

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL

JOÃO WAGNER DE OLIVEIRA

METAHEURÍSTICA *VARIABLE NEIGHBORHOOD SEARCH* (VNS) E
***VARIABLE NEIGHBORHOOD DESCENT* (VND) APLICADA NA**
DISTRIBUIÇÃO DE COMBUSTÍVEIS EM REDE MULTIMODAL

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2020

JOÃO WAGNER DE OLIVEIRA

METAHEURÍSTICA *VARIABLE NEIGHBORHOOD SEARCH* (VNS) E *VARIABLE NEIGHBORHOOD DESCENT* (VND) APLICADA NA DISTRIBUIÇÃO DE COMBUSTÍVEIS EM REDE MULTIMODAL

Metaheuristics Variable Neighborhood Search (VNS) and Variable Neighborhood Descente (VND) applied in Fuel Distribution in Multimodal Networks

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) como requisito parcial para obtenção de título de “Mestre em Ciências”. Área de Concentração: Engenharia de Automação e Sistemas. Linha de Pesquisa: Otimização de Sistemas.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Lúcia Valéria Ramos de Arruda.

CURITIBA

2020



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original. É a licença mais flexível de todas as licenças disponíveis. É recomendada para maximizar a disseminação e uso dos materiais licenciados.



**Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Curitiba**



JOAO WAGNER DE OLIVEIRA

METAHEURÍSTICA VARIABLE NEIGHBORHOOD SEARCH (VNS) E VARIABLE NEIGHBORHOOD DESCENT (VND) APLICADA NA DISTRIBUIÇÃO DE COMBUSTÍVEIS EM REDE MULTIMODAL

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Ciências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Engenharia De Automação E Sistemas.

Data de aprovação: 18 de Dezembro de 2020

Prof.a Lucia Valeria Ramos De Arruda, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Carlos Henrique Dos Santos, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Prof Flavio Neves Junior, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 18/12/2020.

Dedico esse trabalho aos meus pais, por sempre apoiarem as minhas decisões, minha namorada por me ajudar em vários momentos difíceis e a meus familiares.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por sempre estar ao meu lado em todos os momentos dessa caminhada e por me conceder forças para vencer mais essa batalha.

Agradeço a minha namorada Adriana, que nunca mediu esforços para me ajudar em quaisquer que fossem as dificuldades encontradas.

Agradeço a minha orientadora, por me aceitar como orientando e por indicar os caminhos que deveria percorrer.

Agradeço a cada um dos meus professores, cada um deles deixou sua marca especial no decorrer do curso. Cada dica, cada história e cada ensinamento foi de grande valia para vencer as barreiras e as dificuldades do curso.

Agradeço primeiramente a Universidade Federal do Paraná (UFPR), a qual me proporcionou uma base consistente e forte através do curso de Matemática Industrial que me fez olhar o mundo ao meu redor com outros olhos.

Agradeço a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CPGEI) por cada momento que passei durante todo o tempo de pós-graduação, por cada coisa nova que aprendi nesse tempo e pela oportunidade de me tornar uma pessoa muito melhor.

Agradeço imensamente ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo apoio financeiro durante o período de 24 meses, o qual possui o número do processo 133782/2018-2. Essa ajuda de custo foi necessária para que conseguisse me dedicar exclusivamente aos estudos.

“O covarde nunca tenta, o fracassado nunca
termina e o vencedor nunca desiste.”

Norman Vincent Peale, militar norte-americano

RESUMO

OLIVEIRA, João Wagner. **Metaheurística *Variable Neighborhood Search* (VNS) e *Variable Neighborhood Descent* (VND) Aplicada na Distribuição de Combustíveis em Rede Multimodal**. 2020. 58 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

Este trabalho apresenta uma modelagem matemática de um problema de distribuição de derivados de petróleo em rede multimodal como um caso particular do problema de transporte conhecido na literatura como Two-echelon Capacitated Vehicle Routing Problem (2E-CVRP), que realiza o roteamento de veículos em dois níveis, onde os veículos partem dos depósitos com uma quantidade limitada de carga e a transportam até um depósito intermediário, onde o produto é fracionado e redistribuído em novos veículos que saem com destino ao cliente para realizar a entrega. A rede é formada por refinarias, depósitos intermediários e clientes locais os quais são interligados via modais ferroviários e rodoviários. Para resolver esse problema, foi desenvolvido um modelo matemático que foi resolvido utilizando a metaheurística *Variable Neighborhood Search* (VNS), que utiliza conceitos de otimização matemática para realizar buscas a partir de uma solução inicial a procura de soluções melhores. Para ajudar na busca, a heurística *Variable Neighborhood Descent* (VND) foi implementada. O método consiste em definir uma quantidade limitada de diferentes vizinhanças para iniciar a busca por uma melhor solução até que todas as vizinhanças sejam avaliadas. O objetivo é encontrar os arcos de ligação entre as refinarias e os centros de distribuição e dos centros de distribuição aos clientes que que atendam a demanda, diminuindo o tempo e o trajeto percorrido. A metaheurística foi capaz de encontrar a solução ótima em um tempo computacional satisfatório, mostrando-se eficaz para auxiliar na tomada de decisão. O modelo proposto alcançou o resultado em 0,7 segundo, enquanto o modelo matemático, que foi implementado em Excel e resolvido pelo Gurobi atingiu o resultado em 0,2 segundos.

Palavras-chave: Rede Multimodal. Busca local por Vizinhança. Metaheurística.

ABSTRACT

OLIVEIRA, João Wagner. **Metaheurística *Variable Neighborhood Search* (VNS) e *Variable Neighborhood Descent* (VND) Aplicada na Distribuição de Combustíveis em Rede Multimodal**. 2020. 58 p. Dissertation (Master's Degree in Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

This work presents a mathematical model for the problem of petroleum products distribution in multimodal network as a particular case of the transportation problem known in the literature as Two-echelon Capacitated Vehicle Routing Problem (2E-CVRP), which performs vehicle routing in two levels, where vehicles leave the warehouses with a limited amount of cargo and transport them to an intermediate warehouse, where the product is divided and redistributed in new vehicles that leave for the customer to deliver. To solve this problem, a mathematical model was generated and solved using the Variable Neighborhood Search (VNS) metaheuristic, which uses concepts of mathematical optimization to perform searches from an initial solution in search of better solutions. To aid in the search, the Variable Neighborhood Descent (VND) heuristic was implemented. The method consists of defining a limited number of different neighborhoods to start the search for a better solution until all the neighborhoods are evaluated. The goal is to find the connection arcs between the refineries and the distribution centers and the distribution centers to the customers that minimize the objective function. The metaheuristic was able to find the optimal solution in a satisfactory computational time, proving to be effective in assisting decision making. The metaheuristic reached the result in 0.7 seconds, while the mathematical model, which was implemented in Excel and solved by Gurobi, reached the result in 0.2 seconds.

Keywords: Multimodal network. neighborhood local search. metaheuristic.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Divisão dos Níveis para o 2E-CVRP.	15
Figura 2 – Pontos de máximo e mínimo local e absoluto de uma função objetivo de um problema de otimização.	17
Figura 3 – Pseudocódigo Metaheurística VNS.	18
Figura 4 – Pseudocódigo Metaheurística VND.	19
Figura 5 – Vias de ligação entre as refinarias e os centros de distribuição.	23
Figura 6 – Vias de ligação entre os centros de distribuição e os clientes.	24
Figura 7 – Pseudocódigo da metaheurística VNS-VND.	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Demanda dos clientes em mil litros de produto.	30
Tabela 2 – Exemplo de solução inicial: Matriz contendo as quantidades transportadas entre os centros de distribuição e os clientes.	31
Tabela 3 – Exemplo de solução inicial: Matriz contendo as quantidades transportadas entre as refinarias e os centros de distribuição.	31
Tabela 4 – Matriz distância, em quilômetros, via modal rodoviário entre as refinarias e os centros de distribuição.	32
Tabela 5 – Matriz distância, em quilômetros, via modal ferroviário entre as refinarias e os centros de distribuição.	32
Tabela 6 – Matriz distância, em quilômetros, via modal rodoviário entre os centros de distribuição e os clientes.	33
Tabela 7 – Exemplo de uma nova solução: Matriz contendo as quantidades transportadas entre os centros de distribuição e os clientes.	33
Tabela 8 – Exemplo de uma nova solução: Matriz contendo as quantidades transportadas entre as refinarias e os centros de distribuição.	34
Tabela 9 – Quantidades transportadas entre os centros de distribuição e os clientes. . .	35
Tabela 10 – Quantidades transportadas entre as refinarias e os centros de distribuição. . .	35
Tabela 11 – Matriz distância, em quilômetros, via modal rodoviário entre as refinarias e os centros de distribuição.	37
Tabela 12 – Matriz distância, em quilômetros, via modal ferroviário entre as refinarias e os centros de distribuição.	38
Tabela 13 – Matriz distância, em quilômetros, via modal rodoviário entre os centros de distribuição e os clientes.	38
Tabela 14 – Demanda dos clientes em mil litros de produto.	38
Tabela 15 – Matriz distância, em quilômetros, via modal rodoviário entre as refinarias e os centros de distribuição.	39
Tabela 16 – Matriz distância, em quilômetros, via modal ferroviário entre as refinarias e os centros de distribuição.	39
Tabela 17 – Matriz distância, em quilômetros, via modal rodoviário entre os centros de distribuição e os clientes.	39
Tabela 18 – Demanda dos clientes em mil litros de produto.	40
Tabela 19 – Matriz distância, em quilômetros, via modal rodoviário entre as refinarias e os centros de distribuição.	40
Tabela 20 – Matriz distância, em quilômetros, via modal ferroviário entre as refinarias e os centros de distribuição.	41
Tabela 21 – Matriz distância, em quilômetros, via modal rodoviário entre os centros de distribuição e os clientes.	41
Tabela 22 – Demanda dos clientes em mil litros de produto.	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS	12
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	13
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	14
2.1	ROTEIRIZAÇÃO EM DOIS NÍVEIS	14
2.2	METAHEURÍSTICA	16
2.3	MÉTODO VARIABLE NEIGHBORHOOD SEARCH	17
2.4	MÉTODO VARIABLE NEIGHBORHOOD DESCENT	19
2.5	PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS CAPACITADOS DE DOIS NÍVEIS	19
3	REVISÃO DA LITERATURA	21
3.1	DESCRIÇÃO DO MODELO	25
3.2	DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS E VARIÁVEIS UTILIZADAS	25
3.3	FUNÇÃO OBJETIVO	26
3.4	RESTRICÇÕES DO MODELO	26
4	IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL	29
4.1	METAHEURÍSTICA VNS-VND	29
4.2	SOLUÇÃO INICIAL	30
4.3	GERA NOVA SOLUÇÃO S'	31
4.4	BUSCA LOCAL	33
5	RESULTADOS COMPUTACIONAIS	36
5.1	OUTRAS INSTÂNCIAS DE VALIDAÇÃO UTILIZADAS	37
6	CONCLUSÃO	43
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	44
	REFERÊNCIAS	45
	APÊNDICES	49
	APÊNDICE A – UTILIZAÇÃO DO SOLVER GUROBI EM UMA PLANILHA EXCEL	50
A.1	OPENSOLVER	50
	APÊNDICE B – CÓDIGO BASE DA METAHEURÍSTICA VNS-VND MATLAB	52

1 INTRODUÇÃO

A cadeia de suprimentos da indústria brasileira de petróleo é composta por bases de produção (ex. refinarias), armazenamento (ex. terminais) e consumo (ex. consumidores) e modais de transporte (ex. oleoduto, navios, caminhões e trens). O planejamento da transferência de derivados de petróleo nesta rede multimodal é um problema complexo e atualmente é realizado para um horizonte de tempo de três meses com base na experiência de profissionais e sem auxílio de um sistema computacional de apoio à decisão (BANASZEWSKI, 2014).

No Brasil, o modal rodoviário é expressivo em razão de sua ampla participação no sistema logístico nacional. O problema de transporte de combustível é classificado como um problema de otimização combinatória que consiste em encontrar o melhor caminho entre as várias possibilidades de ligações diferentes entre os centros produtores, concentrados na região sudeste, e os consumidores, espalhados em todo território nacional, a fim de minimizar os custos de transporte através da escolha das melhores rotas de ligação entre os pontos.

Em especial, a metaheurística VNS foi utilizada por (WANG *et al.*, 2017) para resolver um problema de roteamento de veículos capacitados em dois níveis. Um modelo baseado em arcos e rotas foi construído para minimizar os custos considerando salários dos motoristas, combustíveis e manutenção. A metaheurística utilizada apresentou um aprimoramento em 13 das 234 instâncias mais conhecidas do Two-echelon Capacitated Vehicle Routing Problem (2E-CVRP).

O presente trabalho tem como objetivo determinar um conjunto de rotas a serem percorridas que minimize o custo total de transporte dos derivados de petróleo no território brasileiro. A rede multimodal modelada neste artigo é composta por refinarias, centros de distribuição e clientes, onde existem custos diferentes para cada rota escolhida. Este problema pode ser caracterizado como o problema conhecido na literatura como 2E-CVRP, que consiste em um problema de roteamento de veículos em dois níveis, que utiliza depósitos intermediários para realizar o fracionamento e a distribuição de mercadorias das fábricas para os clientes. O 2E-CVRP foi proposto por (PERBOLI *et al.*, 2011) para a logística de cargas em 2 níveis, onde a função objetivo tem como característica minimizar os custos de transporte e as operações de carregamento e descarregamento das cargas. O modelo proposto neste trabalho, difere do modelo original, por tratar da minimização das operações logísticas de transporte em múltiplos modais, onde no primeiro nível serão utilizados os modais rodoviário e ferroviário para o transporte dos

derivados de petróleo e no segundo nível será utilizado somente o modal rodoviário para realizar a entrega para os clientes.

A metaheurística aplicada na solução será a Variable Neighborhood Search (VNS), que utiliza a heurística Variable Neighborhood Descent (VND) para realizar a busca local. Essa metaheurística foi adotada devido às características do problema, o qual se trata de um modelo de otimização combinatória.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é adaptar o modelo matemático proposto por (PERBOLI *et al.*, 2011) para a realidade do trabalho e implementar uma metaheurística para resolver o problema de roteamento de veículos em dois níveis aplicados ao transporte de derivados de petróleo, partindo das refinarias até chegar aos centros de distribuição, onde os derivados serão fracionados e redistribuídos em outros meios de transportes para que sejam entregues aos clientes com o menor custo possível.

Os objetivos específicos são:

- Realizar um levantamento bibliográfico acerca do tema, incluindo o problema de distribuição de petróleo.
- descrever o problema distribuição de derivados de petróleo em redes multimodal como um caso particular do problema de roteamento em dois níveis.
- Adaptar um modelo matemático para o problema de abordado.
- Estudar as diversas metaheurísticas que podem ser aplicadas a um problema do tipo 2E-CVRP.
- Implementar o modelo matemático e comparar sua solução com a encontrada pela metaheurística VNS-VND.
- Discutir os resultados analisar/validar a aplicabilidade do modelo em instâncias reais e simuladas do problema.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O restante da dissertação está organizado da seguinte forma: no capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica, onde serão apresentados os métodos utilizados na resolução do problema. No capítulo 3 será apresentada a revisão da literatura, onde foram levantados alguns trabalhos referente a logística de derivados de petróleo e a descrição do modelo utilizado. No capítulo 4 está descrita a implementação computacionais. No capítulo 5 são apresentados os resultados alcançados e no capítulo 6 é apresentada a conclusão e indicações de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

O sistema logístico de transporte de carga, o qual compreende o transporte de produtos de um determinado ponto A até um ponto B é conhecido na literatura como Vehicle Routing Problem (VRP), o qual é um problema de otimização combinatória que tem como objetivo a minimização dos custos totais de transporte de carga. No VRP, os veículos têm como ponto de partida um depósito, do qual saem com o objetivo de atender a um determinado número de clientes e então retornam ao ponto de origem. (MONTROYA-TORRES *et al.*, 2015).

O VRP faz parte de uma classe de problemas de otimização combinatória e foi proposto inicialmente na literatura por (DANTZIG; RAMSER, 1959) e é um problema do tipo NP-hard. Muitas pesquisas foram publicadas apresentando análises sobre o VRP como por exemplo: (BODIN, 1975), (DESROCHERS *et al.*, 1990), (EKSHIOGLU *et al.*, 2009) e (ZIROUR, 2008).

Por se tratar de um problema de difícil resolução, as metaheurísticas são comumente utilizadas na busca por soluções em problemas de otimização combinatória.

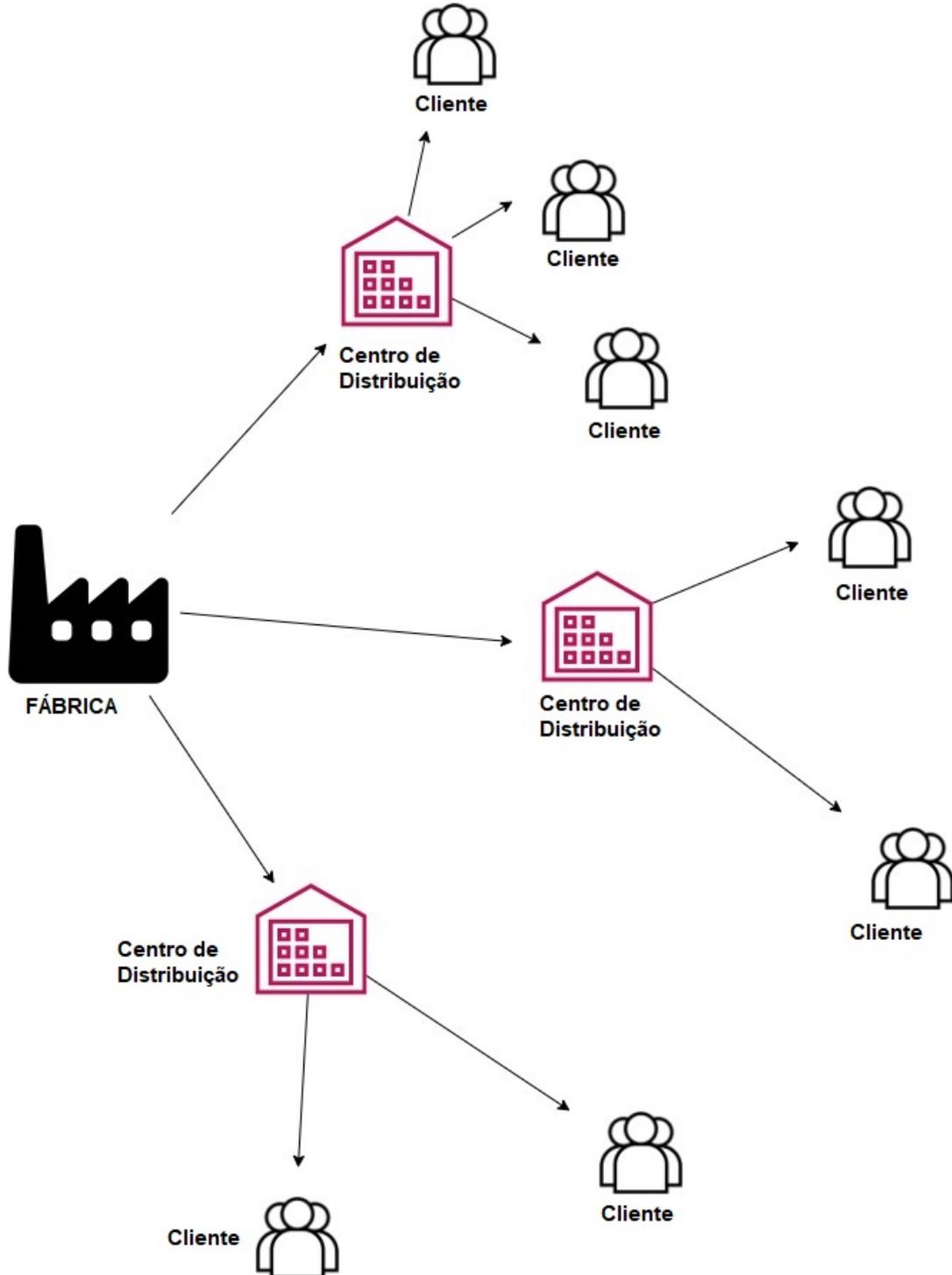
Neste capítulo será apresentada a teoria a respeito dos métodos utilizados na composição deste trabalho.

2.1 ROTEIRIZAÇÃO EM DOIS NÍVEIS

Uma variação do VRP é o *Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP)*, que é um problema que utiliza veículos homogêneos para realizar o transporte dos produtos, as rotas são limitadas pela capacidade dos veículos ou pelo limite de tempo estipulado para viagem do veículo (BALDACCI *et al.*, 2013). O roteamento de veículos em dois níveis é conhecido como *Two-Echelon Vehicle Routing Problem (2E-VRP)* e foi apresentado como uma nova classe de problemas para resolver a logística das cidades e fornecem uma formulação geral para o problema (CRAINIC *et al.*, 2010). Uma variante para esse problema é o *Two-Echelon Capacitated VRP (2E-CVRP)* e foi proposta por (GONZALEZ-FELIU *et al.*, 2008), onde a entrega das fábricas para os clientes é gerenciada através de depósito intermediários, onde os produtos recebidos das fábricas são fracionados e redistribuídos em veículos menores para que possam ser entregues aos clientes. Depósitos diferentes podem ter diferentes capacidades de armazenamento e distribuição (CRAINIC *et al.*, 2010). Os dois níveis são divididos da seguinte forma. O primeiro nível é representado na Figura 1 como sendo a rota percorrida por um veículo, partindo da fábrica com

destino ao centro de distribuição e o segundo nível é composto pela rota percorrida pelo veículo partindo do centro de distribuição com destino ao cliente.

Figura 1 – Divisão dos Níveis para o 2E-CVRP.



Fonte: Autoria própria.

O objetivo do 2E-CVRP é encontrar, entre todas as rotas possíveis, as que minimizam os custos totais de entrega, respeitando as demandas dos clientes e as capacidades de transporte

dos veículos.

Algumas variações para 2E-VRP são encontradas na literatura como *two-echelon vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery problem* (2E-VRPSPD) e propõe um modelo matemático baseado em nós que utiliza um algoritmo híbrido baseado em *variable neighborhood descent* (VNS) e *local search* (LS) para encontrar uma solução para as instâncias grandes do problema (BELGIN *et al.*, 2018). *Two-Echelon Production-Routing Problem* (2E-PRP) foi motivado pela indústria petroquímica, ampliando a integração da cadeia de suprimentos levando em consideração a produção, estoque e as decisões de roteamento onde tudo é gerenciado pelo fornecedor (SCHENEKEMBERG *et al.*, 2020).

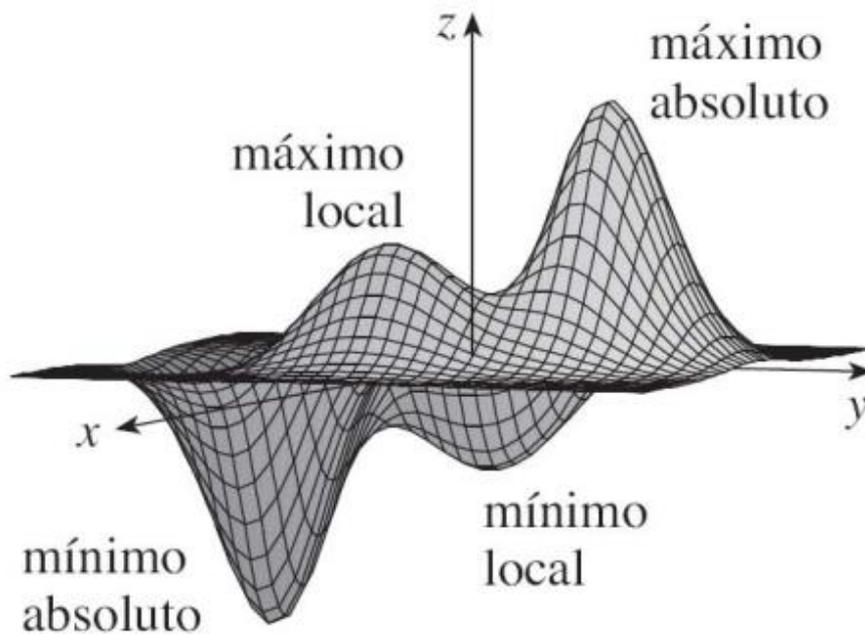
2.2 METAHEURÍSTICA

A metaheurística é um método heurístico para resolver problemas de otimização combinatoria, que pode ser tanto um problema de maximização quanto de minimização, que tem o objetivo de maximizar ou minimizar uma determinada função objetivo e que podem ser aplicados a uma grande quantidade de problemas diferentes. Uma das características da metaheurística é a capacidade de diversificação e melhoramento iterativo de uma solução candidata para não ficar preso nos ótimos locais, que representam o ponto de máximo ou de mínimo dentre o conjunto de pontos analisados, encontrando boas soluções aproximadas e eventualmente encontrar o ótimo global, que corresponde à melhor solução viável de um espaço de busca, para problemas difíceis de otimização combinatoria. Metaheurística é conhecida por resolver, de forma eficiente, problemas conhecidos na literatura como NP-hard que não podem ser resolvidos utilizando uma abordagem determinística dentro de um tempo computacional razoável.

Na Figura 2, é apresentado um exemplo de uma função com pontos de máximo e de mínimo locais e pontos de máximo e de mínimo absoluto que são comuns em problemas de otimização.

Como exemplo, pode-se citar a metaheurística GRASP que, em conjunto com a técnica *path-relinking*, foram aplicadas ao problema da Árvore Geradora de Custos Mínimos (ALVARENGA; ROCHA, 2006). A metaheurística *Variable Neighborhood Descent* (VND) e *Steepest Descent* (SD) foram utilizadas para resolução do problema de minimização de pilhas abertas (LIMA; CARVALHO, 2016). A metaheurística *Simulated Annealing* (SA) foi utilizada na resolução de problemas operacionais contendo restrições de recursos e múltiplos modos de execução das atividades de silvicultura (MENDONÇA, 2016). A metaheurística *Iterated Local Search*

Figura 2 – Pontos de máximo e mínimo local e absoluto de uma função objetivo de um problema de otimização.



Fonte: (STEWART, 2009)

(ILS) foi aplicado ao escalonamento de tarefas e manutenções em um conjunto de máquinas com o objetivo de minimizar o makespan (MENDES; IORI, 2019) e a heurística VND para maximizar a cobertura de um conjunto de nós de uma rede através de p-eixos (BUTINHOLI *et al.*, 2019). As metaheurísticas VNS e VND foram utilizadas em conjunto por (SOUZA *et al.*, 2002) para resolver um problema de otimização combinatória no auxílio à tomada de decisão, onde deveriam alocar 1500 alunos, oferecendo 250 turmas de disciplinas com a disponibilidade de 20 salas de aulas e 29 laboratórios específicos nos períodos matutino, vespertino e noturno.

2.3 MÉTODO VARIABLE NEIGHBORHOOD SEARCH

A metaheurística *Variable Neighborhood Search* (VNS), conhecida como Busca em Vizinhança Variável, foi proposta por (MLADENOVIC; HANSEN, 1997) para resolver problemas combinatórios e é inspirada em conceitos consolidados de otimização matemática e atua explorando em espaços de busca, a partir de uma solução inicial e tem como objetivo, realizar buscas em torno da solução inicial na procura de soluções melhores. Nessas buscas, são realizadas perturbações na solução corrente de forma que as buscas sejam realizadas cada vez em locais diferentes, utilizando para isso diferentes estruturas de vizinhança. Esse processo atua como mecanismo de diversificação da busca, onde durante todo o processo, a solução atual é

mantida até que outra solução melhor seja encontrada.

O VNS é inicializado através da geração de uma solução inicial S , logo após é feita a seleção de um conjunto k_{max} de uma estrutura de vizinhança N_k , ($k = 1, 2, \dots, k_{max}$), que representam as quantidades de vizinhanças que serão exploradas. Partindo da solução inicial, é realizada a primeira vizinhança $N_1(S)$. Caso a solução encontrada seja melhor que a solução corrente, a solução $N_1(S)$ passa a ser a nova solução. Caso em uma vizinhança $N_1(S)$ não seja encontrada uma solução melhor que a atual, passa-se para a próxima vizinhança $N_{k+1}(S)$. O critério de parada é acionado quando a última vizinhança $N_{k_{max}}(S)$ for analisada. Na Figura 3 é apresentado o pseudocódigo da metaheurística VNS.

Figura 3 – Pseudocódigo Metaheurística VNS.

Procedimento VNS (S, k_{max})	
1.	$S =$ Solução Inicial;
2.	$k = 1$;
3.	Enquanto $k \leq k_{max}$
4.	$S' =$ Busca Local(S)
5.	Se $f(S') \leq f(S)$
6.	$S = S'$
7.	$k = 1$;
8.	Senão
9.	$k = k + 1$;
10.	Fim Se
11.	Fim Enquanto
12.	Retorna S ;
13.	Fim VNS ;

Fonte: Autoria própria.

São várias as aplicabilidades do VNS como, por exemplo, o problema de sequenciamento de máquinas paralelas e tempos de preparação dependentes de tarefas e da máquina (PAULA *et al.*,). No problema de roteamento de veículos ecológicos, o VNS foi utilizado para encontrar o melhor ponto de reabastecimento dos veículos que utilizam combustível alternativo, onde o objetivo é minimizar a distância total de reabastecimento para atender a um conjunto de clientes e eliminar o risco de um veículo ficar sem combustível (AFFI *et al.*, 2018).

2.4 MÉTODO VARIABLE NEIGHBORHOOD DESCENT

O método *Variable Neighborhood Descent* (VND) foi desenvolvido por (MLADENOVIC; HANSEN, 1997) e é utilizado de forma a explorar o espaço das soluções utilizando uma estrutura de vizinhança e realizado trocas sistemáticas na procura de outra melhor solução para a solução atual. Na Figura 4 é apresentada o pseudocódigo do algoritmo VND.

Figura 4 – Pseudocódigo Metaheurística VND.

```

Procedimento VND(s)
início
1.  $k \leftarrow 1$ ;
2. enquanto ( $k \leq \gamma$ ) faça
3.   encontre o melhor vizinho  $s' \in s$ ;
4.   se  $f(s') < f(s)$  então
5.      $s \leftarrow s'$ ;
6.      $k \leftarrow 1$ ;
7.   senão
8.      $k \leftarrow k + 1$ ;
9.   fim – se
10. fim – enquanto
11. retorna  $s$ ;
12. fim VND;

```

Fonte: Autoria própria.

A metaheurística VND é normalmente utilizada em conjunto de forma auxiliar na busca local e na rapidez do processamento do algoritmo.

2.5 PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS CAPACITADOS DE DOIS NÍVEIS

O transporte de cargas terrestres, no Brasil, é um importante meio logístico de transporte de todos os tipos de mercadorias e a importância da logística vem aumentando devido ao aumento dos custos de transporte. O transporte de cargas também é um grande gerador de empregos e movimenta a economia do país de Norte a Sul.

No transporte tradicional de cargas, a empresa fornecedora de produtos realiza o transporte de seus produtos a partir de seus depósitos diretamente para os seus clientes, já no sistema de dois níveis, os produtos são transportados das fábricas até centros de distribuição intermediários e dos centros eles são redistribuídos para os clientes. Um exemplo para a entrega em dois níveis seria o sistema de entrega para hipermercados, onde a logística é realizada entre veículos

grandes, que realizam o transporte até os centros de distribuição onde a carga é fracionada e alocada em veículos menores para realizar a entrega nos centros urbanos.

Na literatura, o *Vehicle Routing Problem* (VRP) consiste em determinar as rotas ideais para os veículos que atendam a um grupo de clientes.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo tem por objetivo apresentar um levantamento bibliográfico das abordagens utilizadas para a resolução do problema de transporte de derivados de petróleo.

O problema de transporte de derivados de petróleo é tratado por diferentes abordagens na literatura. (AIZEMBERG, 2014) apresenta uma modelagem matemática para ser utilizada no desenvolvimento de um software para auxiliar na tomada de decisão nas movimentações dos lotes de derivados de petróleo pela rede logística brasileira como multiprodutos e multimodal.

O transporte de derivados de petróleo por meio de dutos é o que possui menor custo operacional, comparado com os transportes rodoviário, ferroviário e marítimo. (SCHNIRMANN *et al.*, 2017) utiliza a programação linear inteira mista (PLIM) para determinar os volumes que devem ser transportados pela rede dutoviária e suas respectivas rotas, considerando suas características a nível operacional para derivados claros de petróleo. (RELVAS *et al.*, 2006) apresenta um modelo PLIM para a otimização de um duto, partindo de uma refinaria, transportando múltiplos produtos até um terminal para um horizonte de tempo de 30 dias.

O problema *scheduling* em uma rede de distribuição de derivados de petróleo é um problema combinatório complexo. (YAMAMOTO, 2009) propôs uma abordagem híbrida utilizando as metaheurísticas greedy randomised adaptative search procedures (GRASP), algoritmo genético (AG) e *variable neighborhood search* (VNS) foram os que obtiveram melhores resultados para resolver o problema de scheduling operacional da rede.

Para resolução do problema de transporte de derivados de petróleo em uma rede multimodal, (VIEIRA, 2012) apresenta uma estratégia baseada em sistemas multiagentes (SMA) baseado em leilões combinatoriais para utilização na tomada de decisão e como mecanismo de negociação entre agentes que representam as bases produtoras e consumidoras. (BANASZEWSKI, 2014) apresenta um problema semelhante, utilizando o paradigma de agentes de sistemas multiagentes (SMA) e de leilão para compor uma ferramenta de auxílio na tomada de decisão no planejamento logístico de transferência de derivados de petróleo de parte da cadeia produtiva da Petrobrás.

O problema abordado neste trabalho é composto por refinarias, que são responsáveis pela produção e distribuição dos derivados de petróleo que serão enviados, através do primeiro nível para os centros de distribuição. Os centros de distribuição são responsáveis por receber os derivados das refinarias, fracionar e enviar para os clientes através do segundo nível.

O problema é constituído por cinco refinarias, dez centros de distribuição intermediários e quinze clientes. Cada uma das refinarias possui uma malha de distribuição ligada a no mínimo três e no máximo oito centros de distribuição. Cada ligação entre as refinarias e os centros de distribuição ou dos centros de distribuição aos clientes são denominados arcos.

Os derivados de petróleo podem ser transportados das refinarias para os centros de distribuição por dois tipos de modais, sendo eles o modal rodoviário e ferroviário. O modal rodoviário possui uma capacidade máxima de transporte de 75 mil litros por veículo utilizado e o modal ferroviário possui uma capacidade máxima de transporte de 113 mil litros.

Partindo do centro de distribuição com destino ao cliente, será convencionado a utilização do modal rodoviário como única forma de entrega com a capacidade de transporte de 68 mil litros por veículo. Na modelagem do problema, foi considerada que a capacidade de cada arco é limitada conforme o modal utilizado, onde o uso do arco está limitado a somente uma única utilização. Considera-se que as refinarias possuem capacidade de produção capaz de atender a qualquer demanda dos centros de distribuição. Considera-se também que as refinarias possuem produção independente umas das outras e não possuem ligação entre si.

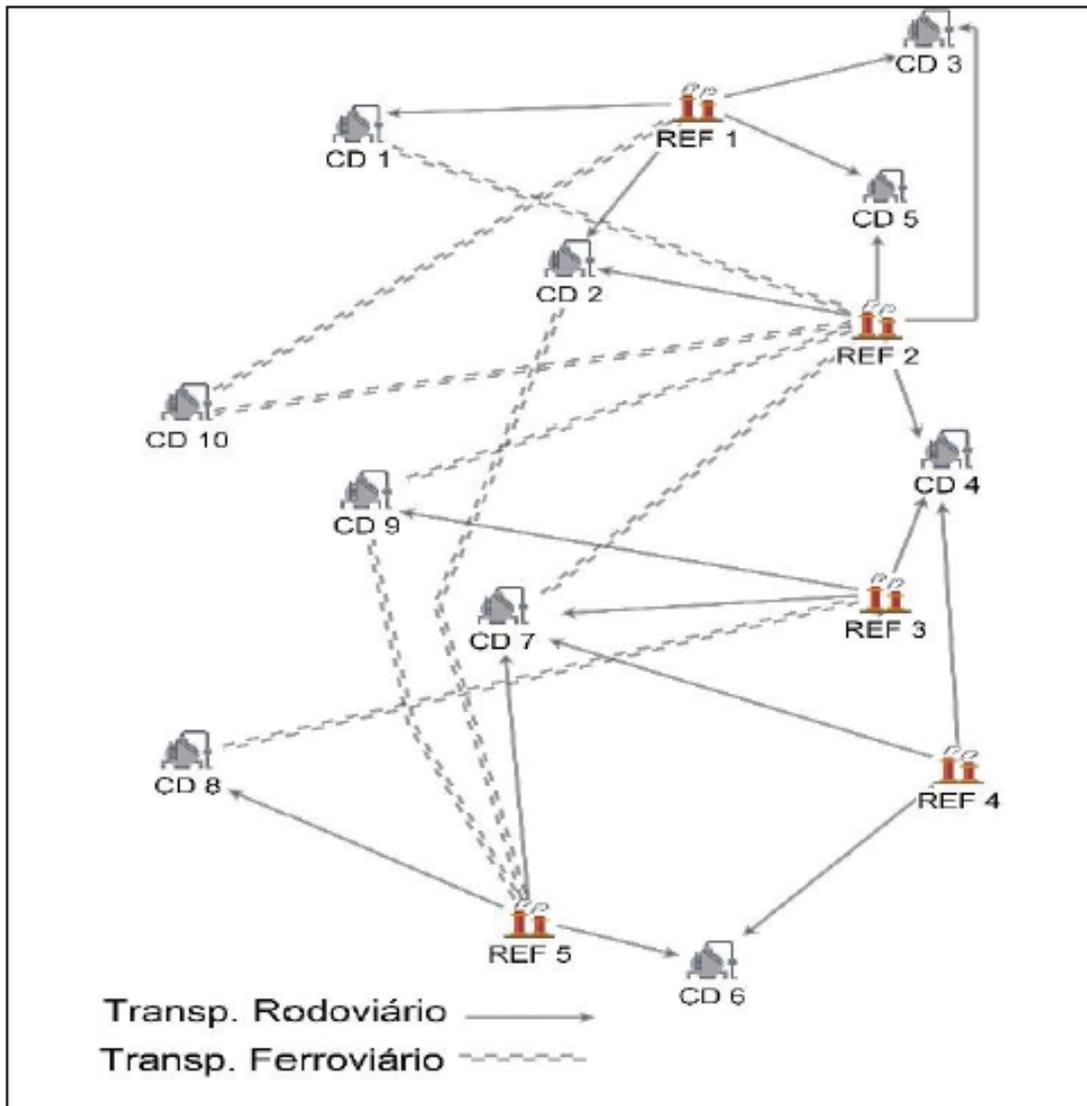
Os arcos possuem uma única orientação de sentido, o que significa que os derivados somente saem das refinarias em sentido aos centros de distribuição e dos centros de distribuição para os clientes.

Os centros de distribuição estão ligados somente com as refinarias e os clientes, não havendo ligação entre si. O mesmo ocorre com os clientes, onde eles possuem somente ligação com os seus respectivos centros de distribuição.

Cada refinaria atende a um número limitado de centros de distribuição em que o transporte entre eles pode ser realizado via modal rodoviário ou ferroviário, sujeito à existência de arcos de ligação, como ilustrado na Figura 5.

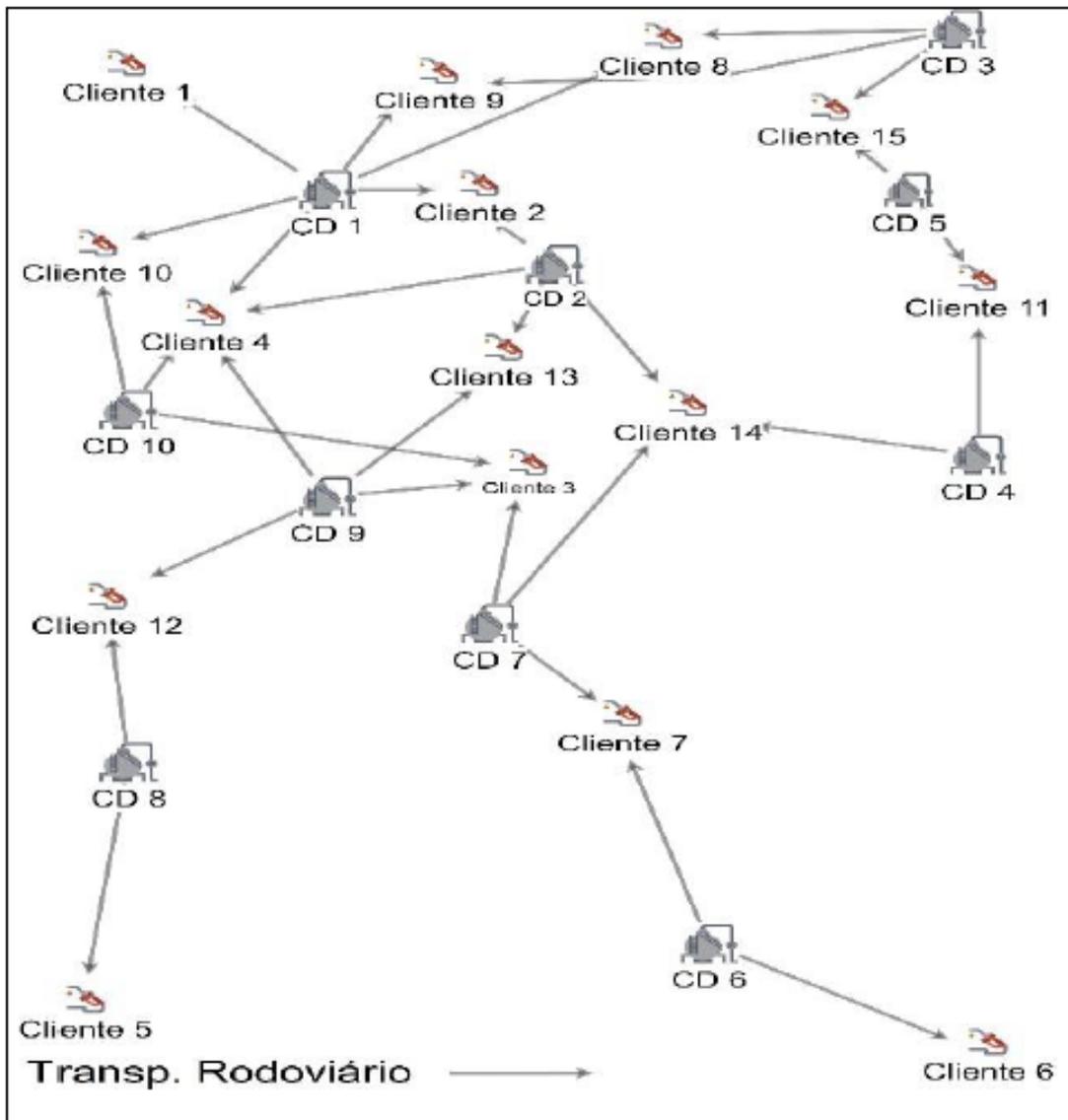
Para o atendimento aos clientes, são definidas rotas de ligação, onde cada centro de distribuição pode atender a um número limitado de clientes, como ilustrado na Figura 6.

Figura 5 – Vias de ligação entre as refinarias e os centros de distribuição.



Fonte: Autoria própria.

Figura 6 – Vias de ligação entre os centros de distribuição e os clientes.



Fonte: Autoria própria.

3.1 DESCRIÇÃO DO MODELO

O modelo matemático foi elaborado considerando as características iniciais do problema, levando em consideração as capacidades dos veículos, a existência de arcos de ligação entre as refinarias e os centros de distribuição e dos centros de distribuição com os clientes, a capacidade de transporte de cada modal utilizado e quanto cada veículo deve transportar para atender a toda a demanda dos clientes.

3.2 DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS E VARIÁVEIS UTILIZADAS

Os conjuntos utilizados são:

- $M = \{r, f\}$, onde r e f são referentes modal rodoviário e ferroviário respectivamente.
- R : Conjunto das refinarias.
- D : Conjunto dos centros de distribuição.
- C : Conjunto de clientes.

Os parâmetros utilizados para a formulação matemática foram os custos, distância entre os pontos, demanda dos clientes, capacidade de transporte e matriz de adjacência.

- CT_m : Refere-se ao custo, por quilômetro rodado, do modal m para entrega do derivado de petróleo.
- DT_{ijm} : A distância em quilômetros para percorrer o arco (i, j) pelo modal m .
- Q_k : A quantidade que deve ser entregue ao cliente k dada em quantidades de mil litros de derivados de petróleo.
- T_m : Quantidade máxima em mil litros que o modal m pode transportar pelo arco.
- AD_{ijm} : Indica se há arco ligando a refinaria i ao CD j pelo modal m . Se houver arco viável, $AD_{ijm} = 1$. Caso contrário, $AD_{ijm} = 0$.
- AD'_{ij} : Indica se há arco ligando o CD i ao cliente j . Se houver arco viável, $AD'_{ij} = 1$. Caso contrário, $AD'_{ij} = 0$.

As variáveis utilizadas na formulação do problema matemático foram:

- q_{ij}^r : Quantidade em mil litros transportada da refinaria i para o centro de distribuição j pelo modal rodoviário.
- q_{ij}^f : Quantidade em mil litros transportada da refinaria i para o centro de distribuição j pelo modal ferroviário.
- q'_{jk} : Quantidade em mil litros transportada do centro de distribuição j para o cliente k .
- b_{ijm} : Variável binária que indica se o arco (i,j) entre a refinaria i e o CD j é percorrido pelo modal m .
- b'_{ij} : Variável binária que indica se o arco (i,j) entre o CD i e o cliente j é percorrido.

3.3 FUNÇÃO OBJETIVO

Com o objetivo de minimizar os custos de transporte geral, saindo das refinarias até a chegada ao cliente, a função objetivo foi definida da seguinte forma:

$$z = CT_r \sum_{i \in R} \sum_{j \in D} DT_{ijr} b_{ijr} + CT_f \sum_{i \in R} \sum_{j \in D} DT_{ijf} b_{ijf} + CT_r \sum_{i \in D} \sum_{j \in C} DT_{ijr} b'_{ij} \quad (1)$$

O primeiro termo da função objetivo se refere aos custos de transporte rodoviário entre refinarias e centros de distribuição, multiplicada por um coeficiente referente a distância percorrida pelo modal rodoviário. O segundo termo se refere aos custos de transporte ferroviário entre as refinarias e os centros de distribuição, multiplicada por um coeficiente referente a distância percorrida pelo modal ferroviário. O terceiro e último termo se refere ao custo de transporte entre centros de distribuição e os clientes e é proporcional à distância percorrida entre eles via modal rodoviário.

3.4 RESTRIÇÕES DO MODELO

O conjunto de restrições Equação (2) garante que a demanda dos clientes seja atendida

$$\sum_{j \in D} q'_{jk} = Q_K \quad \forall k \in C \quad (2)$$

O conjunto de restrição Equação (3) garante que a quantidade de derivados de petróleo recebida pelo centro distribuição seja totalmente despachada aos clientes.

$$\sum_{k \in C} q'_{jk} = \sum_{i \in R} q_{ij}^r + q_{ij}^f \quad \forall j \in D \quad (3)$$

Os conjuntos de restrições Equação (4) - Equação (6) garantem que a quantidade de produto que é transportada nos arcos está limitada à capacidade de atendimento do modal.

$$q_{ij}^r \leq T_r \quad \forall i \in R, j \in D \quad (4)$$

$$q_{ij}^f \leq T_f \quad \forall i \in R, j \in D \quad (5)$$

$$q'_{jk} \leq T_r \quad \forall j \in D, k \in C \quad (6)$$

A variável binária está sujeita aos valores da matriz de adjacência. Se não há arco viável entre os pontos i e j pelo modal m , então b_{ijm} será obrigatoriamente igual a zero.

$$b_{ijr} \leq AD_{ijr} \quad \forall i \in R, j \in D \quad (7)$$

$$b_{ijf} \leq AD_{ijf} \quad \forall i \in R, j \in D \quad (8)$$

$$b'_{ij} \leq AD'_{ij} \quad \forall j \in D, k \in C \quad (9)$$

Os conjuntos de restrições Equação (10) - Equação (12) garantem que a variável binária seja igual a 1 se houver transporte entre o arco (i, j) .

$$b_{ijr} \geq \frac{q_{ij}^r}{T_r} \quad \forall i \in R, j \in D \quad (10)$$

$$b_{ijf} \geq \frac{q_{ij}^f}{T_f} \quad \forall i \in R, j \in D \quad (11)$$

$$b'_{ij} \geq \frac{q'_{jk}}{T_r} \quad \forall j \in D, k \in C \quad (12)$$

Para exemplificar as restrições, considera-se somente a restrição Equação (12) e o mesmo raciocínio é válido para as restrições Equação (10) e Equação (11).

Há três casos possíveis para os valores que $D_j C_k$ pode assumir:

$$\begin{cases} q'_{jk} = 0 \\ q'_{jk} = T_r \\ q'_{jk} < T_r \end{cases}$$

No primeiro caso, a restrição Equação (12) será dada por $b'_{ij} \geq \frac{0}{T_r} = 0$. Além disso, b'_{ij} está na função objetivo e o problema é de minimização, então o valor de b'_{ij} será o menor possível, para que não haja acréscimo na função objetivo. Como a variável é binária, ou seja $0 \leq b'_{ij} \leq 1$, o valor de b'_{ij} mínimo é igual a zero.

Se $q'_{jk} = T_r$, então a restrição correspondente será $b'_{ij} \geq \frac{T_r}{T_r} = 1$. Dado que b'_{ij} é binária, seu valor será obrigatoriamente 1.

Finalmente, se $q'_{jk} < T_r$, então $0 < \frac{q'_{jk}}{T_r} < 1$. Portanto as restrições Equação (9) e Equação (12) irão forçar que $\frac{q'_{jk}}{T_r} \leq b'_{ij} \leq 1$, implicando que $0 < b'_{ij} \leq 1$ e $b'_{ij} = 1$. Portanto,

$$\begin{cases} q'_{jk} = 0 \\ 0 < q'_{jk} < T_r \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} b'_{ij} = 0 \\ b'_{ij} = 1 \end{cases}$$

Os conjuntos Equação (13) - Equação (17) são as restrições de domínio das variáveis.

$$q^r_{ij} \geq 0 \quad (13)$$

$$q^f_{ij} \geq 0 \quad (14)$$

$$q'_{jk} \geq 0 \quad (15)$$

$$b_{ijm} = \{0,1\} \quad (16)$$

$$b'_{ij} = \{0,1\} \quad (17)$$

4 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

O modelo matemático foi implementado em MatLab, em um computador Intel Core i5, memória RAM de 8 GB, sistema operacional de 64 bits e Windows 10. A metaheurística utilizada foi a *Variable Neighborhood Search* (VNS), juntamente com a heurística *Variable Neighborhood Descent* (VND) para realizar a busca local.

4.1 METAHEURÍSTICA VNS-VND

A metaheurística utilizada foi programada a partir uma integração entre VNS e VND. Na Figura 7 está o pseudocódigo do algoritmo.

Figura 7 – Pseudocódigo da metaheurística VNS-VND.

```

Procedimento VNS-VND
início
1.  $S \leftarrow$  solução inicial;
2.  $i \leftarrow 1$ ;
3. enquanto  $i \leq \alpha$  faça
4.    $k \leftarrow 1$ ;
5.   enquanto  $(k \leq \beta)$  faça
6.      $S' \leftarrow$  gera um vizinho qualquer de  $s$ ;
7.      $S'' \leftarrow$  VND( $S'$ );
8.     se  $f(S'') < f(S)$  então
9.        $S \leftarrow S''$ ;
10.     $k \leftarrow k + 1$ ;
11.   senão
12.      $k \leftarrow k + 1$ ;
13.   fim - se
14. fim - enquanto
15.  $i \leftarrow i + 1$ ;
16. fim - enquanto
17. retorna  $S$ ;
18. fim VNS-VND;

```

Fonte: Autoria própria.

A combinação de metaheurística para resolução de problemas combinatórios é comumente utilizado na literatura. (FREITAS; MONTANÉ, 2008) utilizaram as metaheurísticas VNS-VND e GRASP-VND na resolução do problema de roteamento de veículos com coleta e entrega simultâneas, onde a metaheurística VNS-VND se destacou positivamente em relação a metaheurística GRASP-VND. (SALEHIPOUR *et al.*, 2011) aplicaram as metaheurísticas GRASP-VND e VNS-VND para o problema do reparador viajante, onde o tempo de espera do

cliente é minimizado e não o tempo total de viagem do veículo. (AMOUS *et al.*, 2017) utilizou a metaheurística VNS combinada com a metaheurística VND para o problema de roteamento de veículos capacitados (CVRP) com o objetivo de minimizar a distância total percorrida.

4.2 SOLUÇÃO INICIAL

A metaheurística VNS é inicializada através da geração aleatória de uma solução inicial. A solução inicial é construída a partir das matrizes de adjacência, onde o arco $(i,j) = 1$ quando existir ligação entre o cliente i e o centro de distribuição j e $(i,j) = 0$ caso contrário. O mesmo acontece para matriz de adjacência que contém os arcos viáveis entre os centros de distribuição e as refinarias. As matrizes de adjacência são criadas a partir das matrizes que contém as distâncias entre os pontos. A primeira matriz contém as distâncias entre os clientes e os centros de distribuição e a segunda matriz contém as distâncias entre os centros de distribuição e as refinarias.

Na Tabela 1 são apresentadas as demandas de cada cliente, as quais serão utilizadas na construção da solução inicial.

Tabela 1 – Demanda dos clientes em mil litros de produto.

Cientes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Demanda	50	45	145	65	65	55	105	36	46	135	125	85	46	135	135

Fonte: Autoria própria.

A construção da solução inicial foi realizada de forma aleatória, respeitando as características iniciais do problema, como: existência de arcos entre os pontos, capacidade de transporte entre os arcos, demanda dos clientes e a capacidade de atendimento dos centros de distribuição foram respeitadas. Após a construção da solução inicial, o custo total de transporte da solução inicial é calculado.

Na Tabela 2 é apresentado um exemplo de solução inicial gerada pelo algoritmo, onde são apresentadas as quantidades transportadas entre os centros de distribuição, que se encontram nas colunas e os clientes, que se encontram nas linhas. Na Tabela 3 são apresentadas as quantidades transportadas entre as refinarias, que se encontram nas colunas e os centros de distribuição, que se encontram nas linhas. Cada arco é escolhido de forma aleatória para compor a solução inicial do problema. As quantidades transportadas possuem referências em mil litros. Na configuração apresentada nas Tabela 2 e Tabela 3, o valor de retorno da função objetivo é de R\$20.456,00.

Tabela 2 – Exemplo de solução inicial: Matriz contendo as quantidades transportadas entre os centros de distribuição e os clientes.

C/CD	CD1	CD2	CD3	CD4	CD5	CD6	CD7	CD8	CD9	CD10
C1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C2	-	45	-	-	-	-	-	-	-	-
C3	-	-	-	-	-	-	9	-	68	68
C4	65	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C5	-	-	-	-	-	-	-	65	-	-
C6	-	-	-	-	-	55	-	-	-	-
C7	-	-	-	-	-	68	37	-	-	-
C8	-	-	36	-	-	-	-	-	-	-
C9	-	-	46	-	-	-	-	-	-	-
C10	-	67	-	-	-	-	-	-	-	68
C11	-	-	-	57	68	-	-	-	-	-
C12	-	-	-	-	-	-	-	17	68	-
C13	-	-	-	-	-	-	-	-	46	-
C14	-	68	-	-	-	-	67	-	-	-
C15	-	-	68	-	67	-	-	-	-	-

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3 – Exemplo de solução inicial: Matriz contendo as quantidades transportadas entre as refinarias e os centros de distribuição.

CD/Ref	Ref1	Ref2	Ref3	Ref4	Ref5
CD1	75	40	-	-	-
CD2	-	45	-	-	-
CD3	37	113	-	-	-
CD4	-	-	57	-	-
CD5	75	60	-	-	-
CD6	-	-	-	75	48
CD7	-	-	-	75	38
CD8	-	-	82	-	-
CD9	-	107	75	-	-
CD10	113	23	-	-	-

Fonte: Autoria própria.

4.3 GERA NOVA SOLUÇÃO S'

O cálculo da função objetivo leva em consideração o modal utilizado no transporte do derivado de petróleo e a distância percorrida. Na Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6 são apresentadas as matrizes de distância que a metaheurística utiliza para a formação dos custos e para a tomada de decisão na escolha dos novos arcos de ligação. Os valores representados nas tabelas são referentes a distância em quilômetros.

Com base na solução inicial criada, uma nova solução s' é gerada através da escolha de uma linha da primeira matriz, a qual corresponde a matriz que contém as quantidades transportadas entre os clientes, que se encontram nas linhas e os centros de distribuição, que se encontram nas colunas. Após a escolha ser realizada, duas colunas são escolhidas para realizar a troca entre elas. A primeira posição a ser escolhida deve ser uma posição viável que já tenha

Tabela 4 – Matriz distância, em quilômetros, via modal rodoviário entre as refinarias e os centros de distribuição.

CD/Ref	Ref1	Ref2	Ref3	Ref4	Ref5
CD1	300	-	-	-	-
CD2	330	400	-	-	-
CD3	250	-	-	-	-
CD4	-	50	250	450	-
CD5	270	200	-	-	-
CD6	-	-	-	300	30
CD7	-	-	250	450	300
CD8	-	-	-	-	350
CD9	-	-	600	-	-
CD10	-	-	-	-	-

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5 – Matriz distância, em quilômetros, via modal ferroviário entre as refinarias e os centros de distribuição.

CD/Ref	Ref1	Ref2	Ref3	Ref4	Ref5
CD1	-	600	-	-	-
CD2	-	-	-	-	900
CD3	-	500	-	-	-
CD4	-	-	-	-	-
CD5	-	-	-	-	-
CD6	-	-	-	-	-
CD7	-	600	-	-	-
CD8	-	-	750	-	-
CD9	-	700	-	-	850
CD10	800	790	-	-	-

Fonte: Autoria própria.

seu lado escolhido anteriormente, ou seja, que possua uma quantidade sendo transportada pelo arco. A segunda posição escolhida para troca também deve ser uma posição viável, mas diferente da primeira, podendo conter ou não uma quantidade sendo transportada pelo respectivo arco. Na Tabela 7 é apresentado o resultado da primeira iteração do algoritmo.

Ao realizar a troca, as quantidades transportadas entre os centros de distribuição 9 e 10 foram alteradas.

Após a atualização da primeira matriz, a segunda matriz, referente as quantidades transportadas entre os centros de distribuição e as refinarias, é atualizada conforme apresentado na Tabela 8 e as demandas dos centros de distribuição são novamente calculadas de modo a redistribuir as quantidades transportadas de modo a otimizar a função objetivo. Com apenas uma alteração, onde o cliente 8 recebia sua demanda do centro de distribuição 3 e passou a receber do centro de distribuição 1, a matriz referente a distribuição entre os centros de distribuição e as refinarias sofreu várias alterações.

Logo que as alterações são finalizadas, um teste para verificar se houve melhora na

Tabela 6 – Matriz distância, em quilômetros, via modal rodoviário entre os centros de distribuição e os clientes.

C/CD	CD1	CD2	CD3	CD4	CD5	CD6	CD7	CD8	CD9	CD10
C1	350	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C2	50	70	-	-	-	-	-	-	-	-
C3	-	-	-	-	-	-	150	-	70	350
C4	150	145	-	-	-	-	-	-	200	190
C5	-	-	-	-	-	-	-	250	-	-
C6	-	-	-	-	-	350	-	-	-	-
C7	-	-	-	-	-	300	70	-	-	-
C8	300	-	295	-	-	-	-	-	-	-
C9	200	-	400	-	-	-	-	-	-	-
C10	-	300	-	-	-	-	-	-	-	250
C11	-	-	-	200	50	-	-	-	-	-
C12	-	-	-	-	-	-	-	100	200	-
C13	-	70	-	-	-	-	-	-	200	-
C14	-	150	-	300	-	-	200	-	-	-
C15	-	-	60	-	70	-	-	-	-	-

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7 – Exemplo de uma nova solução: Matriz contendo as quantidades transportadas entre os centros de distribuição e os clientes.

C/CD	CD1	CD2	CD3	CD4	CD5	CD6	CD7	CD8	CD9	CD10
C1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C2	-	45	-	-	-	-	-	-	-	-
C3	-	-	-	-	-	-	9	-	68	68
C4	65	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C5	-	-	-	-	-	-	-	65	-	-
C6	-	-	-	-	-	55	-	-	-	-
C7	-	-	-	-	-	68	37	-	-	-
C8	36	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C9	-	-	46	-	-	-	-	-	-	-
C10	-	67	-	-	-	-	-	-	-	68
C11	-	-	-	57	68	-	-	-	-	-
C12	-	-	-	-	-	-	-	17	68	-
C13	-	-	-	-	-	-	-	-	46	-
C14	-	68	-	-	-	-	67	-	-	-
C15	-	-	68	-	67	-	-	-	-	-

Fonte: Autoria própria.

função objetivo é executado e caso contrário, as alterações são desfeitas.

4.4 BUSCA LOCAL

Após as trocas terem sido realizadas, o processo de busca local é iniciado. A heurística VND é iniciada. O método consiste em definir uma quantidade de diferentes vizinhanças e obter o ótimo local em cada uma delas. Quando o método não encontra nenhuma nova melhoria, a próxima vizinhança passa a ser explorada e assim, sucessivamente, até que todos os passos sejam analisados.

Tabela 8 – Exemplo de uma nova solução: Matriz contendo as quantidades transportadas entre as refinarias e os centros de distribuição.

CD/Ref	Ref1	Ref2	Ref3	Ref4	Ref5
CD1	75	76	-	-	-
CD2	67	-	-	-	113
CD3	1	113	-	-	-
CD4	-	-	57	-	-
CD5	75	60	-	-	-
CD6	-	-	-	75	48
CD7	-	-	-	75	38
CD8	-	-	82	-	-
CD9	-	107	75	-	-
CD10	113	23	-	-	-

Fonte: Autoria própria.

A Figura 7 contém o pseudocódigo da heurística utilizada, onde em cada iteração, no processo de encontrar o melhor vizinho $s' \in s$, uma linha da primeira matriz é escolhida de forma aleatória para que seja realizado o processo de melhoria, tanto na primeira matriz, referente aos clientes e centros de distribuição, quanto na segunda matriz, que é referente aos centros de distribuição e as refinarias. Após finalizado o processo de melhoria, os custos de transporte são calculados novamente e caso haja uma melhora no custo de transporte da solução s' em relação a solução s , a solução s passa a conter os valores existentes em s' e o processo é mais uma vez reiniciado até que o critério de parada seja satisfeito. Caso contrário, a solução s' é descartada e o processo é mais uma vez reiniciado até que o critério de parada seja satisfeito.

Para a implementação dos algoritmos descritos nas Figura 3 e Figura 4, foram utilizados os seguintes valores para os contadores $k_{max} = 100$ representa o máximo de iterações que o VNS vai executar e $\gamma = 200$ representa o máximo de iterações que o VND vai executar.

Na Tabela 9 é apresentado um exemplo de solução final do algoritmo, onde são apresentadas as quantidades transportadas entre os centros de distribuição e os clientes e na Tabela 10 são apresentadas as quantidades transportadas entre as refinarias e os centros de distribuição.

Nesta etapa, os valores apresentados já estão posicionados de forma a garantir uma melhor solução em relação a solução inicial apresentada. Nas configurações apresentadas na Tabela 9 e Tabela 10, o valor de retorno da função objetivo é de R\$16.586,00.

Tabela 9 – Quantidades transportadas entre os centros de distribuição e os clientes.

C/CD	CD1	CD2	CD3	CD4	CD5	CD6	CD7	CD8	CD9	CD10
C1	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C2	45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C3	-	-	-	-	-	-	9	-	68	68
C4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	65
C5	-	-	-	-	-	-	-	65	-	-
C6	-	-	-	-	-	55	-	-	-	-
C7	-	-	-	-	-	68	37	-	-	-
C8	-	-	36	-	-	-	-	-	-	-
C9	46	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C10	-	68	-	-	-	-	-	-	-	67
C11	-	-	-	57	68	-	-	-	-	-
C12	-	-	-	-	-	-	-	45	40	-
C13	-	46	-	-	-	-	-	-	-	-
C14	-	68	-	-	-	-	67	-	-	-
C15	-	-	68	-	67	-	-	-	-	-

Fonte: Autoria própria.

Tabela 10 – Quantidades transportadas entre as refinarias e os centros de distribuição.

CD/Ref	Ref1	Ref2	Ref3	Ref4	Ref5
CD1	28	113	-	-	-
CD2	69	-	-	-	113
CD3	-	104	-	-	-
CD4	-	57	-	-	-
CD5	75	60	-	-	-
CD6	-	-	-	48	75
CD7	-	113	-	-	-
CD8	-	-	110	-	-
CD9	-	108	-	-	-
CD10	87	113	-	-	-

Fonte: Autoria própria.

5 RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Este capítulo apresenta alguns resultados obtidos nos experimentos realizados com diferentes instâncias do problema. Foram realizados testes com 3 diferentes instâncias de dados, todas elas utilizando dados fictícios, onde foram realizadas variações nas quantidades de refinarias, centros de distribuição e clientes. O objetivo dos testes é validar a qualidade da metaheurística implementada.

Um modelo matemático utilizado para validação da metaheurísticas VNS-VND, que foi implementada em MatLab com o objetivo de resolver o problema logístico de transporte de derivados de petróleo partindo das refinarias até a chegada aos clientes passando por centros de distribuição de modo a minimizar os custos de transporte dos modais ferroviário e rodoviário utilizados.

A instância resolvida é referente ao transporte logístico da produção realizada por 5 refinarias que abastecem 10 centros de distribuição, que por sua vez, realizam a entrega a 15 clientes. O transporte entre as refinarias e os centros de distribuição pode ser realizado pelos modais rodoviário e ferroviário com um custo de R\$2,00 o quilômetro rodado por rodovia e R\$0,90 o quilômetro rodado pela ferrovia. O transporte entre os centros de distribuição e os clientes é realizado somente através do modal rodoviário, com um custo de R\$2,00 o quilômetro rodado.

Os resultados encontrados pela metaheurística obedeceram todas as restrições do problema, respeitando as limitações de capacidade de transporte e a demanda dos clientes e foram idênticos aos apresentados pelo modelo matemático implementado no Excel e resolvido pelo solver Gurobi, via OpenSolver. O OpenSolver é um suplemento do Excel que pode ser baixado gratuitamente na internet e a versão do Gurobi utilizada foi a versão acadêmica. O Gurobi é um solver tão poderoso quanto o CPLEX, embora não disponha de um ambiente de programação. A vantagem do solver é a facilidade de se obter uma licença acadêmica, que acompanha todas as funcionalidades da licença comercial. No Apêndice A estão os passos necessários para a instalação do Gurobi na versão acadêmica e os passos para incorporar o OpenSolver ao Excel.

Como resultado final, o Gurobi obteve o valor de custo mínimo de R\$ 16.586,00. O teste realizado com a metaheurística proposta, foi realizado inicializando o algoritmo cem vezes e em cada inicialização foi gerada, de forma aleatória, uma nova solução inicial para o problema. Em todos os testes realizados, o algoritmo retornou o mesmo valor obtido pelo Gurobi com um

tempo de processamento de 0,7 segundo, em média, para cada uma das cem execuções enquanto o tempo computacional do solver foi de 0,4 segundos.

5.1 OUTRAS INSTÂNCIAS DE VALIDAÇÃO UTILIZADAS

Para uma segunda validação, outras 3 instâncias de dados foram utilizadas, os novos dados também foram montados de forma fictícias.

Para a primeira, das 3 instâncias utilizadas, foram utilizadas 5 refinarias, 12 centros de distribuição com a mesma configuração de refinarias, clientes e demandas dos clientes. A metaheurística precisou de 1,5 segundos para encontrar a solução de retorna da função objetivo no valor de R\$ 14.496,00, valor esse que se iguala à solução encontrada pelo modelo matemático. Nas Tabela 11, Tabela 12, Tabela 13 e Tabela 14 são apresentadas as distâncias entre as refinarias e seus respectivos centros de distribuição pelo modal rodoviário e ferroviário, as distâncias entre os centros de distribuição e os clientes e as demandas dos clientes respectivamente.

Tabela 11 – Matriz distância, em quilômetros, via modal rodoviário entre as refinarias e os centros de distribuição.

CD/Ref	Ref1	Ref2	Ref3	Ref4	Ref5
CD1	300	-	-	-	-
CD2	330	400	-	-	-
CD3	250	-	-	-	-
CD4	-	50	250	450	-
CD5	270	200	-	-	-
CD6	-	-	-	300	30
CD7	-	-	250	450	300
CD8	-	-	-	-	350
CD9	-	-	600	-	-
CD10	-	-	-	-	-
CD11	-	-	490	-	-
CD12	-	-	-	350	450

Fonte: Autoria própria.

A segunda base utilizada foi configurada com as mesmas 5 refinarias, mas com 8 centros de distribuição que realizam entregas para 19 clientes. A metaheurística precisou de 4 segundos para retornar o custo de R\$ 17.980,00 da função objetivo, valor esse que é igual ao retornado pelo modelo matemático. Nas Tabelas Tabela 15, Tabela 16, Tabela 17 e Tabela 18 são apresentadas as distâncias entre as refinarias e seus respectivos centros de distribuição pelo modal rodoviário e ferroviário, as distâncias entre os centros de distribuição e os clientes e as demandas dos clientes respectivamente.

A terceira e última base de validação utilizada teve as configurações alterada para

Tabela 12 – Matriz distância, em quilômetros, via modal ferroviário entre as refinarias e os centros de distribuição.

CD/Ref	Ref1	Ref2	Ref3	Ref4	Ref5
CD1	-	600	-	-	-
CD2	-	-	-	-	900
CD3	-	500	-	-	-
CD4	-	-	-	-	-
CD5	-	-	-	-	-
CD6	-	-	-	-	-
CD7	-	600	-	-	-
CD8	-	-	750	-	-
CD9	-	700	-	-	850
CD10	800	790	-	-	-
CD11	-	-	-	800	750
CD12	650	-	550	-	-

Fonte: Autoria própria.

Tabela 13 – Matriz distância, em quilômetros, via modal rodoviário entre os centros de distribuição e os clientes.

C/CD	CD1	CD2	CD3	CD4	CD5	CD6	CD7	CD8	CD9	CD10	CD11	CD12
C1	350	-	-	-	-	-	-	-	-	-	450	250
C2	50	70	-	-	-	300	-	-	-	-	-	100
C3	-	-	-	-	-	-	150	-	70	350	200	-
C4	150	145	-	-	-	-	-	-	200	190	-	-
C5	-	-	-	-	100	-	-	250	-	-	350	400
C6	-	-	-	-	-	350	-	-	-	-	250	125
C7	-	-	-	-	-	300	70	-	-	-	-	-
C8	300	-	295	-	-	-	400	-	-	-	-	-
C9	200	-	400	-	-	-	-	350	-	-	105	-
C10	-	300	-	-	-	-	-	-	-	250	-	-
C11	-	-	-	200	50	-	-	-	-	-	-	250
C12	-	-	-	-	150	-	-	100	200	-	-	-
C13	-	70	-	-	-	250	-	-	200	-	-	-
C14	-	150	-	300	-	-	200	-	-	-	190	-
C15	-	-	60	-	70	-	-	90	-	125	-	-

Fonte: Autoria própria.

Tabela 14 – Demanda dos clientes em mil litros de produto.

Clientes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Demanda	50	45	145	65	65	55	105	36	46	135	125	85	46	135	135

Fonte: Autoria própria.

7 refinarias, 13 centros de distribuição e 23 clientes e a metaheurística retornou o valor de R\$ 17.845,90 para a função objetivo, novamente igualando ao valor retornado pelo modelo matemático. Nas Tabelas Tabela 19, Tabela 20, Tabela 21 e Tabela 22 são apresentadas as distâncias entre as refinarias e seus respectivos centros de distribuição pelo modal rodoviário e ferroviário, as distâncias entre os centros de distribuição e os clientes e as demandas dos clientes respectivamente.

Tabela 15 – Matriz distância, em quilômetros, via modal rodoviário entre as refinarias e os centros de distribuição.

CD/Ref	Ref1	Ref2	Ref3	Ref4	Ref5
CD1	300	-	350	-	800
CD2	330	400	-	-	-
CD3	250	-	400	-	-
CD4	-	50	250	-	-
CD5	270	200	-	-	400
CD6	-	-	-	300	30
CD7	-	-	250	450	300
CD8	-	250	-	-	350

Fonte: Autoria própria.

Tabela 16 – Matriz distância, em quilômetros, via modal ferroviário entre as refinarias e os centros de distribuição.

CD/Ref	Ref1	Ref2	Ref3	Ref4	Ref5
CD1	-	600	-	550	-
CD2	-	-	850	950	900
CD3	-	500	-	750	630
CD4	280	-	-	550	650
CD5	-	-	500	500	-
CD6	450	750	-	-	-
CD7	500	600	-	-	-
CD8	450	-	750	-	-

Fonte: Autoria própria.

Tabela 17 – Matriz distância, em quilômetros, via modal rodoviário entre os centros de distribuição e os clientes.

C/CD	CD1	CD2	CD3	CD4	CD5	CD6	CD7	CD8
C1	350	-	-	-	-	-	-	-
C2	50	70	-	-	-	300	-	-
C3	-	275	260	-	-	-	150	-
C4	150	145	-	-	-	-	-	-
C5	-	-	-	-	100	-	-	250
C6	-	-	-	-	-	350	-	-
C7	-	-	-	-	-	300	70	-
C8	300	-	295	-	-	-	400	-
C9	200	-	400	-	-	-	-	350
C10	-	300	-	450	-	-	-	-
C11	-	-	-	200	50	-	-	-
C12	-	-	-	-	150	-	-	100
C13	-	70	-	-	-	250	-	-
C14	-	150	-	300	-	-	200	-
C15	-	-	60	-	70	-	-	90
C16	-	-	-	250	-	30	-	-
C17	135	-	451	-	79	-	-	-
C18	-	-	-	86	97	-	-	120
C19	-	200	153	-	-	-	98	-

Fonte: Autoria própria.

Tabela 18 – Demanda dos clientes em mil litros de produto.

Cientes	Demanda
1	50
2	45
3	145
4	65
5	65
6	55
7	105
8	36
9	46
10	135
11	125
12	85
13	46
14	135
15	135
16	86
17	45
18	119
19	127

Fonte: Autoria própria.

Tabela 19 – Matriz distância, em quilômetros, via modal rodoviário entre as refinarias e os centros de distribuição.

CD/Ref	Ref1	Ref2	Ref3	Ref4	Ref5	Ref6	Ref7
CD1	300	-	350	-	800	-	230
CD2	330	400	-	-	-	300	-
CD3	250	-	400	-	-	-	280
CD4	-	50	250	-	-	150	-
CD5	270	200	-	-	400	-	220
CD6	-	-	-	300	30	180	-
CD7	-	-	250	450	300	-	140
CD8	-	250	-	-	350	320	-
CD9	195	-	256	-	237	-	156
CD10	-	238	-	189	-	325	-
CD11	235	-	423	-	328	-	145
CD12	-	248	-	426	-	329	-
CD13	452	-	389	-	487	-	523

Fonte: Autoria própria.

Tabela 20 – Matriz distância, em quilômetros, via modal ferroviário entre as refinarias e os centros de distribuição.

CD/Ref	Ref1	Ref2	Ref3	Ref4	Ref5	Ref6	Ref7
CD1	-	600	-	550	-	650	-
CD2	-	-	850	950	900	-	890
CD3	-	500	-	750	630	640	-
CD4	280	-	-	550	650	-	420
CD5	-	-	500	500	-	590	-
CD6	450	750	-	-	-	-	640
CD7	500	600	-	-	-	800	-
CD8	450	-	750	-	-	-	530
CD9	-	652	-	458	-	752	-
CD10	480	-	390	-	475	-	689
CD11	-	800	-	700	-	900	-
CD12	293	-	745	-	625	-	432
CD13	-	560	-	670	-	780	-

Fonte: Autoria própria.

Tabela 21 – Matriz distância, em quilômetros, via modal rodoviário entre os centros de distribuição e os clientes.

C/CD	CD1	CD2	CD3	CD4	CD5	CD6	CD7	CD8	CD9	CD10	CD11	CD12	CD13
C1	350	-	-	-	-	-	-	-	210	-	235	278	-
C2	50	70	-	-	-	300	-	-	-	-	325	150	189
C3	-	275	260	-	-	-	150	-	210	-	-	312	-
C4	150	145	-	-	-	-	-	-	-	185	-	-	-
C5	-	-	-	-	100	-	-	250	250	-	320	-	-
C6	-	-	-	-	-	350	-	-	-	250	-	-	450
C7	-	-	-	-	-	300	70	-	592	755	712	584	199
C8	300	-	295	-	-	-	400	-	547	144	759	749	524
C9	200	-	400	-	-	-	-	350	444	591	567	423	290
C10	-	300	-	450	-	-	-	-	220	467	228	200	772
C11	-	-	-	200	50	-	-	-	158	188	508	641	482
C12	-	-	-	-	150	-	-	100	403	453	299	205	412
C13	-	70	-	-	-	250	-	-	603	652	312	515	188
C14	-	150	-	300	-	-	200	-	159	794	520	254	481
C15	-	-	60	-	70	-	-	90	134	364	214	353	712
C16	-	-	-	250	-	30	-	-	211	599	392	334	411
C17	135	-	451	-	79	-	-	-	540	783	371	558	717
C18	-	-	-	86	97	-	-	120	259	276	532	763	383
C19	-	200	153	-	-	-	98	-	577	424	198	381	374
C20	407	429	588	272	510	488	457	393	466	531	360	405	217
C21	460	385	761	544	437	322	680	336	554	275	714	173	726
C22	398	382	692	667	691	245	549	355	725	548	218	722	783
C23	464	261	713	410	307	522	339	234	167	479	618	354	148

Fonte: Autoria própria.

Tabela 22 – Demanda dos clientes em mil litros de produto.

Cientes	Demanda
1	150
2	90
3	145
4	65
5	80
6	55
7	105
8	76
9	46
10	135
11	125
12	85
13	60
14	135
15	135
16	86
17	45
18	119
19	127
20	100
21	80
22	75
23	60

Fonte: Aatoria própria.

6 CONCLUSÃO

A modelagem do sistema logístico de transporte de derivados de petróleo em múltiplos modais é um problema de otimização combinatória que envolve complexas restrições operacionais e por esse motivo acarreta um alto tempo de processamento computacional, causado pela grande quantidade combinatória existente no problema.

Neste trabalho de dissertação foi adotada, como base principal, a metaheurística para realização do planejamento logístico. Esse problema foi modelado levando em consideração o modelo matemático *Two-echelon Capacitated Vehicle Routing Problem (2E-CVRP)* proposto por (PERBOLI *et al.*, 2011). A metaheurística VNS-VND foi utilizada para resolver o problema de 2 níveis considerando a existência de uma frota heterogênea no primeiro nível, homogênea no segundo nível e a função objetivo deve minimizar os custos totais de transporte do primeiro e do segundo nível levando em consideração somente os custos referentes ao transporte.

A metaheurística implementada foi capaz de encontrar a melhor rota entre os dois níveis, rota essa que foi validada através de um modelo matemático implementado em Excel e resolvido pelo Open Solver Gurobi.

A grande dificuldade encontrada na modelagem foram as restrições e variáveis do modelo. Levando em conta todas as possibilidades de rotas, quantidades transportadas, meios de transporte utilizados e como definir qual refinaria atenderia qual centro de distribuição e por consequência, quais clientes seriam atendidos por esse centro de distribuição. A modelagem da metaheurística de modo a trabalhar com a otimização dos dois níveis foi um ponto de grande dificuldade encontrado. Onde no primeiro nível eram utilizados dois modais distintos com quantidades diferentes de capacidade de carga, que eram fracionados para veículos menores no segundo nível.

O objetivo do trabalho de implementar uma metaheurística capaz de otimizar a distribuição de derivados de petróleo em uma rede multimodal foi concluído. Onde uma rota otimizada foi encontrada para cada uma das 4 instâncias de dados utilizadas.

Os resultados apresentados podem auxiliar os gestores na tomada de decisão no momento da escolha do modal utilizado e na quantidade que cada um desses modais deve transportar, tanto no primeiro quanto no segundo nível.

Um ponto positivo para essa modelagem é a facilidade de adaptação desse modelo, utilizado no transporte de derivados de petróleo, para quaisquer outros tipos de transporte de

carga que utilizam dois níveis.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A captação e utilização de dados reais de transporte de derivados de petróleo em dois níveis para a metodologia apresentada.

Adaptação do modelo proposta para o planejamento logístico de coleta de produtos perecíveis, como verduras de pequenos agricultores para entrega nos postos de venda.

Planejamento logístico de distribuição de vacinas pelo Sistema único de Saúde (SUS).

REFERÊNCIAS

AFFI, Mannoubia; DERBEL, Houda; JARBOUI, Bassem. Variable neighborhood search algorithm for the green vehicle routing problem. **International Journal of Industrial Engineering Computations**, v. 9, n. 2, p. 195–204, 2018.

AIZEMBERG, Luiz. **Otimização das Movimentações de Lotes de Petróleo e de Biocombustíveis pela Rede Logística Brasileira de Petróleo: Conceitos, Modelagem e Aplicação**. 2014. 126 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal Fluminense, 2014.

ALVARENGA, Fabiano Vieira de; ROCHA, Marcelo Lisboa. Uma meta-heurística grasp para o problema da árvore geradora de custo mínimo com grupamentos utilizando grafos fuzzy. **INFOCOMP Journal of Computer Science**, v. 5, n. 1, p. 66–75, 2006.

AMOUS, Marwa; TOUMI, Said; JARBOUI, Bassem; EDDALY, Mansour. A variable neighborhood search algorithm for the capacitated vehicle routing problem. **Electronic Notes in Discrete Mathematics**, Elsevier, v. 58, p. 231–238, 2017.

BALDACCI, Roberto; MINGOZZI, Aristide; ROBERTI, Roberto; CALVO, Roberto Wolfler. An exact algorithm for the two-echelon capacitated vehicle routing problem. **Operations research, INFORMS**, v. 61, n. 2, p. 298–314, 2013.

BANASZEWSKI, Roni Fabio. Modelo multiagentes baseado em um protocolo de leilões simultâneos para aplicação no problema de planejamento de transferências de produtos no segmento downstream do sistema logístico brasileiro de petróleo. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014.

BELGIN, Onder; KARAOGLAN, Ismail; ALTIPARMAK, Fulya. Two-echelon vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery: Mathematical model and heuristic approach. **Computers & Industrial Engineering**, Elsevier, v. 115, p. 1–16, 2018.

BODIN, Lawrence D. A taxonomic structure for vehicle routing and scheduling problems. **Computers & Urban Society**, Elsevier, v. 1, n. 1, p. 11–29, 1975.

BUTINHOLI, Matheus de Araujo; MATINS, Alexandre Xavier; OLIVEIRA, Paganini Barcellos de; MARTINO, Diego Perdigão. Algoritmo de descida em vizinhança variável aplicado ao problema de cobertura máxima de p-eixos não capacitados com alocação simples. **LI Simpósio de Pesquisa Operacional**, 2019.

CRAINIC, Teodor Gabriel; PERBOLI, Guido; MANCINI, Simona; TADEI, Roberto. Two-echelon vehicle routing problem: a satellite location analysis. **Procedia-Social and Behavioral Sciences**, Elsevier, v. 2, n. 3, p. 5944–5955, 2010.

DANTZIG, George B; RAMSER, John H. The truck dispatching problem. **Management science**, Informs, v. 6, n. 1, p. 80–91, 1959.

DESROCHERS, Martin; LENSTRA, Jan Karel; SAVELSBERGH, Martin WP. A classification scheme for vehicle routing and scheduling problems. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 46, n. 3, p. 322–332, 1990.

EKSIOGLU, Burak; VURAL, Arif Volkan; REISMAN, Arnold. The vehicle routing problem: A taxonomic review. **Computers & Industrial Engineering**, Elsevier, v. 57, n. 4, p. 1472–1483, 2009.

FREITAS, Lia Mara Borges de; MONTANÉ, Fermín Alfredo Tang. Metaheurísticas vns-vnd e grasp-vnd para problemas de roteamento de veículos com coleta e entrega simultânea. **XI Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha**, 2008.

GONZALEZ-FELIU, Jesus; PERBOLI, Guido; TADEI, Roberto; VIGO, Daniele. The two-echelon capacitated vehicle routing problem. Working paper or preprint. 2008. Disponível em: <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00879447>.

LIMA, Júnior Rhis; CARVALHO, Marco Antonio Moreira de de. Métodos de descida rápida e descida em vizinhança variável aplicados à resolução do problema de minimização de pilhas abertas. **XLVIII Simpósio de Pesquisa Operacional**, 2016.

MENDES, Nilson Felipe; IORI, Manuel. A mathematical model and a metaheuristic for a job and maintenance machine scheduling problem with sequence dependent deterioration. **LI Simpósio de Pesquisa Operacional**, 2019.

MENDONCA, Nathalia de Paiva. **Aplicação do Método Simulated Annealing em um Problema de Sequenciamento de Atividades Silviculturais**. 2016. 76 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Lavras, 2016.

MLADENOVIC, Nenad; HANSEN, Pierre. Variable neighborhood search. **Computers & operations research**, Elsevier, v. 24, n. 11, p. 1097–1100, 1997.

MONTOYA-TORRES, Jairo R; FRANCO, Julián López; ISAZA, Santiago Nieto; JIMÉNEZ, Heriberto Felizzola; HERAZO-PADILLA, Nilson. A literature review on the vehicle routing problem with multiple depots. **Computers & Industrial Engineering**, Elsevier, v. 79, p. 115–129, 2015.

PAULA, Mateus Rocha de; RAVETTI, Martin Gómez; PARDALOS, Panos M. Abordagem variable neighborhood search para o problema de sequenciamento com máquinas paralelas e tempos de preparação dependentes da sequência.

PERBOLI, Guido; TADEI, Roberto; VIGO, Daniele. The two-echelon capacitated vehicle routing problem: Models and math-based heuristics. **Transportation Science**, INFORMS, v. 45, n. 3, p. 364–380, 2011.

RELVAS, Susana; MATOS, Henrique A; BARBOSA-PÓVOA, Ana Paula FD; FIALHO, Joao; PINHEIRO, António S. Pipeline scheduling and inventory management of a multiproduct distribution oil system. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, ACS Publications, v. 45, n. 23, p. 7841–7855, 2006.

SALEHIPOUR, Amir; SÖRENSEN, Kenneth; GOOS, Peter; BRÄYSY, Olli. Efficient grasp+ vnd and grasp+ vns metaheuristics for the traveling repairman problem. **4or**, Springer, v. 9, n. 2, p. 189–209, 2011.

SCHENEKEMBERG, Cleder M; SCARPIN, Cassius T; JR, José E Pécora; GUIMARÃES, Thiago A; COELHO, Leandro C. The two-echelon production-routing problem. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, 2020.

SCHNIRMANN, Guilherme *et al.* **Otimização do planejamento do transporte de derivados claros de petróleo em uma malha dutoviária**. 2017. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

SOUZA, Marcone Jamilson Freitas; MARTINS, Alexandre Xavier; ARAÚJO, CR; COSTA, Francisco Wagner Azevedo. Métodos de pesquisa em vizinhança variável aplicados ao problema de alocação de salas. **XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção ENEGEP, Fortaleza, Brasil**, 2002.

STEWART, James. **Cálculo**: Volume 2. São Paulo, BR: Cengage Learning, 2009. 1077 p.

VIEIRA, Kely Plucinski. **Estratégias de participação em leilões combinatoriais aplicadas em um problema de transporte de derivados de petróleo**. 2012. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012.

WANG, Kangzhou; SHAO, Yeming; ZHOU, Weihua. Matheuristic for a two-echelon capacitated vehicle routing problem with environmental considerations in city logistics service. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, Elsevier, v. 57, p. 262–276, 2017.

YAMAMOTO, Lia. **Um Modelo Baseado em Metaheurística para o Sequenciamento de Bateladas em Redes Dutoviárias**. 2009. 128 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2009.

ZIROUR, MOURAD. Vehicle routing problem: models and solutions. **Journal of Quality Measurement and Analysis JQMA**, v. 4, n. 1, p. 205–218, 2008.

APÊNDICES

APÊNDICE A – UTILIZAÇÃO DO SOLVER GUROBI EM UMA PLANILHA EXCEL

Para fazer o download do Gurobi é necessário estar conectado na rede da instituição, pois ele permite a licença acadêmica somente se o vínculo for com alguma universidade.

Passo 1: Faça o cadastro neste link, escolhendo o tipo de conta como "Academic"

http://www.gurobi.com/registration/general-reg-form?utm_exp=11945996-32.

QTGUWgDTRw2vsRW5839Z5w.1&utm_referrer=http%3A%2F%2Fwww.gurobi.com%2F

Passo 2: Faça login com o email e a senha cadastrados em <http://www.gurobi.com/login>.

Passo 3: Faça o download do Gurobi. Escolha a versão compatível com sua máquina e seu sistema operacional. Após o atalho ser disponibilizado na área de trabalho, acesse o Gurobi acesse o programa. Ao acessar o programa pela primeira vez, o prompt de comando irá pedir o número da licença. Para conseguir esse número vá ao passo 4.

Passo 4: Na sua conta recém criada, Clique em: *Download* → *Licenses* → *University Licenses*. Depois clique em "*Request License*" (esse botão está na parte de baixo da tela). Feito isso, um código de licença será exibido. Copie esse código e cole no prompt de comando que está aberto no **passo 3**. **Lembre-se que esse procedimento precisa ser feito na rede da instituição**. Siga as instruções do prompt de comando.

Após esses passos, o Gurobi estará pronto para utilização.

A.1 OPENSOLVER

O OpenSolver é uma iniciativa da *University of Auckland* (NZ) e consiste em um otimizador desenvolvido para o Excel. Além disso, ele pode ser utilizado como um Guia para outros Solvers (O Gurobi é um deles), e todo o processo de modelagem e *input* de informações pode ser automatizado pelo VBA.

Para fazer o download e incorporar o OpenSolver no Excel, siga os passos a seguir:

Passo 1: Faça o Download do OpenSolver no link: <http://opensolver.org/installing-opensolver/>.

O link para download estará destacado em : [Download the OpenSolver Linear zip file](#).

Passo 2: Descomprima o arquivo e salve em um lugar de fácil acesso.

Passo 3: Abra o Excel, Clique em: *Arquivo* → *Opções* → *Suplementos* → *Ir* (é um botão na parte de baixo da tela, ao lado de um *selectbox* escrito "Suplementos do Excel")

Passo 4: Ao abrir a caixa de opções, clique em procurar e selecione (no lugar onde foi descom-

primida a pasta com os arquivos do OpenSolver) o arquivo OpenSolver.xlam.

Pronto, o OpenSolver estará disponível na aba Dados do Excel. O OpenSolver funciona de forma idêntica ao Solver do Excel.

APÊNDICE B – CÓDIGO BASE DA METAHEURÍSTICA VNS-VND MATLAB

```

clear all; close all; clc;
cont_total_loop = 0;
loop_menor = 9999;
loop_maior = 0;
% tic
cont_menor = 0;
% for loop=1:5
menorr = 9999999;
%As matrizes de distancia foram chamadas de planilhas em Excel.
%3 – Na linha 6 encontram-se as quantidades totais disponiveis
em cada CD.
matriz_cd_ref_original = xlsread('C:\Users\Acer\Desktop\
Metaheuristica_GLS_Artigo\TabelaDistanciaTransporteArtigo.
xlsx',3);

%4 – Na linha 16 tem a qtd total que o cd recebe das refinarias
matriz_cd_c_original = xlsread('C:\Users\Acer\Desktop\
Metaheuristica_GLS_Artigo\TabelaDistanciaTransporteArtigo.
xlsx',4);

%5 – Corresponde ao custo cd refinaria.
dist_cd_ref = xlsread('C:\Users\Acer\Desktop\Metaheuristica
GLS_Artigo\TabelaDistanciaTransporteArtigo.xlsx',5);

%6 – Corresponde a demanda dos clientes.
demanda_c_cd_original = xlsread('C:\Users\Acer\Desktop\
Metaheuristica_GLS_Artigo\TabelaDistanciaTransporteArtigo.
xlsx',6);

%7 – Corresponde ao custo de transporte por km rodado.

```

```

custo_transp = xlsread('C:\Users\Acer\Desktop\Metaheuristica
GLS_Artigo\TabelaDistanciaTransporteArtigo.xlsx',7);
tic
%%
for loopp=1:10
    menor = 9999999;
    Custo_Transporte_vizinho_qq = 99999999999;
    Custo_Transporte_vizinho_qqq = 999999999999;
    Custo_Transporte = 999999999;
    cont_loop_igual = 0;
    cont_loop_diferente = 0;
    menor_qq = 9999999;
    maior = 0;
    maior_qq = 0;
    %%
    cap_arco_cd_c = 68;
    %%
    %Inicio
    %Aqui gera a solucao inicial do problema
    %
    [demanda_CD ,demanda_ref ,Custo_Transporte ,matriz_cd_c ,
demanda_total_clientes] = gera_solucao_inicial(matriz_cd_
ref_original ,matriz_cd_c_original ,dist_cd_ref ,demanda_c_cd_
original ,cap_arco_cd_c ,custo_transp);

    demanda_CD
    demanda_ref

    Custo_Transporte

    %end
    %%

```

```

[cap_cd , total_cd_c ] = size (matriz_cd_c_original);

%O while gera , de forma aleatoria , um vizinho qq atraves
da solucao inicial e troca a posicao de dois arcos
aleatorios .

%Melhorar esse if para quando atualizar o S1_ref e para
%quando tiver ficticio .
new_matriz_cd_c = matriz_cd_c ;
new_demanda_CD = demanda_CD ;
new_demanda_ref = demanda_ref ;
[lin_cd , col_cd ] = size (new_demanda_CD );
[lin_ref , col_ref ] = size (new_demanda_ref );
loop = 1;
% Esse while faz parte do laco do VNS
while loop <= 100 %100
    cont_loop_VND = 1;
    while cont_loop_VND <= 50
        %Contem a distancia de cada cliente para cada CD e e
        %usado somente para marcar zero na posicao escolhida .
        new_matriz_cd = new_matriz_cd_c ;
aleat_cliente = randi (cap_cd - 1);
i = 1;
%While troca as posicoes .
while i <= (cap_cd - 1)
    if i == aleat_cliente
        if matriz_cd_c_original (i , total_cd_c ) > 1
            %Escolhe a posicao que ira ser trocada
            %de forma aleatoria .
            [ce , je ] = escolhe_posicao_troca (i , new

```

```

        _demanda_CD , cap_arco_cd_c , new_matriz_
        cd , total_cd_c , matriz_cd_c_original );
        %Realiza a troca das posicoes na
        matriz CD Cliente .
        [new_matriz_cd_c , new_demanda_CD , troca_
        ce , troca_je , negativo] = troca_posicao
        _CD(i , cap_cd , new_matriz_cd_c , new
        _demanda_CD , ce , je , demanda_total
        _clientes );
        %Atualiza as novas demandas das
        %refinarias .
        [new_demanda_ref] = atualiza_ref(new
        _demanda_CD , lin_cd , ce , je , new_demanda_
        ref , matriz_cd_ref_original );

        break
    else
        aleat_cliente = randi(cap_cd - 1);
        i = 0;
    end
end
i = i + 1;
end

[Custo_Transporte_vizinho_qq , custo_rodos , custo_
ferro] = custo_do_transporte ( lin_cd , col_cd ,
lin_ref , col_ref , custo_transp , new_demanda_CD ,
new_demanda_ref , matriz_cd_ref_original , dist
_cd_ref , new_matriz_cd_c );

%Ate aqui foi gerada a solucao inicial e foi

```

%gerado um vizinho qualquer.

```

%----- VND -----
%Loop para encontrar o melhor vizinho com o VND
%-----

new_matriz_cd_c_VND = new_matriz_cd_c;
new_demanda_CD_VND = new_demanda_CD;
new_demanda_ref_VND = new_demanda_ref;
qtd_for_VND = 0;
for loop_VND = 1 : 50
    aleat_cliente = randi(lin_cd);
    %Realiza testes para encontrar melhor vizinho.
    [new_matriz_cd_c_VND ,new_demanda_CD_VND ,new
    _demanda_ref_VND] =melhora_cd_VND(cap_cd ,lin_cd ,
    col_cd , aleat_cliente , new_matriz_cd_c_VND ,new
    _demanda_CD_VND ,cap_arco_cd_c , new_demanda_ref
    _VND, matriz_cd_ref_original);

    %Atualiza a matriz Ref. CD.

    [new_demanda_ref_VND] = melhora_ref_VND(new
    _demanda_ref_VND , matriz_cd_ref_original ,
    custo_rodo , custo_ferro , dist_cd_ref);
    %Faz o caculo que minimiza os custos entre
    as refinarias e os CDs.
    [Custo_Transporte_vizinho_qqq , new_matriz_cd_c
    _VND, new_demanda_CD_VND , new_demanda_ref_VND]
    = min_ref_CD(cap_cd , lin_cd , col_cd , lin_ref , col
    _ref , new_matriz_cd_c_VND , new_demanda_CD_VND ,
    cap_arco_cd_c , new_demanda_ref_VND , matriz_cd
    _ref_original , Custo_Transporte_vizinho_qq ,

```

```
custo_transp , dist_cd_ref , custo_rodos , custo
_ferro , demanda_total_clientes );

%Calcula os custos de transposte.

[ Custo_Transporte_vizinho_qqq , custo_rodos ,
custo_ferro ] = custo_do_transporte( lin_cd ,
col_cd , lin_ref , col_ref , custo_transp , new
_demanda_CD_VND , new_demanda_ref_VND , matriz
_cd_ref_original , dist_cd_ref , new_matriz_cd
_c_VND );

if Custo_Transporte_vizinho_qqq < Custo
_Transporte
    new_matriz_cd_c = new_matriz_cd_c_VND ;
    new_demanda_CD = new_demanda_CD_VND ;
    new_demanda_ref = new_demanda_ref_VND ;

    matriz_cd_c = new_matriz_cd_c ;
    demanda_CD = new_demanda_CD ;
    demanda_ref = new_demanda_ref ;
    Custo_Transporte = Custo_Transporte
_vizinho_qqq ;
    qtd_for_VND = 1 ;

else
    new_matriz_cd_c = matriz_cd_c ;
    new_demanda_CD = demanda_CD ;
    new_demanda_ref = demanda_ref ;
    qtd_for_VND = qtd_for_VND + 1 ;

end
```

```

        if qtd_for_VND >= 10
            break
        end
    end
    cont_total_loop = cont_total_loop + 1;
    cont_loop_VND = cont_loop_VND + 1;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Aqui finaliza o VND.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    loop = loop + 1;
    if menor > Custo_Transporte
        menor = Custo_Transporte;
        if menorr > menor
            menorr = menor;
        end
    end
end
loopp;
toc
menor
%    demanda_CD
%    demanda_ref
end
toc
menorr
demanda_CD
demanda_ref

```