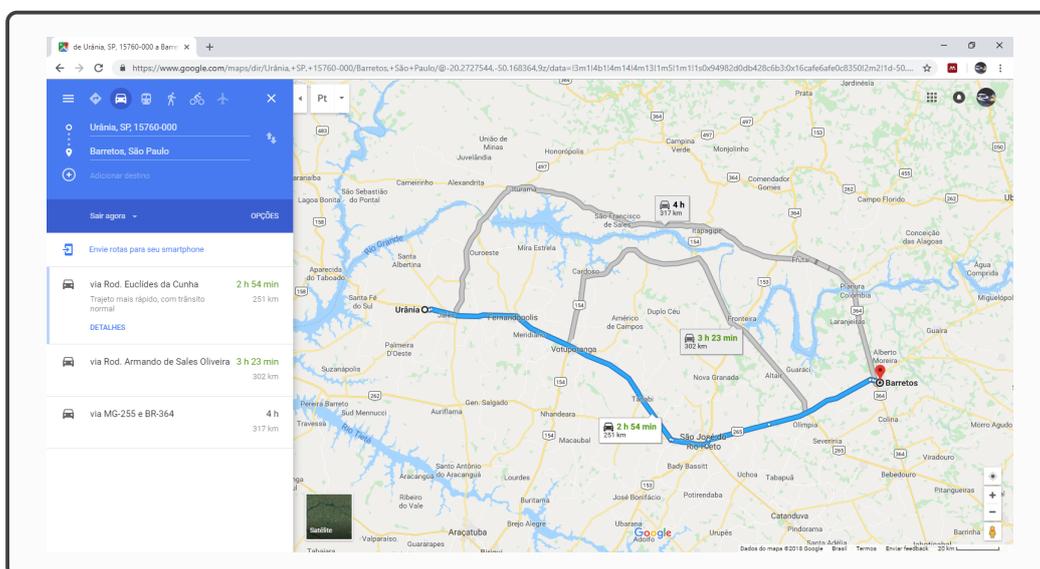


Figura 3.5: Exemplo de uma pesquisa de rota no GoogleMaps, que equivale à API Distance Matrix usada para coletar as distâncias entre municípios neste trabalho.

⁶O site que permite a pesquisa destes custos está disponível no link <https://www.tabelasdefrete.com.br/p/calculo-carreteiro>. Visitado em 13/11/2018

⁷Disponível em <https://github.com/crotman/OtimizacaoBiomassa>

⁸<https://www.google.com/maps>

3.2.6 Preço de venda da energia

Neste trabalho, são utilizados dois cenários de preço de energia. Um dos cenários se refere ao mercado regulado, onde a energia é vendida às distribuidoras de energia via leilões organizados pelo governo. O outro cenário se refere à compensação energética junto ao consumidor final, possibilitada pela resolução 482 da ANEEL.

Para o mercado regulado, foi utilizado o menor preço de um vencedor de fonte de energia similar no último leilão realizado pela CCEE. O último leilão foi o 28º Leilão de Energia Nova A-6, realizado em 31/08/2018. Houve dois vencedores que venderão energia proveniente de bagaço de cana. Um deles vendeu a um preço de R\$ 179,16 e o outro, a R\$ 175,00 por MWh. Para o mercado regulado, fomos conservadores e utilizamos o preço de R\$ 175,00 por MWh. As informações relativas ao leilão usado como referência para este trabalho estão disponíveis no site da CCEE⁹.

Para a venda direta ao consumidor, possibilitada pela resolução 482 da ANEEL, usamos a média da receita, já descontada de impostos, das distribuidoras que atuam em cada uma das UFs usadas nos cenários. O preço foi levantado em consulta direta a especialistas da Empresa de Pesquisa Energética. A receita por MWh levantada para São Paulo foi de R\$ 376,67 e o preço levantado para o Paraná foi de R\$ 450,78 por MWh. Como esta venda é mais arriscada, por haver risco de não se arrematar os consumidores necessários, este preço foi testado com taxas de desconto bem maiores.

3.2.7 Prêmio pago ao produtor

O prêmio pago ao produtor pelo recolhimento do resíduo é parte do custo estimado de obtenção do resíduo e é usado na Equação 3.10, como $Prêmio_c$. Este prêmio é oferecido ao produtor para que seja possível recolher o resíduo na sua propriedade e foi estimado tomando como base o preço do produto principal que gera o resíduo. Como ainda não há um mercado para este tipo de venda de resíduo, consideramos vários cenários para este prêmio, sempre tendo como referência o preço do produto principal, que é conhecido. Esta opção por usar o preço do produto principal como referência para o prêmio é justificada na Seção 2.4. Os preços dos produtos principais foram obtidos no site do Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (Cepea), que é parte do Departamento de Economia, Administração e Sociologia da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq), unidade da Universidade de São Paulo (USP)¹⁰.

⁹Link para o resultado do leilão: https://www.ccee.org.br/ccee/documentos/CCEE_642651

¹⁰Site do Cepea: <https://www.cepea.esalq.usp.br>

3.3 Algoritmos utilizados na otimização

Este estudo implementa a meta-heurística *Iterated Local Search* (ILS) [41] para gerar a função S que leva cada município à sua sede, de acordo com a modelagem proposta na Seção 3.1. Esta meta-heurística usa como soluções iniciais o resultado de algoritmos heurísticos gulosos propostos para este estudo.

Meta-heurísticas podem ser caracterizadas como métodos de solução de problemas que orquestram uma interação entre procedimentos de melhoramento local (algoritmos heurísticos) e estratégias de alto nível a fim de criar um processo capaz de escapar de ótimos locais e realizar uma busca robusta em um espaço de soluções [42].

As buscas meta-heurísticas não percorrem todo espaço de soluções. No caso de problemas como o de que esta dissertação trata, um algoritmo que percorresse todo o espaço de soluções teria complexidade não-polinomial e tornaria-se intratável rapidamente, conforme o escopo do problema crescesse [43]. Afinal, o espaço de soluções do problema de otimização do aproveitamento de resíduos cresce exponencialmente com relação ao número de municípios analisados. As buscas meta-heurísticas são estratégias para percorrer de forma eficiente partes do espaço de soluções em busca da melhor solução possível.

Nem sempre a solução final retornada pela busca vai ser a melhor de todo o espaço, mas a ideia é que ela seja uma solução aceitável e que seja encontrada em um tempo de processamento factível. Apesar de as meta-heurísticas não serem capazes de certificar a otimalidade das soluções encontradas, procedimentos exatos frequentemente são incapazes de achar, em tempo factível, soluções cuja qualidade chegue perto das obtidas pelas meta-heurísticas. Isso acontece particularmente em problemas do mundo real, que atingem altos níveis de complexidade [42].

Os algoritmos heurísticos são estratégias que percorrem o espaço de busca usando um método pré-definido até que encontrem um máximo local. Estes algoritmos servem de base para estratégias de alto nível que, ao agir em interação com estes algoritmos heurísticos, estabelecem um algoritmo meta-heurístico. Os algoritmos heurísticos podem ser divididos em heurísticas construtivas e métodos de busca local ou *Hill Climbing* [44].

Os algoritmos construtivos, também chamados de gulosos, são tipicamente os mais rápidos. Eles geram soluções do zero, adicionando componentes a um conjunto inicialmente vazio. Isso é feito até que uma solução seja completada ou até que algum critério de parada seja atingido. Cada componente adicional da solução é escolhido com o uso de uma estratégia simples, intuitiva e normalmente míope. Por isso, estes algoritmos

são tão rápidos.

Já os algoritmos de busca local costumam gerar soluções melhores que os construtivos [42]. Estes algoritmos partem de uma solução inicial e, de forma iterativa, substituem a solução corrente por uma solução melhor que esteja na região de vizinhança da solução corrente. Na forma mais básica de busca local, também chamada de busca local de melhoramento iterativo [44] ou *Hill Climbing*, cada movimento é feito apenas se umas das soluções vizinhas analisadas é melhor que a solução corrente. O *Hill Climbing*, descrito pelo Algoritmo 6 para quando chega a um ótimo local, isto é, quando nenhuma solução vizinha à solução corrente é melhor que a solução corrente. Uma abordagem muito comum é o uso de soluções encontradas em métodos construtivos como soluções iniciais de métodos de busca local. É essa estratégia que adotamos neste trabalho.

Os detalhes de implementação da meta-heurística *Iterated Local Search* são descritos na Seção 3.3.4. A implementação do *Hill Climbing*, que é a busca local iterada pela ILS, é descrita na Seção 3.3.3. O *Hill Climbing* parte de três tipos de solução inicial diferentes. As heurísticas que produzem as soluções iniciais são descritas na Seção 3.3.1.

As soluções das três heurísticas e as soluções resultantes das perturbações do ILS passam por um pré-processamento antes de serem enviadas ao *Hill Climbing*. Este pré-processamento não modifica as regiões de fornecimento, mas pode mudar a sede destas regiões, de forma que a região tenha a melhor sede possível. Ele é descrito na Seção 3.3.2.

A condição de parada do algoritmo ILS é baseada na quantidade de passos executados durante o algoritmo de *Hill Climbing*.

O valor presente (*fitness* da solução), que é calculado pela função *VPcomNeg*, pode ser menor do que o valor presente real da solução, porque inclui o valor presente das regiões onde este valor é negativo. Na prática essas regiões não seriam aproveitadas em uma utilização real. O cálculo realizado em *VPcomNeg*, portanto, segue uma modificação da Equação 3.2 sem restringir regiões com Valor Presente negativo. O algoritmo utiliza esses valores negativos na sua função objetivo para possibilitar que se desenhe uma trajetória gradual que vá de uma solução com muitas regiões com valor muito negativo para uma solução com menos regiões de valor menos negativo, ou mesmo nenhuma região de valor negativo. Se o algoritmo não considerasse esses valores negativos, qualquer solução com região de valor negativo seria considerada igual. E assim uma solução com valor menos negativo em alguma região seria considerada igual a uma solução com valor muito negativo nesta região. Isso inviabilizaria a trajetória do algoritmo de otimização nestas vizinhanças de regiões com valores negativos em direção a soluções com regiões

de valores positivos ou menos negativos.

O procedimento final é descrito pelo Algoritmo 1. A Figura 3.6 mostra o esquema relativo a este algoritmo.

Algoritmo 1: Algoritmo completo simplificado

```
1: SolucaoInicial ← Heuristica(H1||H2||HRand)
2: SolucaoInicialHC ← EscolheSedes(SolucaoInicial)
3: NumAvaliacoes ← 0
4: SolucaoHC, #AvalHC ← HillClimbing(SolucaoInicialHC)
5: NumAvaliacoes ← NumAvaliacoes + #AvalHC
6: SolucaoFinal ← SolucaoHC
7: while NumAvaliacoes < TotalAvaliacoes do
8:   SolucaoPerturb ← Perturba(SolucaoFinal)
9:   SolucaoPerturbPos ← EscolheSedes(SolucaoPerturb)
10:  SolPerturbPosHC, #AvalHC ← HillClimbing(SolucaoPerturbPos)
11:  NumAvaliacoes ← NumAvaliacoes + #AvalHC
12:  if VPcomNeg(SolPerturbPosHC) > VPcomNeg(SolucaoFinal) then
13:    SolucaoFinal ← SolPerturbPosHC
14:  end if
15: end while
```

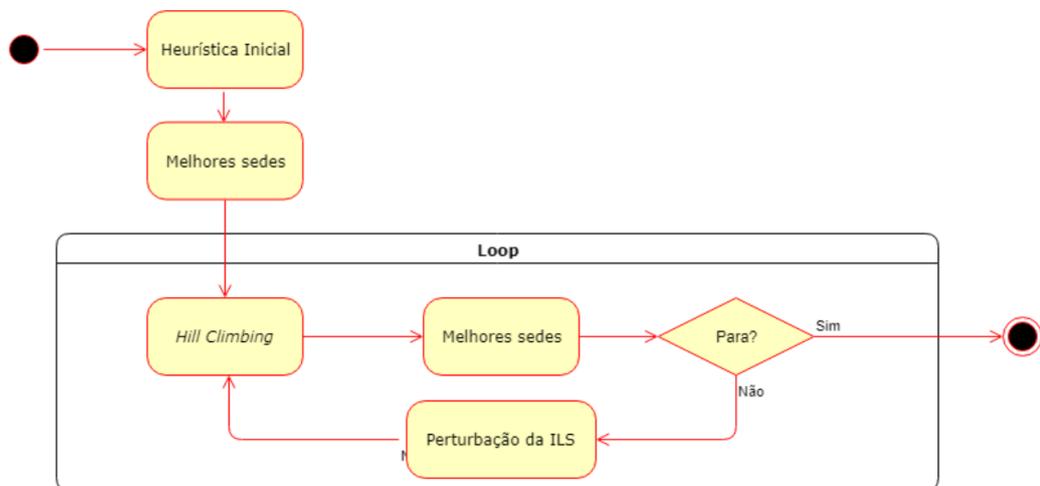


Figura 3.6: Esquema do algoritmo principal

3.3.1 Heurísticas para a solução inicial

O objetivo das heurísticas apresentadas nesta Seção é definir uma solução inicial para o algoritmo de *Iterated Local Search* de forma rápida. Estas heurísticas são algoritmos construtivos que geram soluções rápidas. Os algoritmos construtivos, também chamados de gulosos, são tipicamente os mais rápidos do que os algoritmos de busca. Eles geram soluções do zero adicionando componentes a um conjunto inicialmente vazio. Isso é feito até que uma solução seja completada ou até que algum critério de parada seja atingido. Cada componente adicional da solução é escolhido com o uso de uma estratégia simples, intuitiva e normalmente míope. Por isso estes algoritmos são tão rápidos.

A solução inicial gerada pelas heurísticas é chamada de S_0 .

3.3.1.1 Heurística H1

Na heurística H1, descrita no Algoritmo 2, todos os municípios contidos no território escopo são inicialmente atribuídos à região nula: $S_0(m) = m_{\text{nulo}}, \forall m \in M$. Os municípios são ordenados decrescentemente pela quantidade de energia potencial a ser gerada dada a quantidade de resíduo produzido em um ano (Equação 3.5) e são dispostos em uma fila.

A cada iteração, o primeiro município m_1 é retirado da fila e é criada uma nova região da qual ele é sede da usina a ser construída, ou seja, $S_0(m_1) = m_1$. Depois de retirar m_1 da fila, o algoritmo retira da fila todos os municípios m que dariam valor presente positivo à região recém-criada, adicionando-os a esta região, isto é, estabelecendo que $s(m) = m_1$. Para definir se o município daria valor presente positivo à região cuja sede é m_1 , a heurística usa a Equação 3.13. Os municípios que não dariam lucro à região continuam na fila para as próximas iterações.

A heurística para no momento em que a fila de municípios se torna vazia.

3.3.1.2 Heurística H2

Na heurística H2, descrita pelo Algoritmo 3, os municípios são ordenados decrescentemente pela quantidade de resíduo produzido em um ano. Cada município é analisado nesta ordem. A cada município m , determina-se a qual subconjunto de municípios existente o município m contribuiria mais em termos de valor presente. Analisa-se também o valor presente que este município m teria formando uma região sozinho. Se o município m gera valor presente maior sozinho, uma nova região é criada e ele é a sede desta região. Se não, ele é alocado na região onde ele daria maior valor presente adicional. Se ele não

Algoritmo 2: Heurística H1

```
1: AtribuiTodosRegiãoNula(Municipios)
2: MunicipiosOrdenados ← OrdenaDecresc(Municipios, Producao)
3: while TemElementos(MunicipiosOrdenados) do
4:   Msede ← Pop(MunicipiosOrdenados)
5:   Regiao ← Adiciona(Msede, NovaRegiao)
6:   ViraSede(Msede, Regiao)
7:   Adiciona(Regiao, Regioes)
8:   while ProximoFila(MunicipiosOrdenados) ≠ FimDaFila do
9:     Mcandidato ← AnalisaProximoFila(MunicipiosOrdenados)
10:    VPAdic ← CalculaVPAdic(Mcandidato, Regiao)
11:    if VPAdic > 0 then
12:      Adiciona(Mcandidato, Regiao)
13:      Pop(MunicipiosOrdenados)
14:    end if
15:  end while
16: end while
```

dá valor presente adicional a nenhuma região existente e nem sozinho, ele é mandado para uma região sem usinas.

3.3.1.3 Heurística HRand

Esta heurística, que chamamos de HRand, é uma heurística aleatória. Ela é descrita pelo Algoritmo 4. Primeiro, é definido o número de sedes e, por consequência, de usinas e regiões de fornecimento desta solução S_0 . Este número é calculado como $\left\lfloor \frac{\text{Municípios}}{50} \right\rfloor$. Este número foi definido empiricamente pois resulta em regiões de tamanho similar aos primeiros resultados das heurísticas H1 e H2. Então, um município é sorteado para ser sede de cada região. A partir daí, os municípios restantes são atribuídos a cada região de forma aleatória, com chances iguais de ir para cada região.

3.3.2 Processamento após heurísticas e perturbações do ILS

As soluções retornadas pelas três heurísticas e as soluções retornadas pelas perturbações do ILS são processadas pelo Algoritmo 5, que define, para cada região, qual a sede que deixaria a região com o maior valor presente. Assim, podemos garantir que a configuração que vai ser tratada pelo *Hill Climbing* terá, de partida, a melhor sede possível para cada região.

Algoritmo 3: Heurística H2

```
1: MunicipiosOrdenados  $\leftarrow$  OrdenaDecresc(Municipios, Producao)
2: while TemElementos(MunicipiosOrdenados) do
3:   M  $\leftarrow$  Pop(MunicipiosOrdenados)
4:   MaxVPAdic  $\leftarrow$  0
5:   RegiaoComVPMMax  $\leftarrow$  RegiaoVazia
6:   for all R  $\leftarrow$  Regioes do
7:     VPAdic  $\leftarrow$  CalculaVPAdic( $M_{\text{candidato}}$ , R)
8:     if VPAdic > MaxVPAdic then
9:       MaxVPAdic  $\leftarrow$  VPAdic
10:      RegiaoComVPAdicMax  $\leftarrow$  R
11:    end if
12:  end for
13:  Rsozinho  $\leftarrow$  CriaRegiãoComSede(Sede = M)
14:  VPSozinho  $\leftarrow$  VP(Rsozinho)
15:  if Max(VPAdic, VPSozinho) < 0 then
16:    Adiciona(M, RegiaoNula)
17:  else
18:    if VPAdic > VPSozinho then
19:      Adiciona(M, RegiaoComVPAdicMax)
20:    else
21:      Adiciona(Rsozinho, Regioes)
22:    end if
23:  end if
24: end while
```

Algoritmo 4: Heurística HRand

```
1: QtdRegioes  $\leftarrow$  Floor( $\frac{\text{Count}(\text{Municipios})}{50}$ )
2: for i = 1 to QtdRegioes do
3:   M  $\leftarrow$  SorteiaERetira(Municipios)
4:   R  $\leftarrow$  CriaRegiãoComSede(Sede = M)
5:   Adiciona(R, Regiões)
6: end for
7: while TemElementos(Municipios) do
8:   M  $\leftarrow$  SorteiaERetira(Municipios)
9:   R  $\leftarrow$  Sorteia(Regiões)
10:  Adiciona(M, R)
11: end while
```

Algoritmo 5: Processamento melhores sedes

```
1: for all R  $\leftarrow$  Regioes do
2:   MelhorVP  $\leftarrow$  CalculaVP(R)
3:   MelhorSede  $\leftarrow$  Sede(R)
4:   for all M  $\leftarrow$  Municipios(R) do
5:     RSedeCandidata  $\leftarrow$  MudaSede(M, R)
6:     VPcandidata  $\leftarrow$  CalculaVP(RSedeCandidata)
7:     if VPcandidata > MelhorVP then
8:       MelhorVP  $\leftarrow$  VPcandidata
9:       MelhorSede  $\leftarrow$  M
10:    end if
11:  end for
12:  TrocaSede(MelhorSede, R)
13: end for
```

3.3.3 Hill Climbing

O algoritmo de *Hill Climbing* utilizado tem a seguinte região de vizinhança: cada município de cada região pode ir para qualquer outra região (inclusive a região que não tem sede) ou para uma nova região, inicialmente vazia. Se a região for vazia, o município que se movimentou vira a sede da região; se a região já existia, um teste é realizado para saber qual a melhor sede da região. Todos os vizinhos são testados para descobrir qual seria o maior ganho em termos de valor presente. O *Hill Climbing* é descrito no Algoritmo 6.

Algoritmo 6: *Hill Climbing*

```
1: S  $\leftarrow$  SolucaoInicial
2: while  $\exists S' \in$  Vizinhas(S) | Fitness(S') > Fitness(S) do
3:   S  $\leftarrow$  EscolheMelhorVizinho(Vizinhas(S))
4: end while
```

A cada passo da busca, quando há uma troca vantajosa de município para uma nova sede, a solução passa pelo processamento descrito na Seção 3.3.2, pois a movimentação pode ter deixado alguma região em uma situação em que sua sede não é a melhor possível.

As Figuras 3.7 e 3.8 representam soluções intermediárias, a título de exemplo, do algoritmo. O município de Itararé, que estava na região sediada por Itaí, poderia agregar mais valor presente se estivesse fornecendo resíduos agrícolas para Itapeva. Além disso, essa é a troca mais vantajosa de todas entre municípios e sedes. Por isso, o município passa de uma região a outra.

Como a cada passo da busca local as sedes das regiões são reavaliadas, após algumas das trocas as sedes das regiões podem mudar. No caso das soluções intermediárias mos-

tradas nas Figuras 3.9 e 3.10 o município de Apiaí muda de sede. Após sua mudança de sede, a região original já não tem Itaí como sua melhor sede, pois um dos municípios produtores ao sul saiu da região. Assim, um município mais ao norte, Piraju, passa a ser a melhor sede para a região.

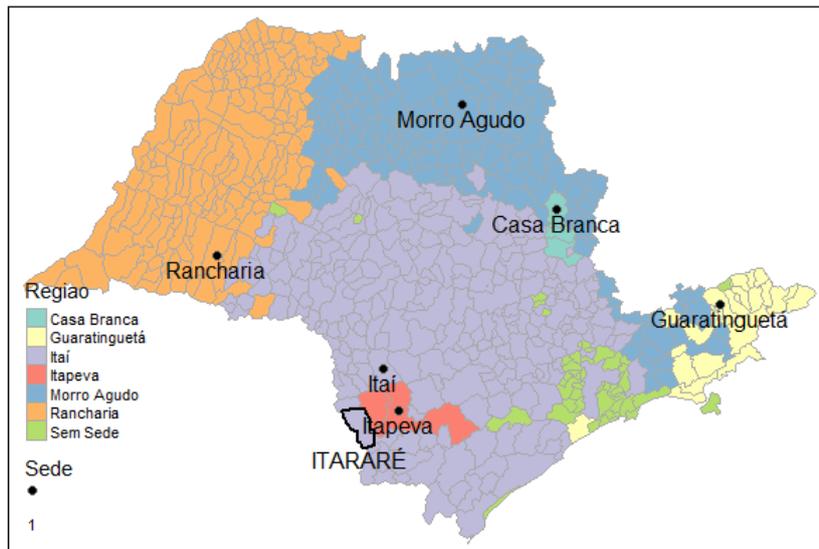


Figura 3.7: Solução intermediária do algoritmo de *Hill Climbing*. O município em destaque, Itararé, vai mudar de região na próxima iteração do algoritmo, transformando esta solução na solução da Figura 3.8

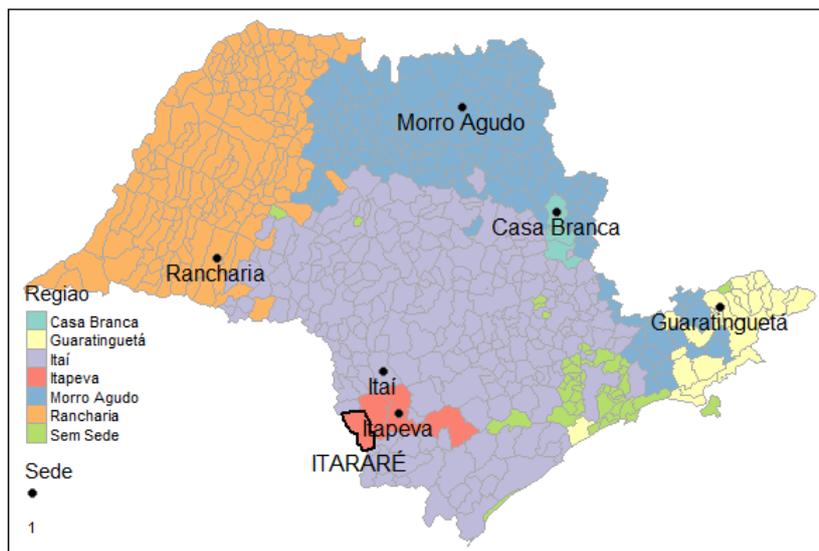


Figura 3.8: Solução intermediária do algoritmo de *Hill Climbing*. O município em destaque, Itararé, mudou de região na última iteração do algoritmo, transformando a solução da Figura 3.7 nesta solução

3.3.4 *Iterated Local Search*

Ao descrever a meta-heurística *Iterated Local Search*, Lourenço, Martin e Stützle [41] lembram que o ideal para um algoritmo meta-heurístico é que ele não precise de nenhum conhecimento específico a respeito do problema a ser resolvido. A *Iterated Local Search* se encaixa nessa característica.

Uma heurística simples como a busca local ou *Hill Climbing* leva uma solução inicial s a uma solução s^* de forma determinística. Não existe nenhuma garantia de que s^* é um ótimo global, mas o conjunto de ótimos locais possui um *fitness* melhor em média e menor em variância do que o conjunto de todas as soluções.

Uma estratégia simples para tentar encontrar um ótimo global é selecionar de forma aleatória novas soluções iniciais para a heurística de busca local a fim de escolher, ao fim do processo, qual o melhor ótimo local encontrado. Entretanto, essa estratégia de reinícios aleatórios não reutiliza nenhum conhecimento a respeito das soluções já encontradas, possuindo, portanto, diversidade alta e intensificação baixa. A ILS gera uma nova solução inicial para a heurística de busca local a partir do melhor ótimo local já encontrado. Essa transformação é realizada através de uma perturbação executada na melhor

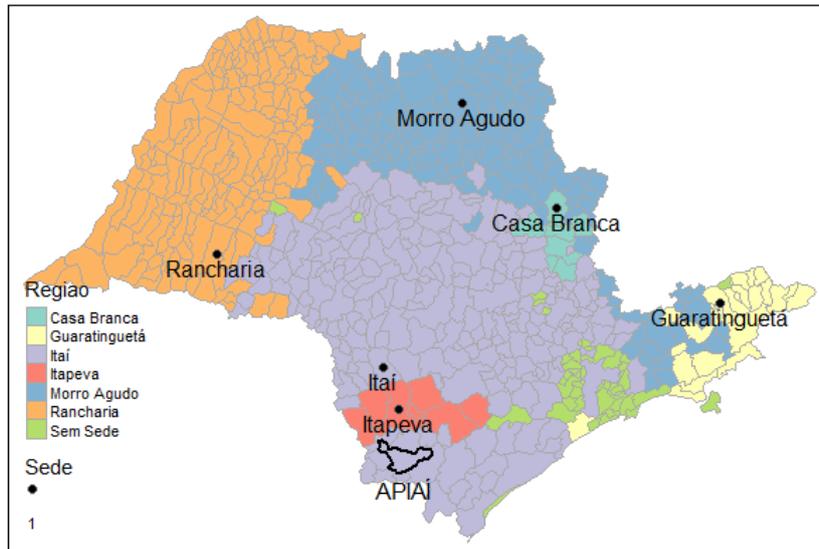


Figura 3.9: Solução intermediária do algoritmo de *Hill Climbing*. O município em destaque, Apiaí, vai mudar de região na próxima iteração do algoritmo. Além disso, a sede de uma regiões vai ser alterada de Itai para Piraju, transformando esta solução na solução da Figura 3.10

solução corrente. O impacto desta perturbação pode ser regulado de forma a balancear diversificação e intensificação. Uma perturbação muito leve significa maior intensificação e menor diversificação e vice-versa. A perturbação executada não é determinística para que se minimize a chance de ciclos, isto é, a chance de voltar ao mesmo ótimo local já visitado. O algoritmo genérico da ILS é descrito pelo Algoritmo 7:

Algoritmo 7: *Iterated Local Search*

```

 $S_0 \leftarrow \text{GeraSolucaoInicial}()$ 
 $S^* \leftarrow \text{BuscaLocal}(S_0)$ 
while not(CondiçãoParada) do
     $S' \leftarrow \text{Perturba}(S^*, \text{História})$ 
     $S^{*'} \leftarrow \text{BuscaLocal}(S')$ 
     $S^* \leftarrow \text{CritérioAceitação}(S^*, S^{*'}, \text{História})$ 
end while

```

O algoritmo de *Iterated Local Search* utilizado nesta Dissertação caracteriza-se pelo tipo de perturbação que é aplicada no algoritmo de *Hill Climbing*. A perturbação aplicada tem dois movimentos:

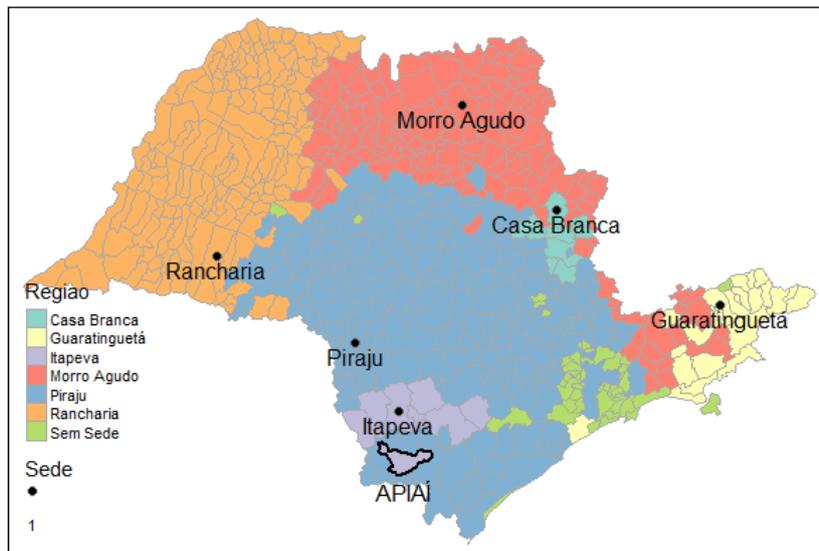


Figura 3.10: Solução intermediária do algoritmo de *Hill Climbing*. O município em destaque, Apiaí, mudou de região na última iteração do algoritmo. Além disso, a sede de uma regiões foi alterada de Itaí para Piraju, transformando a solução da Figura 3.9 nesta solução

- Cada município tem uma probabilidade $P_{\text{Existente}}$ de mudar de região e todas as regiões têm uma chance igual de receber o município movimentado;
- Cada município tem uma probabilidade P_{Nova} de passar a formar uma nova região sozinho, virando sede de uma região que contém apenas ele mesmo.

Vários valores de $P_{\text{Existente}}$ e P_{Nova} foram testados. A discussão sobre estes testes está no Capítulo 4.

É importante lembrar que, após a perturbação e antes de ser submetida ao *Hill Climbing*, a solução perturbada passa pelo processamento descrito na Seção 3.3.2.

A Figura 3.11 mostra uma solução que saiu de uma iteração completa de *Hill Climbing*, ou seja, uma solução que é um máximo local. Já a Figura 3.12 mostra a solução da Figura 3.11 após passar pela perturbação. Esta solução perturbada vai ser a solução inicial de uma nova iteração de *Hill Climbing*.

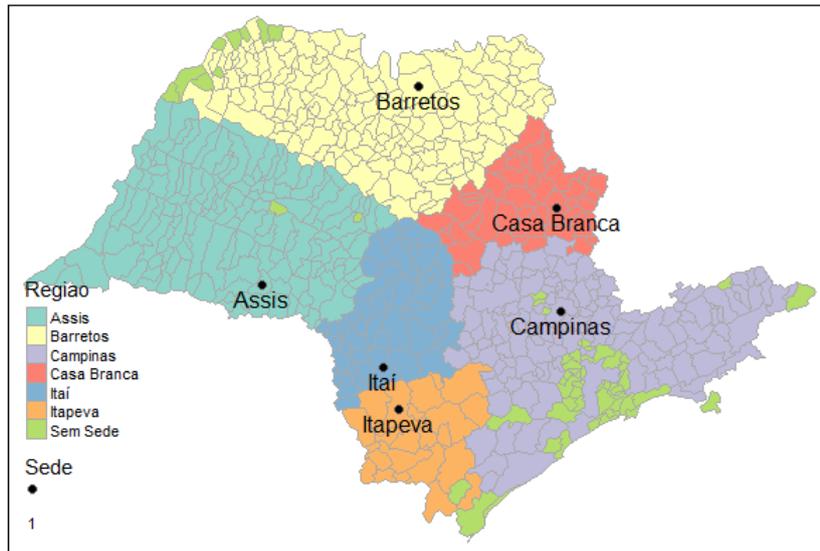


Figura 3.11: Solução final de uma iteração do algoritmo de *Hill Climbing*.

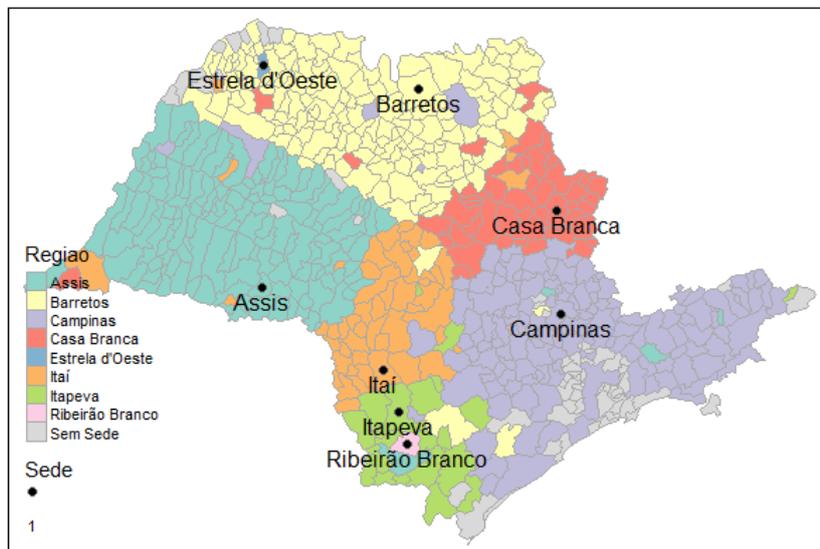


Figura 3.12: Solução mostrada na Figura 3.11 após o procedimento de perturbação

3.4 Ameaças à validade

A proposta de solução apresentada baseia-se em um modelo de precificação da atividade de aproveitamento de resíduos para geração de energia elétrica que, como todo modelo, é uma simplificação da realidade baseada em premissas. A seguir, são listadas algumas dessas premissas e são descritos os motivos por que as premissas podem ser consideradas válidas e o porquê de elas não comprometerem a validade da pesquisa:

- A taxa de desconto é uma constante do modelo durante o processo de otimização. Esta premissa é tratada pela criação de múltiplos cenários com taxas de desconto distintas, que permitem a análise da otimização sob várias condições de taxas. Mais detalhes sobre a criação dos cenários pode ser encontrada na Seção 4.1;
- Os preços de venda de eletricidade são mantidos constantes. Temos dois cenários de preço de venda de energia. O primeiro emula o preço de venda em leilão, que tem demanda garantida, pois o leilão é feito para venda às distribuidoras em um contrato de longo prazo. Este contrato garante acesso a financiamento pelo BNDES a taxas baixas. Assim, a avaliação destes cenários de preço é feita a taxas de desconto mais baixas. No segundo cenário de preço, usamos a hipótese de que a energia é vendida ao consumidor final. Devido ao maior risco para se encontrar demanda para este tipo de venda, este cenário é avaliado com taxas de desconto bem mais altas. Mais detalhes sobre a criação dos cenários pode ser encontrada na Seção 4.1;
- Adotamos a premissa de que as usinas serão construídas do ponto zero. Porém, é possível utilizar usinas de açúcar e álcool, que implementam a cogeração de energia elétrica, para processar os demais resíduos agrícolas. Seria possível arrendar estas usinas durante a entressafra da cana-de-açúcar por um custo menor do que o necessário para construir usinas suficientes para dar conta dos resíduos das culturas que utilizamos. Esta possibilidade fica como sugestão para próximos trabalhos. De qualquer forma, trata-se de uma premissa conservadora.

3.5 Considerações finais

Este capítulo apresentou uma proposta de solução para o problema de avaliar a viabilidade do aproveitamento de resíduos agrícolas para geração de eletricidade. Foram apresentadas as equações componentes do modelo, seus parâmetros, os valores que podem ser assumidos por estes parâmetros, os algoritmos que podem ser utilizados para

resolver o problema de otimização do modelo e as ameaças à validade do modelo em virtude das premissas simplificadoras que este assume. No próximo capítulo, será analisada a capacidade dos algoritmos aqui apresentados encontrarem boas soluções para o problema.

4. Resultados

Este capítulo discute os resultados encontrados pela aplicação do modelo descrito no Capítulo 3 em diversos cenários. A Seção 4.1 enumera os cenários utilizados na análise. A Seção 4.2 discute as escolhas de parametrização do algoritmo. Com os cenários e a parametrização definidos, todos os cenários foram executados com a parametrização escolhida. Os resultados destas execuções do modelo são discutidas na Seção 4.3.

4.1 Cenários

A análise da economicidade foi realizada levando em conta 432 cenários diferentes. Estes cenários são uma combinação dos seguintes conjuntos de atributos:

- duas unidades federativas;
- duas formas de estimar a expansão da produção agrícola;
- dois tipos de preço de venda de energia;
- nove taxas de desconto dos fluxos de caixa, definidos de forma diferente para cada tipo de preço;
- seis níveis de prêmio oferecido ao produtor agrícola.

As Unidades Federativas escolhidas para este estudo foram São Paulo e Paraná. São Paulo possui 645 municípios e o Paraná, 399. O Estado de São Paulo foi escolhido por sua importância econômica e pela relevância de sua produção agrícola. O Estado do Paraná foi escolhido pela grande densidade de produção agrícola das culturas tratadas neste trabalho, como é possível perceber pela densidade energética dos resíduos produzidos nesta Unidade Federativa mostrada na Figura 2.2.

Foram criados cenários com duas formas de estimar a produção agrícola: um cenário sem a expansão da produção e um cenário com a expansão. No cenário sem expansão, para todos os efeitos do modelo a produção agrícola permanece igual à produção de 2017. Neste caso, a capacidade das usinas é calculada de forma a ser suficiente para dar conta da produção agrícola de 2017 e toda produção adicional é desconsiderada pelo modelo. No cenário com expansão, o crescimento da produção agrícola é usado para geração de energia. Neste caso, a capacidade das usinas é calculada de forma a fazer frente à maior produção em cada município da região de fornecimento durante a vida útil da usina. A escolha entre os dois cenários implica em um *trade-off*: no cenário sem expansão, a geração de energia, e conseqüentemente a receita, é menor, mas o custo das usinas também é menor; no cenário com expansão, toda a produção do período durante a vida útil é usada, mas como a capacidade das usinas é calculada levando em conta o pico de produção, no início da vida útil existe capacidade ociosa.

Os tipos de preço de venda de energia utilizados são dois: preço de venda no leilão e preço da compensação energética sob o regime da Resolução 482. Estas modalidades de preço foram explicadas em detalhe na Seção 3.2.6.

Foram criados nove cenários para a taxa de desconto dos fluxos de caixa. O método usado neste trabalho para avaliação da economicidade da atividade de geração de energia a partir da biomassa residual é baseado na avaliação de ativos a partir da abordagem dos fluxos de caixa descontados. O valor presente de cada configuração possível de aproveitamento é usado como *fitness*, ou seja, baliza o processo de otimização que é proposto como solução nesta Dissertação.

A abordagem de fluxos de caixa descontados usa estimativas a respeito dos fluxos de caixa futuros gerados pelo ativo. O valor presente de um ativo extraído a partir desta abordagem não pode ser considerado totalmente preciso. As fontes de incerteza desta estimativa são de dois tipos: incertezas de estimação (do ato de se estimar) e incertezas reais. As incertezas de estimação são falhas na modelagem, falhas no momento de se transformar informação bruta em entradas do modelo e falhas na construção do modelo. Já as incertezas reais podem ser divididas em incertezas específicas do ativo e incertezas macroeconômicas. As incertezas do ativo são relacionadas ao desempenho da atividade econômica que utiliza o ativo. As incertezas macroeconômicas têm como fonte acontecimentos como variações nas taxas de juros e câmbio [45].

Várias respostas podem ser dadas a estas incertezas, algumas saudáveis e outras, não. Dentre as saudáveis, segundo Damoradan, está a construção de melhores modelos, que capturem uma parcela maior da informação disponível; intervalos de confiança para as esti-

mativas, que podem vir de simulações ou do uso de múltiplos cenários e declarações probabilísticas a respeito da estimativa. Dentre as respostas que não são saudáveis é possível citar o ato de passar a responsabilidade para terceiros, aceitando passivamente números de outros analistas. Outra resposta que não é saudável é cair na tentação de usar métodos simplificados de avaliação, como múltiplos, análises gráficas e outros tipos de avaliação que não requerem premissas explícitas sobre o futuro. Apesar de ser possível mitigar as incertezas de estimação, não é possível fazer muito a respeito das incertezas reais a não ser tratar como um risco e inseri-la na taxa de desconto. Em geral, os analistas focam em construir o modelo que descreve da melhor forma possível o ativo e evitam trazer suas visões a respeito das variáveis macroeconômicas.

Outro ponto a ser considerado é que o grau de compreensão de um modelo de avaliação é inversamente proporcional ao número de entradas necessárias [45]. Modelos de avaliação mais simples são melhores que os mais complexos, pois o investidor tem dificuldade de lidar com muitas premissas ao mesmo tempo: existem limitações cognitivas que impedem uma boa análise quando há premissas demais [46–49]. Além disso, cada indivíduo tem uma percepção diferente do grau de risco associado a um mesmo investimento, o que se reflete na taxa de desconto demandada por cada um deles [50].

Considerando a proposição de Damoradan de incluir as incertezas reais (as específicas do ativo e as macroeconômicas) na taxa de desconto, a importância de se manter um modelo avaliação de ativo parcimonioso e as diferentes percepções de risco de cada indivíduos, foram criados vários cenários de taxas de desconto. Como as duas formas de remunerar a energia, leilão ou compensação, apresentam níveis de risco inerentes ao negócio diferente, foram criados cenários diferentes para cada tipo de preço de energia. Para a venda de energia no leilão, o risco de demanda e de calote é praticamente nulo, pois a contraparte é um *pool* de distribuidoras. Neste caso, os nove cenários da taxa de desconto variam entre 7% e 15%, com 1% de incremento na taxa entre os cenários. Por outro lado, no caso da compensação energética sob as condições da Resolução 482, a contraparte é um conjunto pulverizado de consumidores. Neste caso, a taxa de desconto varia de 15% a 35%, com incremento de 2,5% entre os cenários.

A taxa de desconto usada é a taxa real, ou seja, descontada a inflação. Isso permite que usemos os fluxos de caixa sempre a valores de dezembro de 2018 desconsiderando os efeitos da inflação futura. A premissa que fica implícita no uso da taxa real é que todas as receitas e todos custos considerados variam com a inflação: preço de venda da energia, custos por tonelada de armazenamento, colheita e carga e custo por tonelada-quilômetro do transporte. Esta premissa é verossímil porque a inflação é exatamente a média do aumento dos preços da economia. Se não há nenhuma razão para estimar que estes custos

ou as receitas vão subir de forma diferente dos outros preços da economia, a correção mais adequada é a inflação mesmo.

Outra variável para a qual foram definidos cenários variados foi o prêmio ao produtor do resíduo. Ainda não existe um mercado de venda de resíduos agrícolas. Por isso, é difícil determinar um só preço que seja factível. Na dissertação de Oliveira [4], conforme foi mencionado na Seção 2.4, este prêmio é definido como 7,5% do custo logístico do resíduo. Neste trabalho, é apresentada uma abordagem diferente: o prêmio é definido tendo como referência o preço do agrícola produto principal, cujo cultivo leva à existência do resíduo. Esta abordagem foi detalhada na Seção 3.1. Como este mercado ainda não está consolidado, a opção foi avaliar seis cenários: 1%, 2,5%, 5%, 7,5%, 10% e 25%.

A combinação destes atributos levou à criação de $2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 9 \cdot 6 = 432$ cenários, que foram avaliados nesta Dissertação. A ferramenta criada neste trabalho está disponível para uso, possibilitando a criação e avaliação de novos cenários, caso um potencial investidor ou um analista do setor esteja interessado em testar novos patamares dos atributos. A descrição de como usar a ferramenta está no Apêndice A desta Dissertação.

4.2 Escolha da parametrização e das heurísticas

Esta Seção descreve como foi escolhida a parametrização do algoritmo de otimização usado neste trabalho para a avaliação dos 432 cenários definidos na Seção 4.1. Na Seção 4.2.1 é mostrada a decisão a respeito da intensidade da perturbação aplicada pela meta-heurística de *Iterated Local Search* a cada solução encontrada pela heurística de *Hill Climbing*. Na Seção 4.2.3 é discutida a quantidade de iterações usadas no algoritmo. A escolha da heurística usada para gerar a solução inicial do algoritmo de *Hill Climbing* é mostrada na Seção 4.2.2.

4.2.1 Escolha do grau de perturbação da ILS

Meta-heurísticas podem ser caracterizadas como métodos de solução de problemas que orquestram uma interação entre procedimentos de melhoramento local (algoritmos heurísticos) e estratégias de alto nível, a fim de criar um processo capaz de escapar de ótimos locais e realizar uma busca robusta em um espaço de soluções [42]. As buscas meta-heurísticas não percorrem todo espaço de soluções. No caso de problemas como o de que esta Dissertação trata, um algoritmo que percorresse todo o espaço de soluções teria complexidade não-polinomial e tornaria-se intratável rapidamente, conforme o escopo

do problema crescesse [43]. Os algoritmos heurísticos são estratégias que percorrem o espaço de busca usando um método pré-definido até que encontrem um máximo local. Estes algoritmos servem de base para estratégias de alto nível que, ao agir em interação com estes algoritmos heurísticos, estabelecem um algoritmo meta-heurístico.

No caso deste trabalho, o procedimento de melhoramento local é um algoritmo de *Hill Climbing*, descrito na Seção 3.3.3. Já a meta-heurística que orquestra a operação do *Hill Climbing* é o algoritmo de *Iterated Local Search*, apresentado na Seção 3.3.4. A cada solução gerada pelo *Hill Climbing*, uma perturbação é aplicada a ela. O grau desta perturbação define a escolha do algoritmo entre diversificação e intensificação. O termo diversificação se refere à exploração ampla do espaço de soluções, enquanto intensificação se refere à exploração de conhecimento de busca acumulado sobre a instância corrente do problema. Uma perturbação muito leve significa maior intensificação e menor diversificação e vice-versa. A perturbação executada não é determinística, a fim de que se minimize a chance de ciclos, isto é, a chance de voltar ao mesmo ótimo local já visitado.

Dois parâmetros definem o grau de perturbação aplicado a uma solução do algoritmo no passo 8 do Algoritmo 1: a probabilidade de um município mudar da sua região de fornecimento para uma outra já existente na solução, $P_{\text{Existente}}$, e a probabilidade de um município sair de sua região de fornecimento para uma nova região de fornecimento na qual ele é o único município, P_{Nova} . Quanto maiores os valores de cada um destes parâmetros, maior o grau de perturbação da solução, ou seja, mais a perturbação altera a melhor solução encontrada. Quanto maior a perturbação, mais diferente a nova solução inicial da próxima iteração de *Hill Climbing* será com relação à melhor solução já encontrada. Portanto, quando maiores cada uma das probabilidades $P_{\text{Existente}}$ e P_{Nova} forem menor a intensificação e maior a diversificação. Foram testados diversos valores para os parâmetros $P_{\text{Existente}}$ e P_{Nova} . Os valores testados são apresentados na tabela 4.1. Um valor p de $P_{\text{Existente}}$ significa que cada município da melhor solução encontrada tem probabilidade p de ser movido para uma outra região de fornecimento já existente na nova solução inicial da próxima iteração do *Hill Climbing*. Já um valor p de P_{Nova} significa que cada município tem probabilidade p de ser movido para uma região própria, nova, da qual ele é sede e único município numa nova solução inicial da próxima iteração de *Hill Climbing*.

Todos estes conjuntos de parâmetros foram testados com dois dos cenários descritos na Seção 4.1. O Cenário 1 é mais desafiador e o Cenário 2 é mais favorável. O Cenário 1 tem como território escopo São Paulo, que possui densidade de produção agrícola dos produtos analisados menor que a do Paraná; preço de venda igual ao preço de leilão; prêmio ao produtor de 1% do preço de mercado do produto principal; taxa de desconto

de 7% reais ao ano; e considera a expansão da produção agrícola. O Cenário 2 tem como território escopo Paraná, que possui densidade de produção agrícola dos produtos analisados maior do que a de São Paulo; preço da energia igual ao preço sob a Resolução 482; prêmio ao produtor de 1% do preço de mercado do produto principal; taxa de desconto de 15% ao ano; e considera a expansão da produção agrícola.

Pelo componente aleatório presente na perturbação, cada uma das combinações de parametrizações com cenários foi rodada 10 vezes, possibilitando a análise de pelo menos 30 execuções com o valor de cada parâmetro.

	P_Existente	P_Nova
1	1/5	1/25
2	1/5	1/50
3	1/5	1/75
4	1/10	1/25
5	1/10	1/50
6	1/10	1/75
7	1/15	1/25
8	1/15	1/50
9	1/15	1/75
10	1/20	1/25
11	1/20	1/50
12	1/20	1/75

Tabela 4.1: Parâmetros de perturbação da *Iterated Local Search* avaliados.

A Figura 4.1 mostra a análise realizada para o parâmetro P_Existente. É possível observar que no Cenário 2, mais favorável, há uma tendência de que o resultado da otimização seja pior para perturbações mais agressivas. O teste de Kruskal-Wallis [51] para o parâmetro P_Existente mostra que há diferenças significativas. Um teste *post-hoc* de Mann-Whitney [52] com correção de Bonferroni [53] mostra que as diferenças significativas ocorrem entre os seguintes pares de valores do parâmetro: 1/5 e 1/10 ($p\text{-value} = 4,8e-08$), 1/5 e 1/15, ($p\text{-value} = 2,9e-09$), 1/5 e 1/20 ($p\text{-value} = 3,0e-10$) e 1/10 e 1/20 ($p\text{-value} = 0,0002$). Não foi encontrada diferença significativa entre 1/10 e 1/15 e nem entre 1/15 e 1/20. É possível concluir que quanto menor o valor de P_Existente, melhores serão os resultados encontrados pelo processo de otimização no Cenário 2. No Cenário 1, esta tendência não aparece. O teste de Kruskal-Wallis resultou em um $p\text{-value}$ de 0,8532 para o parâmetro P_Existente, não indicando diferenças significativas entre os pares de valores que podem ser assumidos pelo parâmetro.

A Figura 4.2 mostra a análise realizada para o parâmetro P_Nova. É possível observar que no Cenário 1, mais desafiador, há uma tendência de que o resultado da otimização piore para perturbações mais agressivas. O teste de Kruskal-Wallis para o parâmetro

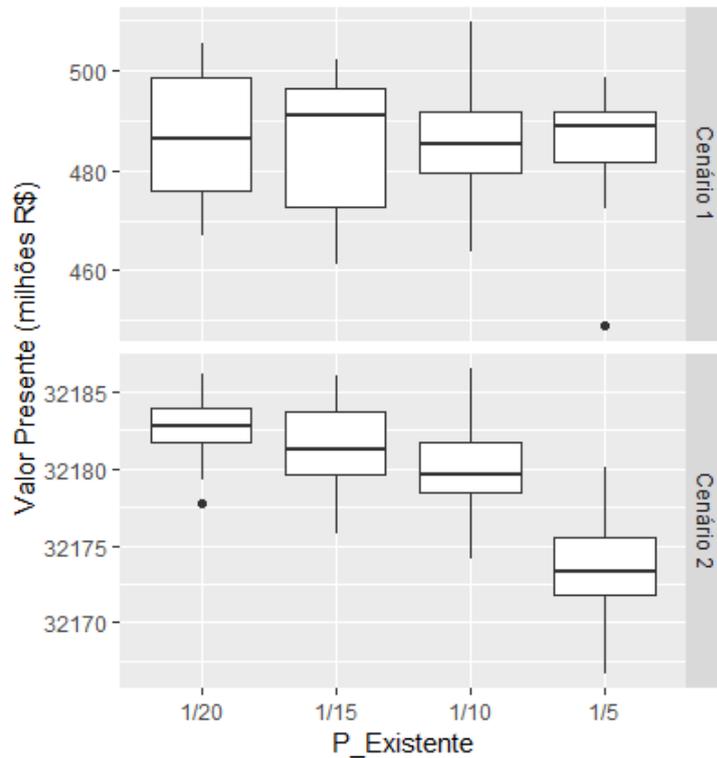


Figura 4.1: Avaliação do parâmetro P_Existente para dois cenários. Quanto maior o valor do parâmetro, maior o impacto da perturbação. Os resultados mostram que valores menores do parâmetro apresentam melhor desempenho no Cenário 2, com diferenças estatisticamente significativas para alguns pares de valores. No Cenário 1, não há diferença estatisticamente significativa entre os pares.

P_Nova encontra diferenças significativas entre pares de valores para o parâmetro. Um teste *post-hoc* de Mann-Whitney com correção de Bonferroni mostra que as diferenças significativas ocorre entre todos os pares de valores do parâmetro: entre 1/25 e 1/50 ($p\text{-value} = 7,3e-10$); 1/25 e 1/75 ($p\text{-value} = 6,9e-11$) e entre 1/50 e 1/75 ($p\text{-value} = 0,018$). No Cenário 2 esta tendência não aparece. O teste de Kruskal-Wallis resultou em um $p\text{-value}$ de 0,1682 para o parâmetro P_Nova, não indicando diferenças significativas.

Considerando estes resultados, foi escolhida a parametrização com $P\text{-Nova} = 1/75$ e $P\text{-Existente} = 1/20$.

4.2.2 Escolha das heurísticas para a solução inicial

Neste trabalho, a solução inicial submetida ao algoritmo de *Hill Climbing* é dada por uma heurística. Foram testadas três heurísticas diferentes, descritas na Seção 3.3.1. Cada uma destas heurísticas foi avaliada nos mesmos cenários usados na Seção 4.2.1. Cada uma das combinações de heurísticas e cenários foi executada 30 vezes.

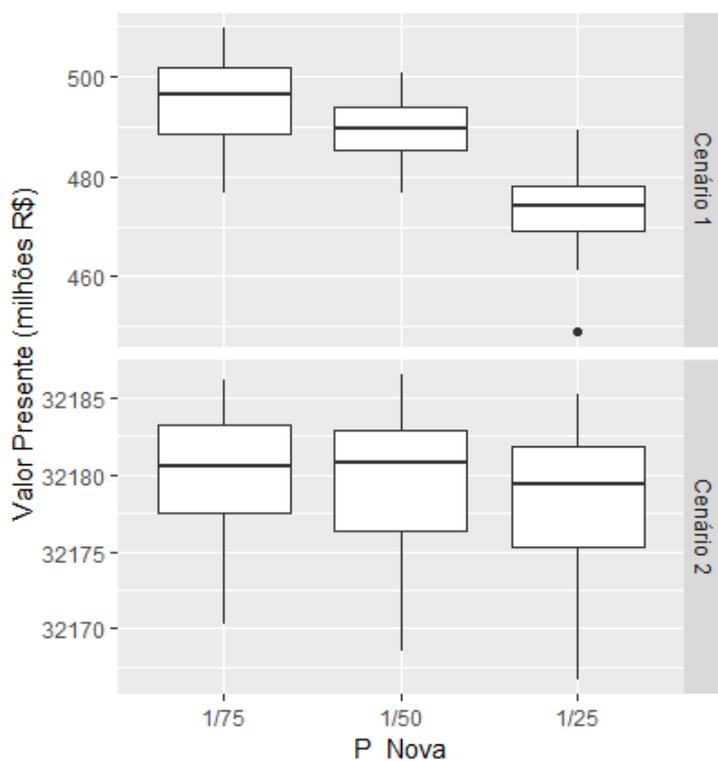


Figura 4.2: Avaliação do parâmetro P_Nova para dois cenários. Quanto maior o valor do parâmetro, maior o impacto da perturbação. Os resultados mostram que valores menores para o parâmetro produzem melhores resultados no Cenário 1, com diferenças estatisticamente significativas para todos os pares de valores. No Cenário 2, não há diferenças estatisticamente significativas entre os pares de valores de parâmetros.

A Figura 4.3 mostra os resultados da aplicação das heurísticas. É possível ver que no Cenário 1, mais desafiador, a heurística H2 é a que se sai melhor. No Cenário 2, a heurística H2 também produz os melhores resultados, porém com uma margem menor em relação às demais.

O teste de Kruskal-Wallis foi utilizado para avaliar se há diferença estatisticamente significativa entre o desempenho das heurísticas após 10.000 iterações em cada um dos cenários. No Cenário 2, o teste resulta em um p -value de 0,4441, indicando que não há diferenças estatisticamente significativas entre as heurísticas. Já no Cenário 1, o teste indica diferença estatisticamente significativa entre os pares de heurísticas. Um teste *post-hoc* de Mann-Whitney com correção de Bonferroni mostra que estas diferenças ocorrem entre todos os pares heurísticas: entre H2 e H1 (p -value = $1,7e-10$), entre H2 e HRand (p -value = 0,0013) e entre HRand e H1 (p -value = $3,7e-05$).

Considerando que em um dos cenários avaliados a heurística H2 obteve resultados melhores com significância estatística, esta heurística foi a escolhida para a avaliação final de todos cenários descritos na Seção 4.1. É importante notar que a heurística HRand

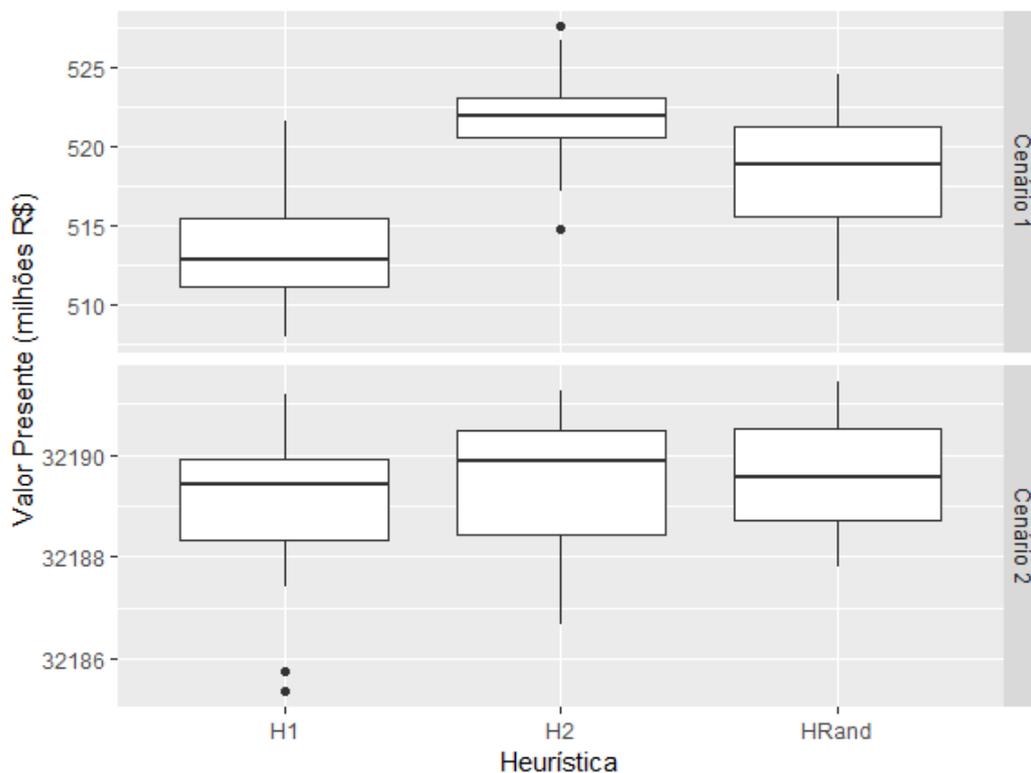


Figura 4.3: Avaliação das heurísticas como solução inicial do *Hill Climbing*

é aleatória, portanto uma das heurísticas construídas especificamente para este trabalho se saiu pior do que uma heurística que não se utiliza de decisões informadas a respeito do problema para definir sua solução.

Estes resultados, entretanto, são aferidos ao fim de 10.000 iterações da otimização. Uma iteração, aqui, é definida como uma execução do passo 3 do Algoritmo 6. Sendo assim, uma iteração é contabilizada cada vez que os vizinhos da solução corrente são avaliados e o melhor vizinho é escolhido (caso haja um vizinho melhor do que a própria solução corrente). Analisando as trajetórias das soluções ao longo das iterações, é possível tirar conclusões mais detalhadas. A Figura 4.4 mostra a trajetória de todas as execuções realizadas para testar as heurísticas. O eixo y de cada gráfico mostra o valor presente da melhor solução encontrada até a iteração que é indicada pelo eixo x. Os gráficos da primeira linha do *grid* mostram as Heurísticas executadas no Cenário 1, mais desafiador. Os gráficos na segunda linha mostram as execuções no Cenário 2, mais favorável.

Observando as trajetórias das execuções ao longo das iterações, é possível perceber que a solução inicial do *Iterated Local Search* dada pela heurística H2 já é bem próxima à melhor solução encontrada após 10.000 iterações. A solução inicial gerada pelas heurísticas H1 e HRand fica bem distante dos patamares finais, obrigando o algoritmo a gastar iterações adicionais. Este fato fica mais claro ao observar as trajetórias das primeiras

1.000 iterações (Figura 4.5). Enquanto as heurísticas H1 e HRand só atingem patamares próximos à solução final a partir da iteração 500, aproximadamente, a heurística H2 já parte de patamares bem próximos à solução final

Com base nestes resultados, a heurística H2 foi escolhida para avaliação dos 432 cenários descritos na Seção 4.1.

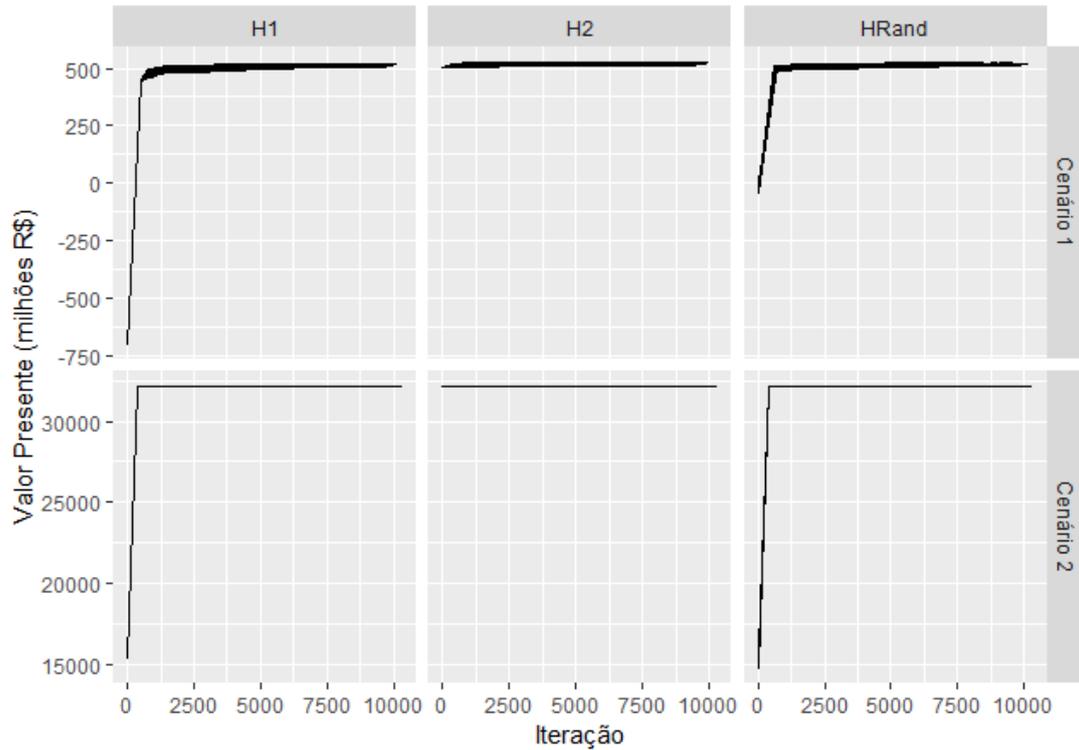


Figura 4.4: Trajetórias das heurísticas ao longo de 10.000 iterações

4.2.3 Escolha da quantidade de iterações da ILS

Definida a heurística a ser utilizada para gerar a solução inicial do algoritmo, foi necessário definir o número de iterações usadas nas 432 avaliações dos cenários definidos na Seção 4.1. Para fazer esta análise, foram executadas 30 rodadas de 25.000 iterações para dois cenários escolhidos.

A Figura 4.6 mostra a trajetória das execuções com 25.000 iterações. Cada linha do gráfico corresponde a uma execução do algoritmo, cada ponto mostra a última iteração após uma perturbação que levou a uma solução melhor do que a corrente. Foi inserida uma linha de tendência, mais espessa e sem pontos, gerada por uma regressão loess¹.

¹Na regressão *loess* [54] (*Local Polynomial Regression Fitting*), o *fitting* é feito localmente, isto é, o valor de *y* para um dado *x* é estimado com uso dos dados observados na vizinhança de *x*. Os dados observados mais próximos de *x* entram com maior peso na estimativa, que é feita por mínimos quadrados.

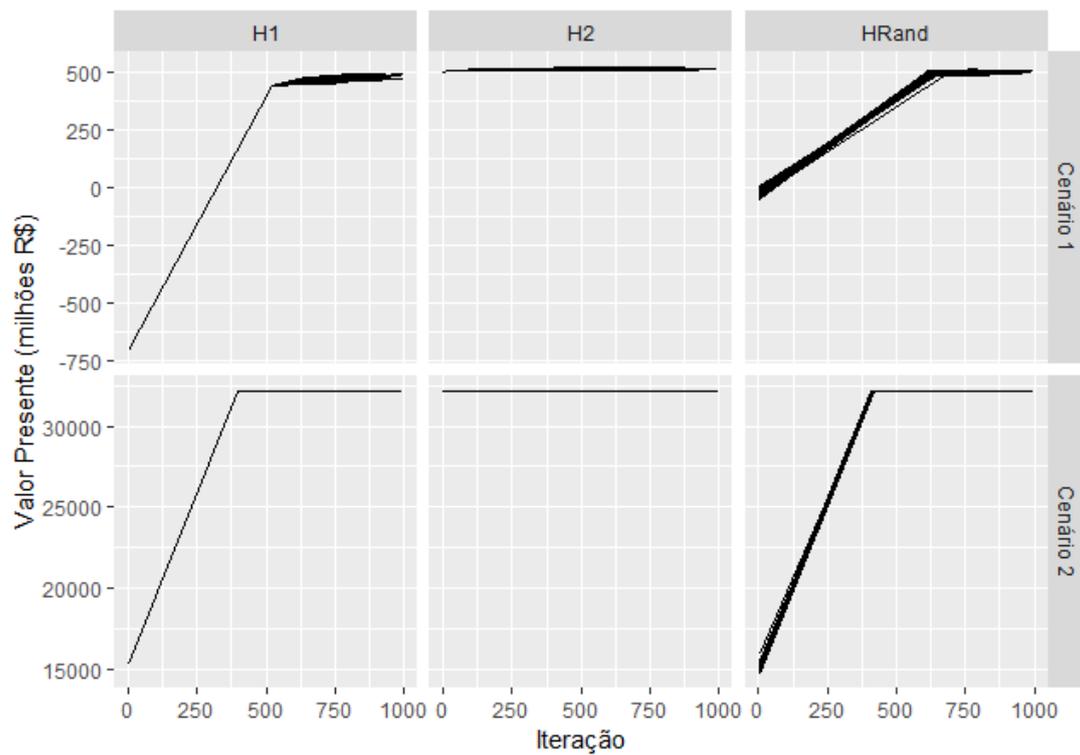


Figura 4.5: Trajetórias das heurísticas até a iteração 1.000

Como discutido na Seção 4.2.2, os valores das soluções são muito próximos do valor presente da solução gerada pela heurística H2. Ainda assim, é possível visualizar uma evolução no *fitness* das soluções, que vai se estabilizando ao longo das iterações. Observando a trajetória sintetizada pela linha da regressão *loess* e considerando que cada iteração adicional significa maior tempo de execução do algoritmo, optamos por avaliar os 432 cenários definidos na Seção 4.1 em execuções de 10.000 iterações.

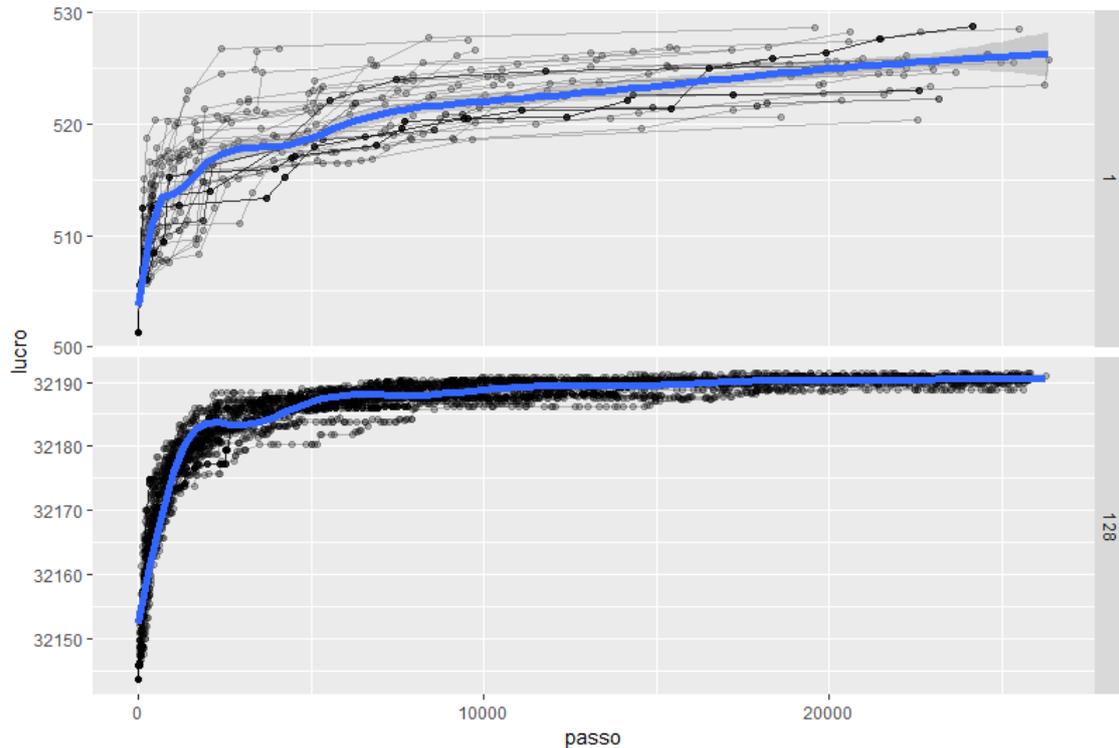


Figura 4.6: Trajetórias das execuções de 25.000 iterações usando a heurística H2 como geradora da solução inicial

4.3 Resultados da avaliação

As execuções dos 432 cenários foram realizadas com os parâmetros discutidos na Seção 4.2. As Figuras 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10 mostram os resultados de todos os cenários avaliados. Nas figuras são mostrados dois conjuntos de cenários em dois gráficos empilhados. No gráfico de cima, são apresentados os cenários que consideram a expansão da produção, ou seja, onde são construídas usinas com capacidade suficiente para fazer frente à maior produção de resíduos que haverá durante sua vida útil. O eixo y de cada gráfico mostra vários cenários de prêmios ao produtor. No eixo x, são apresentadas várias opções de taxa de desconto anual real. Os números dentro de cada *tile* do gráfico mostram o valor presente estimado em bilhões de reais. Os *tiles* mais escuros, sem números, mostram cenários em que não houve solução com valor presente positivo. Dentre os *tiles* com valor presente positivo, os com fundo mais escuro são os mais valiosos.

O valor presente varia da forma esperada entre os cenários: os cenários mais favoráveis encontram-se sempre no canto inferior esquerdo, onde o prêmio pago ao produtor é menor e a taxa de desconto, também. As várias soluções com valor presente pequeno refletem cenários onde há poucas regiões viáveis, com pouco aproveitamento energético. É possível perceber que a viabilidade do aproveitamento em São Paulo é mais difícil do que

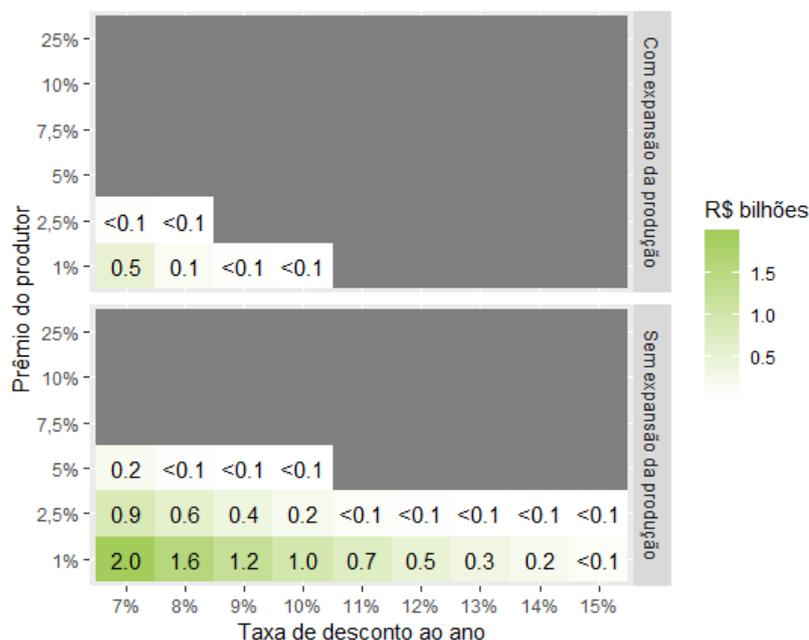


Figura 4.7: Valores presentes das melhores soluções geradas pelo algoritmo nos cenários avaliados. São Paulo, preços de leilão.



Figura 4.8: Valores presentes das melhores soluções geradas pelo algoritmo nos cenários avaliados. São Paulo, preços sob a Resolução 482.

no Paraná, isto é, os *breakevens* de taxa de desconto e prêmio ao produtor são menores. A diferença média absoluta de valor presente entre as mesmas configurações de São Paulo e Paraná é de aproximadamente R\$ 6,3 bilhões, considerando apenas as configurações para as quais as duas UFs têm valor presente diferente de zero.

Uma conclusão importante é que não vale a pena construir usinas com a capacidade

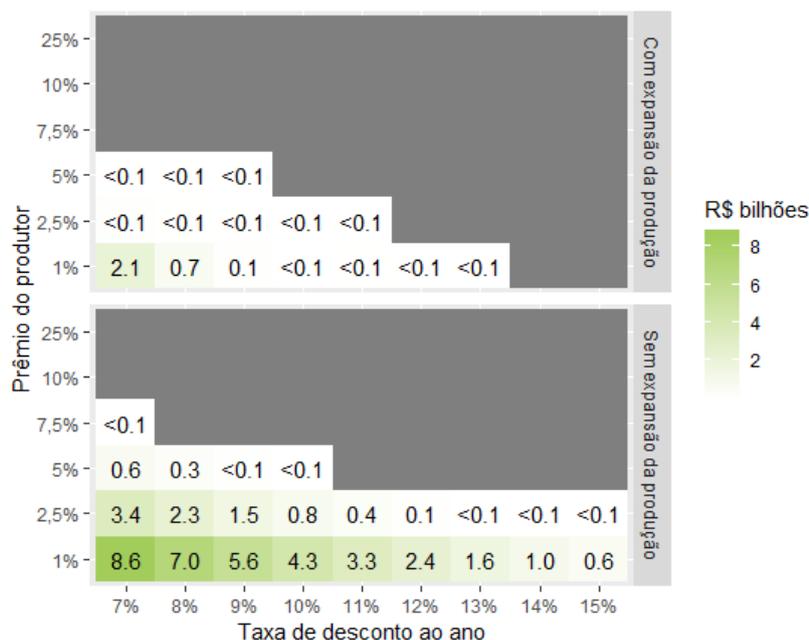


Figura 4.9: Valores presentes das melhores soluções geradas pelo algoritmo nos cenários avaliados. Paraná, preços de leilão.

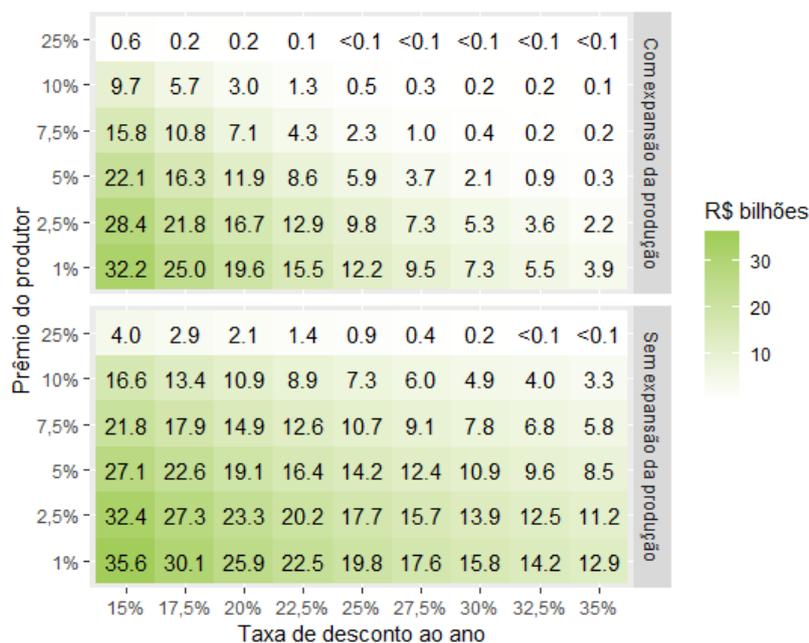


Figura 4.10: Valores presentes das melhores soluções geradas pelo algoritmo nos cenários avaliados. Paraná, preços sob a Resolução 482.

suficiente para dar conta da produção futura de biomassa: as configurações com capacidade suficiente para dar conta da produção de 2017 se saem melhor. Isso acontece porque o investimento maior necessário para construir usinas com capacidade para gerar eletricidade com toda a produção de resíduos futura não se paga, pois boa parte da vida útil das usinas se passará com capacidade ociosa.

Expansão	Preço	Diferença em R\$ bi
Com expansão da produção	Preço Leilão	1.08
Sem expansão da produção	Preço Leilão	2.52
Com expansão da produção	Preço Resolução 482	6.82
Sem expansão da produção	Preço Resolução 482	10.68

Tabela 4.2: Diferença média no valor presente entre as UFs. Apenas os cenários para os quais as duas UFs têm valor presente diferente de zero

Considerando apenas as configurações sem a expansão da produção, o prêmio pago ao produtor se torna uma variável importante. A negociação deste prêmio com os produtores pode tornar o aproveitamento viável ou não, principalmente quando se trata de aproveitar os preços de leilão (uma opção de investimento menos arriscada). Tanto em São Paulo quanto no Paraná, um prêmio ao produtor de mais de 5% do preço do produto final pelo resíduo inviabilizaria mesmo uma taxa de desconto baixa para preços de leilão. É importante lembrar que esta Dissertação não leva em conta a possibilidade de se usar as usinas termelétricas a bagaço de cana, que são numerosas em São Paulo, para processamento dos demais resíduos agrícolas. O uso destas usinas reduziria o investimento inicial e viabilizaria o uso do resíduos em um maior número de cenários.

Já sob o regime da Resolução 482, o aproveitamento dos resíduos agrícolas para geração de energia elétrica é viável a taxas de desconto que chegam a 35% ao ano, mesmo com pagamento ao produtor de prêmios pelo resíduo equivalentes 10% do preço do produto final. É importante notar que, enquanto no leilão organizado pelo governo a contraparte é um *pool* de distribuidoras, no caso da Resolução 482, o negócio é feito com cada consumidor individualmente. No caso do leilão, um calote é virtualmente impossível. No caso da Resolução 482, existe o risco de calote de cada consumidor por até um mês, além disso há o trabalho de arregimentação destes consumidores e de manutenção desta base de consumidores com a substituição frequente dos clientes que saíram da carteira ao longo da vida útil do empreendimento. Estes riscos justificam as taxa de desconto bem mais altas utilizadas nas avaliações.

4.4 Considerações finais

Este capítulo apresentou os resultados extraídos da ferramenta construída com uso do modelo descrito no Capítulo 3. O próximo capítulo apresenta as conclusões deste trabalho de pesquisa e as sugestões de próximos trabalhos.

5. Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões

Esta Dissertação teve o objetivo de construir uma abordagem e uma ferramenta que possibilitasse a avaliação da economicidade da geração de energia elétrica a partir de resíduos agrícolas. A busca pela viabilidade do uso de resíduos agrícolas para geração de energia elétrica no Brasil se justifica, pois a energia elétrica ainda é cara no país e a expansão do parque de geração a partir de outras fontes encontra obstáculos diversos.

O estudo da literatura brasileira a respeito desta análise de viabilidade mostrou que o problema havia sido abordado com ênfase na definição dos custos de logística e investimento necessários à operação. Entretanto, havia uma oportunidade de se conjugar algoritmos computacionais de otimização heurística a estas análises, de forma a maximizar o valor econômico das configurações de localização de usinas e regiões de fornecimento.

Esta Dissertação apresentou um método de análise da viabilidade de geração de energia elétrica a partir de resíduos agrícolas baseado em um modelo de avaliação de configurações de usinas e regiões de fornecimento de biomassa baseado em fluxos de caixa descontados e da criação de um algoritmo meta-heurístico do tipo *Iterated Local Search* para seleção da melhor configuração dentre as analisadas.

A metodologia e os algoritmos que adotamos neste estudo podem ser estendidos para dar conta de outros tipos de resíduos, como os da pecuária e os resíduos urbanos. Outras adaptações podem ser feitas a fim de levar em conta o aproveitamento das usinas já existentes para geração de eletricidade a partir de bagaço de cana.

Os experimentos utilizados para definir a parametrização do algoritmo mostraram que perturbações mais sutis no algoritmo de *Iterated Local Search* trazem um desempenho melhor do que perturbações mais intensas. Estes experimentos mostraram também que após 10.000 iterações do algoritmo não há melhoria considerável nas soluções encon-

tradas. Com relação às heurísticas criadas para este trabalho, ficou claro que o melhor desempenho foi obtido pela heurística H2. Nos dois cenários testados, esta heurística foi tão eficiente que criou soluções iniciais muito próximas das soluções finais encontradas.

A análise da viabilidade do aproveitamento dos resíduos agrícolas para geração de eletricidade foi realizada em 432 cenários, variando a Unidade da Federação, a forma de tratar a expansão agrícola futura, o preço de venda da energia, as taxas de desconto dos fluxos de caixa e os níveis de prêmio oferecido ao produtor da biomassa. Esta análise possibilitou a extração dos *breakevens* conjuntos para as taxas de desconto e para os prêmios pagos aos produtores para cada Unidade da Federação, cada tipo de preço e cada tipo de tratamento da expansão agrícola.

É possível concluir que não vale a pena construir usinas que deem conta da produção futura de resíduos, de modo a ficarem com capacidade ociosa no início da vida útil. O Estado do Paraná se mostrou mais promissor do que São Paulo. O prêmio pago ao produtor do resíduo se mostrou uma variável muito importante na avaliação do investimento.

Este trabalho produziu uma ferramenta para execução de ensaios parametrizados que utilizem premissas variadas. Esta ferramenta, ao revelar as melhores regiões de fornecimento e locais de construção de usinas, além da viabilidade econômica, pode ajudar os agentes planejadores a definir programas de incentivo e coordenar os agentes econômicos no melhor uso deste recurso natural.

5.2 Trabalhos futuros

É possível produzir evoluções no modelo proposto nesta Dissertação de várias formas:

- Foram utilizadas premissas de preço de venda de energia e custos logísticos, mas não foi considerada a incerteza na evolução destas séries temporais. É possível incluir a avaliação da incerteza que existe em algumas das variáveis do problema através de simulação de Monte Carlo. É possível gerar vários cenários de preço de venda da energia, de produção agrícola e de taxa de juros, por exemplo. Estes cenários poderiam ser simulados de forma a gerar uma distribuição para o valor presente e não estimativas pontuais para cada cenário pré-definido como foi feito nesta Dissertação;
- Outro ponto não considerado nas análises financeiras dos estudos apresentados nesta Dissertação são as emissões de gases de efeito-estufa. No atual contexto

mundial, esta análise pode ajudar a qualificar diferentes tipos de aproveitamento energético;

- É possível considerar, também, a possibilidade de geração de postos de trabalho no meio rural, estimada em trezentos mil [3];
- Outra possibilidade que pode melhorar os resultados é a utilização das usinas que já realizam a queima de bagaço de cana. Neste caso, seria possível usar a capacidade ociosa das usinas a bagaço de cana para queima dos resíduos considerados nesta Dissertação. O custo deste uso seria o arrendamento destas usinas durante a entressafra e não o custo total de construção e operação de novas usinas. O Estado de São Paulo, que apresentou resultados piores do que os do Paraná em nossas análises, é repleto de usinas a bagaço de cana que poderiam ser consideradas em uma evolução do modelo aqui proposto;
- A ferramenta construída como parte da pesquisa realizada nessa Dissertação cria um *log* bastante rico com as melhores soluções obtidas para todos os cenários. É possível analisar estes dados de forma a propor, por exemplo, quais seriam as primeiras usinas a se construir em um projeto piloto para exploração desta atividade econômica;
- A granularidade usada para a análise logística foi municipal, mas é possível realizar este mesmo trabalho com a granularidade das fazendas. Para isso, seria necessário utilizar os dados do Cadastro Ambiental Rural (CAR) e uma análise de utilização do solo, para identificar a posição real dos volumes de resíduos e melhorar a estimativa do custo logístico de transporte destes até as usinas.

Referências Bibliográficas

- [1] Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. *Projeções do Agronegócio*. [S.l.: s.n.], 2018.
- [2] Empresa de Pesquisa Energética. *Economicidade e Competitividade do Aproveitamento Energético de Resíduos Rurais*. [S.l.], 2014. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA_17_-_Economicidade e Competitividade do Aproveitamento Energético de\[1\].pdf](http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA_17_-_Economicidade_e_Competitividade_do_Aproveitamento_Energético_de[1].pdf)>.
- [3] Empresa de Pesquisa Energética. *Inventário Energético de Resíduos Rurais*. [S.l.], 2014. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-308/DEA_15_-_14_-_Inventário Energético de Resíduos Rurais](http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-308/DEA_15_-_14_-_Inventário_Energético_de_Resíduos_Rurais)>.
- [4] OLIVEIRA, L. G. S. d. *Aproveitamento Energético De Resíduos Agrícolas – O Caso Da Agroeletricidade Distribuída*. Dissertação (Mestrado), 2011. Disponível em: <http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe_m/LuizGustavoSilvaDeOliveira.pdf>.
- [5] SILVA, F. T. F. d. S. *Avaliação da torrefação e densificação de resíduos agrícolas no Brasil*. Dissertação (Mestrado), 2017.
- [6] VEIGA, J. E. da. *Energia Nuclear: do anátema ao diálogo*. [S.l.]: Senac, 2018.
- [7] MELIKOGLU, M. Current status and future of ocean energy sources: A global review. *Ocean Engineering*, Elsevier Ltd, v. 148, n. November 2017, p. 563–573, 2018. ISSN 00298018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.11.045>>.
- [8] Empresa de Pesquisa Energética. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2026*. [S.l.: s.n.], 2017.

- [9] FONSECA, I. F. d. A construção de grandes barragens no Brasil, na China e na Índia: Semelhanças e peculiaridades dos processos de licenciamento ambiental em países emergentes. 2013.
- [10] TOLMASQUIM, M. T. *Energia Termelétrica - Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear*. [S.l.: s.n.], 2016. ISBN 9788560025053.
- [11] CASTRO, N. J. d. et al. TDSE 50: Expansão do sistema elétrico brasileiro e o potencial hidroelétrico da região amazônica. 2012.
- [12] CORREIA, P. J.; CULCHESK, A. S.; REGO, E. E. Is the energy tariff expensive for captive customers in Brazil? *IEEE Latin America Transactions*, v. 14, n. 11, p. 4506–4511, 2016. ISSN 15480992.
- [13] Empresa de Pesquisa Energética. *Balço Energético Nacional*. [s.n.], 2018. Disponível em: <<http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018_{int}.pdf>>.
- [14] GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T. Renewable energy - Traditional biomass vs. modern biomass. *Energy Policy*, v. 32, n. 6, p. 711–714, 2004. ISSN 03014215.
- [15] VEHKAMÄKI, S. The concept of sustainability in modern times. 2005. Disponível em: <<http://www.helsinki.fi/mmtkd/mmeko/sunare>>.
- [16] GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energias renováveis: um futuro sustentável. *Revista USP*, v. 72, p. 6–15, 2006. ISSN 2316-9036.
- [17] Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. *Plano Nacional de Agroenergia*. [S.l.: s.n.], 2006. ISBN 8573833572.
- [18] CENBIO - Centro Nacional de Referência em Biomassa. *Atlas de Bioenergia do Brasil: Metodologias de cálculo da conversão energética das biomassas selecionadas*. [S.l.], 2008.
- [19] Empresa de Pesquisa Energética. *PDE - Plano Decenal de Expansão de Energia 2027*. [S.l.], 2017. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE_2027_{aprova}O_FICIAL.pdf>.
- [20] LEAL, M. R. V.; WALTER, A. da S.; SILVA, J. A. R. da. Estudo de Baixo Carbono para o Brasil. *Emissões da Produção de Etanol.. Tema F. Relatório Técnico*, 2010.

- [21] ANDREWS, S. S. Crop residue removal for biomass energy production: Effects on soils and recommendations. 2006. Disponível em: <http://nitcnrcsbase-www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_53255.pdf>.
- [22] AUGUSTO, L. et al. *Wood Energy : Principles and Applications*. [S.l.: s.n.], 2002. ISBN 8571930775.
- [23] ALÉM, A. C.; GIAMBIAGI, F. *O BNDES em um Brasil em Transição*. [s.n.], 2010. ISSN 1098-6596. ISBN 9788587545374. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecim>.
- [24] KUMAR, A.; CAMERON, J. B.; FLYNN, P. C. Biomass power cost and optimum plant size in western Canada. *Biomass and Bioenergy*, v. 24, n. 6, p. 445–464, 2003. ISSN 09619534.
- [25] KOOPMANS, A.; KOPPEJAN, J. Regional Wood Energy Development in Asia: Agricultural and Forest Residues - Generation Utilization and Availability. *Modern Applications of Biomass Energy*, n. January 1997, p. 23, 1997. ISSN 1434-6222. Disponível em: <http://wgbis.ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/RWEDP/acrobat/pr_esidues.pdf>.
- [26] SILVA, L. C. d.; QUEIROZ, D. M. d.; FLORES, R. A. Estimativa de custos operacionais em unidades armazenadoras de grãos por meio de simulação. *Revista Brasileira de Armazenamento*, v. 31, n. 1, p. 1–7, 2006.
- [27] Abrapa. *A Cadeia do Algodão Brasileiro: Desafios e Estratégias*. [s.n.], 2012. Disponível em: <[https://www.abrapa.com.br/BibliotecaInstitucional/Publicações/Livros/Livro A Cadeia do Algodao - Abrapa.pdf](https://www.abrapa.com.br/BibliotecaInstitucional/Publicações/Livros/Livro_A_Cadeia_do_Algodao_-_Abrapa.pdf)>.
- [28] LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. *Geração termelétrica: planejamento, projeto e operação*. [S.l.: s.n.], 2004.
- [29] GOLD, S.; SEURING, S. Supply chain and logistics issues of bio-energy production. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier Ltd, v. 19, n. 1, p. 32–42, 2011. ISSN 09596526. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.08.009>>.
- [30] RENTIZELAS, A. A.; TOLIS, A. J.; TATSIOPOULOS, I. P. Logistics issues of biomass: The storage problem and the multi-biomass supply chain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, n. 4, p. 887–894, 2009. ISSN 13640321.

- [31] SULTANA, A.; KUMAR, A.; HARFIELD, D. *Development of agri-pellet production cost and optimum size*. Elsevier Ltd, 2010. v. 101. 5609–5621 p. ISSN 09608524. ISBN 0960-8524. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.011>>.
- [32] KADAM, K. L.; FORREST, L. H.; JACOBSON, W. A. Rice straw as a lignocellulosic resource: collection, processing, transportation, and environmental aspects. *Biomass and Bioenergy*, v. 18, p. 369–389, 2000.
- [33] THORSELL, S. et al. Economics of a coordinated biorefinery feedstock harvest system: Lignocellulosic biomass harvest cost. *Biomass and Bioenergy*, v. 27, n. 4, p. 327–337, 2004. ISSN 09619534.
- [34] SOKHANSANJ, S.; KUMAR, A.; TURHOLLOW, A. F. Development and implementation of integrated biomass supply analysis and logistics model (IBSAL). *Biomass and Bioenergy*, v. 30, n. 10, p. 838–847, 2006. ISSN 09619534.
- [35] MAPEMBA, L. D. et al. Herbaceous plant biomass harvest and delivery cost with harvest segmented by month and number of harvest machines endogenously determined. *Biomass and Bioenergy*, v. 32, n. 11, p. 1016–1027, 2008. ISSN 09619534.
- [36] DELIVAND, M. K.; BARZ, M.; GHEEWALA, S. H. Logistics cost analysis of rice straw for biomass power generation in Thailand. *Energy*, Elsevier Ltd, v. 36, n. 3, p. 1435–1441, 2011. ISSN 03605442. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2011.01.026>>.
- [37] DAMBROSIO, M. A. et al. Custos da Padronização e Armazenagem da Soja em Armazém Próprio no Município de Sorriso/MT. *Revista Contabilidade & Amazônia*, v. 2, n. 1, p. 118–133, 2009.
- [38] RAVULA, P. P.; GRISSO, R. D.; CUNDIFF, J. S. Comparison between two policy strategies for scheduling trucks in a biomass logistic system. *Bioresource Technology*, v. 99, n. 13, p. 5710–5721, 2008. ISSN 09608524.
- [39] Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Divisão Regional do Brasil em Mesorregiões e Microrregiões Geográficas*. [S.l.], 1990.
- [40] SIQUEIRA, R. P. *sidrar: An Interface to IBGE's SIDRA API*. 2017. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/package=sidrar>>.
- [41] LOURENÇO, H. R.; MARTIN, O. C.; STÜTZLE, T. Iteradted Local Search. In: *Handbook of Metaheuristics*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 363–398.

- [42] GENDREAU, M.; POTVIN, J.-Y. *Handbook in Metaheuristics*. [S.l.: s.n.], 2010. ISBN 9781441916631.
- [43] GAREY, M. R.; JOHNSON, D. S. *Computers and Intractability; A Guide to the Theory of NP-Completeness*. [S.l.: s.n.], 1979. ISSN 00219606. ISBN 0716710455.
- [44] BLUM, C.; ROLI, A.; ALBA, E. Parallel Metaheuristics: A New Class of Algorithms. p. 3–42, 2005.
- [45] DAMODARAN, A. *Investment Valuation: Second Edition*. [S.l.: s.n.], 2002. ISSN 15710661. ISBN 0-471-41490-5.
- [46] RYAN, B. *Corporate finance and valuation*. [S.l.]: Cengage Learning EMEA, 2007.
- [47] THAM, J.; VÉLEZ-PAREJA, I. *Principles of cash flow valuation: An integrated market-based approach*. [S.l.]: Elsevier, 2004.
- [48] BUENZA, D.; Garud. Calculators, lemmings, or frame makers: The role of securities analysts. 2007. Disponível em: <<http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0805/2007029399-b.html>>
- [49] PENG, L.; XIONG, W. Investor attention, overconfidence and category learning. *Journal of Financial Economics*, v. 80, n. 3, p. 563–602, 2006. ISSN 03044405X.
- [50] BENZION, U.; RAPOPORT, A.; YAGIL, J. Discount rates inferred from decisions: An experimental study. *Management science*, INFORMS, v. 35, n. 3, p. 270–284, 1989.
- [51] KRUSKAL, W. H.; WALLIS, W. A. Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. *Journal of the American Statistical Association*, Taylor & Francis, v. 47, n. 260, p. 583–621, 1952. Disponível em: <<https://amstat.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01621459.1952.10483441>>.
- [52] WHITNEY, H. B. M.; R., D. On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other Author (s): H . B . Mann and D . R . Whitney Source : The Annals of Mathematical Statistics , Vol . 18 , No . 1 (Mar . , 1947), pp . 50-60 Published by : Institute. *The Annals of Mathematical Statistics*, v. 18, n. 1, p. 50–60, 1947.
- [53] HOLM, S. A Simple Sequentially Rejective Multiple Test Procedure. *Scandinavian Journal of Statistics*, v. 6, n. 2, p. 65–70, 1979.
- [54] SHYU, W. M.; GROSSE, E.; CLEVELAND, W. S. Local regression models. In: *Statistical models in S*. [S.l.]: Routledge, 2017. p. 309–376.

- [55] R Development Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria: [s.n.], 2008. Disponível em: <<http://www.r-project.org>>.
- [56] WICKHAM, H. *tidyverse: Easily Install and Load the 'Tidyverse'*. 2017. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/package=tidyverse>>.
- [57] GROLEMUND, G.; WICKHAM, H. Dates and Times Made Easy with {lubridate}. *Journal of Statistical Software*, v. 40, n. 3, p. 1–25, 2011. Disponível em: <<http://www.jstatsoft.org/v40/i03/>>.
- [58] TENNEKES, M. {tmap} Thematic Maps in {R}. *Journal of Statistical Software*, v. 84, n. 6, p. 1–39, 2018.

A. Ferramenta de otimização: como usar

A ferramenta de otimização foi construída em R [55], usando o pacote Tidyverse [56]. Outros pacotes foram usados na confecção das análises inseridas na Dissertação: lubridate [57] e tmap [58].

O código está disponível em https://github.com/crotman/Otimizacao_Biomassa. É necessário baixar todos os arquivos contidos no repositório. O script `Otimizacao.R` executa a otimização levando em conta os dados contidos nos outros arquivos do repositório. Estes outros arquivos devem estar no diretório indicado pela variável "diretório" inicializada no começo do script.

A otimização é executada utilizando os cenários definidos no arquivo `parametros_novo_v2`. É possível executar somente alguns dos cenários a cada instância de execução do script. Para isso, é necessário definir, na sessão do R, as variáveis `GL_CENARIO_INICIO` e `GL_CENARIO_FIM`. Se o arquivo `parametros_novo_v2` contém n cenários, tanto `GL_CENARIO_INICIO` e `GL_CENARIO_FIM` devem ter valores entre 1 e n . Além disso, $GL_CENARIO_FIM \geq GL_CENARIO_INICIO$. O arquivo `parametros_novo_v2.csv` contido no repositório possui os cenários usados na Seção 4.3, mas é possível alterar o arquivo csv de forma a executar a otimização para o cenário que for desejado.

A ferramenta escreve arquivos csv contendo todas as soluções encontradas ao longo das iterações da otimização. São escritas as sedes escolhidas, as cidades contidas em cada sede, o número da iteração e o número da perturbação, além do número do cenário que está sendo executado. Um arquivo csv de saída é escrito a cada dez perturbações ou ao final de cada cenário.