

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
ENG. DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

**PEDRO FERREIRA MORAIS - 218137**

**LOGÍSTICA DO ESCOAMENTO DA  
PRODUÇÃO EM BIORREFINARIAS  
DESCENTRALIZADAS**

Porto Alegre  
2021



**PEDRO FERREIRA MORAIS - 218137**

**LOGÍSTICA DO ESCOAMENTO DA  
PRODUÇÃO EM BIORREFINARIAS  
DESCENTRALIZADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC-CCA) apresentado à COMGRAD-CCA da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de *Bacharel em Eng. de Controle e Automação* .

**ORIENTADOR:**

Prof. Dr. Jorge Otávio Trierweiler

Porto Alegre

2021



**PEDRO FERREIRA MORAIS - 218137**

**LOGÍSTICA DO ESCOAMENTO DA  
PRODUÇÃO EM BIORREFINARIAS  
DESCENTRALIZADAS**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção dos créditos da Disciplina de TCC do curso *Eng. de Controle e Automação* e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Jorge Otávio Trierweiler, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Jorge Otávio Trierweiler, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Michel José Anzanello, UFRGS

Doutor pela Rutgers, The State University of New Jersey – New Brunswick, Estados Unidos

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Fernanda Cabral Borges, FURG

Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

\_\_\_\_\_  
Marcelo Götz

Coordenador de Curso

Eng. de Controle e Automação

Porto Alegre, Maio de 2021.



## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu avô Paulo, quem mais ansiava por sua realização, mas que não pode vê-lo concluído.





## AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pelo apoio ininterrupto ao longo dos meus estudos, pelo suporte nos momentos difíceis e pela presença nos momentos de comemoração. Agradeço aos meus colegas, professores e outros profissionais pela compreensão e ajuda ao navegar os trâmites formais da Academia. Agradeço ao Sílvio, ao meu pai e à minha irmã pela as discussões e ajuda na composição, revisão e correção do texto. Agradeço à minha mãe pela sua obstinação que me ajudou a tornar este trabalho realidade. Agradeço ao meu orientador, Prof. Jorge, pela oportunidade de desenvolver um trabalho tão útil e importante, assim como ao Prof. Marcelo Escobar pela troca de ideias sobre Otimização Matemática. Agradeço à Banca Examinadora pelas críticas e sugestões de melhoria do trabalho.

Agradeço, principalmente: à minha companheira Natália, por dividir comigo o desafio de perdurar a realização e escrita deste trabalho em combinação com a manutenção de um lar; e à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, pela oportunidade de realizar meus estudos, de forma gratuita, no Brasil e na França, em instituições de ensino de qualidade.



## RESUMO

Esta monografia apresenta o estudo do problema de otimização da logística de escoamento da produção em biorrefinarias distribuídas (unidades produtoras de pequena escala juntas aos minifúndios produtores de biomassa) para a produção de bioetanol, utilizando como matéria prima a batata-doce. Foi desenvolvido um modelo de Programação Linear Inteira Mista (MILP), que representa a operação de unidades produtoras (pontos de coleta), caminhões-tanque (para o transporte do bioetanol) e de uma Central (ponto de destino final), ao longo de um número arbitrário de dias, buscando minimizar a distância percorrida pelos caminhões, respeitando restrições lógicas, temporais e capacitivas. Para ilustrar a aplicação da formulação proposta, se desenvolveu um estudo de caso em uma região produtora de batata-doce entre os vales dos rios Jacuí e Taquari, no estado do Rio Grande do Sul. O estudo compreendeu uma Central, 26 unidades de produção e dois caminhões-tanque, analisados ao longo de 11 dias. Com esta configuração, foram realizadas seis simulações, alterando o número de unidades de atendimento, de caminhões-tanque e de dias trabalhados. Os resultados demonstram que o modelo proposto é funcional, porém está sujeito a aumento expressivo da complexidade com o aumento do número de fatores considerados. São propostas várias possibilidades de trabalhos futuros com potencial de resolver o problema da complexidade.

**Palavras-chave:** Engenharia Química, Bioetanol, Biorrefinarias Descentralizadas, Roteamento Veicular, Otimização Matemática, Programação Linear Inteira Mista.



## ABSTRACT

This work presents the study of an optimization problem of production flow logistics in distributed biorefineries (small-scale production units along biomass-producing small farms) for the production of bioethanol, using sweet potato as raw material. A Mixed Integer Linear Programming (MILP) model was developed, which represents the operation of producing units (collection points), tank trucks (for the transportation of bioethanol) and a Central unit (final destination point), along an arbitrary number of days, seeking to minimize the distance traveled by the trucks while respecting logical, temporal and capacitive restrictions. To illustrate the application of the proposal, a case study was developed in a sweet potato producing region between the Jacuí and Taquari Valleys, in Rio Grande do Sul. The study comprised a Central, 26 production units and two tank trucks, analyzing the tours over 11 days. Within this configuration, six simulations were performed, altering the number of units, the number of tank trucks, and the number of work days. The results demonstrate that the proposed model is functional, however, it is subject to expressive growth in complexity with the increase of factors being considered. Several possibilities of future works with the potential of solving the complexity problem are proposed.

**Keywords: Chemical Engineering, Bioethanol, Decentralized Biorefineries, Vehicle Routing, Mathematical Optimization, Mixed Integer Linear Programming.**



# SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES . . . . .	15
LISTA DE TABELAS . . . . .	15
LISTA DE ABREVIATURAS . . . . .	17
LISTA DE SÍMBOLOS . . . . .	19
<b>1 INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>21</b>
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA . . . . .</b>	<b>25</b>
<b>2.1 Produção de Bioetanol e Biorrefinarias . . . . .</b>	<b>25</b>
2.1.1 Biorrefino de Etanol e o Potencial da Batata Doce . . . . .	25
2.1.2 Biorrefinarias e o Modelo de Produção Distribuído . . . . .	26
<b>2.2 Logística de Biomassa e Biocombustíveis . . . . .</b>	<b>28</b>
<b>2.3 Modelagem Matemática e Otimização de Problemas de Logística . . . . .</b>	<b>28</b>
2.3.1 Otimização Matemática . . . . .	28
2.3.1.1 Características gerais e técnicas de otimização matemática . . . . .	29
2.3.1.2 Técnicas de otimização matemática . . . . .	29
2.3.1.3 Algoritmos de resolução de problemas de otimização . . . . .	30
2.3.1.4 Softwares (IDEs e/ou solvers) a se utilizar na solução desses problemas. . . . .	31
2.3.2 Problema de Roteamento Veicular . . . . .	32
2.3.2.1 Descrição do Problema . . . . .	32
2.3.2.2 Descrição da Variante com Janelas de Tempo . . . . .	32
2.3.2.3 Descrição da Variante Capacitada . . . . .	33
<b>3 PROPOSIÇÃO DE MODELAGEM DE OTIMIZAÇÃO . . . . .</b>	<b>35</b>
<b>3.1 Identificação de Condições e Variáveis do Problema . . . . .</b>	<b>35</b>
<b>3.2 Caracterização do Modelo Proposto . . . . .</b>	<b>37</b>
3.2.1 Conjuntos . . . . .	37
3.2.2 Constantes . . . . .	38

3.2.3	Variáveis . . . . .	39
3.2.4	Função Objetivo . . . . .	39
3.2.5	Restrições . . . . .	40
3.2.5.1	Restrições Lógicas . . . . .	40
3.2.5.2	Restrições Temporais . . . . .	40
3.2.5.3	Restrições Capacitivas . . . . .	41
<b>4</b>	<b>ESTUDO DE CASO: INSTALAÇÃO HIPOTÉTICA NA REGIÃO DOS VALES DOS RIOS JACUÍ E TAQUARI . . . . .</b>	<b>43</b>
<b>4.1</b>	<b>Justificativa e Contextualização . . . . .</b>	<b>43</b>
<b>4.2</b>	<b>Detalhamento dos Dados Utilizados . . . . .</b>	<b>44</b>
<b>4.3</b>	<b>Simulação e Resultados . . . . .</b>	<b>48</b>
4.3.1	Casos Estudados . . . . .	49
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	<b>51</b>
<b>5.1</b>	<b>Conclusões . . . . .</b>	<b>51</b>
<b>5.2</b>	<b>Trabalhos Futuros . . . . .</b>	<b>51</b>
	REFERÊNCIAS . . . . .	53
	REFERÊNCIAS . . . . .	53
	APÊNDICE A - MATRIZES DE DISTÂNCIA E TEMPO . . . . .	59
	APÊNDICE B - CÓDIGOS <i>PYTHON</i> . . . . .	63
	APÊNDICE C - CÓDIGO GAMS . . . . .	73



## Lista de ilustrações

1	Representação geométrica em 3 dimensões do algoritmo simplex. . .	31
2	Localização geográfica da Central e das 26 unidades de produção. . .	48

## Lista de tabelas

1	Coordenadas geográficas e endereço da Central e unidades. . . . .	44
2	Nível inicial do tanque de cada unidade, em litros. . . . .	47
3	Início de cada dia e volume de etanol reservado pela Central. . . . .	47
4	Unidades, caminhões e número de dias considerados para cada caso simulado. . . . .	49
5	Valor da função objetivo e <i>gap</i> para cada caso simulado. . . . .	50
6	Matriz de distâncias entre a Central e as unidades de produção, em quilômetros. . . . .	60
7	Matriz de tempo de deslocamento entre a Central e as unidades de produção, em horas. . . . .	61



## LISTA DE ABREVIATURAS

CCA Curso de Eng. em Controle e Automação



## LISTA DE SÍMBOLOS

- $\Sigma$  Somatório
- $\mathbb{R}_+$  Conjunto dos números reais não-negativos
- $\mathbb{Z}_+$  Conjunto dos números inteiros não-negativos
- $\mathbb{R}_+^n$  Espaço de coordenadas reais não-negativas de dimensão  $n$
- $\mathbb{Z}_+^n$  Espaço de coordenadas inteiras não-negativas de dimensão  $n$



# 1 INTRODUÇÃO

Um grande desafio para a persistência da prosperidade humana é a construção de crescimento econômico e ambientalmente sustentável. A busca do equilíbrio entre políticas energéticas e de desenvolvimento com a preservação do meio ambiente é um obstáculo que a presente e futuras gerações deverão enfrentar, evitando tanto a paralisia econômica, quanto as consequências nefastas do crescimento infrene.

Segundo a *International Energy Agency* (IEA, 2020), em 2018 o uso de combustíveis fósseis como carvão, petróleo e gás natural correspondia a 81,2% de toda a energia utilizada no mundo, uma pequena redução em relação a 1971, quando este valor era 86,3%. A queima desses combustíveis gera grandes volumes de gases de efeito estufa, principalmente o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que contribuem para o aquecimento global e consequente mudança climática. Entre 1970 e 2000, a contribuição da queima de combustíveis fósseis e processos industriais na emissão de gases de efeito estufa antropogênicos foi de 78% (IPCC, 2014), um alerta para a necessidade de desenvolvimento de novos hábitos.

Inequivocadamente, o aumento nas emissões de gases de efeito estufa é um fator determinante para o aquecimento global, cujos impactos climáticos, ecológicos, econômicos e sociais serão severos se a tendência persistir (IPCC, 2018).

O *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), criado no âmbito da Organização das Nações Unidas em 1988, aponta as causas, efeitos e riscos das mudanças climáticas para a humanidade e o meio ambiente e sugere maneiras de combater os problemas decorrentes. A proposta do Painel de limitar o aquecimento global a 1,5°C implica severas mudanças, as quais apresentam desafios profundos para o manejo sustentável dos diversos usos de terra para assentamentos humanos, alimentos, alimentação animal, fibras, bioenergia, armazenamento de carbono e biodiversidade (IPCC, 2018).

Neste contexto, o bioetanol apresenta-se como potencial solução para atenuar os impactos climáticos dos setores de energia e industrial, uma vez que pode ser produzido de maneira sustentável e utilizado tanto como combustível, quanto matéria prima para diversos processos industriais. De acordo com Yue, You e Snyder (2014), os biocombustíveis são os únicos recursos renováveis que conseguem resolver a dependência de combustíveis fósseis sem gerar a necessidade de renovação da frota de veículos.

O Brasil é destaque mundial na produção de bioetanol, etanol produzido a partir de biomassa. Em 2019, o etanol representou 7,0% do consumo total de energia do país (MME, 2020), enquanto o Brasil figurou 29,6% da produção mundial do combustível (RFA, 2021). Kohlhepp (2010) ratifica a posição de destaque que o Brasil possui na produção e consumo de bioetanol, tendo condições naturais favoráveis à produção, principalmente daquele extraído da cana de açúcar. Destaca o autor, que a produção brasileira se concentra nas regiões sudeste e nordeste do país. Na contramão desta posição destacada, o Rio Grande do Sul produz menos de 1% do etanol que consome anualmente (RIO GRANDE DO SUL, 2020).

A instituição de projetos governamentais para regular a produção de biocombustíveis atestam a importância do tema. Através da Lei nº 13.576/17, o Governo Federal estabeleceu a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), cujo objetivo principal é expandir a produção de biocombustíveis no Brasil, fundamentado na “importância da agregação de valor à biomassa brasileira e o papel estratégico dos biocombustíveis na matriz energética nacional”. O RenovaBio tem como princípios impulsionar o desenvolvimento tecnológico e a inovação, buscando aumentar a competitividade dos biocombustíveis nacionais. Além disso, estabelece metas para redução de emissão de gases de efeito estufa e ações no âmbito do Acordo de Paris (BRASIL, 2017).

Evidenciando preocupações semelhantes, no final do ano de 2020, o governo do Estado do Rio Grande do Sul, por iniciativa do Poder Executivo, encaminhou projeto de lei que institui o Programa Estadual de Produção de Etanol Amiláceo, o Pró-Etanol. Justificada pela baixa produção gaúcha de etanol, a proposta prevê uma política estadual de estímulo à produção de etanol baseada em matéria-prima de amiláceos, ou fontes de amido (RIO GRANDE DO SUL, 2020).

Ao pesquisar a viabilidade econômica e técnica de micro-usinas de etanol de batata doce, Masiero (2012) partiu da análise de quatro culturas agrícolas sul-rio-grandenses, prováveis produtoras de etanol: cana de açúcar, mandioca, batata doce e sorgo. Seu estudo evidenciou que, dentre as quatro culturas, a batata doce apresenta a maior viabilidade econômica no Estado, que se destaca como maior produtor da cultivar no país (IBGE, 2020). Entre os fatores que justificam essa melhor performance estão a alta produtividade desta cultura, em torno de 40 a 60 toneladas por hectare (por ano) (CASTRO; TREPTOW et al., 2012), o fato de desenvolver-se em solos “pobres”, ser resistente à seca, possuir alta taxa de multiplicação, baixa incidência de doenças e pragas e ciclo de crescimento curto, de 4 a 6 meses (TRIERWEILER, 2020).

As pesquisas do Grupo de Intensificação, Modelagem, Simulação, Controle e Otimização de Processos (GIMSCOP), UFRGS, do qual a presente pesquisa é tributária, evidenciam o caráter intrinsecamente extensivo da biomassa e dos resíduos agrícolas, com destaque para a batata doce. Considera-se, nessa lógica, a implantação de unidades de biorrefino de pequeno porte, altamente automatizadas e autônomas, monitoradas remotamente



por especialistas em um centro de apoio, configurando um modelo de produção descentralizado. Essa proposta é compatível com o crescimento sustentável e economia circular, possibilitando a integração de minifúndios e resíduos da produção e comercialização de biomassa no ciclo de produção de bioetanol (TRIERWEILER, 2020).

Um dos pilares para o sucesso deste modelo é a logística (TRIERWEILER, 2020), que aqui apresenta desafios distintos àqueles da produção centralizada em latifúndios e biorrefinarias de grande porte. Logística é o processo de planejamento, implementação e controle de processos para o transporte e armazenamento de bens e serviços do ponto de origem ao ponto de consumo com o propósito de atender aos requisitos do cliente (CSCMP, 2013). No contexto de biorrefinarias, a logística implica principalmente no escoamento da produção, seja da biomassa partindo da lavoura para a biorrefinaria ou do bioetanol desta para destino posterior. Enquanto no modelo tradicional de biorrefinarias o maior fluxo de material e, conseqüentemente, o maior desafio de logística se dá na forma de biomassa, com baixo valor agregado, do ponto de cultivo ao de refino, no modelo descentralizado esse processo é trivial, uma vez que o refino ocorre na mesma localidade da colheita. Resta, no modelo proposto, o escoamento do bioetanol, de maior valor agregado, produzido nas micro-usinas até a unidade central, onde será certificado ou convertido em outros produtos de valor superior.

A logística de biorrefinarias tradicionais apresenta desafios atrelados à baixa previsibilidade dos processos de cultivo, sendo dificultado o planejamento dinâmico da logística, e ao grande volume de material de baixo valor agregado a ser transportado. No modelo descentralizado, contando com o uso de monitoramento nas unidades de produção, passa a ser possível prever e reagir mais agilmente e precisamente aos cenários e adversidades que se apresentam ao longo da execução da logística. A introdução desse paradigma é fundamental para a automação do planejamento da logística, um dos pilares do modelo proposto (TRIERWEILER, 2020).

A logística do escoamento da produção envolve diversas premissas e requisitos, como não permitir o esgotamento de estoques de insumos, evitar a lotação de tanques de armazenamento, gerar planejamentos factíveis dados os recursos disponíveis, além de visar a minimização dos custos de operação. O presente estudo tem por objetivo propor um modelo de Programação Linear Inteira Mista (MILP, da sigla em inglês *Mixed-Integer Linear Programming*), condizente com a formulação apresentada por Kallehauge et al. (2005) para problema semelhante e que, por sua generalidade, pode ser utilizado como ponto inicial para o desenvolvimento de outras metodologias de resolução do problema. É necessário que tal modelo represente a operação das unidades produtoras (pontos de coleta), de caminhões-tanque (transporte do bioetanol) e de uma central (ponto de destino final) ao longo de um número arbitrário de dias. Além disso, busca-se também validar o modelo através de sua aplicação em um estudo de caso.



## 2 REVISÃO DA LITERATURA

A presente seção tem por objetivo apresentar alguns dos processos envolvidos na produção de bioetanol, extraído a partir da batata doce. Serão destacados também os aspectos que envolvem o desenvolvimento de uma metodologia de planejamento da logística de escoamento da produção de biorrefinarias distribuídas, tendo por base diversas pesquisas que abordaram temas relacionados a este objeto de estudo, a fim de contextualizar o problema estudado neste trabalho.

### 2.1 Produção de Bioetanol e Biorrefinarias

Nesta seção, serão apresentados os processos químicos e produtivos envolvidos na produção de bioetanol, contemplando o biorrefino e a caracterização do modelo descentralizado de biorrefinarias.

#### 2.1.1 Biorrefino de Etanol e o Potencial da Batata Doce

O bioetanol é o etanol ( $C_2H_6O$ ) produzido a partir da transformação de diferentes matérias-primas (biomassa), e se trata de um combustível de origem renovável, de alta octanagem, utilizado mais comumente no setor de transportes (GÜLDEN, 2019). No Brasil, o bioetanol é produzido principalmente a partir da cana-de-açúcar e do milho (BRASIL, 2020), porém outros cultivares também apresentam potencial para a produção de biocombustíveis (BORGES, 2010).

Weber (2017) e Petterle (2010) destacam que a batata doce possui grande importância na alimentação humana e expressivo potencial para produção de etanol. A produção brasileira desta cultura é a 16ª no ranking mundial (FAO, 2020), com produção de 805.412.814 t em 2019, destacando-se o Rio Grande do Sul, responsável por 21,73% da produção do país (IBGE, 2020). (CASTRO; EMYGDIO, 2008) ainda ressalta a potencialidade da utilização da batata doce para a produção de etanol no âmbito de sua cultura, que é rústica, não exigindo cuidados muito específicos para que se desenvolva.

Os principais fatores que afetam a produtividade nas lavouras de batata doce no Brasil são “a carência de tecnologia, alto índice de enfermidades e inexistência de cultivares

adaptadas às regiões de cultivo” (CASTRO; TREPTOW et al., 2012). Embora a produtividade média no Estado do Rio Grande do Sul seja de  $14,607 t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$ , um pouco acima da média nacional de  $14,059 t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$  (IBGE, 2020), ainda há espaço para melhorias nas condições de produção deste cultivar.

Pesquisas desenvolvidas pela Embrapa Clima Temperado e sua ação junto aos produtores têm apresentado mais oportunidades tecnológicas para o cultivo da batata doce adaptada às condições do Rio Grande do Sul. Destaca-se o cultivo da batata doce do tipo BRS Cuia. De acordo com Castro, Treptow et al. (2012),

A cultivar BRS Cuia mostra boa adaptação às condições climáticas do Rio Grande do Sul, sendo suscetível a geadas tanto na fase de plantio como na colheita. Com relação a esse elemento climático, o plantio pode ser realizado a partir do mês de agosto e a colheita até o mês de maio. A colheita ocorre entre 120 e 140 dias após o plantio. As plantas são relativamente resistentes à seca e necessitam de solo moderadamente arenoso.

Acerca da cultivar BRS Cuia, foram realizados experimentos para determinar sua produtividade e avaliar o potencial para cultivo no Estado. Segundo Castro e Becker (2011),

Muito produtiva, supera em muito as médias de produção nacional e a do Rio Grande do Sul. Em ensaios experimentais, produziu em média 40 toneladas por hectare, entretanto pode chegar a  $60 t/ha$ . Embora excelente para consumo doméstico, devido ao tamanho relativamente grande das batatas, mostra boa adequação ao processo industrial.

Além da BRS Cuia, outro cultivar de batata doce desenvolvido pela Embrapa é a BRS Gaita, desenvolvida com dupla finalidade, tanto para produção de etanol quanto para alimentação. De acordo com testes realizados, o cultivar produz batatas grandes e com alta quantidade de amido –  $26,50 g/100$ ), importante para a produção de bioetanol (CASTRO; BECKER et al., 2018). Como justificam os estudos acima mencionados, as melhorias genéticas e adaptações das práticas de cultivo podem garantir melhor produtividade por hectare e maior uniformidade, tornando a batata doce uma boa alternativa de biomassa.

### **2.1.2 Biorrefinarias e o Modelo de Produção Distribuído**

De acordo com a Embrapa (2011), “biorrefinaria é uma instalação que integra processos de conversão de biomassa em biocombustíveis, insumos químicos, materiais, alimentos, rações e energia”. Ainda segundo a Embrapa,

A otimização do uso da biomassa busca a utilização de sistemas integrados (matérias-primas, processos, tecnologias, produtos e resíduos) sustentáveis, de acordo com parâmetros técnicos que

levam em conta, entre outros aspectos, os balanços de massa e de energia, o ciclo de vida, o desenvolvimento socioeconômico regional, a geração e o consumo dos produtos e serviços de forma distribuída e a mitigação da emissão de gases do efeito de estufa.

O conceito de biorrefinaria e a utilização de sistemas integrados se alinham com o objetivo do presente trabalho, que estuda um modelo que aproxima o produtor da biomassa e o produto do biorrefino através da realização do processamento na mesma propriedade do cultivo.

Nos limites deste estudo, contudo, não será destacado o funcionamento do processo químico realizado na biorrefinaria, mas sim o processo que tem como elementos principais a biomassa (fornecida pelo agricultor) e os insumos, como enzimas e levedura (fornecidos pela central). O resultado desse processo é o etanol hidratado, produzido numa taxa previsível de acordo com o tipo de biomassa, o processo e a quantidade de matéria-prima utilizados. Masiero (2012) propõe e Schweinberger et al. (2016) revisam um procedimento que resulta em cerca de 1000 L/dia do produto por unidade de produção, que Masiero denomina micro-usina.

É de interesse classificar as biorrefinarias quanto a sua distribuição espacial, segundo a qual podem ser centralizadas ou distribuídas. Biorrefinarias centralizadas têm instalações de grande porte concentradas em um único local, para o qual devem ser fornecidas as matérias-primas e do qual se distribui o produto. Petterle (2010) destaca que as grandes usinas de produção de etanol no Brasil são também proprietárias das terras que produzem a cana-de-açúcar para o processo. Essa configuração, segundo a autora, pode acarretar no desgaste de recursos ambientais devido à monocultura da cana.

No modelo descentralizado de biorrefinarias proposto por Borges (2010), o vínculo entre o produtor agrário e a produção de bioetanol é mais estreito, pois as unidades de produção são de pequeno porte e localizam-se junto à produção da biomassa, majoritariamente em pequenas e médias propriedades rurais. Em relação ao modelo centralizado, a descentralização apresenta como vantagens:

- o aproveitamento do potencial de culturas regionais e sazonais;
- a possibilidade de produção integrada de alimentos, biocombustíveis e energia;
- a redução de custos e impacto ambiental do transporte da biomassa através da sua substituição pelo transporte de produtos de maior valor agregado; e
- o reaproveitamento de resíduos do processamento nas propriedades rurais próximas – uma alternativa para agregar valor na produção de pequenas e médias propriedades rurais.

A partir da caracterização de Borges (2010), é importante destacar que, no modelo distribuído proposto, após a colheita, existem as etapas de separação e pré-tratamento,

onde se dividem os produtos entre primários e intermediários. Os produtos classificados como primários podem ser comercializados, enquanto os intermediários ainda precisam passar pelo pré-tratamento – segunda etapa –, em que novamente são categorizados entre comercializáveis e intermediários. Os produtos intermediários passam então por uma terceira etapa, de especificação, e somente após isso podem ser mercantilizados.

## **2.2 Logística de Biomassa e Biocombustíveis**

O escoamento da produção é um ponto fundamental para o desenvolvimento deste trabalho, pois é a ponte que conecta o produtor agrário e unidade de produção à central, que faz o planejamento, supervisão e controle da rede de produção de bioetanol.

Como dependem de matérias primas provenientes do plantio agrícola, o fornecimento de biorrefinarias é geralmente realizado através de meios rodo-ferro-hidroviários. Devido à dependência de veículos destes modais, as logísticas de fornecimento, escoamento e distribuição da produção são dinâmicas e devem ser planejadas e estudadas antes e durante a operação.

Segundo o *Feedstock Logistics Interagency Working Group* (FLIWG, 2010), a logística de transporte de biomassa enfrenta desafios que são comuns a diversas matérias primas, como a capacidade do modal de transporte, a densidade do carregamento e a eficiência de carga e descarga. Ainda segundo o grupo, para melhorias no transporte de matérias-primas, recomenda-se desenvolver processos e operações logísticas que maximizem as densidades mássica e energética do material transportado e armazenado, diminuindo assim o custo de transporte por unidade do produto final.

## **2.3 Modelagem Matemática e Otimização de Problemas de Logística**

O problema de escoamento da produção tratado neste trabalho envolve a observação das características físicas dos produtos e processos, o atendimento a regras de negócio próprias de biorrefinarias distribuídas e a minimização dos custos de operação logística. Nesta seção, serão apresentadas as técnicas presentes na literatura que permitem formalizar matematicamente o problema, seu objetivo e suas restrições.

### **2.3.1 Otimização Matemática**

Otimização é definida como a seleção de uma melhor alternativa, dentre um conjunto de possibilidades, segundo determinados critérios e que respeite dadas restrições. Uma vez que existem diversos tipos de problemas de otimização, não existe um método único para a resolução de todos estes problemas – uma gama de diferentes métodos foi desenvolvida para se obter os melhores resultados em situações específicas, dependendo da estrutura do problema a ser resolvido (CHATTI et al., 2019). De forma simplificada, um problema de

otimização consiste na minimização ou maximização de uma determinada função através da escolha de valores de entrada dentre uma seleção de valores permitidos, que atendam às restrições e condições do problema.

### 2.3.1.1 Características gerais e técnicas de otimização matemática

A formalização matemática de problemas de otimização baseia-se em um espaço de soluções  $\mathcal{S}$ , um conjunto de soluções factíveis  $\mathcal{F}$  contido em  $\mathcal{S}$  e uma função-objetivo  $f$  que mapeia soluções de  $\mathcal{S}$  em valores reais  $z \in \mathbb{R}$  – que deve ser maximizada ou minimizada – da seguinte forma:

$$f : \mathcal{S} \rightarrow \mathbb{R} \quad (2.1a)$$

$$\mathcal{F} \subseteq \mathcal{S} \quad (2.1b)$$

Para problemas do tipo Programação Linear (em inglês *Linear Programming* – LP), Programação Linear Inteira (em inglês *Integer Linear Programming* – ILP), Programação Linear Inteira Mista (em inglês *Mixed Integer Linear Programming* – MILP) e similares, a formulação toma a forma canônica

$$\min \quad c^\top x \quad (2.2a)$$

$$\text{sujeito a} \quad Ax \leq b \quad (2.2b)$$

$$x \in \mathcal{S} \quad (2.2c)$$

onde  $x$  é um vetor cujos componentes são as variáveis a serem determinadas;  $A$  é uma matriz contendo os coeficientes das variáveis em inequações lineares; e  $b$  e  $c$  são vetores de valores representando, respectivamente, as constantes das inequações relacionando as variáveis e os coeficientes das variáveis na função-objetivo linear.

Em problemas do tipo LP, tem-se que  $\mathcal{S} \subseteq \mathbb{R}_+^n$ . Já em problemas do tipo ILP, as variáveis têm uma restrição adicional  $\mathcal{S} \subseteq \mathbb{Z}_+^n$ . Por fim, MILP é uma generalização que compreende ambas as classes, onde é permitido que parte das variáveis sejam inteiras e parte sejam reais.

### 2.3.1.2 Técnicas de otimização matemática

Em ILPs e MLIPs, é possível utilizar variáveis binárias para “ativar” ou “desativar” restrições, tal como em

$$\sum_i a_i x_i \leq b + M(1 - y) \quad (2.3)$$

onde  $a_i$  são coeficientes,  $x_i$  são variáveis,  $y$  é uma variável binária e  $M$  um coeficiente que assume valor suficientemente grande. Desta forma, quando  $y = 1$ , a restrição está “ativada”

e se reduz a

$$\sum_i a_i x_i \leq b \quad (2.4)$$

e quando  $y = 0$ , a restrição é desativada, e assume a forma de

$$\sum_i a_i x_i \leq b + M \quad (2.5)$$

e, sendo  $M$  suficientemente grande, a restrição deve ser atendida para quaisquer valores de  $x$  que o solver do problema calcular (RUBIN, 2018).

### 2.3.1.3 Algoritmos de resolução de problemas de otimização

Um dos algoritmos para resolução de LPs mais utilizados é o simplex, que envolve resolver desigualdades lineares de maneira similar à solução de equações lineares. Em termos geométricos, o espaço de soluções viáveis, definido por todos os valores do vetor  $x$  tal que  $Ax \leq b$  e  $x_i \geq 0 \forall i$ , é um polítopo convexo.. Um vértice qualquer deste polítopo é conhecido como solução viável básica (BFS, do inglês *Basic Feasible Solution*) (FEIGE, 2011).

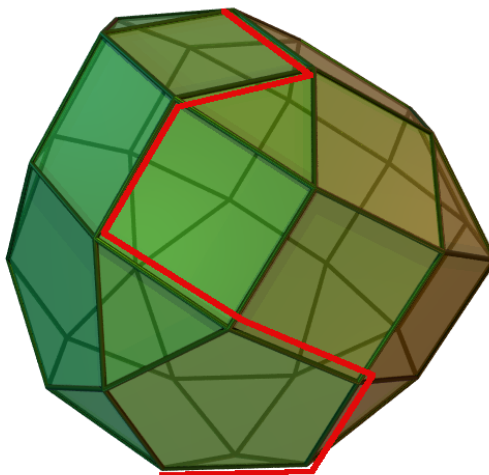
De acordo com Feige (2011), no algoritmo simplex, começa-se em um vértice qualquer do polítopo, e a cada iteração o algoritmo se move para um vértice vizinho, cujo valor da função objetivo é melhor do que o anterior. Uma vez que o espaço de soluções é um polítopo convexo, não existem ótimos locais, significando que o algoritmo termina quando nenhum movimento a mais é permitido, ou seja, o valor da função objetivo no vértice atual é o melhor se comparado a seus vizinhos. A Figura 1 apresenta a visualização do espaço de soluções do algoritmo em três dimensões.

Para a resolução de LIPs e MILPs, um método muito utilizado é o *Cutting Plane Method*. A aplicação do método baseia-se em, inicialmente, aplicar a relaxação linear, ou seja, remover as restrições de integralidade do problema original, ampliando o espaço de soluções para além dos valores inteiros. Após este passo, o LP resultante é resolvido até que se encontre uma primeira solução. Caso esta solução não seja inteira, é adicionada uma restrição que, geometricamente, aplica um corte no polítopo da relaxação linear na forma de um plano que remova a solução ótima da relaxação, mas não remova nenhuma solução factível do problema original. Estes passos são repetidos e o problema é resolvido quando são feitos cortes suficientes para que a solução ótima da relaxação linear respeite as restrições de integralidade, não sendo necessários mais cortes (HUANG; LAI; CHENG, 2009).

Outro método amplamente utilizado para a resolução de LIPs e MILPs é o *Branch and Bound*. Esse método pode ser combinado com o *Cutting Plane Method*, e seu algoritmo consiste em dividir o problema original em subproblemas, até que a solução de algum destes subproblemas seja provada ótima. Para cada subproblema, é resolvida a relaxação linear, originando um limite inferior para a melhor solução deste subproblema. Todavia, a



**Figura 1** – Representação geométrica em 3 dimensões do algoritmo simplex.



O poliedro representa o espaço de soluções e o percurso destacado em vermelho é uma possível evolução do algoritmo de um BFS inicial até o ótimo. Fonte: Wikimedia Commons (2020)

melhor solução conhecida para o problema original, chamada de incumbente, tem como valor da função objetivo o limite superior. No caso do limite inferior de um subproblema ser igual ou maior ao limite superior, este subproblema pode ser desconsiderado na análise, visto que não é possível existir uma solução com valor da função objetivo melhor do que a incumbente. Caso contrário, o subproblema atual é dividido, tipicamente em dois, gerando novos subproblemas a serem explorados. O algoritmo persiste até que todos os subproblemas sejam resolvidos até sua otimalidade ou descartados (GAMRATH, 2010).

#### 2.3.1.4 Softwares (IDEs e/ou solvers) a se utilizar na solução desses problemas.

A resolução de problemas de otimização envolve, além de métodos e algoritmos, softwares nos quais o problema, descrito em determinada linguagem de programação, é compilado e resolvido de acordo com as informações fornecidas. Dentre os softwares existentes, se destacam

- GAMS (*General Algebraic Modelling System*): *software* proprietário, também chamado de sistema de modelagem, possui linguagem própria que se traduz para formatos aos quais *solvers* conseguem entender e resolver. Permite a alteração entre diversos *solvers* sem alterar a formulação do problema (GAMS DEVELOPMENT CORP., 2006);
- CPLEX (*IBM ILOG CPLEX Optimization Studio*): *software* proprietário, capaz de resolver problemas de programação inteira através das variações primal ou dual do

método simplex e métodos de barreira. Pode ser acessado através de sistemas de modelagem independentes, como o GAMS (IBM, 2020);

- Gurobi: *solver* proprietário, com licença acadêmica gratuita, capaz de resolver problemas de LP e MILP, além de problemas de Programação Quadrática (QP). Suporta diversas linguagens de programação, como C e *Python*, além de poder ser acessado através de sistemas de modelagem como o GAMS e através do Microsoft Excel. Se destaca por ser o *solver* mais rápido do mercado (GUROBI OPTIMIZATION, 2021); e
- SCIP (*Solving Constraint Integer Programs*): software gratuito através de licença acadêmica, desenvolvido pelo Zuse Institute Berlin, é um dos solvers de uso não comercial mais rápidos para a resolução de problemas de Programação Linear Mista Inteira. É implementado através de linguagem em C, e pode ser acessado através do sistema de modelagem GAMS (ZUSE INSTITUTE BERLIN, 2021).

### 2.3.2 Problema de Roteamento Veicular

O Problema de Roteamento Veicular (em inglês *Vehicle Routing Problem – VRP*) é uma classe de problemas de otimização matemática – tradicionalmente modelados como Programação Linear Mista Inteira (MIP, do inglês *Mixed Integer Programming*) – que buscam, considerando restrições aplicáveis, as rotas ótimas para a visita de diversos pontos geograficamente dispersos a partir de um ponto inicial, retornando a este ao fim do trajeto (LAPORTE, 1992; CHURCH, 2015). O principal objetivo deste tipo de problema é minimizar a distância total das rotas ou o número de veículos utilizados, podendo também buscar o menor custo ou tempo de deslocamento (KALLEHAUGE et al., 2005).

#### 2.3.2.1 Descrição do Problema

Matematicamente, o problema é descrito através de um grafo  $G$ , cujos vértices  $V$  são pontos de atendimento e os arcos  $A$  são deslocamentos entre tais pontos. De acordo com Laporte (1992), o VRP busca o arranjo de rotas com menor distância de forma que:

- cada cidade seja visitada apenas uma vez por apenas um veículo;
- as rotas de todos os veículos começam e terminam no ponto inicial;
- as restrições específicas do problema sejam atendidas.

#### 2.3.2.2 Descrição da Variante com Janelas de Tempo

O Problema de Roteamento Veicular com Janelas de Tempo (em inglês *Vehicle Routing Problem with Time Windows – VRPTW*) trata de VRP com a restrição de que um ponto de atendimento  $i$  deve ser visitado dentro do intervalo de tempo  $[a_i, b_i]$ , chamado de janela de

tempo. As janelas de tempo são consideradas flexíveis quando é aplicada uma penalidade ao não atender o ponto  $i$  em determinado intervalo de tempo, e consideradas inflexíveis quando a restrição não pode ser violada. Por exemplo, caso um veículo chegue muito cedo ao ponto  $i$ , antes do início do intervalo da janela, esse deve aguardar até que este intervalo comece. Também não é permitido que chegue com atraso, após o fim da janela de tempo (KALLEHAUGE et al., 2005).

### 2.3.2.3 Descrição da Variante Capacitada

O Problema de Roteamento Veicular Capacitado (em inglês *Capacitated Vehicle Routing Problem – CVRP*) insere uma capacidade não negativa  $d_i$  a cada ponto de atendimento  $i$ , tal que a soma dessas capacidades de cada rota não exceda a capacidade do veículo que realizará a coleta (LAPORTE, 1992).

Os problemas VRPTW e CVRP podem ser combinados e generalizados para formar o Problema de Roteamento Veicular Capacitado com Janelas de Tempo (em inglês *Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows – CVRPTW*), que, assim como seus componentes, é NP-difícil (LIU; JIANG, 2019).



## 3 PROPOSIÇÃO DE MODELAGEM DE OTIMIZAÇÃO

Nesse capítulo serão apresentadas as propriedades identificadas no problema, assim como a modelagem proposta, na forma de MILP.

### 3.1 Identificação de Condições e Variáveis do Problema

Esta restrição é uma das mais comuns em VRPs, e no presente estudo é aplicada no volume de etanol nos tanques de cada ponto de atendimento, cuja coleta é limitada pela capacidade do reservatório do caminhão que percorre cada rota.

Tendo em vista que este estudo se propõe a desenvolver um modelo matemático capaz de representar as variáveis e condições relevantes para a operação do escoamento da produção de bioetanol em biorrefinarias distribuídas ao longo de um período de tempo, foram analisados os aspectos que influenciam os parâmetros do problema. Inicialmente, leva-se em consideração um conjunto de pontos (unidades e Central) pré-estabelecidos, com recursos (veículos) disponíveis. Tal modelo deve considerar as variáveis que influenciam no escoamento da produção, seja de forma mais direta – como a quantidade que é coletada de cada unidade, ou menos direta – como o fato de um caminhão ser utilizado ou não em determinado dia.

Identifica-se, então, um problema inicial de decisão: de que forma alocar os recursos disponíveis para resolver subproblemas atrelados ao problema macro de escoamento sobre o qual se deseja atuar? Como exemplo destes subproblemas, é possível citar:

- Quais caminhões serão utilizados em cada dia;
- Quais as unidades atendidas em um dia específico;
- Qual caminhão atende qual unidade em determinado dia;
- Quais rotas os caminhões percorrerão para realizar as coletas;
- Quanto bioetanol será coletado em cada unidade;

- Em que horário será realizada a coleta em cada unidade na rota;
- Como respeitar a capacidade de cada caminhão; e
- Como respeitar os turnos de trabalho.

Conhecendo todas as situações que admitem variações no problema, passa-se a pensar nas restrições, que estabelecem os limites permitidos para estas variações. Nas restrições, são determinadas as relações entre variáveis que devem ser respeitadas, a fim de manter a lógica do modelo e garantir a factibilidade das soluções. Como exemplo de restrição lógica, é possível citar a situação em que uma certa unidade é visitada em um certo dia. Para que isto ocorra, é necessário que um caminhão faça uma rota que passe por esta unidade. É possível, então, estabelecer uma variável binária, capaz de assumir apenas os valores 0 ou 1, sinalizando que a unidade em questão foi ou não visitada naquele dia por aquele caminhão. Para que essa variável possa assumir o valor 1, algum deslocamento deve estar ocorrendo até essa unidade.

Além deste exemplo, outras relações são importantes de serem citadas e levadas em consideração na modelagem do problema, e podem ser divididas entre relações lógicas, temporais e capacitivas. Como relações lógicas, pode-se citar:

- Se um caminhão visitou uma unidade, ele deve sair de lá por algum caminho, tendo a possibilidade de ir para qualquer outra unidade ou a central. Desta forma, alguma variável deve ser capaz de registrar essa informação;
- Todos os caminhões que chegam em um determinado ponto devem sair deste ponto; e
- Se um caminhão é utilizado em determinado dia, ele deve sair da Central, e se não saiu da Central, não foi utilizado.

Dentre as relações temporais, tem-se que:

- O motorista não pode ter um turno de trabalho maior do que o permitido em lei, então há um limite de tempo no qual o caminhão e o motorista podem estar fazendo uma rota;
- A chegada de um caminhão em um ponto deve ser posterior à saída do ponto anterior; e
- No caso de o caminhão vir de uma unidade anterior, o tempo de chegada na unidade posterior deve respeitar todos os tempos do processo do ponto anterior.

Como relações capacitivas, cita-se:

- A quantidade produzida de bioetanol em determinada unidade não pode ser tal que ultrapasse a capacidade do tanque lá situado;
- A quantidade de bioetanol acumulada na Central, vindo das unidades, não pode ser maior do que a capacidade do seu tanque;
- Um caminhão não pode transportar um volume de bioetanol maior do que a capacidade do seu tanque; e
- Nenhum tanque – das unidades, da Central ou dos caminhões – pode apresentar volume negativo.

## 3.2 Caracterização do Modelo Proposto

Nesta seção, serão apresentadas as principais características do modelo matemático proposto, compreendendo as dimensões do problema, através de conjuntos, as constantes e variáveis associadas, a função objetivo e as restrições às quais as soluções devem se submeter. Para a modelagem do problema como MILP, a formulação de VRPTW apresentada por Kallehauge et al. (2005) foi utilizada como fundamento.

### 3.2.1 Conjuntos

Os conjuntos do modelo caracterizam diferentes dimensões do problema através da representação por índices. Em outras palavras, cada elemento de cada conjunto indexa um elemento distinto do problema, que pode estar vinculado a diversas variáveis e constantes.

$$\mathcal{K} = \{1, \dots, k_{max} \mid k_{max} \in \mathbb{Z}_+\}$$

$$\mathcal{D} = \{1, \dots, d_{max} \mid d_{max} \in \mathbb{Z}_+\}$$

$$\mathcal{L} = \mathcal{D} \cup \{d_{max} + 1\}$$

$$\mathcal{U} = \{1, \dots, u_{max} \mid u_{max} \in \mathbb{Z}_+\}$$

$$\mathcal{H} = \{0\} \cup \mathcal{U}$$

$$\mathcal{A} = \{(i, j) \mid i, j \in \mathcal{H}\}$$

$$G = (\mathcal{H}, \mathcal{A})$$

O conjunto  $\mathcal{K}$  representa os caminhões considerados no problema, sendo 1 o índice do primeiro caminhão e  $k_{max}$  o índice do último caminhão. Analogamente, o conjunto  $\mathcal{D}$  representa os dias de planejamento, sendo 1 o primeiro e  $d_{max}$  o último dia planejado. O conjunto  $\mathcal{L}$  é uma extensão do conjunto  $\mathcal{D}$ , contendo o dia seguinte ao último planejado, para a representação de uma condição de contorno temporal. O conjunto  $\mathcal{U}$  representa as unidades de produção, sendo estendido pelo conjunto  $\mathcal{H}$ , representando todos os pontos

geográficos do problema, com a adição de 0 indexando a Central. O conjunto  $\mathcal{A}$  contém todos os pares de elementos de  $\mathcal{H}$ , representando todos os possíveis deslocamentos entre quaisquer dois pontos. Finalmente,  $G$  é um grafo completo, cujos nós são os elementos de  $\mathcal{H}$  e arcos os elementos de  $\mathcal{A}$ .

### 3.2.2 Constantes

Uma série de constantes foram utilizadas para modelar parâmetros do problema, ou seja, os símbolos descritos nesta subsecção assumem valores particulares para cada instância do problema de escoamento da produção.

$$T_{i,j} \in \mathbb{R}_+, \forall (i, j) \in \mathcal{A}$$

$$D_{i,j} \in \mathbb{R}_+, \forall (i, j) \in \mathcal{A}$$

As constantes  $T_{i,j}$  e  $D_{i,j}$  representam, respectivamente, as matrizes de tempo e distância ao percorrer os deslocamentos dos arcos de  $\mathcal{A}$ .

$$t_l \in \mathbb{R}_+, \forall l \in \mathcal{L}$$

$$\Delta t_l \in \mathbb{R}_+, \forall l \in \mathcal{L}$$

A constante  $t_l$  representa o instante de início do turno de trabalho do dia  $l$ , enquanto  $\Delta t_l$  é a duração deste turno. Estas duas constantes devem ser limitadas pelas seguintes restrições para a correta modelagem do problema:

$$t_1 = 0 \tag{3.1}$$

$$t_d + \Delta t_d < t_{d+1}, \forall d \in \mathcal{D} \tag{3.2}$$

A Equação (3.1) define o início do primeiro turno como 0 e (3.2) indica que o início de qualquer turno deve ser posterior ao fim do turno anterior.

$$T' \in \mathbb{R}_+$$

A constante  $T'$  é a única independente de conjuntos, representando o tempo decorrido nos processos de configuração (*setup*), inicialização e finalização da carga dos caminhões em cada unidade. É assumido que este tempo não varie significativamente entre pares caminhão-unidade, ou que a previsibilidade do valor específico em cada caso seja baixa, de forma que o uso de um único valor pessimista (mais longo) baste para a modelagem.



$$\begin{aligned}
N_h &\in \mathbb{R}_+, \forall h \in \mathcal{H} & F_u &\in \mathbb{R}_+, \forall u \in \mathcal{U} \\
C_k &\in \mathbb{R}_+, \forall k \in \mathcal{K} & F'_k &\in \mathbb{R}_+, \forall k \in \mathcal{K} \\
n_h^{ini} &\in \mathbb{R}_+, \forall h \in \mathcal{H} & V_l &\in \mathbb{R}_+, \forall l \in \mathcal{L}
\end{aligned}$$

As constantes  $N_h$  e  $C_k$  representam os níveis máximos do tanque de armazenamento em  $h$  e do tanque do caminhão  $k$ , respectivamente. A constante  $n_h^{ini}$  representa o nível inicial, ou seja, no início do primeiro turno planejado, do tanque de armazenamento situado em  $h$ . As constantes  $F_u$  e  $F'_k$  equivalem às vazões de entrada e saída dos tanques, isto é, respectivamente, a taxa de produção da unidade  $u$  e a taxa de bombeamento do caminhão  $k$ . Por fim,  $V_l$  representa a quantidade de bioetanol reservado para processamento ou vendido pela central no dia  $l$ .

### 3.2.3 Variáveis

Para a modelagem do problema foram estabelecidas variáveis, responsáveis por controlar a rota dos caminhões, a quantidade de etanol coletado e o tempo percorrido nos trajetos diários.

$$\begin{aligned}
x_{k,i,j,d} &\in \{0, 1\}, & \forall (i, j) \in \mathcal{A}, \forall k \in \mathcal{K}, \forall d \in \mathcal{D} \\
y_{k,u,d} &\in \{0, 1\}, & \forall u \in \mathcal{U}, \forall k \in \mathcal{K}, \forall d \in \mathcal{D} \\
z_{k,d} &\in \{0, 1\}, & \forall k \in \mathcal{K}, \forall d \in \mathcal{D} \\
v_{k,u,d} &\in \mathbb{R}_+, & \forall u \in \mathcal{U}, \forall k \in \mathcal{K}, \forall d \in \mathcal{D} \\
s_{k,h,d} &\in \mathbb{R}_+, & \forall h \in \mathcal{H}, \forall k \in \mathcal{K}, \forall d \in \mathcal{D}
\end{aligned}$$

A variável  $x_{k,i,j,d}$  é binária e representa se o caminhão  $k$  faz o arco  $(i, j)$  no dia  $d$ . De forma semelhante, a variável  $y_{k,u,d}$ , também binária, sinaliza se o caminhão  $k$  visita a unidade  $u$  no dia  $d$ . Em relação ao uso dos caminhões, a variável  $z_{k,d}$  informa se o caminhão  $k$  é utilizado ou não no dia  $d$ . Além destas, a variável  $v_{k,u,d}$  apresenta a quantidade de etanol, em litros, coletada pelo caminhão  $k$  na unidade  $u$  no dia  $d$ , e a variável  $s_{k,h,d}$  determina o instante de chegada do caminhão  $k$  no ponto  $h$  no dia  $d$ , em horas.

### 3.2.4 Função Objetivo

A função objetivo, descrita a seguir, direciona a busca de soluções através da aplicação de pesos a determinadas variáveis do problema.

$$\min \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{i \in \mathcal{H}} \sum_{j \in \mathcal{H}} \sum_{d \in \mathcal{D}} D_{i,j} \cdot x_{k,i,j,d} \quad (3.3)$$

No contexto do modelo proposto, a expressão (3.3) indica que o problema é de minimização, com pesos  $D_{i,j}$  representando o comprimento do percurso associado às variáveis  $x_{k,i,j,d}$ . O resultado dos somatórios equivale à distância total percorrida por todos os caminhões em todos os turnos de trabalho planejados.

### 3.2.5 Restrições

As relações lógicas e físicas das grandezas representadas pelas variáveis são modeladas através de equações e inequações, ditas restrições, descritas nesta seção.

#### 3.2.5.1 Restrições Lógicas

As equações desta seção condicionam o problema a seguir lógicas de relacionamento entre variáveis binárias e respeitar a continuidade na travessia do grafo.

$$\sum_{i \in \mathcal{H}} x_{k,i,h,d} - \sum_{j \in \mathcal{H}} x_{k,h,j,d} = 0 \quad \forall h \in \mathcal{H}, \forall k \in \mathcal{K}, \forall d \in \mathcal{D} \quad (3.4)$$

$$\sum_{h \in \mathcal{H}} x_{k,u,h,d} - y_{k,u,d} = 0 \quad \forall u \in \mathcal{U}, \forall k \in \mathcal{K}, \forall d \in \mathcal{D} \quad (3.5)$$

$$\sum_{u \in \mathcal{U}} x_{k,0,u,d} - z_{k,d} = 0 \quad \forall k \in \mathcal{K}, \forall d \in \mathcal{D} \quad (3.6)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} y_{k,u,d} \leq 1 \quad \forall u \in \mathcal{U}, \forall d \in \mathcal{D} \quad (3.7)$$

$$x_{k,h,h,d} = 0 \quad \forall h \in \mathcal{H}, \forall k \in \mathcal{K}, \forall d \in \mathcal{D} \quad (3.8)$$

A restrição (3.4) garante que cada caminhão que chega em um nó  $h$  do grafo, saia desse, enquanto (3.5) determina que o caminhão pode visitar o nó no máximo uma vez, quando for necessário, senão a visita é restrita. A restrição (3.6) determina que o trajeto de qualquer caminhão acionado  $k$  deve incluir o nó da central – 0 – e (3.7) limita o número de caminhões que visitam a unidade  $u$  a no máximo um, simplificando o modelo ao evitar problemas de ordem de chegada dos caminhões em cada unidade nas restrições de capacidade. Por fim, (3.8) garante que nenhum trajeto inclua saída e chegada no mesmo nó  $h$ .

#### 3.2.5.2 Restrições Temporais

Nesta seção são apresentadas as restrições que mantêm a continuidade e progressão temporal das variáveis e dos eventos por elas representados.

$$s_{k,u,d} + T' \cdot y_{k,u,d} + \frac{v_{k,u,d}}{F_{E,u}} + T_{u,j} \cdot x_{k,u,j,d} - \left( \Delta t_d + T' + \frac{N_u}{F_{E,u}} \right) \cdot (1 - x_{k,u,j,d}) \leq s_{k,j,d} \quad \forall u \in \mathcal{U}, \forall j \in \mathcal{H}, \forall k \in \mathcal{K}, \forall d \in \mathcal{D} \quad (3.9)$$

$$s_{k,u,d} - T_{0,u} \cdot x_{k,0,u,d} \geq 0 \quad \forall u \in \mathcal{U}, \forall k \in \mathcal{K}, \forall d \in \mathcal{D} \quad (3.10)$$

$$s_{k,0,d} = \Delta t_d \quad \forall k \in \mathcal{K}, \forall d \in \mathcal{D} \quad (3.11)$$

$$s_{k,u,d} \leq \Delta t_d \quad \forall u \in \mathcal{U}, \forall k \in \mathcal{K}, \forall d \in \mathcal{D} \quad (3.12)$$

A restrição (3.9) assegura o progresso do tempo em visitas sequenciais do caminhão  $k$ . A restrição (3.10) condiciona o horário de início da primeira visita do caminhão  $k$  a respeitar o tempo de deslocamento da central até a unidade  $u$ , enquanto (3.11) restringe o horário de retorno à central ao turno de trabalho no dia  $d$ . A função de (3.12) é garantir que o tempo de chegada do caminhão  $k$  na unidade  $u$  seja não-nulo apenas quando há necessidade de visitá-la. As restrições (3.4), (3.9), (3.11) e (3.12), juntas, garantem que todas as rotas incluam a Central, evitando a ocorrência de ciclos (*tours*) que não a contenham, e, conseqüentemente, vinculando as variáveis  $z_{k,d}$  e  $y_{k,u,d}$  da seguinte forma:

$$y_{k,u,d} \leq z_{k,d} \quad \forall k \in \mathcal{K}, \forall u \in \mathcal{U}, \forall d \in \mathcal{D} \quad (3.13)$$

### 3.2.5.3 Restrições Capacitivas

As restrições aqui apresentadas asseguram o cumprimento de leis de continuidade físicas e das capacidades dos tanques de armazenamento e transporte.

$$v_{k,u,d} - N_u \cdot y_{k,u,d} \leq 0, \quad \forall u \in \mathcal{U}, \forall k \in \mathcal{K}, \forall d \in \mathcal{D} \quad (3.14)$$

$$\sum_{u \in \mathcal{U}} v_{k,u,d} \leq C_k, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \forall d \in \mathcal{D} \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} n_u^{ini} + F_u \cdot (t_d + s_{k,u,d} + T_S \cdot y_{k,u,d}) \\ - \sum_{d'=1}^{d-1} \sum_{k' \in \mathcal{K}} v_{k',u,d'} - v_{k,u,d} \geq 0 \end{aligned} \quad \forall k \in \mathcal{K}, \forall d \in \mathcal{D} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} n_u^{ini} + F_u \cdot (t_d + s_{k,u,d}) \\ - \sum_{d'=1}^{d-1} \sum_{k' \in \mathcal{K}} v_{k',u,d'} \leq N_u \end{aligned} \quad \forall u \in \mathcal{U}, \forall k \in \mathcal{K}, \forall d \in \mathcal{D} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} n_u^{ini} + F_u \cdot (t_{d_{max}+1} + \Delta t_{d_{max}+1}) \\ - \sum_{d=1}^{d_{max}+1} \sum_{k \in \mathcal{K}} v_{k,u,d} \leq N_u \end{aligned} \quad \forall u \in \mathcal{U} \quad (3.18)$$

$$n_0^{ini} + \sum_{d=1}^{l-1} \sum_{k' \in \mathcal{K}} v_{k',u,d} - \sum_{d=1}^{l-1} V_d \geq V_l \quad \forall u \in \mathcal{U}, \forall l \in \mathcal{L} \quad (3.19)$$

$$n_0^{ini} + \sum_{d'=1}^d \sum_{k' \in \mathcal{K}} v_{k',u,d'} - \sum_{d'=1}^d V_{d'} \leq N_0 \quad \forall u \in \mathcal{U}, \forall d \in \mathcal{D} \quad (3.20)$$

A restrição (3.14) garante que um caminhão  $k$  só pode coletar bioetanol na unidade  $u$  caso a visite. A restrição (3.15) limita o total coletado em um dia  $d$  pelo caminhão  $k$  à capacidade máxima desse caminhão. A restrição (3.16) determina que o volume máximo coletado pelo caminhão  $k$  na unidade  $u$  no dia  $d$  deve ser a quantidade de bioetanol presente na unidade no instante de chegada do caminhão, mais a quantidade de combustível produzida ao longo da coleta. As restrições (3.17) e (3.18) impedem o transbordamento dos tanques de armazenamento das unidades, respectivamente, até a chegada do caminhão  $k$  no dia  $d$  e até o fim do turno seguinte ao último planejado (ampliando a robustez das soluções às imprevisibilidades de operação ao longo do período de planejamento). As restrições (3.19) e (3.20) delimitam o nível do tanque de armazenamento da Central ao valor máximo e a zero, respectivamente.

## 4 ESTUDO DE CASO: INSTALAÇÃO HIPOTÉTICA NA REGIÃO DOS VALES DOS RIOS JACUÍ E TAQUARI

O presente capítulo traz as principais características consideradas no estudo de caso, definindo a localização da Central e das Unidades, a capacidade de produção das biorrefinarias e de coleta pelos veículos, o número de dias compreendido no estudo e demais informações pertinentes à modelagem do problema para simulação.

### 4.1 Justificativa e Contextualização

O presente estudo de caso propõe-se a aplicar o modelo matemático proposto em uma determinada situação hipotética. Pelo fato de não existir nenhum sistema implementado sobre o qual poderiam ser feitas as análises, impõe-se a necessidade de uma construção hipotética, direcionada pelas pesquisas anteriores do GIMSCOP. Estes estudos orientam algumas características que são relevantes no presente trabalho: as unidades de produção analisadas estão instaladas em pequenas propriedades rurais no Rio Grande do Sul, e estão espalhadas em zonas de alta produtividade agrária próximas à capital do Estado, tendo como referência os municípios de Triunfo e Lajeado (região do Vale do Taquari). A região também está localizada próximo ao Polo Petroquímico de Triunfo, possibilitando o direcionamento do bioetanol para a produção de eteno verde, matéria prima para a produção de plásticos (PETTERLE, 2010). A localização da Central foi escolhida às margens do Rio Taquari, sendo seu acesso pelo modal hidroviário até o Estuário do Guaíba é de grande relevância. A Central também está próxima do cruzamento das rodovias BR-287 e RS-130, estando, portanto, interligada a outras estradas que direcionam para as demais regiões do Estado e do país. A Central encontra-se próxima ao centro geográfico da região ocupada pelas unidades de produção, minimizando as distâncias e tempos médios entre a Central e as unidades.

## 4.2 Detalhamento dos Dados Utilizados

Neste estudo, foram consideradas uma unidade Central e 26 unidades de produção, numeradas de 1 a 26. A Central está localizada em Venâncio Aires/RS, e as 26 unidades de produção estão espalhadas por 15 municípios da região do Vale do Taquari. O ponto da Central, como acima citado, foi escolhido por sua localização estratégica, permitindo tanto o recebimento facilitado do etanol, vindo das biorrefinarias, quanto seu transporte para o consumo final, podendo se dar através dos modais hidroviário e rodoviário. Os pontos das Unidades foram escolhidos de forma arbitrária e estão aproximadamente uniformemente dispersos em torno da área estudada. Na escolha, foram buscados locais próximos aos encontros entre vias ou às entradas de propriedades rurais, identificadas através de imagens de satélite da região. A Figura 2 apresenta a localização geográfica da Central (simbolizada pelo ícone de uma casa, na cor rosa) e das unidades de produção (simbolizadas pelos pontos em azul), em mapa elaborado através da ferramenta Google My Maps (GOOGLE, 2021a).

Os dados de distância e tempo entre os pontos (Central e unidades) foram coletados utilizando *Python* (PYTHON SOFTWARE FOUNDATION, 2020) e as bibliotecas externas *googlemaps* (GOOGLE, 2021b), *pandas* (NUMFOCUS, 2021) e *numpy* (NUMPY, 2020), além de código inspirado na ferramenta *kml\_io* (MAZZMA12, 2020) (através das bibliotecas *geopandas* e *pandas*). Mais especificamente, a partir do *Google My Maps*, o mapa com as localidades foi exportado no formato kml, importado para *Python* e processado para então ser enviado como requerimento de matriz de distâncias e tempos à API (Interface de Programação de Aplicações, em inglês *Application Programming Interface*) *distance\_matrix* da biblioteca *googlemaps*. O resultado foi compilado e convertido em um texto compatível à definição de tabela do GAMS. Os códigos *Python* utilizados estão apresentados no Apêndice B.

A Tabela 1 apresenta as coordenadas geográficas da Central e de cada unidade, além de seu endereço.

**Tabela 1** – Coordenadas geográficas e endereço da Central e unidades.

Início da Tabela 1			
Nome	Latitude	Longitude	Endereço
Central	29°41'00.07"S	29°41'10.07"W	RS-130, Venâncio Aires - RS, 95800-000, Brasil
Unidade 1	29°29'96.63"S	29°29'96.63"W	R. Prof. Aloízio Romeu Sieben, Cruzeiro do Sul - RS, 95930-000, Brasil
Unidade 2	29°30'08.18"S	29°30'08.18"W	Est. sem nome, Mato Leitão - RS, 95835-000, Brasil

Continuação da Tabela 1			
Nome	Latitude	Longitude	Endereço
Unidade 3	29°46'60.33"S	29°46'60.33"W	Rod. Gen. Câmara Rs-244, 2761-2159, Vale Verde - RS, 95833-000, Brasil
Unidade 4	29°53'37.21"S	29°53'37.21"W	RS-244, Gen. Câmara - RS, 95820-000, Brasil
Unidade 5	29°39'90.57"S	29°39'90.57"W	Est. sem nome, Taquari - RS, 95860-000, Brasil
Unidade 6	29°39'92.51"S	29°39'92.51"W	Linha Capão Grande, Venâncio Aires - RS, 95800-000, Brasil
Unidade 7	29°39'90.68"S	29°39'90.68"W	Est. sem nome, Passo do Sobrado - RS, 96685-000, Brasil
Unidade 8	29°44'43.04"S	29°44'43.04"W	Est. sem nome, Passo do Sobrado - RS, 96685-000, Brasil
Unidade 9	29°48'87.03"S	29°48'87.03"W	Estrada Passo da Mangueira, Passo do Sobrado - RS, 96685-000, Brasil
Unidade 10	29°50'05.41"S	29°50'05.41"W	Est. sem nome, Vale Verde - RS, 95833-000, Brasil
Unidade 11	29°55'52.03"S	29°55'52.03"W	Est. sem nome, Vale Verde - RS, 95833-000, Brasil
Unidade 12	29°51'18.50"S	29°51'18.50"W	Est. sem nome, Gen. Câmara - RS, 95820-000, Brasil
Unidade 13	29°48'80.09"S	29°48'80.09"W	Est. sem nome, Taquari - RS, 95860-000, Brasil
Unidade 14	29°54'41.55"S	29°54'41.55"W	BR-470, Triunfo - RS, 95840-000, Brasil
Unidade 15	29°40'07.95"S	29°40'07.95"W	Est. sem nome, Tabaí - RS, 95863-000, Brasil
Unidade 16	29°38'83.43"S	29°38'83.43"W	Est. sem nome, Bom Retiro do Sul - RS, 95875-000, Brasil
Unidade 17	29°34'47.57"S	29°34'47.57"W	Est. sem nome, Fazenda Vilanova - RS, 95875-000, Brasil
Unidade 18	29°26'60.02"S	29°26'60.02"W	Est. sem nome, Teutônia - RS, 95890-000, Brasil
Unidade 19	29°27'72.38"S	29°27'72.38"W	Est. sem nome, Estrela - RS, 95880-000, Brasil

Continuação da Tabela 1			
Nome	Latitude	Longitude	Endereço
Unidade 20	29°24'46.25"S	29°24'46.25"W	R. Arnaldo Alfredo Scherer - Conventos, Lajeado - RS, 95900-000, Brasil
Unidade 21	29°27'76.55"S	29°27'76.55"W	Est. sem nome, Santa Clara do Sul - RS, 95915-000, Brasil
Unidade 22	29°34'41.48"S	29°34'41.48"W	RS-422, Venâncio Aires - RS, 95800-000, Brasil
Unidade 23	29°46'65.62"S	29°46'65.62"W	RS-130, Gen. Câmara - RS, 95820-000, Brasil
Unidade 24	29°45'58.86"S	29°45'58.86"W	Est. sem nome, Vale Verde - RS, 95833-000, Brasil
Unidade 25	29°44'41.00"S	29°44'41.00"W	Est. sem nome, Vale Verde - RS, 95833-000, Brasil
Unidade 26	29°45'58.84"S	29°45'58.84"W	Est. sem nome, Tabai - RS, 95860-000, Brasil
Fim da Tabela 1			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Cada biorrefinaria tem capacidade para produzir até 1.000 litros de etanol por dia (41,67 litros/hora), e cada unidade tem um tanque que comporta até 10.000 litros de combustível. O tanque da Central, para onde é transportado o etanol produzido em cada unidade, tem capacidade de 100.000 litros. Para a coleta do etanol nas unidades e transporte até a Central, serão considerados até dois caminhões-tanque com capacidade máxima de 15.000 litros – equivalente a modelos de pequeno porte (CEREDA, 2014) – e cuja vazão é de 20.000 litros por hora.

Para a determinação do nível inicial do tanque de cada unidade, em litros, usou-se *Python* para gerar uma lista de 26 valores – cada um representando uma unidade – aleatórios uniformes entre 0 e 10.000, arredondados para o múltiplo de 250, inferior, mais próximo. A Tabela 2 apresenta o nível inicial do tanque para cada unidade, em litros. O nível inicial do tanque da Central foi arbitrado em 75.000 litros. Na determinação do volume de etanol vendido pela consumidores externos, foi utilizado *Python* para gerar uma lista de 11 valores aleatórios – representando cada dia da simulação – de zero ao dobro da capacidade de produção diária, em litros, de todas as unidades – 52.000 litros –, arredondados para o múltiplo de 250, inferior, mais próximo. A Tabela 3 apresenta o início de cada dia, em horas, e o volume de combustível, em litros, reservado pela Central para venda a clientes externos ou outras etapas de beneficiamento realizadas pela própria Central.

O horário de início de cada turno foi estipulado como zero para o primeiro turno, com



**Tabela 2** – *Nível inicial do tanque de cada unidade, em litros.*

Unidade ( $\mathcal{U}$ )	Nível inicial, $n_u^{ini}$ (litros)
1	1750
2	8250
3	2500
4	2500
5	6250
6	3000
7	2000
8	4750
9	5500
10	7250
11	1250
12	8500
13	4750
14	8500
15	9000
16	1500
17	8500
18	3000
19	8250
20	0
21	3750
22	1000
23	7750
24	6250
25	5000
26	3000

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Tabela 3** – *Início de cada dia e volume de etanol reservado pela Central.*

Dia ( $\mathcal{L}$ )	Início do dia, $t_l$ (horas)	Combustível reservado pela central, $V_l$ (litros)
1	0	26250
2	24	18000
3	48	28500
4	72	45500
5	96	23250
6	168	23000
7	192	39000
8	216	14250
9	240	33000
10	264	32500
11	336	11250

Fonte: Elaborado pelo autor.



### 4.3.1 Casos Estudados

Para a simulação do modelo proposto, foram considerados seis casos distintos, em que foram alterados o número de unidades (biorrefinarias produzindo bioetanol), a quantidade de caminhões capazes de realizar a coleta do combustível produzido e o número de dias analisado. A Tabela 4 apresenta as informações consideradas para cada simulação.

**Tabela 4** – Unidades, caminhões e número de dias considerados para cada caso simulado.

Simulação	Unidades ( $\mathcal{U}$ )	Caminhões ( $\mathcal{K}$ )	Dias ( $\mathcal{D}$ )
1	1-10	1	1-10
2	1-15	1-2	1-10
3	1-20	1-2	1-10
4	1-20	1-2	1-7
5	1-26	1-2	1-7
6	1-26	1-2	1-10

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na resolução do problema, foram utilizados os *softwares* GAMS, na versão 2.0.33.5, através de licença fornecida pelo DEQUI (Departamento de Engenharia Química da UFRGS) e Gurobi, na versão 9.1.2, através de licença acadêmica de uso gratuito. A partir do modelo completo no GAMS, foi realizada alteração manual dos conjuntos para cada simulação, e executado o modelo no modo de exportação, a fim de gerar um arquivo .lp. Partindo deste arquivo, foi criada uma rotina em *Python* que reconstrói o modelo diretamente na API do Gurobi. No Gurobi, a simulação foi realizada buscando a otimização em um tempo máximo de 600 segundos (10 minutos).

A Tabela 5 apresenta os valores da função objetivo resultantes de cada simulação e os *gaps* (intervalo percentual entre o valor da melhor solução encontrada e o limite inferior mais próximo encontrado para a função objetivo), além da dimensão da instância simulada do problema através do número de restrições, variáveis (totais e binárias) e elementos não-nulos da matriz  $A$ , que representa o problema como apresentado na formulação 2.2.

Primeiramente, deve-se destacar o aumento do tamanho e conseqüente complexidade do problema junto ao escopo do cenário simulado. Vale lembrar que, como problema NP-difícil e combinatório (LIU; JIANG, 2019), a complexidade aumenta mais do que polinomialmente com o aumento do número de variáveis de decisão, sendo evidente a dificuldade de resolução do problema através do maior valor de *gap* nos cenários de maior escopo, culminando em falha ao otimizar o sexto cenário. Tal cenário não foi comprovado insolúvel, porém não houve tempo suficiente para encontrar nenhuma solução factível, seja na simulação limitada a 600 segundos ou num teste posterior sem limite de tempo, mas interrompido após mais de 10 horas sem resultados.

Por fim, é notável que a distância total aumentou menos do que linearmente em função do número de unidades consideradas, demonstrando um aumento da eficiência da logística com o atendimento de mais unidades em cada viagem.

**Tabela 5** – Valor da função objetivo e gap para cada caso simulado.

Simulação	Função objetivo (km)	Gap (%)	Restrições	Variáveis (Total)	Variáveis (Binárias)	Elementos Não-Nulos
1	631,412	22,32	1981	1641	1310	14781
2	1047,637	47,00	7036	6231	5420	61861
3	1446,058	50,28	11341	10281	9220	102461
4	765,235	43,97	7945	7197	6454	68783
5	1001,156	50,30	12487	11523	10570	111245
6	-	-	17827	16461	15100	164381

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo, serão discutidas as conclusões acerca do estudo realizado, compreendendo o modelo proposto e os resultados das simulações realizadas. Além disso, serão abordados possíveis trabalhos futuros, que complementaríamos as análises já realizadas.

### 5.1 Conclusões

O presente trabalho apresentou uma proposta de modelagem da logística do escoamento da produção em biorrefinarias descentralizadas, um modelo de produção em desenvolvimento no GIMSCOP. Sendo o primeiro trabalho neste assunto, foi necessário mapear os fatores importantes para a operação da logística para então construir um modelo de programação linear inteira mista (MILP) que permita realizar o planejamento das operações.

Através do estudo de caso realizado, demonstrou-se que o modelo proposto atendeu ao que se propunha, respeitando as restrições lógicas, capacitivas e temporais, e gerando resultados factíveis para cinco das seis simulações realizadas. Ainda no âmbito das simulações do modelo proposto, verificou-se aumento do tamanho do problema (restrições, variáveis e elementos não-nulos) com o aumento do escopo (unidades de produção, número de caminhões e dias de simulação), o que traz maior complexidade à sua resolução.

Pela complexidade do problema, conclui-se que as técnicas utilizadas não foram suficientes para solucionar a otimização à exaustão, sendo necessário o emprego de técnicas mais avançadas para sua ampla utilização. O modelo proposto pode ser utilizado como ponto inicial no desenvolvimento de outras metodologias de resolução, sejam exatas, heurísticas ou meta-heurísticas.

### 5.2 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros, em nenhuma ordem particular, propõe-se:

- Desenvolver um sistema que automatize os processos de construção do modelo a partir dos dados disponíveis, execução das rotinas de otimização e decodificação dos

resultados da otimização para facilitar o desenvolvimento de estudos da logística de escoamento da produção de biorrefinarias descentralizadas e o planejamento e execução das operações;

- Ampliar o modelo para planejar também a entrega de insumos, como levedura e enzimas, nas unidades;
- Considerar a variação térmica dos locais de produção, com o objetivo de melhorar a aferição do volume dos tanques e permitir análise de comportamento do combustível e produção ao longo do ano;
- Aumentar a flexibilidade do modelo com o uso de janelas temporais distintas para cada caminhão e unidade;
- Aumentar a precisão do modelo com o uso de parâmetros  $T'$  específicos para cada par caminhão-unidade;
- Aumentar a precisão do modelo com o uso de matrizes de tempo e distância derivadas de dados históricos para diferentes dias ou horários;
- Estudar o uso do método de geração de colunas, seja genérico, através de ferramentas que desempenham análise estrutural automática do problema, em cima da qual realizam decomposição apropriada, como GCG ou DIP, ou através de decomposição manual do problema;
- Estudar o uso da ferramenta de roteamento veicular contida no pacote de otimização OR-Tools do Google; e
- Estudar o uso de outros solvers para a resolução das simulações.

## REFERÊNCIAS

- BORGES, F. C. *Proposta de um modelo conceitual de biorrefinaria com estrutura descentralizada*. 2010. Diss. (Mestrado). Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/24714>. Acesso em: 15 abr. 2021.
- BRASIL. *Brasil alcança a maior produção de etanol da história*. Abr. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/agricultura-e-pecuaria/2020/04/brasil-alcanca-a-maior-producao-de-etanol-da-historia>. Acesso em: 25 abr. 2021.
- BRASIL. *Lei nº 13.576, Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências*. Dez. 2017. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/2017/lei/113576.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/113576.htm). Acesso em: 16 abr. 2021.
- CASTRO, L. A. S. DE; BECKER, A. Batata-doce BRS-Cuia. In: Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado, 2011. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/915801/batata-doce-brs-cuia>. Acesso em: 25 abr. 2021.
- CASTRO, L. A. S. DE; BECKER, A. et al. BRS GAITA: cultivar de batata-doce. In: Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1089577/brs-gaita-cultivar-de-batata-doce>. Acesso em: 24 abr. 2021.
- CASTRO, L. A. S. DE; EMYGDIO, B. M. Acessos genéticos de batata-doce com potencial para produção de biocombustível. In: Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado, 2008. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/903707/acessos-geneticos-de-batata-doce-com-potencial-para-producao-de-biocombustivel>. Acesso em: 25 abr. 2021.
- CASTRO, L. A. S. DE; TREPTOW, R. D. O. et al. Cultivar de batata-doce BRS-Cuia. In: Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado, 2012. (Embrapa Clima Temperado. Documentos, 352). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/952592>. Acesso em: 22 abr. 2021.

- CEREDA, M. J. *Tanques Scherrer*: Catálogo. 2014. Disponível em: <http://www.tanquescherrer.com.br/download/catalogo.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2021.
- CHATTI, S. et al. (Ed.). Optimization. In: *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019. P. 1294–1294. ISBN 978-3-662-53120-4. DOI: 10.1007/978-3-662-53120-4\_300484. Disponível em: [https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-3-662-53120-4\\_300484](https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-3-662-53120-4_300484).
- CHURCH, R. Spatial Optimization Models. In: WRIGHT, J. D. (Ed.). *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences (Second Edition)*. Second Edition. Oxford: Elsevier, 2015. P. 172–177. ISBN 978-0-08-097087-5. DOI: 10.1016/B978-0-08-097086-8.72063-0. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080970868720630>. Acesso em: 24 abr. 2021.
- COUNCIL OF SUPPLY CHAIN MANAGEMENT PROFESSIONALS (CSCMP). *Supply Chain Management Terms and Glossary*. 2013. Disponível em: [https://cscmp.org/CSCMP/Educate/SCM\\_Definitions\\_and\\_Glossary\\_of\\_Terms.aspx](https://cscmp.org/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms.aspx). Acesso em: 18 abr. 2021.
- EMBRAPA AGROENERGIA. *Biorrefinarias*. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2011. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/908142>. Acesso em: 22 abr. 2021.
- FEEDSTOCK LOGISTICS INTERAGENCY WORKING GROUP (FLIWG). *Biofuel feedstock logistics: recommendations for research and commercialization*. [S.l.]: Biomass Research and Development Board, 2010. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/260870400\\_Biofuel\\_Feedstock\\_Logistics\\_Recommendations\\_for\\_Research\\_and\\_Commercialization](https://www.researchgate.net/publication/260870400_Biofuel_Feedstock_Logistics_Recommendations_for_Research_and_Commercialization). Acesso em: 22 abr. 2021.
- FEIGE, U. *The Simplex Algorithm*. 2011. Disponível em: <http://www.wisdom.weizmann.ac.il/~robi/teaching/2012a-AdvancedAlgorithms/lecture2-simplex.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2021.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). *Global Food and Agriculture Statistics of FAO (FAOSTAT): Crops - Sweet potatoes*. 2020. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Acesso em: 19 abr. 2021.
- GAMRATH, G. *Generic Branch-Cut-and-Price*. 2010. Tese (Doutorado). Disponível em: [https://www.zib.de/gamrath/publications/gamrath2010\\_genericBCP.pdf](https://www.zib.de/gamrath/publications/gamrath2010_genericBCP.pdf).
- GAMS DEVELOPMENT CORP. *GAMS*. [S.l.: s.n.], 2006. Disponível em: <https://www.gams.com/products/gams/gams-language/>.



- GOOGLE. *Google My Maps*. [S.l.: s.n.], 2021a. Disponível em: <https://www.google.com/maps/about/mymaps/>.
- GOOGLE. *googlemaps*. [S.l.: s.n.], 15 mar. 2021b. Disponível em: <https://github.com/googlemaps/google-maps-services-python>.
- GÜLDEN, J. S. *Roadmap Tecnológico: Etanol de Batata-Doce*. 2019. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/200465>. Acesso em: 15 abr. 2021.
- GUROBI OPTIMIZATION. *Gurobi Optimizer*. [S.l.: s.n.], 25 abr. 2021. Disponível em: <https://www.gurobi.com/products/gurobi-optimizer/>.
- HUANG, C.-Y.; LAI, C.-Y.; CHENG, K.-T. CHAPTER 4 - Fundamentals of algorithms. In: WANG, L.-T.; CHANG, Y.-W.; CHENG, K.-T. (Ed.). *Electronic Design Automation*. Boston: Morgan Kaufmann, 2009. P. 173–234. ISBN 978-0-12-374364-0. DOI: 10.1016/B978-0-12-374364-0.50011-4. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123743640500114>.
- IBGE - PRODUÇÃO AGRÍCOLA MUNICIPAL. *Tabela 5457: Área plantada ou destinada à colheita, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias e permanentes*. 2020. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5457>. Acesso em: 22 abr. 2021.
- IBM. *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio*. [S.l.: s.n.], 11 dez. 2020. Disponível em: <https://www.ibm.com/products/ilog-cplex-optimization-studio>.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York, USA, 2014. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>. Acesso em: 15 abr. 2021.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Global warming of 1.5°C: an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Geneva, Switzerland, 2018. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/sr15/>. Acesso em: 15 abr. 2021.
- INTERNATIONAL ENERGY ASSOCIATION (IEA). *World Energy Balances: Overview*. Jul. 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview#world>. Acesso em: 15 abr. 2021.

- KALLEHAUGE, B. et al. Vehicle Routing Problem with Time Windows. In: *Column Generation*. Edição: Guy Desaulniers, Jacques Desrosiers e Marius M. Solomon. Boston, MA: Springer US, 2005. P. 67–98. ISBN 978-0-387-25486-9. DOI: 10.1007/0-387-25486-2\_3. Disponível em: [https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F0-387-25486-2\\_3](https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F0-387-25486-2_3). Acesso em: 27 abr. 2021.
- KOHLHEPP, G. Análise da situação da produção de etanol e biodiesel no Brasil. pt. *Estudos Avançados*, scielo, v. 24, p. 223–253, 2010. ISSN 0103-4014. DOI: 10.1590/S0103-40142010000100017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142010000100017>. Acesso em: 25 abr. 2021.
- LAPORTE, G. The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, v. 59, n. 3, p. 345–358, 1992. ISSN 0377-2217. DOI: 10.1016/0377-2217(92)90192-C. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037722179290192C>. Acesso em: 24 abr. 2021.
- LIU, R.; JIANG, Z. A hybrid large-neighborhood search algorithm for the cumulative capacitated vehicle routing problem with time-window constraints. *Applied Soft Computing*, v. 80, p. 18–30, 2019. ISSN 1568-4946. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.03.008>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494619301267>. Acesso em: 21 mai. 2021.
- MASIERO, S. S. *Microusinas de etanol de batata-doce: viabilidade econômica e técnica*. 2012. Diss. (Mestrado). Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/75879>. Acesso em: 19 abr. 2021.
- MAZZMA12. *kml\_io*. [S.l.: s.n.], 3 dez. 2020. Disponível em: <https://gist.github.com/mazzma12/0a32ce693bb42b742252caabb98519db>.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). *Balanco Energético Nacional*. Mai. 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>. Acesso em: 12 abr. 2021.
- NUMFOCUS. *pandas*. [S.l.: s.n.], 12 abr. 2021. Disponível em: <https://github.com/pandas-dev/pandas>.
- NUMPY. *numpy*. [S.l.: s.n.], 27 mar. 2020. Disponível em: <https://github.com/numpy/numpy>.
- PETTERLE, É. C. *Produção descentralizada de etanol visando suprir a planta de eteno verde da Braskem*. 2010. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/127797>. Acesso em: 15 abr. 2021.
- PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. *Python*. [S.l.: s.n.], 5 out. 2020. Disponível em: <https://github.com/python>.

- RENEWABLE FUELS ASSOCIATION (RFA). *Annual World Fuel Ethanol Production - US and World Ethanol Production*. 2021. Disponível em: <https://ethanolrfa.org/statistics/annual-ethanol-production/>. Acesso em: 16 abr. 2021.
- RIO GRANDE DO SUL. *Leite encaminha à Assembleia projeto de lei que institui o Pró-Etanol*. 2020. Disponível em: <https://estado.rs.gov.br/leite-encaminha-a-assembleia-projeto-de-lei-que-institui-o-pro-etanol>. Acesso em: 22 abr. 2021.
- RUBIN, P. A. *Choosing "Big M" Values*. 2018. Disponível em: <https://orinanobworld.blogspot.com/2018/09/choosing-big-m-values.html>. Acesso em: 28 abr. 2021.
- SCHWEINBERGER, C. M. et al. Ethanol production from sweet potato: The effect of ripening, comparison of two heating methods, and cost analysis. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 94, n. 4, p. 716–724, 2016. DOI: 10.1002/cjce.22441. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/cjce.22441>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cjce.22441>. Acesso em: 25 abr. 2021.
- TRIERWEILER, J. O. *Decentralized and Autonomous Biorefineries: a Circular, Green and Digital Economy Model*. 2020. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/gimscop/2020/08/13/lecture-decentralized-and-autonomous-biorefineries-a-circular-green-and-digital-economy-model/>. Acesso em: 16 abr. 2021.
- WEBER, C. T. *Produção, caracterização e avaliação econômica de destilados de batata doce*. 2017. Diss. (Mestrado). Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/171392>. Acesso em: 21 abr. 2021.
- WIKIMEDIA COMMONS. *File:Simplex-method-3-dimensions.png — Wikimedia Commons, the free media repository*. 2020. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Simplex-method-3-dimensions.png&oldid=481347148>. Acesso em: 25 abr. 2021.
- YUE, D.; YOU, F.; SNYDER, S. W. Biomass-to-bioenergy and biofuel supply chain optimization: Overview, key issues and challenges. *Computers & Chemical Engineering*, v. 66, p. 36–56, 2014. Selected papers from ESCAPE-23 (European Symposium on Computer Aided Process Engineering - 23), 9-12 June 2013, Lappeenranta, Finland. ISSN 0098-1354. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2013.11.016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135413003670>. Acesso em: 25 abr. 2021.
- ZUSE INSTITUTE BERLIN. *SCIP Optimization Suite*. [S.l.: s.n.], 13 jan. 2021. Disponível em: <https://www.scipopt.org/>.



## APÊNDICE A - MATRIZES DE DISTÂNCIA E TEMPO

**Tabela 6 – Matriz de distâncias entre a Central e as unidades de produção, em quilômetros.**

0	0,000	44,209	39,787	58,362	28,859	26,204	10,228	25,430	49,332	55,866	27,618	39,362	32,677	34,346	55,890	33,455	20,500	40,226	66,025	42,223	46,517	54,467	36,982	11,194	13,308	416,990	40,066
1	48,113	0,000	6,728	59,354	88,170	45,478	39,517	26,407	50,324	56,888	74,010	81,860	95,577	66,638	78,580	56,144	42,522	34,016	45,285	27,927	18,935	17,727	31,532	58,807	52,473	72,897	62,559
2	44,509	6,728	0,000	55,750	84,566	52,588	35,913	22,803	46,721	53,254	70,406	78,256	91,973	77,708	85,690	63,255	49,633	41,127	52,395	35,037	26,045	14,680	27,928	55,204	48,869	69,293	69,669
3	58,434	59,369	54,947	0,000	28,816	83,492	49,838	36,728	15,721	18,946	14,656	22,506	36,223	91,634	66,617	90,742	77,788	90,957	102,230	84,868	75,876	69,628	46,711	33,478	40,505	13,543	97,354
4	28,859	88,185	83,763	28,816	0,000	54,563	38,588	65,544	44,537	47,762	20,637	15,652	7,407	22,985	37,801	61,814	48,860	68,585	94,385	70,583	104,690	98,444	75,527	20,052	27,905	39,000	33,252
5	26,004	46,013	53,130	83,438	54,364	0,000	35,304	50,506	74,408	80,942	53,122	64,866	34,501	21,938	35,438	13,003	14,883	14,800	40,600	38,073	42,367	60,216	62,058	36,699	38,812	67,194	19,418
6	10,326	35,710	31,289	49,863	38,685	35,383	0,000	16,932	40,834	47,367	37,444	72,369	42,502	43,525	65,069	42,634	29,679	49,405	75,204	51,403	52,217	45,969	28,483	21,020	14,686	63,406	49,245
7	25,284	26,218	21,797	37,075	65,891	50,341	16,688	0,000	28,045	34,579	51,731	59,581	73,298	58,483	80,027	57,592	44,637	57,807	69,076	51,717	42,726	36,477	17,596	35,978	29,644	50,618	64,203
8	49,361	50,295	45,874	15,603	44,419	74,418	40,765	27,655	0,000	11,260	30,259	38,109	51,826	82,560	104,100	81,669	68,714	81,884	93,153	75,794	66,803	60,554	37,637	49,081	53,721	29,146	88,280
9	55,894	56,829	52,407	22,136	50,952	80,951	47,298	34,188	11,249	0,000	36,792	44,643	58,360	89,093	110,640	88,202	75,248	88,417	99,686	82,328	73,336	67,088	44,171	55,614	60,254	35,679	94,813
10	27,618	74,025	69,603	14,656	20,637	53,322	37,346	51,384	30,376	33,602	0,000	14,327	28,044	28,425	58,437	60,573	47,618	67,344	93,143	69,341	90,532	84,283	61,367	18,822	25,849	17,118	67,184
11	39,362	81,875	77,453	22,506	15,652	65,066	72,344	59,234	38,227	41,452	14,327	0,000	23,060	38,638	53,453	72,317	59,363	79,088	104,890	107,370	98,382	92,134	69,217	30,555	40,176	32,690	48,894
12	32,677	95,592	91,171	36,223	7,407	34,499	42,405	72,952	51,944	55,170	28,044	23,060	0,000	17,425	37,465	41,749	52,677	48,521	74,320	71,794	76,087	105,850	82,934	21,482	35,312	46,407	27,682
13	34,238	67,136	73,116	91,691	22,914	21,901	43,558	58,760	82,662	89,195	28,354	38,566	17,354	0,000	34,747	29,152	34,172	35,953	61,722	59,196	63,490	81,399	70,311	14,474	47,066	42,426	12,385
14	56,336	79,534	86,650	65,906	37,090	36,073	65,637	80,839	104,740	111,270	57,727	52,742	36,755	34,791	0,000	28,918	58,572	48,321	74,120	71,594	75,887	93,737	92,390	67,031	69,144	76,089	24,843
15	31,610	54,808	61,924	89,044	59,970	11,347	40,911	56,113	80,014	86,548	58,728	70,473	40,107	27,544	28,825	0,000	33,846	23,595	49,394	46,868	51,161	69,011	67,664	42,305	44,418	72,800	14,619
16	20,379	43,681	50,797	77,813	48,739	18,251	29,679	44,882	68,783	75,317	47,497	59,242	52,556	34,139	51,352	28,917	0,000	15,953	41,752	35,741	40,035	57,884	56,433	31,074	33,187	61,569	35,332
17	42,702	34,357	41,473	91,283	71,062	17,476	52,002	58,336	82,253	88,787	69,820	81,564	51,199	38,636	50,578	28,143	16,042	0,000	26,799	21,721	30,710	48,560	63,461	53,397	55,510	104,830	34,557
18	68,634	49,919	57,035	106,840	96,994	43,408	77,934	73,898	97,816	104,350	95,752	129,350	77,131	64,568	76,510	54,075	41,974	26,932	0,000	23,490	46,273	64,122	79,024	79,329	81,442	120,390	60,489
19	46,616	27,916	35,033	84,843	74,976	41,644	65,006	51,896	75,813	82,347	99,498	107,350	75,366	62,804	74,746	52,310	38,688	20,925	18,846	0,000	24,270	42,120	57,021	57,311	59,425	98,386	58,725
20	40,284	18,406	25,522	75,332	104,150	42,283	55,495	42,385	66,302	72,836	89,987	97,838	76,006	63,443	75,385	52,950	39,328	30,822	42,091	24,732	0,000	24,682	47,510	51,479	68,451	88,875	59,364
21	59,190	17,727	14,680	70,431	99,247	59,689	50,594	37,484	61,401	67,934	85,086	92,937	106,650	80,849	92,791	70,356	56,734	48,228	59,497	42,138	23,115	0,000	42,609	69,884	63,550	83,974	76,770
22	39,067	31,563	27,141	46,565	75,382	64,125	30,472	17,362	37,536	44,069	61,221	69,072	82,789	72,267	93,811	71,376	58,421	63,151	74,420	57,062	48,070	41,822	0,000	49,762	43,428	60,108	77,987
23	11,194	54,903	50,482	33,513	20,052	36,899	20,923	36,125	49,234	52,459	18,857	30,555	21,482	14,545	66,585	44,149	31,195	50,920	76,720	52,918	57,211	65,162	47,676	0,000	16,183	32,929	50,761
24	13,308	48,666	44,245	40,505	27,905	39,012	14,686	29,888	53,790	60,323	25,849	40,176	35,312	47,154	68,698	46,263	33,308	53,034	78,833	55,031	59,325	58,925	41,439	16,148	0,000	39,921	52,874
25	41,690	72,912	68,490	13,543	39,000	67,394	63,381	50,271	29,264	32,489	17,118	32,690	46,407	42,497	76,800	74,645	61,690	104,500	115,770	98,411	89,419	83,171	60,254	32,894	39,921	0,000	81,256
26	39,978	62,954	70,070	97,411	33,337	19,493	49,278	64,480	88,382	94,915	67,096	48,989	27,777	12,385	24,800	16,350	39,892	31,741	57,540	55,014	59,307	77,157	76,031	50,672	52,786	81,167	0,000

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Tabela 7 – Matriz de tempo de deslocamento entre a Central e as unidades de produção, em horas.**

0	0,000	0,688	0,624	0,786	0,729	0,392	0,148	0,374	0,725	0,863	0,699	0,963	0,847	0,498	0,799	0,517	0,495	0,596	1,037	0,805	0,839	1,065	0,678	0,290	0,423	1,153	0,659
1	0,711	0,000	0,187	0,888	1,234	0,667	0,610	0,471	0,828	0,965	1,107	1,231	1,388	1,008	1,128	0,845	0,775	0,500	0,835	0,481	0,344	0,525	0,611	0,984	1,016	1,300	1,020
2	0,664	0,184	0,000	0,842	1,188	0,813	0,564	0,424	0,781	0,919	1,061	1,184	1,342	1,123	1,273	0,990	0,920	0,646	0,980	0,626	0,489	0,442	0,565	0,938	0,969	1,253	1,165
3	0,789	0,896	0,832	0,000	0,346	1,141	0,688	0,549	0,276	0,406	0,219	0,343	0,500	1,247	1,358	1,266	1,244	1,316	1,651	1,296	1,160	1,274	0,778	0,698	0,918	0,412	1,409
4	0,738	1,243	1,178	0,346	0,000	1,115	0,871	0,895	0,623	0,753	0,293	0,281	0,154	0,956	1,011	1,240	1,218	1,319	1,760	1,528	1,506	1,620	1,125	0,499	0,762	0,713	1,206
5	0,384	0,666	0,802	1,138	1,096	0,000	0,500	0,726	1,078	1,216	1,066	1,330	1,083	0,382	0,539	0,256	0,493	0,251	0,691	0,570	0,603	1,126	1,030	0,657	0,790	1,521	0,431
6	0,171	0,597	0,533	0,695	0,884	0,524	0,000	0,283	0,634	0,772	0,854	1,038	1,002	0,629	0,931	0,649	0,626	0,728	1,168	0,937	0,861	0,974	0,586	0,445	0,476	1,107	0,791
7	0,374	0,482	0,418	0,564	0,911	0,727	0,274	0,000	0,503	0,641	0,783	0,907	1,064	0,833	1,134	0,851	0,829	0,902	1,236	0,882	0,746	0,859	0,463	0,648	0,679	0,976	0,994
8	0,727	0,834	0,770	0,271	0,618	1,079	0,626	0,487	0,000	0,293	0,490	0,614	0,771	1,185	1,486	1,204	1,182	1,254	1,589	1,235	1,098	1,212	0,717	0,969	1,032	0,683	1,347
9	0,860	0,968	0,903	0,404	0,751	1,213	0,759	0,620	0,287	0,000	0,623	0,747	0,904	1,318	1,619	1,337	1,315	1,388	1,722	1,368	1,231	1,345	0,850	1,102	1,165	0,816	1,480
10	0,712	1,116	1,051	0,220	0,300	1,089	0,845	0,769	0,496	0,626	0,000	0,296	0,453	1,133	1,311	1,214	1,192	1,293	1,734	1,502	1,380	1,493	0,998	0,478	0,699	0,540	1,356
11	0,986	1,251	1,187	0,355	0,292	1,363	1,043	0,904	0,632	0,762	0,302	0,000	0,446	1,248	1,304	1,488	1,466	1,568	2,008	1,652	1,515	1,629	1,134	0,747	1,001	0,721	1,498
12	0,859	1,397	1,333	0,501	0,154	1,096	0,992	1,050	0,777	0,907	0,447	0,436	0,000	0,842	1,079	1,220	1,339	1,300	1,741	1,619	1,653	1,774	1,279	0,568	0,916	0,867	1,092
13	0,493	1,001	1,085	1,248	0,963	0,382	0,609	0,836	1,187	1,325	1,154	1,244	0,846	0,000	0,699	0,506	0,696	0,586	1,026	0,905	0,938	1,461	1,139	0,784	0,899	1,608	0,304
14	0,808	1,134	1,271	1,348	1,002	0,556	0,924	1,151	1,502	1,640	1,295	1,283	1,063	0,678	0,000	0,503	1,020	0,719	1,160	1,038	1,072	1,595	1,454	1,081	1,214	1,714	0,453
15	0,497	0,824	0,959	1,252	1,209	0,244	0,613	0,840	1,191	1,329	1,179	1,444	1,196	0,495	0,505	0,000	0,709	0,409	0,849	0,727	0,761	1,284	1,143	0,770	0,903	1,634	0,456
16	0,491	0,798	0,934	1,246	1,204	0,477	0,608	0,834	1,186	1,323	1,174	1,438	1,322	0,701	0,937	0,655	0,000	0,432	0,872	0,701	0,735	1,258	1,138	0,765	0,898	1,628	0,829
17	0,635	0,499	0,635	1,308	1,348	0,293	0,752	0,891	1,248	1,385	1,318	1,582	1,334	0,634	0,753	0,471	0,416	0,000	0,487	0,375	0,436	0,959	1,031	0,909	1,042	1,720	0,645
18	1,085	0,860	0,996	1,670	1,798	0,743	1,201	1,253	1,609	1,747	1,768	2,012	1,784	1,083	1,203	0,920	0,865	0,489	0,000	0,467	0,798	1,321	1,393	1,358	1,491	2,081	1,095
19	0,924	0,485	0,621	1,294	1,637	0,633	1,017	0,877	1,234	1,372	1,514	1,637	1,675	0,974	1,093	0,811	0,741	0,371	0,449	0,000	0,422	0,946	1,018	1,198	1,331	1,706	0,986
20	0,835	0,328	0,464	1,137	1,484	0,611	0,859	0,720	1,076	1,214	1,356	1,480	1,653	0,952	1,071	0,789	0,718	0,444	0,778	0,424	0,000	0,653	0,860	1,124	1,265	1,549	0,964
21	1,097	0,517	0,433	1,274	1,621	1,124	0,996	0,857	1,214	1,351	1,494	1,617	1,774	1,465	1,584	1,302	1,231	0,957	1,292	0,937	0,630	0,000	0,998	1,371	1,402	1,686	1,477
22	0,681	0,626	0,561	0,783	1,130	1,034	0,581	0,441	0,723	0,860	1,003	1,126	1,283	1,139	1,441	1,158	1,136	1,046	1,380	1,026	0,890	1,003	0,000	0,955	0,986	1,195	1,301
23	0,290	0,963	0,899	0,696	0,512	0,668	0,423	0,649	0,973	1,103	0,477	0,746	0,557	0,771	1,075	0,792	0,770	0,872	1,312	1,081	1,114	1,341	0,953	0,000	0,466	0,931	0,935
24	0,421	1,021	0,956	0,933	0,783	0,799	0,481	0,707	1,058	1,196	0,714	1,009	0,937	0,904	1,206	0,923	0,901	1,003	1,443	1,211	1,245	1,398	1,010	0,475	0,000	1,168	1,066
25	1,177	1,308	1,244	0,412	0,719	1,554	1,100	0,961	0,688	0,818	0,549	0,716	0,873	1,598	1,731	1,679	1,657	1,728	2,063	1,708	1,572	1,685	1,190	0,943	1,164	0,000	1,821
26	0,648	1,011	1,147	1,403	1,193	0,432	0,764	0,991	1,342	1,480	1,331	1,474	1,077	0,297	0,468	0,448	0,851	0,596	1,036	0,915	0,948	1,471	1,294	0,921	1,054	1,785	0,000

Fonte: Elaborado pelo autor.





## APÊNDICE B - CÓDIGOS *PYTHON*

### **Código 1** – Adaptação da ferramenta *kml\_io*

```
import geopandas as gpd
import pandas as pd

def read(file):
    # Enable fiona driver
    gpd.io.file.fiona.drvsupport.supported_drivers['KML'] = 'rw'

    # Read file
    gdf = gpd.read_file(file, driver='KML')

    df = pd.DataFrame()

    df['name'] = gdf['Name']
    df['lat'] = gdf['geometry'].y
    df['lon'] = gdf['geometry'].x

    return df
```

### **Código 2** – Geração de matrizes de tempo e distância através da API do *googlemaps*

```
import googlemaps
import pandas as pd
import json
import kml_io
import numpy as np
import os
import math
```

```

def deg_to_dms(deg, type='lat'):
    decimals, number = math.modf(deg)
    d = int(number)
    m = int(decimals * 60)
    s = (deg - d - m / 60) * 3600.00
    compass = {
        'lat': ('N', 'S'),
        'lon': ('E', 'W')
    }
    compass_str = compass[type][0 if d >= 0 else 1]
    return '{}°{:02.0f}\'{:05.2f}"{}'.format(abs(d), abs(m), abs(s),
    compass_str)

def to_json_file(values, json_file):
    with open(json_file, 'w') as fp:
        json.dump(values, fp)

def from_distance_matrix_json_file(distance_matrix_json_file):
    res = pd.read_json(distance_matrix_json_file)

    origin_addresses = res['origin_addresses']
    destination_addresses = res['destination_addresses']
    dist_matrix = np.array([[res['rows'][i]['elements'][j]['distance']['
value'] for j in range(len(res['rows'][i]['elements']))] for i in range
(len(res['rows']))])
    dur_matrix = np.array([[res['rows'][i]['elements'][j]['duration']['
value'] for j in range(len(res['rows'][i]['elements']))] for i in range
(len(res['rows']))])

    return origin_addresses, destination_addresses, dist_matrix, dur_matrix

def from_reverse_geocode_json_file(reverse_geocode_json_file):
    results = pd.read_json(reverse_geocode_json_file)

    for i in range(results.shape[0]):
        res = results[0][i]
        print(res['formatted_address'])

```

```

addresses = [results[0][i]['formatted_address'].replace("Unnamed Road",
"Est. sem nome") for i in range(results.shape[0])]

return addresses

def gams_print(matrix):
    out = "\t"

    for j in range(matrix.shape[1]):
        out = out + "\t" + str(j + 1)

    for i in range(matrix.shape[0]):
        out = out + "\n" + "\t" + str(i + 1)
        for j in range(matrix.shape[1]):
            out = out + "\t" + f'{matrix[i][j]:<3.5g}'

    print(out)

def query_distance_matrix(kml_file, distance_matrix_json_file="
distance_matrix.json", force=False):

    if not distance_matrix_json_file:
        pass

    unidades = kml_io.read(kml_file)

    if not os.path.isfile(distance_matrix_json_file) or force:
        coordinates = unidades[['lat', 'lon']]
        tuples = [tuple(x) for x in coordinates.values]

        origins = tuples
        destinations = tuples

        def split_list(arg_list, x): return [arg_list[i:i+x] for i in range
(0, len(arg_list), x)]

        gmaps = googlemaps.Client(key='AIzaSyCZwnT_weSF1Sa8IPSKSivSL4NHK-
dACms')

```

```

combined = None

dist_matrix = np.empty([0, len(origins)])
dur_matrix = np.empty([0, len(origins)])
pairs = []

for sub_origins in split_list(origins, 9):

    combined_by_destination_dist_matrix = np.empty([len(sub_origins)
), 0])
    combined_by_destination_dur_matrix = np.empty([len(sub_origins)
), 0])

    combined_by_destination_pairs = []

    for sub_destinations in split_list(destinations, 9):

        distance_matrix_result = gmaps.distance_matrix(origins=
sub_origins, destinations=sub_destinations, mode='driving', language='
pt-BR', units='metric')

        to_json_file(distance_matrix_result,
distance_matrix_json_file)

        origin_addresses, destination_addresses, sub_dist_matrix,
sub_dur_matrix = from_distance_matrix_json_file(
distance_matrix_json_file)

        combined_by_destination_pairs =
combined_by_destination_pairs + [(origin_addresses,
destination_addresses)]

        print(combined_by_destination_dist_matrix)
        print('@'*100)

        print(sub_dist_matrix)
        print('@'*100)
        combined_by_destination_dist_matrix = np.concatenate((
combined_by_destination_dist_matrix, sub_dist_matrix), axis=1)
        combined_by_destination_dur_matrix = np.concatenate((
combined_by_destination_dur_matrix, sub_dur_matrix), axis=1)

```

```

        pairs = pairs + [combined_by_destination_pairs]

        dist_matrix = np.concatenate((dist_matrix,
combined_by_destination_dist_matrix), axis=0)
        dur_matrix = np.concatenate((dur_matrix,
combined_by_destination_dur_matrix), axis=0)

    return unidades, pairs, dist_matrix, dur_matrix

def query_reverse_geocode(kml_file, reverse_geocode_json_file="
reverse_geocode.json", force=False):

    if not reverse_geocode_json_file:
        pass

    unidades = kml_io.read(kml_file)

    if not os.path.isfile(reverse_geocode_json_file) or force:
        coordinates = unidades[['lat', 'lon']]
        tuples = [tuple(x) for x in coordinates.values]

        origins = tuples

        gmaps = googlemaps.Client(
            key='*****')

        reverse_geocode_result_types = [
            'route', 'administrative_area_level_2', 'political', '
postal_code']

        reverse_geocode_result = [gmaps.reverse_geocode(
            latlng=latlng, result_type=reverse_geocode_result_types,
language='pt-BR') for latlng in origins]

        to_json_file(reverse_geocode_result, reverse_geocode_json_file)

    addresses = from_reverse_geocode_json_file(reverse_geocode_json_file)
    unidades['addresses'] = addresses

```

```

latitudes = unidades['lat']
longitudes = unidades['lon']
unidades['lat'] = [deg_to_dms(latitudes[i], 'lat') for i in range(
unidades.shape[0])]
unidades['lon'] = [deg_to_dms(longitudes[i], 'lon') for i in range(
unidades.shape[0])]

return unidades

unidades_dm, pairs, dist, dur = query_distance_matrix('Unidades.kml', force
=True)

dist = dist/1000
dur = dur/3600

print(unidades_dm)
print('@'*100)

print(pairs)
print('@'*100)

print(dist)
print('@'*100)

print(dur)
print('@'*100)

gams_print(dist)
print('@'*100)

gams_print(dur)

```

---

### **Código 3 – Execução das simulações**

---

```

import gurobipy as gp
from gurobipy import GRB

root = r'C:\Users\pedro\Documents\UFRGS\TCC\case\gurobi'
output_types = ['mps', 'lp', 'prm', 'json', 'sol', 'mst']
prm_file = f"{root}\\case.prm"

cases = [f"case_{c+1}" for c in range(5, 6)]

```

```

for case in cases:
    try:

        folder = f"{root}\\{case}"
        lp_file = f"{folder}\\gams\\cplex.lp"

        # Create a new model
        m = gp.read(lp_file)
        m.read(prm_file)

        # Optimize model
        m.optimize()

        for out_type in output_types:
            m.write(f"{folder}\\case.{out_type}")

    except gp.GurobiError as e:
        print('Error_code_' + str(e.errno) + ':_' + str(e))
    except AttributeError:
        print('Encountered_an_attribute_error')

```

---

#### Código 4 – Extração dos resultados para .csv

---

```

from dataclasses import dataclass, field, asdict
from typing import List, Dict
import pandas as pd
import re

@dataclass(frozen=False)
class Variable:
    name: str
    indices: List[int]
    pseudonym: str
    full_name: str
    value: float = 0.0

root = r'C:\Users\pedro\Documents\UFRGS\TCC\case\gurobi'
prm_file = f"{root}\\case.prm"

variables_sets = {
    'o': [],

```

```

    'x': ['k', 'i', 'j', 'd'],
    'y': ['k', 'u', 'd'],
    'z': ['k', 'd'],
    's': ['k', 'h', 'd'],
    'v': ['k', 'u', 'd'],
    'tp': ['k', 'd'],
    'tv': ['k', 'd'],
    'tn': ['u', 'd']
}

cases = [f"case_{c_{c+1}}" for c in range(6)]
pattern_pseudo_value = re.compile(r'^(?P<pseudonym>[^#]\w+)\s(?P<value>\b
    (?!\0$)\S+)\$')
pattern_pseudo_name = re.compile(r'^\s\s(?P<pseudonym>[xb]\w+)\s\s(?P<
    full_name>(P<name>\w+)\(?(?P<indices>([\d,]+)*\)\)?\$')
pattern_index = re.compile(r'(P<index>\d+)')

for case in cases:
    try:

        folder = f"{root}\\{case}"
        results_folder_path = f"{folder}\\results"
        sol_file_path = f"{folder}\\case.sol"
        dict_file_path = f"{folder}\\gams\\dict.txt"

        pseudo_to_variable: Dict[str, Variable] = {}

        with open(dict_file_path, "r") as dict_file:
            for line in dict_file:
                match = pattern_pseudo_name.match(line)

                if match:
                    indices = pattern_index.findall(match['indices'])

                    name = match['name']
                    full_name = match['full_name']
                    pseudonym = match['pseudonym']

                    pseudo_to_variable[pseudonym] = Variable(name, indices,
pseudo_name, full_name)

```



```

with open(sol_file_path, "r") as sol_file:
    for line in sol_file:
        match = pattern_pseudo_value.match(line)

        if match:
            pseudonym = match['pseudonym']

            pseudo_to_variable[pseudonym].value = float(match['
value'])

    as_dict = [asdict(var) for var in pseudo_to_variable.values() if
var.value > 0]
    df = pd.DataFrame.from_dict(as_dict)

    for name, table in df.groupby('name', as_index=False):
        table[variables_sets[name]] = pd.DataFrame(table.indices.
to_list(), index=table.index)

        num_of_sets = len(variables_sets[name])

        cols = table.columns.tolist()
        cols = cols[0:1] + cols[-num_of_sets:] + cols[1:-num_of_sets]
        table = table[cols]

        table.to_csv(f"{results_folder_path}\\{name}.csv", sep="\t",
mode='w+', index=False)

except IOError as e:
    print(f"File_{e.filename}_not_accessible")

```





```
Parameter n_max(hp) "Nível máximo do tanque u" /1 10000.0,  
2 10000.0,  
3 10000.0,  
4 10000.0,  
5 10000.0,  
6 10000.0,  
7 10000.0,  
8 10000.0,  
9 10000.0,  
10 10000.0,  
11 10000.0,  
12 10000.0,  
13 10000.0,  
14 10000.0,  
15 10000.0,  
16 10000.0,  
17 10000.0,  
18 10000.0,  
19 10000.0,  
20 10000.0,  
21 10000.0,  
22 10000.0,  
23 10000.0,  
24 10000.0,  
25 10000.0,  
26 10000.0/;
```

```
Parameter n_l(hp) "Nível inicial do tanque u" /1 1750,  
2 8250,  
3 2500,  
4 2500,  
5 6250,  
6 3000,  
7 2000,  
8 4750,  
9 5500,  
10 7250,  
11 1250,  
12 8500,  
13 4750,  
14 8500,  
15 9000,  
16 1500,  
17 8500,  
18 3000,  
19 8250,  
20 0,  
21 3750,  
22 1000,  
23 7750,  
24 6250,  
25 5000,  
26 3000/;
```

```
Parameter F(hp) "Taxa de produção do tanque u" /1 41.67,  
2 41.67,  
3 41.67,  
4 41.67,  
5 41.67,  
6 41.67,  
7 41.67,  
8 41.67,  
9 41.67,  
10 41.67,  
11 41.67,  
12 41.67,  
13 41.67,  
14 41.67,  
15 41.67,  
16 41.67,  
17 41.67,  
18 41.67,  
19 41.67,  
20 41.67,  
21 41.67,  
22 41.67,  
23 41.67,  
24 41.67,  
25 41.67,  
26 41.67/;  
  
Parameter t(lp) "Hora de início do turno no dia l" /1 0.0,  
2 24.0,  
3 48.0,  
4 72.0,  
5 96.0,  
  
6 168.0,  
7 192.0,  
8 216.0,  
9 240.0,  
10 264.0,  
  
11 336.0/;
```

```

Parameter Dt(lp) "Duração do turno no dia 1" /1 8.0,
2 8.0,
3 8.0,
4 8.0,
5 8.0,

6 8.0,
7 8.0,
8 8.0,
9 8.0,
10 8.0,

11 8.0/;

Parameter v_Cp(lp) "Volume comprado da central no dia 1" /1 26250,
2 18000,
3 28500,
4 45500,
5 23250,

6 23000,
7 39000,
8 14250,
9 33000,
10 32500,

11 11250/;

Parameter v_C(lp);
v_C(lp) = card(h) * v_Cp(lp) / card(hp);

Parameter n_C_1 "Nível inicial do tanque da central" /75000.0/;

Parameter n_C_max "Nível máximo do tanque da central" /100000.0/;

Parameter T_p "Tempo de fixo de atendimento" /0.5/;
    
```

Table D\_M(hp,hp) "Arcos associados entre as conexões"

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
0	0	44.209	39.787	50.362	28.859	26.204	10.228	25.43	49.332	55.866	27.618	39.362	32.677	34.346	55.89	33.455	20.5	40.226	66.025	42.223	46.517	54.467	36.982	11.194	13.308	41.69	40.066
1	48.113	0	6.728	59.354	88.117	45.478	39.517	26.407	50.324	56.289	74.01	81.286	95.977	66.438	78.38	56.144	42.522	34.016	45.288	27.927	18.938	17.727	31.532	58.807	52.479	72.897	62.559
2	44.509	6.728	0	55.75	84.566	52.388	35.913	22.903	46.721	53.254	70.406	78.256	91.973	77.708	85.49	43.255	49.633	41.127	52.395	35.037	24.045	14.68	27.928	55.204	48.869	69.293	69.669
3	58.434	59.369	54.947	0	28.816	83.492	49.838	36.728	15.721	18.946	14.656	22.506	36.223	91.634	66.617	90.742	77.788	90.957	102.23	84.868	75.876	69.628	46.711	33.478	40.505	13.543	67.354
4	28.859	88.185	83.763	28.816	0	54.563	38.588	65.544	44.537	47.762	20.637	15.652	7.407	22.985	37.801	61.814	48.86	68.585	94.385	70.583	104.69	98.444	75.527	20.052	27.905	39	33.242
5	26.004	46.013	53.13	83.438	54.364	0	35.304	50.506	74.408	80.942	53.122	64.866	34.501	21.930	35.438	13.003	14.893	14.8	40.6	38.073	42.367	60.216	62.058	36.699	38.812	67.194	19.418
6	10.326	35.71	31.289	49.863	39.685	35.383	0	16.932	40.834	47.367	37.444	72.369	42.502	43.525	65.069	42.634	29.679	49.405	75.204	51.403	52.217	45.969	28.483	21.02	14.686	63.406	49.245
7	25.284	26.218	21.797	37.075	65.891	50.341	16.688	0	28.049	84.579	51.731	59.581	73.298	58.483	80.027	57.592	44.637	57.007	69.076	51.717	42.726	36.477	17.596	35.978	29.444	50.618	64.203
8	49.361	50.285	45.874	15.603	44.419	74.418	40.745	27.655	0	11.226	30.259	38.109	51.826	82.56	104.1	81.669	68.714	81.884	93.153	75.794	66.803	60.554	37.637	49.081	53.721	29.146	88.28
9	55.894	56.829	52.407	22.136	50.952	80.951	47.298	34.188	11.249	0	36.792	44.643	58.36	89.093	110.64	88.202	75.248	88.417	99.686	82.328	73.336	67.088	44.171	55.614	60.254	35.679	94.813
10	27.618	74.025	69.603	14.656	20.637	53.322	37.346	51.384	30.376	33.602	0	14.327	28.044	28.425	58.437	60.573	47.618	67.344	93.143	69.341	90.532	84.283	61.367	18.822	25.849	17.118	67.184
11	39.362	81.875	77.453	32.506	15.652	65.066	72.344	59.234	38.227	41.452	14.327	0	23.06	38.638	53.453	72.317	59.363	79.088	104.89	107.37	98.382	92.134	69.217	30.555	40.176	32.69	48.894
12	32.677	95.952	91.171	36.223	7.407	34.499	42.405	72.952	51.944	55.17	28.044	23.06	0	17.425	37.465	41.749	52.677	49.521	74.32	71.794	76.087	105.85	82.934	21.482	35.312	46.407	27.682
13	34.258	47.136	73.116	91.691	22.914	21.901	43.558	58.76	82.662	89.195	28.954	38.566	17.354	0	34.747	29.152	34.172	35.923	61.722	59.196	63.419	81.339	70.311	14.474	47.066	42.426	12.385
14	56.336	75.534	86.65	65.906	37.09	36.073	65.637	80.839	104.74	111.27	57.727	52.742	36.755	34.791	0	28.918	58.572	49.321	74.12	71.594	75.887	93.737	92.39	67.031	69.144	76.089	24.843
15	31.61	54.808	61.924	89.044	59.97	11.347	40.911	56.113	80.014	86.548	58.728	70.473	40.107	27.544	28.825	0	33.846	23.595	49.394	46.868	51.161	69.011	67.664	42.305	44.418	72.8	14.619
16	20.379	43.681	50.797	77.813	48.739	18.251	29.679	44.882	68.783	75.317	47.497	59.242	52.556	34.139	51.352	28.917	0	15.953	41.752	35.741	40.035	57.884	56.433	31.074	33.187	61.569	35.332
17	42.702	34.357	41.473	91.283	71.062	17.476	52.002	58.336	82.253	88.787	69.82	81.564	51.159	38.636	50.578	28.143	16.042	0	26.799	21.721	30.71	48.56	63.461	53.397	55.51	104.83	34.557
18	68.434	49.919	57.035	106.84	96.594	43.408	77.934	73.898	97.816	104.35	95.752	129.35	77.131	64.568	76.51	54.075	41.974	26.932	0	23.49	46.273	64.122	79.024	79.329	81.482	120.39	60.485
19	46.616	27.516	35.033	84.843	74.976	41.644	65.006	51.896	75.813	82.347	89.489	107.35	75.366	62.804	74.746	52.31	39.688	20.925	18.846	0	24.27	42.12	57.021	57.311	59.425	98.386	58.725
20	40.284	18.406	25.522	75.332	104.15	42.283	55.495	42.385	66.302	72.836	89.987	97.838	76.006	63.443	75.365	52.95	39.328	30.822	42.091	24.732	0	24.682	47.51	51.479	68.451	88.875	59.364
21	59.19	17.727	14.68	70.431	99.247	59.689	50.594	37.484	61.401	67.934	85.086	82.937	106.65	80.849	92.791	70.356	56.734	46.228	59.497	42.138	23.115	0	42.609	69.884	63.55	83.974	76.77
22	39.067	31.563	27.141	46.565	75.382	64.125	30.472	17.362	37.536	44.069	61.221	69.072	82.789	72.267	93.811	71.376	59.421	63.151	74.42	57.062	48.07	41.822	0	49.762	43.428	60.108	77.987
23	11.194	54.903	50.482	33.513	20.052	36.959	20.933	34.125	49.234	52.459	18.957	30.555	21.482	24.545	66.585	44.149	31.195	50.92	76.72	52.618	57.211	65.162	47.676	0	16.183	32.929	50.761
24	13.308	49.666	44.245	40.505	27.905	39.012	14.686	29.888	53.79	60.323	25.849	40.176	35.312	47.154	68.698	46.243	33.308	53.034	78.833	55.031	59.325	58.925	41.439	16.148	0	39.921	52.874
25	41.69	72.912	68.49	13.543	39	67.394	63.381	50.271	29.264	82.489	17.118	32.69	46.407	42.497	76.8	74.645	61.69	104.5	115.77	98.411	89.419	83.171	60.254	32.894	39.921	0	81.256
26	39.978	62.954	70.07	97.411	33.337	19.493	49.278	64.48	88.382	94.915	67.096	48.989	27.777	12.385	24.8	16.35	39.892	31.741	57.54	55.014	59.307	77.157	76.031	50.672	52.786	81.167	0

Table T\_M(hp,hp) "Arcos associados entre as conexões"

0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
0	0	0.68778	0.62361	0.78611	0.72917	0.39222	0.14778	0.37417	0.72528	0.86306	0.69917	0.96333	0.84694	0.49778	0.79917	0.51694	0.49472	0.59639	1.0367	0.805	0.83861	1.0653	0.6775	0.29	0.42306	1.1533	0.65944
1	0.71083	0	0.18667	0.88806	1.2344	0.66722	0.61028	0.47111	0.8275	0.96528	1.1072	1.2306	1.3883	1.0083	1.1275	0.845	0.77472	0.50028	0.83472	0.48056	0.34389	0.52528	0.61139	0.98444	1.0158	1.2997	1.0197
2	0.66417	0.18389	0	0.84167	1.1891	0.8125	0.56361	0.42444	0.78083	0.91861	1.0600	1.1842	1.3417	1.1225	1.2728	0.99028	0.91972	0.64556	0.98	0.62556	0.48917	0.44167	0.56472	0.93778	0.96917	1.2531	1.165
3	0.75861	0.89611	0.83167	0	0.34639	1.1511	0.48006	0.54889	0.27639	0.40639	0.21917	0.3425	0.50028	1.2469	1.3578	1.2458	1.2439	1.3164	1.4500	1.2964	1.16	1.2736	0.77833	0.6575	0.51806	0.41167	1.4086
4	0.73806	1.2425	1.1783	0.34639	0	1.1153	0.87083	0.89528	0.62278	0.75278	0.29306	0.28111	0.15389	0.95556	1.0114	1.24	1.2181	1.3194	1.7597	1.5283	1.5064	1.62	1.1247	0.45917	0.76194	0.7125	1.2061
5	0.38361	0.66611	0.80222	1.1383	1.0964	0	0.5	0.72639	1.0778	1.2156	1.0661	1.3303	1.0828	0.38222	0.53889	0.25639	0.49278	0.25111	0.69139	0.57	0.60333	1.1264	1.0297	0.65722	0.79	1.5206	1.43111
6	0.17139	0.59694	0.5325	0.695	0.88417	0.52389	0	0.28306	0.63417	0.77194	0.85417	1.0375	1.0019	0.62944	0.93083	0.64861	0.62639	0.72806	1.1683	0.93667	0.86056	0.97417	0.59639	0.445	0.47639	1.1067	0.78111
7	0.37444	0.48194	0.4175	0.56417	0.91056	0.72694	0.27389	0	0.50333	0.64111	0.78333	0.90667	1.0642	0.8325	1.1339	0.85139	0.82944	0.90194	1.2364	0.88222	0.74589	0.85917	0.4625	0.64778	0.67944	0.97556	0.99417
8	0.72694	0.93444	0.77	0.27111	0.6175	1.0794	0.62639	0.48722	0	0.29333	0.49038	0.61861	0.77139	1.185	1.4864	1.2042	1.1822	1.2544	1.5892	1.2347	1.0583	1.2119	0.73667	0.96961	1.0319	0.65278	1.3947
9	0.86	0.9675	0.90306	0.40417	0.75056	1.2125	0.75944	0.62	0.28667	0	0.62333	0.74667	0.90417	1.3181	1.6194	1.3369	1.315	1.3875	1.7219	1.3678	1.2314	1.3447	0.84972	1.1017	1.165	0.81556	1.4797
10	0.71167	1.1158	1.0514	0.21972	0.29972	1.0892	0.84472	0.76861	0.49611	0.62611	0	0.29583	0.45333	1.1328	1.3111	1.2139	1.1917	1.2933	1.7336	1.5019	1.3797	1.4933	0.99806	0.47833	0.69861	0.53972	1.3564
11	0.99583	1.2514	1.1872	0.35528	0.29194	1.3633	1.0433	0.90417	0.63167	0.76167	0.30194	0	0.44583	1.2475	1.3036	1.4878	1.4658	1.5675	2.0075	1.6519	1.5153	1.6289	1.1336	0.74694	1.0006	0.72139	1.4983
12	0.85961	1.3969	1.3325	0.50083	0.15444	1.0961	0.99167	1.0497	0.77694	0.90722	0.44722	0.43356	0	0.84167	0.7094	1.2203	1.3386	1.3003	1.7406	1.6189	1.6525	1.7744	1.2792	0.56833	0.91611	0.86667	1.0522
13	0.49278	1.0011	1.0853	1.2478	0.96278	0.38194	0.60944	0.83583	1.1869	1.3247	1.1536	1.2439	0.94639	0	0.69817	0.50611	0.69639	0.58611	1.0264	0.905	0.93833	1.4614	1.1392	0.78389	0.89944	1.6081	0.30417
14	0.80778	1.1344	1.2706	1.3481	1.0017	0.55556	0.92444	1.1508	1.5019	1.6397	1.2947	1.2828	1.0631	0.47778	0	0.50333	1.0203	0.71944	1.1597	1.0383	1.0717	1.595	1.4539	1.0814	1.2142	1.7139	0.4825
15	0.49667	0.82361	0.95944	1.2517	1.2094	0.24444	0.61333	0.83972	1.1911	1.3289	1.1794	1.4436	1.1958	0.49528	0.50528	0	0.70944	0.40861	0.84861	0.72722	0.76083	1.2839	1.1431	0.77028	0.90333	1.6336	0.43556
16	0.49139	0.7975	0.93361	1.2461	1.2042	0.47694	0.60778	0.83444	1.1856	1.3239	1.1794	1.4436	1.1958	0.49528	0.50528	0	0.43167	0.87194	0.70139	0.73472	1.2578	1.1375	0.765	0.89778	1.6286	0.82944	0.43528
17	0.63528	0.49861	0.63472	1.3081	1.3481	0.29278	0.75194	0.89111	1.2475	1.3853	1.3181	1.5819	1.3344	0.63389	0.75306	0.47056	0.41556	0	0.48722	0.37472	0.43611	0.95917	1.0314	0.90889	1.0417	1.7197	0.64528
18	1.0847	0.86028	0.95639	1.6697	1.7975	0.7425	1.2014	1.2528	1.6092	1.7469	1.7675	2.0122	1.7839	1.8833	1.2025	0.92028	0.865	0.48944	0	0.46722	0.79778	1.3208	1.3931	1.3583	1.4514	2.0614	1.095
19	0.92444	0.485	0.62111	1.2944	1.6372	0.63333	1.0167	0.87222	1.2336	1.3717	1.5136	1.6369	1.6747	0.97417	1.0933	0.81111	0.74056	0.37056	0.44889	0	0.42222	0.94556	1.0175	1.1981	1.3311	1.7061	0.98033
20	0.83472	0.32778	0.46389	1.1372	1.4836	0.61111	0.85944	0.72	1.0764	1.2144	1.3564	1.4797	1.6525	0.95194	1.0711	0.78889	0.71833	0.44389	0.77833	0.42417	0	0.65333	0.86028	1.1244	1.265	1.5489	0.56361
21	1.0969	0.51694	0.43278	1.2742	1.6206	1.1242	0.99639	0.85722	1.2136	1.3514	1.4936	1.6169	1.7744	1.465	1.5842	1.3015	1.2314	0.95722	1.2917	0.93722	0.62972	0	0.9975	1.3706	1.4019	1.6858	1.4767
22	0.68111	0.62583	0.56139	0.78333	1.1297	1.0336	0.59056	0.44139	0.7225	0.86028	1.0025	1.1259	1.2893	1.1394	1.4406	1.1583	1.1364	1.0458	1.3803	1.0261	0.88972	1.0033	0	0.95472	0.98611	1.1947	1.3011
23	0.29028	0.96333	0.89889	0.69639	0.51167	0.66778	0.42306	0.64944	0.9725	1.1028	0.47667	0.74583	0.56694	0.77083	1.0747	0.79222	0.77028	0.87194	1.3119	1.0506	1.1142	1.3488	0.95278	0	0.46556	0.93083	0.935
24	0.42111	1.0208	0.95639	0.83333	0.78278	0.79861	0.48056	0.70694	1.0581	1.1961	0.71361	1.0094	0.93667	0.90417	1.2056	0.82333	0.90111	1.0028	1.4431	1.2114	1.245	1.3981	1.0103	0.475	0	1.1681	1.0659
25	1.1767	1.3078	1.2436	0.41167	0.71944	1.5539	1.0997	0.96056	0.68806	0.81833	0.54944	0.71556	0.87306	1.8978	1.7308	1.6796	1.6567	1.7281	2.0625	1.7083	1.5717	1.6853	1.19	0.94306	1.1636	0	1.8214
26	0.64778	1.0108	1.1469	1.4028	1.1933	0.43194	0.76444	0.99083	1.3419	1.4797	1.3306	1.4744	1.0769	0.29722	0.4675	0.44633	0.85139	0.95833	1.0361	0.91472	0.94833	1.4714	1.2942	0.92139	1.0544	1.7847	0

Variables

- o "Custo/objetivo"
- x(k,h,h,d) "Variável binária - arco i-j atendido pelo caminhão k no dia d"
- v(k,u,d) "Volume coletado pelo caminhão k na unidade u no dia d"
- y(k,u,d) "Caminhão k visita unidade u no dia d"
- s(k,h,d) "Hora de chegada do caminhão k na estação h no dia d"
- z(k,d) "Caminhão k sai no dia d"
- tp(k,d) "Total percorrido pelo caminhão k no dia d"
- tv(k,d) "Total coletado pelo caminhão k no dia d"
- tn(u,d) "Nível na unidade u no início do dia d";

Binary variables x, y, z;

Positive variables v, s, tp, tv, tn;

Equations

fobj "Função objetivo"

\*\*\*\*\*  
 \*  
 \* Restrições Lógicas (relacionam e associam as variáveis binárias)  
 \*

e1(k,h,d) "Continuidade do percurso"  
 e3(k,u,d) "Quantidade de saídas de uma unidade deve ser igual ao número de caminhões que visitam"  
 e2(k,d) "Caminhão, quando sai, sai da central"  
 e4(k,h,d) "x(i->i) = 0"  
 e5(u,d) "Apenas um caminhão pode visitar cada unidade por dia"  
 e6(k,d) "Caminhão só pode visitar unidade se sair naquele dia"  
 e6a(k,u,d) "Caminhão só pode visitar unidade se sair naquele dia"  
 e4a(k,d) "Total percorrido pelo caminhão k no dia d"  
 e4b(k,d) "Total coletado pelo caminhão k no dia d"  
 e5c(u,d) "Nível na unidade u no início do dia d"

\*\*\*\*\*  
 \*  
 \* Restrições Temporais:  
 \*

e7(k,u,j,d) "Hora de chegada em j deve ser maior do que a hora de chegada em i, mais o tempo de operação, mais o tempo de deslocamento i->j"  
 e8(k,u,d) "A hora de chegada mais cedo é o tempo do deslocamento da central até a unidade"  
 e9(k,u,d) "A hora de chegada na unidade não pode exceder o fim do turno quando o caminhão atender a unidade, senão deve ser 0"  
 e10(k,d) "A hora de chegada na central não pode exceder o fim do turno quando o caminhão sair, senão deve ser 0"

```

=====
*
* Restrições Capacitivas:
*
=====

e11(k,u,d)    "Volume só pode ser escoado por caminhão que visita unidade"
e12(k,d)      "Volume escoado por caminhão não pode exceder sua capacidade"
e13(k,u,d)    "Tanque não pode encher antes ou durante o turno"
e14(u,lf)     "Tanque não pode completar antes do fim do primeiro turno após período estudado"
e15(k,u,d)    "Volume escoado em uma unidade deve ser menor do que o nível do tanque"
e16(l)        "O tanque da central, no início de um turno, tem que ter sempre pelo menos o quanto vai ser comprado naquele dia"
e17(d)        "Tanque da central não pode encher";

fobj..        o =e= sum((d,i,j,k), D_M(i,j)*x(k,i,j,d));

*
* Restrições Lógicas (relacionam e associam as variáveis binárias)
*
=====

e1(k,h,d)..   sum(jj, x(k,h,jj,d)) - sum(ii, x(k,ii,h,d)) =e= 0;
e3(k,u,d)..   sum(j, x(k,u,j,d)) - y(k,u,d) =e= 0;
e2(k,d)..     sum(u, x(k,'0',u,d)) - z(k,d) =e= 0;
e5(u,d)..     sum(k, y(k,u,d)) =1= 1;
e6a(k,u,d)..  y(k,u,d) - z(k,d) =1= 0;
e4a(k,d)..    sum((i,j), D_M(i,j)*x(k,i,j,d)) - tp(k,d) =e= 0;
e4b(k,d)..    sum(u, v(k,u,d)) - tv(k,d) =e= 0;
e4c(u,d)..    n_1(u) + F(u)*t(d) - sum((k,dd)$ (ord(dd) < ord(d)), v(k,u,dd)) - tn(u,d) =e= 0;

*
* Restrições Temporais:
*
=====

e7(k,u,j,d).. s(k,u,d) + T_p*y(k,u,d) + v(k,u,d)/F_e(k) + T_M(u,j)*x(k,u,j,d) - (Dt(d) + T_p + n_max(u)/F_e(k))*(1 - x(k,u,j,d)) =1= s(k,j,d);
e8(k,u,d)..   s(k,u,d) - T_M('0',u)*x(k,'0',u,d) =g= 0;

*
* Restrições Capacitivas:
*
=====

e11(k,u,d)..   v(k,u,d) - n_max(u)*y(k,u,d) =1= 0;
e12(k,d)..     sum(u, v(k,u,d)) =1= C(k);
e13(k,u,d)..   n_1(u) + F(u)*(t(d) + s(k,u,d) + T_p*y(k,u,d)) - sum((kk,dd)$ (ord(dd) < ord(d)), v(kk,u,dd)) =1= n_max(u);
e14(u,lf)..    n_1(u) + F(u)*(t(lf) + Dt(lf)) - sum((k,d)$ (ord(d) <= card(l)), v(k,u,d)) =1= n_max(u);
e15(k,u,d)..   n_1(u) + F(u)*(t(d) + s(k,u,d) + T_p) - sum((kk,dd)$ (ord(dd) < ord(d)), v(kk,u,dd)) - v(k,u,d) =g= 0;
e16(l)..       n_C_1 + sum((u,k,d)$ (ord(d) < ord(l)), v(k,u,d)) - sum(d$ (ord(d) < ord(l)), v_C(d)) =g= v_C(l);
e17(d)..       n_C_1 + sum((u,k,dd)$ (ord(dd) <= ord(d)), v(k,u,dd)) - sum(dd$ (ord(dd) < ord(d)), v_C(dd)) =1= n_C_max;

v.up(k,u,d) = n_max(u);
s.up(k,h,d) = Dt(d);
x.fx(k,h,h,d) = 0;
s.fx(k,'0',d)=Dt(d);

Display v_C;
Display n_1;

Model pedro /fobj,
            e1,e2,e3,e5,e4a,e4b,e4c,
            e7,e8,
            e11,e12,
            e13,e14,e15,e16,e17/;

pedro.optfile = 1;
option MIP=convert;
option optcr=0.0, resLim=1800;

*option mip=cplex, optcr=0.0, resLim=1800;

Solve pedro using mip minimizing o;

Display x.l;
Display y.l;
Display z.l;
Display v.l;
Display s.l;
Display o.l;
Display tp.l;
Display tv.l;

execute_unload 'results.gdx', x, y, z, v, s, o, tp, tv;

```