

**PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA APLICADA À LOGÍSTICA DE UNIDADES
MÓVEIS DE PROCESSAMENTO TERMOQUÍMICO DE RESÍDUOS**

**MATHEMATICAL PROGRAMMING APPLIED TO THE LOGISTICS OF MOBILE
UNITS FOR THERMOCHEMICAL WASTE PROCESSING**

Ritiele Eduarda de Lima

Discente do PPGSPA/FURG. Campus Santo Antônio da Patrulha, Rio Grande do Sul (RS),
Brasil

Marcelo Escobar Aragão

Professor Associado PPGSPA/FURG. Campus Santo Antônio da Patrulha, Rio Grande do Sul
(RS), Brasil

Juliana da Silveira Espindola

Professora Adjunta PPGSPA/FURG. Campus Santo Antônio da Patrulha, Rio Grande do Sul
(RS), Brasil

Fernanda Cabral Borges

Professora Adjunta PPGSPA/FURG. Campus Santo Antônio da Patrulha, Rio Grande do Sul
(RS), Brasil

Alex Leonardi

Professor Associado PPGSPA/FURG. Campus Santo Antônio da Patrulha, Rio Grande do Sul
(RS), Brasil

GT12. Impactos socioambientais das novas tecnologias no agronegócio

Resumo: A demanda por energia e por alternativas sustentáveis tem crescido significativamente nos últimos anos. Nesse contexto, a biomassa residual destaca-se como uma fonte promissora, com elevado potencial para aplicação em processos que gerem produtos sustentáveis e de maior valor agregado. Entre as estratégias emergentes para o seu aproveitamento, destaca-se o uso de unidades móveis de conversão termoquímica, que possibilitam o processamento descentralizado de resíduos, resultando em produtos com maior densidade energética. No entanto, a viabilidade econômica dessa abordagem depende de uma gestão logística eficiente, especialmente no que se refere ao planejamento de rotas. Diante disso, este trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo matemático baseado em um problema de roteamento de veículos aplicado à logística de unidades móveis de processamento termoquímico, visando otimizar o aproveitamento descentralizado de resíduos e a coleta do bio-óleo obtido desse processamento. O modelo foi validado e aplicado a um estudo de caso da cadeia produtiva do arroz, considerando a casca como principal resíduo. Foram consideradas 20 beneficiadoras do estado do Rio Grande do Sul, um planejamento semanal (168 horas) com veículos de diferentes capacidades (de 20 a 60 mil litros), buscando identificar rotas economicamente favoráveis. Os resultados indicaram que o uso das metodologias uma abordagem eficiente e estratégica para a obtenção de soluções viáveis. Para o estudo de caso foram encontradas as melhores rotas com frotas com diferentes cenários. O melhor resultado foi obtido com uma rota de 2534,2 km e a utilização de dois veículos e um custo estimado de R\$ 6.588,92. Por fim, o estudo permitiu identificar rotas mais favoráveis economicamente para a operação de unidades móveis, além de propor uma destinação eficiente para os resíduos, contribuindo para a redução de custos logísticos e impactos ambientais na cadeia agroindustrial.

Palavras-chave: resíduos, unidades móveis de processamento, roteamento veicular.

Abstract: The demand for energy and sustainable alternatives has grown significantly in recent years. In this context, residual biomass stands out as a promising source, with high potential for application in processes that generate sustainable products with higher added value. Among the emerging strategies for its use, the use of mobile thermochemical conversion units stands out, enabling the decentralized processing of waste, resulting in products with higher energy density. However, the economic viability of this approach depends on efficient logistics management, especially regarding route planning. Therefore, this work aims to develop a mathematical model based on a vehicle routing problem applied to the logistics of mobile thermochemical processing units, aiming to

optimize the decentralized use of waste and the collection of bio-oil obtained from this processing. The model was validated and applied to a case study of the rice production chain, considering the husk as the main residue. Twenty waste processing plants in the state of Rio Grande do Sul were considered, with weekly planning (168 hours) using vehicles of different capacities (from 20,000 to 60,000 liters), seeking to identify economically favorable routes. The results indicated that the use of the methodology is an efficient and strategic approach to obtaining viable solutions. For the case study, the best routes were found with fleets in different scenarios. The best result was obtained with a 2534,2 km route using two vehicles and an estimated cost of R\$ 6588,92. Finally, the study allowed the identification of more economically favorable routes for the operation of mobile units, in addition to proposing an efficient destination for waste, contributing to the reduction of logistical costs and environmental impacts in the agro-industrial chain.

Keywords: residues, mobile processing units, vehicle routing.

1. Introdução

A crescente demanda por energia, aliada às preocupações ambientais e à limitação das reservas de combustíveis fósseis, tem impulsionado a busca por fontes energéticas alternativas e sustentáveis. Nesse cenário, a biomassa residual destaca-se como uma matéria-prima promissora, capaz de contribuir simultaneamente para a geração de energia e para a mitigação de impactos ambientais associados ao acúmulo de resíduos agroindustriais (Junior, 2022; Borges, 2014). No Brasil, a elevada produção de resíduos provenientes do setor agroindustrial reforça a necessidade de estratégias que promovam seu aproveitamento e agregação de valor.

Entre as rotas tecnológicas disponíveis para a conversão da biomassa, os processos termoquímicos têm se destacado pela versatilidade e eficiência, especialmente a pirólise (Stremel; Cordeiro, 2023). Esse processo consiste na degradação térmica da biomassa em ambiente com ausência ou baixa presença de oxigênio, resultando na geração de produtos de interesse, como bio-óleo, carvão e gás de síntese (Keith; Castillo-Villar, 2023; Sosa, 2019). A pirólise apresenta vantagens como tempos de reação reduzidos e elevada diversidade de produtos, o que a torna uma alternativa atrativa para o aproveitamento energético de resíduos (Agrizzi, 2018).

Entretanto, um dos principais desafios associados ao uso da biomassa refere-se à logística de transporte, especialmente devido à sua baixa densidade, que eleva significativamente os custos operacionais (De Lima et al., 2022). Nesse contexto, o conceito de unidades móveis de processamento termoquímico, também conhecidas como *Process Truck*, surge como uma solução inovadora. Essas unidades possibilitam a conversão descentralizada da biomassa diretamente nos locais de geração, reduzindo a necessidade de transporte de grandes volumes de material *in natura* e, consequentemente, os custos logísticos (Oliveira, 2020; Ha et al., 2011).

Apesar das vantagens, a utilização dessas unidades móveis demanda um planejamento logístico eficiente, uma vez que o deslocamento dos equipamentos entre diferentes pontos de

processamento também envolve custos relevantes. Assim, o problema de roteamento de veículos (PRV) torna-se uma ferramenta fundamental para otimizar as rotas e operações dessas unidades, contribuindo para a viabilidade econômica do sistema (Morais, 2021).

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo estudar a otimização logística de unidades móveis de pirólise no processamento descentralizado de resíduos agroindustriais no estado do Rio Grande do Sul. Para isso, propõe-se o desenvolvimento de um modelo matemático baseado em Programação Linear Inteira Mista (MILP), implementado no sistema de modelagem GAMS, visando à minimização dos custos logísticos e à maximização da eficiência operacional. Espera-se, com isso, contribuir para o avanço de soluções sustentáveis no aproveitamento de biomassa, em consonância com os princípios de produção responsável e energia limpa.

2. Revisão da Literatura

2.1 Processamento de Resíduos

Resíduos industriais provocam impactos ambientais se forem depositados de maneira imprópria, trazendo prejuízos a qualidade do meio. Dessa maneira, a busca por novas destinações para resíduos tem despertado cada vez mais o interesse para tecnologias que permitam agregar valor a esses resíduos. Os processos termoquímicos, com destaque para a pirólise, têm se mostrado como uma solução viável para esta questão, possibilitando gerar novos produtos de maior valor agregado, como carvão vegetal e líquido combustível (Fontoura, 2015).

A tecnologia de pirólise pode ser definida como um processo termoquímico responsável pela conversão da biomassa. Esta é capaz de decompor termicamente materiais sem oxigênio ou em uma atmosfera com tal concentração deste gás de maneira que a combustão não aconteça (Scheda, 2015). Os produtos gerados no processo de pirólise são bio-óleo, carvão (*biochar*) e gases combustíveis. O bio-óleo é um combustível líquido renovável que pode ser aplicado para a produção de várias substâncias químicas (Oliveira, 2020). Esse produto consiste em um líquido viscoso escuro, polar e com elevada oxigenação que possui em sua composição álcoois, ácidos orgânicos, cetonas, fenóis e água. Devido apresentar tais características, o mesmo tem grande potencial de ser empregado como substituto do petróleo (Sosa, 2019).

2.2 Unidades Móveis de Processamento Termoquímico

Segundo Oliveira (2020) as unidades móveis de processos termoquímicos já vêm sendo estudadas e até mesmo comercializadas, sendo capazes de converter localmente a biomassa em produtos de maior valor agregado. Essas plantas móveis são consideradas sustentáveis e viáveis

economicamente. Além disso, a sua utilização possibilita diminuir custos de transporte, uma vez que permite a transformação descentralizada da biomassa em produtos com maior densidade e com menor chance de deterioração. Plantas móveis são apropriadas para utilizações rápidas, curtas e em lugares com limitação de espaço. Além disso, não necessitam de obra civil e assim não interferem na infraestrutura local. Existem alguns benefícios que são inerentes ao uso dessas unidades móveis, como instalação rápida, construção modular da planta e locomoção facilitada (Oliveira, 2020).

2.3 Problema de Roteamento Veicular (PRV)

O Problema de Roteamento Veicular (PRV) conhecido em inglês como *Vehicle Routing Problem* visa determinar as rotas ótimas para visitar um conjunto de pontos geograficamente dispersos, partindo de um ponto de origem e retornando a ele ao final do percurso, considerando as restrições impostas ao sistema. O principal propósito do PRV é minimizar a distância total percorrida ou a quantidade de veículos utilizados e reduzir custos ou tempo de deslocamento (Morais, 2021). Busca-se proporcionar atendimento a demandas dos clientes de forma eficiente, porém com custos de operação e capital reduzidos. As restrições referem-se às condições que devem ser respeitadas para tal fim (Novaes, 2007) como por exemplo, restrições de horizontes de tempo e capacidade dos veículos da frota.

O problema de roteamento veicular (PRV) é modelado através de modelos de programação matemática. Esses modelos apresentam uma natureza combinatória elevada uma vez que o número de restrições e variáveis necessárias para sua completa descrição cresce exponencialmente com o número de localidades consideradas.

3. Metodologia

3.1 Definição do Problema de Pesquisa

O problema abordado neste trabalho consiste em um Problema de Roteamento Veicular (PRV) para o aproveitamento de resíduos a partir de unidades móveis processamento térmico de pirólise rápida. Foi considerado que as unidades móveis disponíveis partem de um depósito central e se deslocavam via terrestre até as localizações geográficas para processar localmente o resíduo. Partiu-se do cenário teórico em que a unidade móvel é rebocada por um caminhão tanque que coletaria o bio-óleo oriundo do processamento local. Os custos foram restringidos apenas para os de logística, uma vez que o resíduo é tratado sem custo de compra. A seguir é caracterizada a modelagem do problema listando suas premissas, restrições e parâmetros necessários para a utilização do modelo.

Caracterização:

O problema abordado neste trabalho apresenta as seguintes características gerais:

- É conhecido um conjunto de pontos (localizações geográficas) nos quais conhece-se a disponibilidade diária em kg de resíduo;
- Tem-se disponível uma frota de veículos para processar localmente esse resíduo e coletar o bio-óleo resultante deste processamento. Com esse objetivo, cada veículo carrega consigo uma unidade de processamento móvel de pirólise rápida e um tanque de armazenamento de capacidade conhecida;
- O objetivo é então determinar as rotas (roteiros) executadas por cada veículo da frota com ponto de origem e de destino definidos passando por um subconjunto dos pontos a serem visitados, de forma a minimizar o custo de logística (distância total percorrida por todos os roteiros) não excedendo as restrições de capacidade de armazenamento do veículo e o horizonte de tempo para o planejamento.

Premissas:

- É conhecido o local de partida dos veículos e o local de destino final no qual o bio-óleo é estocado;
- Todas as rotas começam no ponto de origem, passam por um (sub)conjunto de pontos, e retornam para o depósito onde o bio-óleo é armazenado;
- Todos os pontos são visitados e por um único veículo. Ou seja, todos os pontos devem estar contemplados em algum roteiro;
- Todo resíduo disponível é processado localmente, e o todo bio-óleo obtido inerente a esse processamento é coletado no tanque de armazenamento;
- O tempo da rota considera o tempo de deslocamento terrestre acrescido do tempo de processamento, sem pausas e/ou intervalos.

Principais restrições:

- **Capacidade:** O total de bio-óleo coletado em um dado roteiro não pode exceder a capacidade de armazenamento do veículo;
- **Tempo:** O tempo total de uma rota, consistindo do tempo de deslocamento e o tempo de processamento dos pontos visitados, não pode exceder o horizonte de tempo do planejamento.

Parâmetros:

Os seguintes parâmetros são necessários para a resolução do modelo:

- Localização geográfica dos pontos de disponibilidade do resíduo;
- Quantidade de resíduo disponível em massa em cada localização;
- Rendimento do processo % em massa para estimar a massa de bio-óleo obtida;
- Massa específica do bio-óleo, permitindo estimar o volume de bio-óleo obtido do processamento (pela razão da massa do óleo pela sua massa específica);
- Taxa de processamento média (em massa por unidade de tempo) da unidade de pirólise para estimar o tempo de processamento (pela razão da massa de resíduo pela taxa de processamento);
- A velocidade média de deslocamento do veículo, usada para estimar o tempo de deslocamento entre os pontos (pela razão da distância percorrida pela velocidade média);
- A capacidade máxima de armazenamento do tanque dos veículos da frota;
- Custo médio do combustível e autonomia do veículo para estimar o custo de transporte; e
- O horizonte do tempo do planejamento que deve ser respeitado.

Os parâmetros com sua respectiva simbologia que foram considerados neste estudo são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros do modelo com valores padrões para o estudo de caso.

Parâmetro	Descrição	Valor padrão
m_i	Massa disponível no ponto i em kg	*
d_{ij}	Distância entre os pontos i e j em km	**
Y	Rendimento do processo em massa	50%
ρ_b	Massa específica do bio-óleo	1,2 kg/l
R_p	Taxa de Processamento	400 Kg/h
v	Velocidade média de deslocamento	60 km/h
Q	Capacidade do veículo (1000 l)	20 a 60
H	Horizonte de tempo (h)	168
c_D	Custo médio do diesel (R\$/l)	6,50
p	Autonomia do veículo (km/l)	3-3,5***

* Tabela 2; ** A partir do Quadro 1, vide (De Lima et al., 2025).

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Foi assumido um horizonte de tempo de uma semana (168 horas) para o planejamento e a utilização de veículos com capacidade de armazenamento variando de 20 a 60 mil litros. Os valores utilizados são valores são característicos dos dados e de uma revisão da literatura (De Lima et al., 2025). É importante mencionar que o resíduo impacta no processo e nas

características do bio-óleo obtido. A precisão dos dados utilizados impacta diretamente na qualidade da solução obtida.

3.2 Modelo de Programação Matemática

O modelo proposto foi formulado como um problema de programação com variáveis inteiras (MILP). Modelos clássico de PRV capacitado e com horizonte de tempo apresentado em (Toth; Vigo, 2002) foi utilizado como base para adaptação e desenvolvimento do modelo proposto no contexto caracterizado na Seção 3.1.

No modelo é considerado uma orientação completa descrita a seguir. São considerados n (com índice i ou j) pontos geográficos e uma frota com no máximo k_{max} veículos (com índice k). Descrição dos conjuntos (*sets*):

$$\text{Veículos } (k) \quad k \in K = \{1, 2, \dots, k_{max}\} \quad (1)$$

$$\text{Pontos ou nós } (i \text{ ou } j): \quad V = \{1, 2, \dots, n\} \quad (2)$$

Conjunto de pontos incluindo o ponto de origem (nó 0):

$$V' = \{0, 1, 2, \dots, n\} = \{0\} \cup V \quad (3)$$

Conjunto de pontos incluindo o ponto de destino final (nó $n+1$):

$$V'' = \{1, 2, \dots, n, n+1\} = V \cup \{n+1\} \quad (4)$$

Conjunto de pontos completo:

$$W = \{0, 1, 2, \dots, n, n+1\} = \{0\} \cup V \cup \{n+1\} \quad (5)$$

Cabe ressaltar que V , V' e V'' são subconjuntos de W .

Com a seguinte orientação completa:

$$\text{Grafo} \quad G = (W, A) \quad (6)$$

$$\text{Arcos} \quad A = \{(i, j): i \in V', j \in V'', i \neq j, (i, j) \neq (0, n+1)\} \quad (7)$$

Variáveis Binárias (assumem valor 0 ou 1):

$$x_{ijk} \quad \text{Assume valor de 1 se o veículo } k \text{ usa o arco } (i, j), 0 \text{ caso contrário} \quad (8)$$

$$y_k \quad \text{Assume valor 1 se o veículo } k \text{ é utilizado, 0 caso contrário} \quad (9)$$

Equações do Modelo:

Função Objetivo (minimização):

$$z = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} x_{ijk} d_{ij} + \alpha \sum_{k \in K} y_k \quad (10)$$

Restrições de Fluxo:

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in V''} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in V' \quad (11)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ihk} - \sum_{j \in V} x_{hjk} = 0 \quad \forall h \in V, \forall k \in K \quad (12)$$

Restrições de atribuições de veículo:

$$\sum_{j \in V'} x_{0j} = y_k \quad \forall k \in K \quad (13)$$

$$\sum_{i \in V'} x_{in+1k} = y_k \quad \forall k \in K \quad (14)$$

Restrições de Capacidade:

$$\sum_{i \in V} \frac{m_i}{\rho_B} \sum_{j \in V''} x_{ijk} \leq Q y_k \quad \forall k \in K \quad (15)$$

Restrições de Horizonte de Tempo:

$$\sum_{i \in V'} \sum_{j \in V''} \frac{d_{ij}}{v} x_{ijk} + \sum_{i \in V} \frac{m_i}{R_p} \sum_{j \in V''} x_{ijk} \leq H \quad \forall k \in K \quad (16)$$

Integralidade:

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i \in V', \forall j \in V'', \forall k \in K \quad (17)$$

$$y_k \in \{0,1\} \quad \forall k \in K \quad (18)$$

A função objetivo, equação (10), consiste na distância total percorrida por todos os veículos. Considerando uma frota homogênea com veículos iguais, a minimização da distância total implica na minimização do custo de transporte.

As restrições de fluxo, equações (11) e (12), garantem que o ponto i (ou j) seja visitado e por um único veículo k . Adicionalmente, que o mesmo veículo que chega no ponto i , sai do i

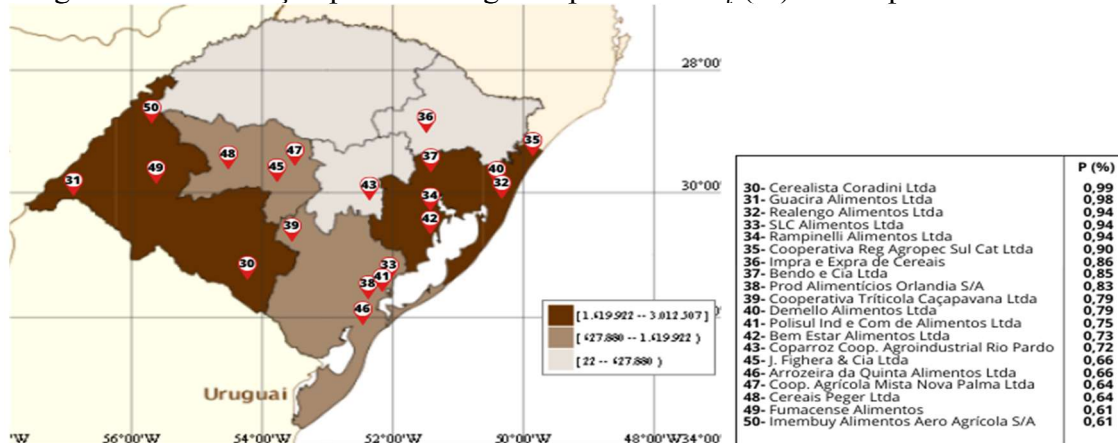
por uma questão de consistência (continuidade física). As restrições de fluxo, equações (13) e (14), garantem a utilização do veículo k caso ele saia da origem (ponto 0), e adicionalmente que ele retorne ao ponto de destino final (ponto $n+1$). A restrição de capacidade, equação (15), garante que a capacidade máxima de armazenamento do veículo não seja excedida. A restrição de horizonte de tempo, equação (16), garante que o tempo máximo de rota de cada veículo incluindo o tempo de deslocamento e o tempo de processamento não seja excedido. As restrições de integralidade, (17) e (18), estabelecem que as variáveis são de natureza binária, podendo assumir valor 0 ou 1.

3.3 Caracterização do Estudo de Caso

A caracterização e levantamento dos dados da quantidade de resíduo gerado no beneficiamento de arroz do Rio Grande do Sul foi realizada a partir de revisão da literatura, onde foram identificadas e escolhidas as empresas beneficiadoras de arroz do Rio Grande do Sul consideradas neste estudo. O trabalho utilizou como base os dados estudados por De Lima, Borges, Espindola e Leonardi (2022), onde os autores utilizaram o *Ranking* das 50 maiores empresas beneficiadoras de arroz do Rio Grande do Sul para o ano de 2019, este fornecido pelo Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA) e divulgado pelo Planetaarroz.

No trabalho De Lima, Escobar, Borges e Leonardi (2025), foram selecionados um subconjunto de 20 beneficiadoras que teriam casca disponível para doação. A quantidade de casca gerada foi estimada utilizando o percentual de 20% em massa relatada por Lorenzetti, Neuhaus e Schwab (2012) e De Lima, Borges, Espindola e Leonardi (2022). Já para encontrar o valor de casca disponível diariamente foi utilizado o percentual de 30% de casca disponível para doação descrito por Lorenzetti, Neuhaus e Schwab (2012). A Figura 1 apresenta a localização de tais empresas e o percentual de casca gerada P_i (%) no cenário do RS.

Figura 1 – Localização por mesorregião e percentual P_i (%) das empresas escolhidas.



Fonte: Adaptada de De Lima, Borges, Espindola e Leonardi (2022).

Foram analisadas as 20 beneficiadoras, assim foram considerados 20 pontos e 1 depósito (origem e destino final) conforme pode ser visualizado no Quadro 1 que mostra os pontos e suas respectivas localizações.

Quadro 1– Localização de todos os pontos.

#	Descrição	Localização
0	Garagem/Depósito	Centro - Triunfo, RS
1	Cerealista Coradini Ltda	Av. Visc. Ribeiro de Magalhães, km 21 - Pedras Brancas, Bagé - RS
2	Guacira Alimentos Ltda	R. Érico Veríssimo, 208 - Ipiranga, Uruguaiana - RS, 97500-610
3	Realengo Alimentos Ltda	Chicolomã, Santo Antônio da Patrulha - RS, 95500-000
4	SLC Alimentos Ltda	7H4F+3Q - Capão do Leão, RS, 96160-000
5	Rampinelli Alimentos Ltda	BR-290, 116 - Boa Vista, Eldorado do Sul - RS, 92990-000
6	Cooperativa Reg Agropec Sul Catarinense Ltda	BR101 KM 8,5 - São Braz, Torres - RS, 95560-000
7	Impra e Expra de Cereais	BR-471, km 161 - Distrito Industrial, Rio Pardo - RS, 96640-000
8	Bendo e Cia Ltda	RS-124 - Montenegro, RS, 95780-000
9	Prod Alimentícios Orlandia S/A	Av. Leopoldo Brod, 634 - Três Vendas, Pelotas - RS, 96070-370
10	Cooperativa Tríticola Caçapavana Ltda	Av. João Manoel de Lima e Silva, 1330 - Caçapava do Sul, RS, 96570-000
11	Demello Alimentos Ltda	Rod. Cristóvão P. de Abreu, 604 - Menino Deus, Santo Antônio da Patrulha - RS, 95500-000
12	Polisul Ind e Com de Alimentos Ltda	Av. Fernando Osório, 5508 - Três Vendas, Pelotas - RS, 96055-000
13	Bem Estar Alimentos Ltda	RS-717, Tapes - RS, 96760-000
14	Coparroz Cooperativa Agroindustrial Rio Pardo	R. Dr. João Pessoa, 21 - São João, Rio Pardo - RS, 96640-000
15	J. Figuera & Cia Ltda	Estr. p/ Vila Figueiras - Arroio Grande, Santa Maria - RS
16	Arrozeira da Quinta Alimentos Ltda	R. Romar Demétrio Vanzin, 5000 - Distrito Industrial, Rio Grande - RS, 96204-460
17	Coop. Agrícola Mista Nova Palma Ltda	Av. Emancipação, 575 - Nova Palma, RS, 97250-000
18	Cereais Peger Ltda	R. Cap. Nicolau Schmidt, 200 - Mata, RS, 97410-000
19	Fumacense Alimentos	br 290 km 577 Nova - Brasília, Alegrete - RS, 97546-090
20	Imembuy Alimentos Aero Agrícola S/a	R. Mal. Deodoro - Várzea, São Borja - RS, 97670-000

Fonte: De Lima et al. (2025)

A distância entre as localidades foi obtida pelo *Google Maps* a partir do conhecimento das localidades geográficas das beneficiadoras consideradas (Quadro 1). A partir do

conhecimento da quantidade de casca disponível diária considerando o rendimento e massa específica do bio-óleo de 50% e 1,2 kg/l, respectivamente, e taxa de processamento de 400 kg/h foi possível estimar o volume de bio-óleo gerado e o tempo de processamento necessário. Na Tabela 2 são apresentados os resultados obtidos para as 20 beneficiadoras estudadas. Pode-se observar que para estas mais de 138 mil kg de casca de arroz encontram-se a disposição para o processamento local e com isso pode ser gerado 57.529,11 litros de bio-óleo em 143,82 h de processamento (aproximadamente 6 dias).

A fim de determinar o tempo de deslocamento dividiu-se a distância entre os pontos por 60 km/h (velocidade média de deslocamento considerado nesse trabalho). O tempo total de cada rota foi encontrado mediante a soma do tempo de deslocamento com o tempo de processamento. Por fim, para o tempo acumulado somou-se o tempo total com o tempo total do ponto anterior. Já para o volume de óleo coletado considerou-se o volume de óleo no respectivo ponto. Para o volume acumulado coletado por um dado veículo somou-se o volume total dos pontos percorridos no seu respectivo roteiro.

Tabela 2 – Dados do estudo de para as 20 beneficiadoras.

	Casca diária (ton)	Casca disponível diária (kg) ⁽¹⁾	Bio-óleo (kg)	Bio-óleo (L) ⁽²⁾	Tempo processamento (h)
1	28,86	8.658,08	4.329,04	3.607,53	9,02
2	28,50	8.550,08	4.275,04	3.562,53	8,91
3	27,38	8.215,40	4.107,70	3.423,08	8,56
4	27,30	8.190,08	4.095,04	3.412,53	8,53
5	27,20	8.158,68	4.079,34	3.399,45	8,50
6	26,08	7.825,15	3.912,58	3.260,48	8,15
7	24,96	7.486,52	3.743,26	3.119,38	7,80
8	24,84	7.450,68	3.725,34	3.104,45	7,76
9	24,14	7.241,59	3.620,79	3.017,33	7,54
10	23,07	6.921,70	3.460,85	2.884,04	7,21
11	22,93	6.879,45	3.439,73	2.866,44	7,17
12	21,68	6.504,99	3.252,49	2.710,41	6,78
13	21,12	6.335,34	3.167,67	2.639,73	6,60
14	20,85	6.256,11	3.128,05	2.606,71	6,52
15	19,11	5.732,38	2.866,19	2.388,49	5,97
16	19,09	5.726,14	2.863,07	2.385,89	5,96
17	18,73	5.619,78	2.809,89	2.341,58	5,85
18	18,69	5.606,79	2.803,40	2.336,16	5,84
19	17,85	5.356,27	2.678,14	2.231,78	5,58
20	17,85	5.354,63	2.677,32	2.231,10	5,58
Total	460,23	138.069,86	69.034,93	57.529,11	143,82

⁽¹⁾ Usado o percentual de 30% de casca disponível para doação

⁽²⁾ Considerada a massa específica do bio-óleo de 1,2 kg/l

⁽³⁾ Fonte: De Lima et al. (2025)

Para cada cenário analisado foi utilizada uma frota de veículos homogênea, ou seja, todos os veículos apresentam a mesma capacidade. Adicionalmente, os custos foram restringidos apenas para os de logística, uma vez que o resíduo é tratado sem custo de compra. Uma vez que a frota foi considerada homogênea, a metodologia foi aplicada buscando minimizar a distância total percorrida, e o custo é estimado posteriormente. Para esse caso particular, minimizar a distância percorrida implica na minimização de custos. A partir da distância percorrida pelo veículo e sua autonomia (considerado dependente do tamanho do veículo) em quilômetros por litro de diesel é possível estimar a quantidade de diesel a ser utilizado, e com o custo diesel pode-se estimar o custo de transporte das rotas e o custo total considerando todas as rotas.

3.4 Cenários de Análise

Foram realizadas duas análises. Na primeira foram mantidos os cenários 1 e 2 estudados do trabalho anterior (De Lima, Escobar, Borges e Leonardi, 2025) com veículos de capacidade de 20 mil litros e 30 mil litros. Através dessa análise foi possível validar o modelo e comparar os resultados diretamente com o estudo realizado anteriormente e utilizar estrategicamente as soluções previamente obtidas de forma heurística para melhorar as soluções encontradas nesse trabalho. Na segunda análise foi avaliado o efeito da capacidade do veículo nas soluções obtidas para a obtenção de soluções passíveis de implementação prática.

Nas duas análises foram desconsideradas informações de trânsito, jornada do motorista e custos de aquisição do veículo com o objetivo de simplificar a modelagem e encontrar a solução para o problema de roteamento veicular. Também é válido ressaltar que, quanto mais considerações um PRV tiver, mais complexo o mesmo se torna e consequentemente, mais tempo e estudo são necessários para resolvê-lo.

Parâmetros do problema como rendimento do processo e taxa de processamento foram obtidos a partir de uma revisão da literatura. Outros parâmetros característicos do estudo de caso foram obtidos dos dados tais como quantidade de resíduo e localização geográfica. O Horizonte de tempo, capacidade dos veículos foram arbitrados compatível com a dimensão do problema. A capacidade e o número de veículos da solução a ser implementada na prática são definidos indiretamente a partir de diferentes instâncias de resolução do modelo.

3.5 Considerações sobre a solução computacional

O modelo de programação matemática apresentado na seção 3.3 foi implementado no sistema de modelagem GAMS e se utilizou o solver CPLEX para todas as instâncias com um computador de memória ram de 4 GB e processador core i3 de 2.00GHz. O tempo máximo foi

arbitrariamente limitado em um tempo máximo de 30 horas (considerando razoável para um planejamento semanal) retornando a melhor solução viável encontrada.

O solver CPLEX 22 utilizado é baseado no algoritmo *Branch & Bound* (B&B). Esse método resolve uma sequência de subproblemas de programação matemática lineares (LPs). A cada iteração, limites inferiores (LB) e limites superiores (UB) para o valor da função objetivo vão sendo atualizados, sendo o limite superior uma solução viável para o problema. A diferença relativa entre esses limites é o que se chama de *gap*. Um *gap* relativo de 0% implica na solução ótima. No entanto, o algoritmo pode ser interrompido quando for atingido, por exemplo o tempo máximo disponível, permitindo assim que soluções (sub)ótimas sejam encontradas. Cabe então ao analista estabelecer um compromisso entre a qualidade da solução obtida e o tempo e esforço computacional para sua obtenção.

Embora a estimativa inicial das variáveis influencie o tempo de execução, ela não altera significativamente a solução final obtida. No entanto, soluções heurísticas e intuitivas podem ser usadas estrategicamente para reduzir a complexidade do problema, reduzindo sua dimensionalidade, e obter boas soluções subótimas como discutido na seção 4.

4. Resultados

4.1 Análise 1: Comparação e Validação do Modelo

Com o objetivo de comparar e utilizar os resultados obtidos da aplicação da metodologia heurística, foram mantidos os parâmetros utilizados no estudo DE Lima, Escobar, Borges e Leonardi (2025) listados na Tabela 1. Utilizando a metodologia heurística, a melhor solução encontrada foi com 4 rotas e uma distância total percorrida de 3183,8 km. Tendo em vista a quantidade total de bio-óleo a ser coletada (próxima a 58000 l) é necessário pelo menos 3 rotas com capacidade de 20 mil litros. Com essa capacidade foram testadas soluções com 3 e 4 rotas.

Inicialmente foi testada a utilização de 3 rotas ($k_{max}=3$). Após 30 horas de execução, o algoritmo foi interrompido retornando como melhor solução viável (UB) uma distância total de 3196,7 km (função objetivo). Essa solução apresenta um *gap* de 9,68% com limite inferior de 2887,2 km. Não se pode garantir otimalidade nesse caso, mas que no máximo a função objetivo apresentaria um valor 9,68% menor. É importante verificar que essa solução não é melhor que a solução obtida pela metodologia heurística com 4 rotas.

Foi analisada a solução obtida a partir da fixação de alguma das rotas obtidas na solução pelo método heurístico. Ao fixar alguma rota, os pontos da rota fixada são excluídos das demais rotas, reduzindo assim, a dimensionalidade do problema resultante a ser resolvido. Com 3 rotas, ao fixar a rota 1 foi obtida a mesma solução de distância total de 3196,7 km como solução ótima

(*gap* de 0%) em 652,6 segundos. Ao fixar as demais rotas (2, 3 ou 4) o problema se tornaria inviável pela capacidade insuficiente para coletar o bio-óleo.

O problema foi testado com 4 rotas ($k_{max}=4$), sendo resolvido livremente e fixando alguma das quatro rotas da solução obtida pela metodologia heurística. Na Tabela 3 são apresentados os resultados obtidos dessa análise. Ao fixar alguma rota é possível perceber uma redução significativa no número de variáveis inteiras. Como consequência foi possível obter soluções ótimas globais (*gap* de 0%), e para os casos em que essa redução da dimensionalidade foi maior, as soluções foram obtidas em curtos espaços de tempo. Para o caso em que resolvemos o problema sem fixar algum roteiro a melhor solução encontrada quando o tempo máximo foi atingido com um *gap* de 12%, limite inferior de 2783,7 km. Essa solução foi a mesma encontrada ao fixar a Rota 4, nesse caso sendo a solução ótima.

A melhor solução obtida com as rotas é apresentada na Tabela 4. A solução consiste em 4 veículos com uma distância total percorrida de 3119,0 km. Na prática, devido ao tempo total das rotas ser muito inferior a 168 horas, duas rotas podem ser realizadas sequencialmente com um veículo fazendo 2 rotas cada. Desta forma, podemos usar dois veículos de capacidade de 20 mil litros para a implementação prática dessa solução.

Embora a redução na função objetivo em comparação à solução obtida pela metodologia heurística (3183,2 km) em relação a esta melhor solução pela programação matemática (3119,0 km) seja pequena, da ordem de 2%, essa análise permitiu validar o modelo e demonstrar que o conhecimento prévio de uma solução por uma metodologia heurística pode ser utilizado para reduzir a dimensionalidade do problema e obter soluções viáveis, ótimas em alguns casos, em tempo razoável. O uso do algoritmo B&B nos permite obter soluções intermediárias, mesmo que subótimas, boas o suficiente para uma implementação prática. Adicionalmente, é possível conhecer os limites que podem ser alcançados, até para mensurar de forma subjetiva a validade do esforço necessário permitindo ao analista uma análise de compromisso entre potencial de melhoria e tempo/esforço computacional. Por fim, essa modelagem matemática permite que cenários sejam analisados de forma mais facilitada do que quando aplicamos uma metodologia heurística.

4.2 Análise 2: Efeito da Capacidade do Veículo

Nesta segunda análise foi considerado variar a capacidade do veículo para verificar de que forma isso impactaria no planejamento semanal, e desta forma, identificar qual seria o número de veículos e a capacidade mais adequada da frota. Inicialmente foi considerada a capacidade dos veículos de 30 mil litros, para a qual se tinha a solução prévia pela metodologia

heurística. A melhor solução encontrada com a metodologia heurística neste cenário foi de 3095,1 km utilizando 3 rotas. O problema foi resolvido com 2 rotas e em 30 horas a melhor solução obtida apresentou como função objetivo 2895,0 km e um *gap* de 4,75%. Com 3 rotas, em 30 horas, a solução encontrada foi de 2795,3 km e um *gap* de 3,70% (limite inferior de 2656,96 km), uma redução de 9,69% em relação à solução obtida pela metodologia heurística.

Tabela 3 – Função objetivo, número de variáveis e tempo computacional – cenário com 4 veículos de 20 mil litros.

Rota Fixa	Total Distância (km)	N. Variáveis Inteiras	Tempo Computacional(s)	Gap (%)
Rota 1	3180,5	547		0
Rota 2	3181,0	631	19,6	0
Rota3	3121,8	721	178,4	0
Rota 4	3119,0	1027	33005,8	0
Nenhuma	3119,0	1681	108000	12,0

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Tabela 4 – Melhor solução do cenário de 20 mil L- distância total de 3119 km.

Rota	Distância (km)	Tempo (h)			Óleo (L)
		Deslocamento	Processamento	Total	
0-13-12	931,8	15,53	44,35	59,88	17773,42
9-16-4-1-0					
0-8-3-6	547,80	9,13	40,14	49,27	16053,90
11-5-0					
0-10-19-2-20	1437,10	23,95	44,94	68,89	17975,72
8-15-17-0					
0-7-14-0	202,30	3,37	14,32	17,69	5729,06

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Considerando 3 rotas com capacidade de 30 mil litros foi testado fixar algum roteiro, assim como foi feito para o cenário de 20 mil litros na subseção 4.1. Ao fixar a rota 1 foi encontrada a solução ótima de 3069.5 km em 7,58 segundos, e neste caso apenas 2 rotas foram utilizadas. Fixando a rota 2 encontramos a solução ótima de 3095,1 km em 33,4 segundos. E fixando a rota 3 chegamos à solução ótima de 3031,2 km em 8,02 segundos. Nesses casos, soluções ótimas foram encontradas de forma rápida e justificada pela redução na

dimensionalidade do problema. No entanto, são soluções subótimas menos favoráveis quando comparadas à solução subótima obtida sem fixar nenhuma rota com 30 horas de execução com 2795,3 km. Isto se justifica pelo fato de que nem sempre a solução heurística encontrada é necessariamente próxima da solução ótima.

Foi testado utilizar duas rotas de 40 mil litros obtendo solução ótima com distância total de 2663,2 km em 1318,72 segundos. Foram realizados testes com capacidade máxima de 60 mil litros. Com 2 rotas foi encontrada a solução ótima com distância total de 2534,2 km em 365 segundos. Essa solução é a melhor encontrada sendo apresentada na Tabela 5. Com essa capacidade maior foi possível a inclusão de mais pontos no roteiro 1 sem a necessidade de retornar ao depósito. Com 1 rota o problema se torna inviável pois excederia o tempo limite de uma semana estabelecido. A restrição de tempo foi então relaxada (aumentando o horizonte de tempo) e verificou-se que seria possível atender todos os pontos em 184,39 h (1 semana e aproximadamente 16 horas) com distância total de 2438,4 km.

Tabela 5 – Resultados para a melhor solução de 60 mil litros - distância total de 2534,2 km.

Rota	Distância Total (km)	Tempo (h)			Óleo (L)
		Deslocamento	Processamento	Total	
0-13-12 9-16-4-1-0	1982,6	15,53	44,35	145,15	44874,68
0-7-14-0	551,6	3,37	14,32	40,83	12654,45

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Com todas as análises realizadas os resultados foram sumarizados na Tabela 6. O aumento da capacidade permite que: (i) menos rotas sejam utilizadas no planejamento reduzindo a dimensionalidade do problema resultante, reduzindo o esforço computacional para encontrar soluções mais próximas da ótima; (ii) a distância total seja reduzida, uma vez que mais pontos podem ser incluídos em uma rota. Comparando subproblemas que apresentam dimensionalidade similar, ou seja, mesmo número de rotas consideradas, quanto mais restritiva for a capacidade, mais esforço computacional é investido para encontrar a solução ótima. Sem as restrições de capacidade e tempo impostas, a melhor solução consistiria numa única rota com tempo de percurso de 184,390 h capaz de coletar todo o bio-óleo. Nesse caso o veículo deveria ter a capacidade suficiente, ou seja, acima de 57529,11 litros.

Em uma análise de custo de logística (custo de transporte), a estimativa do custo de transporte pode ser estimada a partir do desempenho do veículo em km rodados/litro de diesel e pelo valor médio do diesel em R\$ por litro. Para ser mais realista, foi considerado que o desempenho/autonomia do veículo depende da sua capacidade. Considerando uma autonomia de 2,5 km por litro o custo de transporte da melhor solução (Tabela 5) foi de 6588,92R\$.

Tabela 6. Melhores soluções encontradas para o estudo de caso.

Rota	Distância Total (km)	Gap %	Tempo Computacional (s)
3 Rotas de 20 mil L	3195,2	9,68	108000
4 Rotas de 20 mil L	3119,0	12,0	108000
2 Rotas de 30 mil L	2895,0	4,75	108000
3 Rotas de 30 mil L	2795,3	3,70	108000
2 Rotas de 40 mil L	2663,2	0	1318,72
2 Rotas de 60 mil L	2534,2	0	365,0

Fonte: Elaborada pela autora (2026).

5. Considerações Finais

Nesse trabalho foi desenvolvido um modelo matemático de PRV adaptado para o contexto do processamento descentralizado de resíduos através do uso de unidades móveis de processamento térmica via pirólise. Foi utilizado dados de um estudo de caso da cadeia do arroz, sendo consideradas 20 localidades geográficas. O modelo foi validado e comparado com um estudo anterior se mostrando eficiente, uma vez que foi possível obter soluções com custos menores. Ainda mais importante, o conhecimento de soluções prévias nos permite utilizar essa informação de forma estratégica para gerenciar a dimensionalidade do modelo, permitindo assim, soluções em tempo hábil e soluções práticas com mais autonomia.

Foram obtidas soluções com uma frota de veículos entre 2 e 4 veículos, com capacidade variando entre 20 e 60 mil litros e um planejamento semanal (168 horas). Para cada cenário foi possível obter as melhores rotas. Através dos resultados obtidos foi possível verificar que para atendimento das 20 beneficiadoras de arroz do Rio Grande do Sul analisadas neste trabalho o melhor cenário estudado para o problema de roteamento veicular foi o que considerou a capacidade de armazenamento do veículo de coleta do bio-óleo de 60 mil litros. Estes resultados apontaram que seriam necessários dois caminhões tanque com esta capacidade para atendimento das 20 empresas, sendo possível processar localmente mais de 138 mil kg de casca de arroz que estão disponíveis diariamente pelas mesmas e gerar mais de 57 mil litros de bio-óleo em um tempo total de percurso inferior a 1 semana, respeitando assim as restrições de capacidade e tempo estabelecidas. Alternativamente, seria possível a utilização de um único

veículo com capacidade de 60 mil litros para atender todos os pontos em 1 semana e aproximadamente 16 horas.

Em continuidade à pesquisa e trabalhos futuros destaca-se o estudo do pós-processamento do bio-óleo coletado e também a consideração de cenários mais realísticos onde a jornada de trabalho do motorista, tempo de pernoite e informações de trânsito, como por exemplo, os pedágios são analisados; a aplicação do modelo em outros estudos de caso; extensões no modelo que permita otimizar o custo total utilizando frotas heterogêneas e levar em consideração o investimento na aquisição dos veículos; a proposição de estratégias para definição do tamanho da frota (número de veículos) e capacidade dos mesmos; e pretende-se avaliar a utilização de centrais de processamento e sua respectiva localização geográfica.

Com a realização deste trabalho foi possível encontrar o roteiro mais favorável economicamente, com menores custos de transporte, para a utilização de unidades móveis de pirólise rápida para o processamento local de resíduos dando uma possível destinação para os mesmos contribuindo com a redução de impactos ambientais e a busca de soluções econômicas e eficientes.

Referências

AGRIZZI, T. **Produção de bio-óleo a partir da pirólise de casca de coco em leito fixo**. 2018. 95f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2018.

BORGES, F. C. **Estudo do processamento termoquímico de biomassas com micro-ondas: pirólise rápida de biomassas residuais e microalgas**. 2014. 132f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2014.

DE LIMA, R. E.; ARAGÃO, M. E.; BORGES, F. C.; LEONARDI, A. **Estratégias logísticas de unidades móveis de processamento termoquímico de resíduos aplicadas à cadeia de beneficiamento de arroz**. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL (SOBER), 63., 2025, Passo Fundo. *Anais [...]*. Passo Fundo: UPF, 2025. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/sober2025/1105254-estrategias-logisticas-de-unidades-moveis-de-processamento-termoquimico-de-residuos-aplicadas-a-cadeia-de-benefi/>. Acesso em: 1 abr. 2026. DOI: <https://doi.org/10.29327/9786527214786.1105254>.

DE LIMA, R. E.; BORGES, F.C.; ESPINDOLA, J. D. S.; LEONARDI, A. Potencial de desenvolvimento regional através do reaproveitamento dos resíduos do beneficiamento do arroz no Rio Grande do Sul. **COLÓQUIO-Revista do Desenvolvimento Regional**, Taquara, v. 19, n. Edição Especial 1 (SOBER), p. 4-24, mar. 2022.

FONTOURA, L. P. **Potencial econômico e aplicações da casca de arroz no Rio Grande do Sul**. 2015. 57f. Monografia (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

HA, M. et al. GIS program to optimize feedstock utilization for mobile pyrolysis units. In: **2011 ANNUAL INTERNATIONAL MEETING**, Louisville, KY, 7–10 Aug. 2011. Proceedings [...]. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2011. p. 1.

IRGA - INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ. **Ranking beneficiamento das 50 maiores indústrias de arroz**. Disponível em: <http://www.irga.rs.gov.br/>. Acesso em 05 jun. 2022.

JUNIOR, A. A. Da T. **Rotas termoquímicas para reaproveitamento de biomassas residuais**. 2022. 63f. Monografia (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2022.

KEITH, K.; CASTILLO-VILLAR, K. K. Stochastic programming model integrating pyrolysis byproducts in the design of bioenergy supply chains. **Energies**, v. 16, n. 10, p. 4070, 2023.

LORENZETT, D. B.; NEUHAUS, M.; SCHWAB, N. T. Gestão de resíduos e a indústria de beneficiamento de arroz. **Revista Gestão Industrial**, v.8, n. 1, p. 219-232, 2012.

MORAIS, Pedro Ferreira. **Logística do escoamento da produção em biorrefinarias descentralizadas**. 2021. 78f. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

NOVAES, A. G. **Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição**. 3. ed. 11. reimpr. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

OLIVEIRA, T. K. R. D. **Desenvolvimento de um sistema móvel para agregação de valor em resíduos florestais**. 2020. 56f. Monografia (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

SCHENA, T. **Pirólise da fibra da casca de coco: caracterização do bio-óleo e após a aplicação de dois processos de melhoramento**. 2015. 173f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2015.

SOSA, E. E. A. **Desenvolvimento de um sistema de pirólise aquecido por micro-ondas**. 2019. 83f. Monografia (Graduação em Engenharia Química) – Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, Santa Cruz do Sul, 2019.

STREMEL, D. P.; CORDEIRO, L. A. Modelagem e otimização da cinética do processo de pirólise de biomassas florestais. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 16, n. 1, p. 1-13, 2023.

TOTH, P.; VIGO, D. An overview of vehicle routing problems. In: The vehicle routing problem. [S.l.]: SIAM, 2002. p. 1–26. Citado 5 vezes nas páginas 26, 27, 55, 56 e 65. as 26, 27, 55, 56 e 65.