



ConBRepro

XI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



01 a 03
de dezembro 2021

Definição de rotas alternativas para entrega de produtos de uma indústria alimentícia em Fortaleza-CE

Gabriel Costa Oliveira de Brito

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – *campus* Quixadá

Rodrigo Silvestre Queiroz

Universidade Federal do Ceará

Carlos Vinicius Sousa Oliveira

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – *campus* Quixadá

Maria Arilene Nóbrega da Costa

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – *campus* Quixadá

Caio Augusto Nunes Marques

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – *campus* Quixadá

Resumo: As empresas encontram-se em um cenário de mercado muito competitivo, potencializado pelos impactos sofridos por conta da pandemia de Covid-19. Para sobreviverem, as organizações buscam diferenciar-se dos seus concorrentes e, para isso, precisam buscar eficiência em seus processos. Este trabalho analisou o processo de distribuição dos produtos de uma empresa familiar do setor de alimentos situada em Fortaleza-CE. O objetivo deste trabalho foi encontrar melhores rotas de distribuição dos produtos da empresa. Com isso, buscou-se reduzir a distância percorrida da rota de distribuição atualmente utilizada pela empresa, reduzindo também, os custos logísticos. O caso foi modelado como um Problema de Caixeiro Viajante assimétrico que foi resolvido de forma exata por meio de modelagem no software IBM ILOG CPLEX 12.10 e utilizando as heurísticas do vizinho mais próximo e do subcircuito inverso, implementadas em linguagem Python, versão 3.8.3. Com os resultados obtidos, foi feita uma análise comparativa entre a rota atualmente utilizada e as rotas obtidas, identificando-se o potencial de se reduzir 728 km no percurso e economizar R\$ 479,67 no período de um ano.

Palavras-chave: Caixeiro Viajante. Programação Linear Inteira. Heurísticas.

Definition of alternative routes to deliver products from a food industry in Fortaleza-CE

Abstract: Companies find themselves in a very competitive market scenario, boosted by the impacts suffered as a result of the Covid-19 pandemic. To survive, organizations seek to differentiate themselves from their competitors and, for that, they need to seek efficiency in their processes. This work analyzed the product distribution process of a family business in the food sector located in Fortaleza-CE. The objective of this work was to find better distribution routes for the company's products. With this, we sought to reduce the distance traveled on the distribution route currently used by the company, also reducing logistical costs. The case was modeled as an asymmetrical Traveling Salesman Problem that was solved exactly through modeling in IBM ILOG CPLEX 12.10 software and using the nearest neighbor and inverse subcircuit heuristics, implemented in Python language, version 3.8.3. With the results obtained, a comparative analysis was made between the route

currently used and the routes obtained, identifying the potential of reducing 728 km in the route and saving R\$ 479.67 in a period of one year.

Keywords: Traveling Salesman. Integer Linear Programming. Heuristics.

1. Introdução

Atualmente, a competitividade entre as micro e pequenas empresas (MPE's) vem crescendo e, com isso, é necessário que as organizações busquem continuamente aprimorar a eficiência em todas as suas funções, sempre buscando a melhoria contínua dentro de suas operações.

Aliado à essa necessidade, no novo contexto de pandemia ocasionado pelo vírus da Covid – 19 (Sars-CoV-2), segundo pesquisas do Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE, 2020), cerca de 31% das empresas (aproximadamente 5,3 milhões de pequenas empresas no Brasil) tiveram que adaptar seus negócios para manter sua saúde financeira. Além disso, outras 58,9% interromperam seu funcionamento temporariamente, 3,5% fecharam definitivamente, e apenas 6,6% não mudaram sua forma de operar seus negócios (SEBRAE, 2020).

O motivo deve-se à diminuição do faturamento mensal dessas empresas ocasionado pelas restrições necessárias ao combate à Covid – 19, o que trouxe impactos significativos na sua gestão de custos – principalmente nos custos relacionadas às matérias primas e insumos, com um percentual de até 67,2 % dos custos totais (SEBRAE, 2020).

Dentro deste cenário, merece especial destaque a indústria de alimentos. De acordo com a Associação Brasileira da Indústria de Alimentos (ABIA, 2019), esse setor é um dos maiores do país, representando em 2019, um faturamento de 9,6% do PIB do Brasil, contribuindo com 67% do saldo geral da balança comercial brasileira. No que diz respeito às MPE's enquadradas neste setor, há ainda aquelas que operam como empresas familiares, ou seja, com parentes dentro do quadro de funcionários ou sócios. Considerando a proporção dessas empresas no meio dos pequenos negócios formais no Brasil, pesquisas do Sebrae (2015), apontam que 57% das MPE's do país se enquadram como “empresa familiar”, sendo esse número na região Nordeste igual a 52%.

Neste contexto, e considerando ainda o processo decisório sobre como alocar eficaz e eficientemente os recursos de uma organização em um cenário de busca por eficiência das MPE's e de redução de custos, o uso das ferramentas da Pesquisa Operacional (PO) oferece uma visão mais sofisticada para os processos, servindo assim como aliada na tomada de decisão (TAHA, 2008). A Pesquisa Operacional é utilizada em problemas que exigem uma condução, coordenação e tomada de decisões em relação às operações de uma organização (HILLIER; LIEBERMAN, 2013). Portanto, a PO pode ser abordada em diversos segmentos, como na produção, logística, gestão financeira e planejamento e controle da produção, o que denota a sua multidisciplinaridade (ARENALES *et al.*, 2015).

Diante disso, o objetivo deste trabalho é encontrar melhores rotas de distribuição dos produtos de uma empresa familiar do ramo alimentício, localizada na cidade de Fortaleza – CE. Para esses fins, foram utilizadas técnicas de modelagem matemática – com soluções baseadas em métodos exatos e heurísticos – visando a minimização da distância total percorrida, contribuindo, dessa forma, para a sua sobrevivência no atual cenário competitivo.

2. Referencial Teórico

2.1. Pesquisa Operacional e Modelagem Matemática

A Pesquisa Operacional é uma disciplina que congrega as principais técnicas de modelagem matemática para representação de problemas reais, em apoio ao processo decisório (ARENALES *et al.*, 2015; GOLDBARG; LUNA, 2005).

Para Hillier e Lieberman (2013) e Moreira (2010), a Pesquisa Operacional, utilizada em conjunto com as técnicas de modelagem matemática, vem contribuir com o processo de tomada de decisão das organizações, oferecendo diretrizes para chegar à melhor decisão ou melhor solução para o problema enfrentado (BARBOSA; DECKMANN, 2015).

Arenales *et al.* (2015) e Taha (2008) definem como modelagem matemática o processo de captação simplificada da realidade através de funções e expressões matemáticas (GOLDBARG; LUNA, 2005). A principal vantagem dos modelos matemáticos é que eles proporcionam uma descrição do problema de forma muito mais sucinta, o que não seria possível através de uma simples descrição verbal (COLIN, 2019; HILLIER; LIEBERMAN, 2013).

Durante a modelagem de um problema, variáveis (incógnitas) e suas respectivas relações causais são definidas, seguindo-se pela aplicação de ferramentas computacionais e técnicas matemáticas para aferição dos resultados e conclusões acerca da representatividade do modelo (ARENALES *et al.*, 2015).

É a complexidade e o tipo do modelo matemático construído que determinarão a técnica de solução adotada, podendo variar desde uma simples enumeração das alternativas de decisão até o uso do cálculo diferencial (TAHA, 2008). É preferível o uso de algoritmos de otimização, que fornecem regras de cálculo fixas aplicadas repetidas vezes ao problema – em um processo iterativo ou, ainda, o uso de heurísticas (TAHA, 2008).

Alguns exemplos são os modelos de programação matemática (otimização matemática), utilizados no âmbito da Pesquisa Operacional (PO) que constituem uma das mais importantes variedades dos modelos quantitativos (GOLDBARG; LUNA, 2005). Outros exemplos são os modelos de teoria de filas, utilizados para estudar sistemas sujeitos à congestão (ARENALES *et al.*, 2015).

Os modelos de Programação Matemática contemplam os modelos de Programação Linear (PL), Programação Linear Inteira (PLI), Programação não Linear (PNL), etc. (TAHA, 2008). Neste trabalho, será dada ênfase aos modelos de Programação Linear Inteira.

2.2. Programação Linear e Programação Linear Inteira

Entre os modelos de programação matemática mais utilizados pela Pesquisa Operacional, a Programação Linear (PL) é considerada a de maior destaque, e isso ocorre pelo fato de ser amplamente usada devido à sua simplicidade na formulação de modelos matemáticos, resolução de problemas e apoio à tomada de decisão (GAMEIRO, ROCCO e CAIXETA FILHO, 2011).

A Programação Linear (PL) é uma aplicação matemática utilizada por profissionais para o melhor aproveitamento possível da produção e insumos, evitando desperdícios de produtos, matérias-primas ou mão de obra (BARBOSA; DECKMANN, 2015).

Para Colin (2019), os modelos de Programação Linear contemplam um conjunto de variáveis controláveis pelo tomador de decisão (variáveis de decisão), um conjunto de variáveis não controláveis (parâmetros) assumidas como constantes ao longo do processo de solução, um conjunto de restrições, que estabelecem regras a serem atendidas, e uma função objetivo a ser otimizada (maximizada ou minimizada). Na Programação Linear, todas as funções do modelo matemático devem possuir comportamento linear (HILLIER; LIEBERMAN, 2013).

Uma solução de um modelo de Programação Linear é dita viável se todas as restrições do problema foram respeitadas, e dita ótima se, além de viável, essa maximizar ou minimizar determinado critério objetivo (expresso pela função objetivo) (TAHA, 2008)

As diversas denominações dos modelos de PL dependem do domínio assumido pelas suas variáveis de decisão (BELFIORE; FÁVERO, 2013, TAHA, 2008). Os modelos de PLI surgem quando suas variáveis assumem apenas valores inteiros, ou seja, quando pertencem a um domínio discreto (HILLIER; LIEBERMAN, 2013).

Já em outras situações, de acordo com Arenales *et al.*, (2015), um número considerável de problemas discretos abrange a existência ou não de um determinado evento, e a escolha entre duas opções, 0 (zero) ou 1 (um), é modelado por variáveis binárias. Quando todas as variáveis de um modelo são binárias, o modelo diz-se de Programação (Linear) Inteira Binária (PIB) (BELFIORE; FÁVERO, 2013).

2.3. Problema do Caixeiro Viajante

O Problema do Caixeiro Viajante (PCV) é uma classe de problemas de PIB que consiste em encontrar o menor circuito (ou ciclo) fechado que passe por n cidades, de tal forma que cada cidade seja visitada apenas uma vez, e que, ao final, se volte para cidade inicial (cidade origem) (ARENALES *et al.*, 2015; TAHA, 2008).

Nesse problema, a distância entre dois pares de cidades (i, j) é igual à c_{ij} , e quando $c_{ij} = c_{ji}$, diz-se que o problema é simétrico, e quando $c_{ij} \neq c_{ji}$, assimétrico (ARENALES *et al.*, 2015). No PCV, cada circuito viável é chamado de ciclo hamiltoniano, consistindo o problema em achar o ciclo hamiltoniano de distância, ou custo, mínimo (ARENALES *et al.*, 2015). Aplicações do PCV envolvem áreas como logística, manufatura de circuitos, programação da produção, sequenciamento de DNA e outros (ARENALES *et al.*, 2015).

Para a formulação exata do problema, um modelo genérico do PCV assimétrico proposto por Arenales *et al.*, (2015) pode ser visualizado a seguir:

a) variáveis de decisão:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o arco } (i, j) \text{ é selecionado, } \forall i, j = 1, 2 \dots n \mid i \neq j. \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (1)$$

b) Função Objetivo

$$\min z = \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n c_{ij} x_{ij} \quad (2)$$

c) Restrições

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad j \neq i \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad i \neq j \quad (4)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1, \quad S \subset N, 2 \leq |S| \leq N \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor \quad (5)$$

$$\sum_{i \in S, j \notin S} x_{ij} \geq 1, \quad S \subset N, 2 \leq |S| \leq N \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor \quad (6)$$

$$x_{ij}, \forall i, j = 1, 2, \dots, n \mid i \neq j \in B \quad (7)$$

As variáveis de decisão (1) compreendem todo o conjunto das combinações dos trajetos, modeladas como variáveis binárias. A função objetivo (2) consiste em minimizar a distância total percorrida. As restrições (3) e (4) impõem que cada cidade tenha apenas uma cidade sucessora e predecessora imediata (ARENALES *et al.*, 2015). As restrições (5) e (6), por sua vez, impõem a ausência de sub-rotas desconexas, caso haja (ARENALES *et al.*, 2015). A restrição (7) impõe que as variáveis sejam binárias (ARENALES *et al.*, 2015).

Os principais algoritmos exatos utilizados no PCV são o *branch-and-bound* e o de planos de corte (TAHA, 2008), já incorporados nos principais *solvers* comerciais disponíveis. No entanto, em certas ocasiões, esses algoritmos não garantem uma solução ótima em um tempo computacional praticável, o que exige a utilização de heurísticas para promover uma solução “boa” para o problema, porém não necessariamente ótima (TAHA, 2008)

2.4. Heurísticas para o PCV assimétrico

Heurísticas são métodos de resolução de problemas de otimização que não garantem uma solução ótima, mas uma solução viável suficientemente boa (TAHA, 2008). Segundo Arenales *et al.*, (2015), o crescimento do interesse por heurísticas se deve, em grande parte, ao advento da teoria da complexidade computacional, que mostra que determinados problemas de otimização combinatória são intratáveis por algoritmos exatos em ocasiões em que o número de variáveis e restrições são elevados.

Para os PCV assimétricos, as principais heurísticas utilizadas são as Heurísticas do Vizinho mais Próximo e do Subcircuito Inverso (TAHA, 2008).

A Heurística do Vizinho Mais Próximo consiste em escolher uma cidade aleatoriamente ou de acordo com algum critério determinístico e incorporá-la à rota como ponto de partida (ARENALES *et al.*, 2015). A partir daí, escolhe-se sucessivamente a cidade mais próxima da última já incorporada à rota, e quando todas as cidades tiverem sido incorporadas, fecha-se a rota entre a primeira e a última cidade (ARENALES *et al.*, 2015).

Já a Heurística do Subcircuito Inverso começa por um circuito viável e então tenta melhorá-lo invertendo subcircuitos de duas cidades, em seguida, subcircuito de três, e continua até chegar a subcircuitos de tamanho $n - 1$ (TAHA, 2008). Os pseudocódigos dessas heurísticas podem ser visualizados no Quadro 1 abaixo:

Quadro 1 – Pseudocódigos das heurísticas do vizinho mais próximo e do subcircuito inverso

Vizinho mais próximo		Subcircuito inverso	
1	Algoritmo VizinhoMaisProximo(MatrizDistancias)	1	Algoritmo SubCircuitoInverso(MatrizDistancias, rota)
2	$n \leftarrow \text{numCidades}(\text{MatrizDistancias});$	2	$n \leftarrow \text{numCidades}(\text{MatrizDistancias});$
3	$\text{listaCidades} \leftarrow \text{listarCidades}(\text{MatrizDistancias})$	3	$\text{melhorRota} \leftarrow \text{rota}$
4	$c_1 \leftarrow \text{rand}(\text{listaCidades});$	4	$\text{listaCidadesInvertidas}$
5	$i \leftarrow 1;$	5	$i \leftarrow 2;$
6	$\text{rota} = \text{adicionarCidade}(c_1);$	6	Enquanto ($i < n-1$) faça
7	Enquanto ($i < n$) faça	7	$\text{listaCidadesInvertidas} \leftarrow \text{inverterCidades}(\text{melhorRota}, i)$
8	$\text{rota} = \text{rota} + \text{adicionarCidade}(\text{cidadeMaisPróxima}(c_i));$	8	$\text{melhorRota} = \text{MenorDistancia}(\text{listaCidadesInvertidas})$
9	$i \leftarrow i + 1;$	9	$\text{listaCidadesInvertidas} = \text{limpar}()$
10	Fim-Enquanto;	10	Fim-Enquanto;
11	$\text{rota} = \text{rota} + \text{adicionarCidade}(c_1)$	11	Retorne $\text{melhorRota};$
12	Retorne $\text{rota};$	12	Fim SubCircuitoInverso;
13	Fim VizinhoMaisPróximo;		

Fonte: Adaptado de Taha (2008)

3. Metodologia

O trabalho seguiu um estudo de caso com abordagem quantitativa, caracterizado pelo profundo exames de variáveis e pela investigação exaustiva de um ou poucos objetos, de maneira que permitiu seu amplo e detalhado conhecimento (CAUCHICK-MIGUEL; SOUSA, 2018). No delineamento dessa pesquisa, utilizou-se as fases de implementação da Pesquisa Operacional propostos por Taha (2008), como pode ser visto na Figura 1:

Figura 1 – Fases de implementação da Pesquisa Operacional



Fonte: Adaptado de Taha (2008)

A definição do problema consiste em definir seu escopo, visando identificar os seus três elementos principais, sendo eles a) determinação das alternativas de decisão, b) determinação do objetivo de estudo e c) determinação das limitações, ou restrições, que devem ser respeitados para a correto funcionamento do sistema (TAHA, 2008). O problema, caracterizado como caixeiro viajante assimétrico, teve seu escopo definido com o auxílio dos dados fornecidos pela própria empresa.

A construção do modelo é a forma de traduzir o problema através de relações e regras matemáticas, ou seja, combinações que se proponham a resolver o problema de decisão apresentado (TAHA, 2008). Nesta fase, o modelo foi construído conforme o modelo genérico apresentado na seção 2.4 para o PCV assimétrico. Também foi implementado o pseudocódigo das heurísticas do vizinho mais próximo e do subcircuito inverso em linguagem Python, versão 3.8.3. O uso de métodos exatos e heurísticos neste estudo de caso foi imprescindível para gerar rotas alternativas para a empresa em questão.

A solução do modelo pode ser vista como umas das fases mais delicadas e importantes do estudo, sendo imprescindível analisar o comportamento da solução dentro dos parâmetros que estão sendo estudados para o problema (TAHA, 2008). Nesta fase, utilizou-se o *solver* IBM ILOG CPLEX 12.10, para solucionar o modelo exato. O *script* Python, por sua vez, foi implementado em um *Jupyter Notebook* para a solução das heurísticas.

A validação do modelo prevê o adequado funcionamento do modelo para aplicação no estudo proposto; o modelo é válido se sob condições iniciais reproduz razoavelmente o desempenho teórico esperado (TAHA, 2008). Para validação do modelo, foi conduzido um estudo comparativo entre a qualidade das soluções obtidas pelos modelos (heurísticos e exatos) propostos e pela atual solução adotada pela empresa.

A implementação do sistema de um modelo válido envolve a tradução dos resultados em instruções operacionais inteligentes que serão emitidas para as pessoas que administrarão o sistema estudado (TAHA, 2008). Essa fase não foi desenvolvida, e apenas foi proposta a nova rota para a empresa.

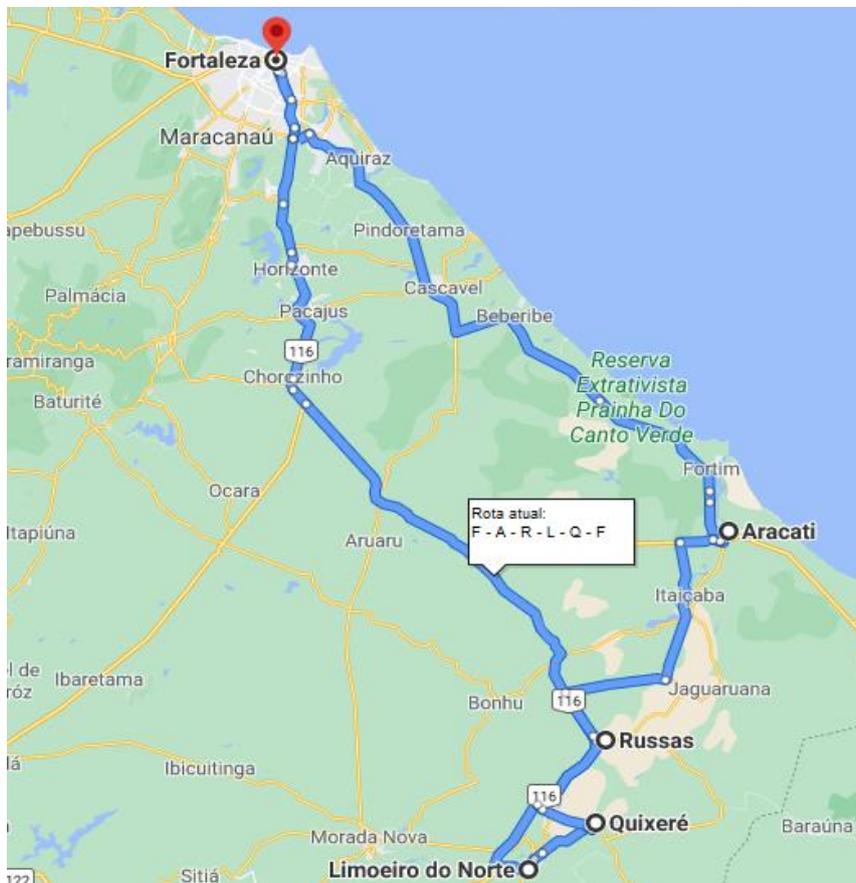
4. Resultados e Discussões

4.1. Definição do Problema

A empresa sob investigação é um negócio familiar, presente no mercado há mais de 20 anos no ramo de produção de salgados de trigo e doces industrializados, em que o número de colaboradores nunca ultrapassou 10 pessoas. O empreendimento é localizado na cidade de Fortaleza – CE e atualmente atende uma demanda de mais de 10 cidades do estado.

Uma das atuais rotas de distribuição da empresa é realizada uma vez por semana e é composta por quatro cidades a serem atendidas (Russas, Quixeré, Limoeiro do Norte e Aracati), além da cidade de origem (Fortaleza). Atualmente, a empresa possui dois veículos comerciais que fazem a distribuição dos produtos, ambos com consumo de 9km por litro de gasolina. A rota atual, estabelecida baseada nos conhecimentos pessoais do motorista da empresa, tem a seguinte sequência: (F) Fortaleza → (A) Aracati → (R) Russas → (L) Limoeiro do Norte → (Q) Quixeré → (F) Fortaleza. Essa rota pode se visualizada na figura abaixo:

Figura 2 – Mapa da rota utilizada atualmente pela empresa



Fonte: Adaptado de Google maps (2021)

Na definição do problema foram apontadas as distâncias entre as cidades que compõem a rota de distribuição dos produtos, como mostra a tabela 1 abaixo:

Tabela 1 – Matriz de distâncias entre as cidades da rota

Cidade	Fortaleza	Russas	Quixeré	Limoeiro do Norte	Aracati
Fortaleza	0	167	186	201	153
Russas	166	0	19	37	59
Quixeré	186	19	0	17	76
Limoeiro do norte	201	34	18	0	86
Aracati	148	57	75	91	0

Fonte: Autores (2021)

Ao se realizar a investigação do problema estudado, tem-se como alternativas de decisão as rotas pelas quais serão realizadas as entregas dos salgadinhos de trigo e doces (conforme equação (1)), nesse caso, envolvendo as cidades de Fortaleza, Russas, Quixeré, Limoeiro do Norte e Aracati.

O objetivo consistiu em encontrar a sequência de deslocamento que obtivesse, no fim, a menor distância possível entre as cidades a serem percorridas, de forma que se retornasse à cidade de origem ao fim do trajeto (equação (2)). As limitações do problema foram aquelas apontadas pelas restrições do modelo genérico para o PCV, conforme equações (3) a (7).

4.2. Construção e Solução do Modelo

Todos os métodos (exato e heurísticos) foram executados em um computador com sistema operacional Windows 10 x64, com processador Intel® Pentium®, 2.10GHz, 2100 Mhz, 2 núcleos, com memória RAM instalada de 4GB. Todos os códigos podem ser encontrados em <https://github.com/GitRodrigoQueiroz/OptimizationCodes>.

A versão final do modelo matemático construído no CPLEX para encontrar a rota ótima é apresentada na figura 3.

Figura 3 – Modelo matemático construído no CPLEX

```
6 //Variáveis de decisão
7 dvar boolean x12;
8 dvar boolean x13;
9 dvar boolean x14;
10 dvar boolean x15;
11 dvar boolean x21;
12 dvar boolean x23;
13 dvar boolean x24;
14 dvar boolean x25;
15 dvar boolean x31;
16 dvar boolean x32;
17 dvar boolean x34;
18 dvar boolean x35;
19 dvar boolean x41;
20 dvar boolean x42;
21 dvar boolean x43;
22 dvar boolean x45;
23 dvar boolean x51;
24 dvar boolean x52;
25 dvar boolean x53;
26 dvar boolean x54;
27
28 //Função objetivo
29 minimize 167*x12 + 186*x13 + 201*x14 + 153*x15 + 166*x21 + 19*x23 + 37*x24 + 59*x25 + 186*x31 + 19*x32
30 + 17*x34 + 76*x35 + 201*x41 + 34*x42 + 18*x43 + 86*x45 + 148*x51 + 57*x52 + 75*x53 + 91*x54;
31
32 //Restrições
33 subject to{
34 x21 + x31 + x41 + x51 == 1;
35 x12 + x32 + x42 + x52 == 1;
36 x13 + x23 + x43 + x53 == 1;
37 x14 + x24 + x34 + x54 == 1;
38 x15 + x25 + x35 + x45 == 1;
39 x12 + x13 + x14 + x15 == 1;
40 x21 + x23 + x24 + x25 == 1;
41 x31 + x32 + x34 + x35 == 1;
42 x41 + x42 + x43 + x45 == 1;
43 x51 + x52 + x53 + x54 == 1;
44 x15 + x51 <= 1;
45 x23 + x34 + x42 <= 2;
46 x34 + x43 <= 1;
47 x12 + x25 + x51 <= 2;
48 }
```

Fonte: Autores (2021)

4.2.1 Solução ótima do PCV

O modelo inicialmente construído considerou apenas as restrições (3) e (4), uma vez que ainda não havia sub-rotas para o problema. Na primeira execução do modelo (solução parcial 1), encontrou-se uma solução ótima após 0,8 segundos, com distância igual à 371 km. No entanto, essa solução contemplou as seguintes sub-rotas: (F) Fortaleza → (A)

Aracati e (R) Russas → (L) Limoeiro do Norte → (Q) Quixeré, não sendo possível o motorista realizar duas rotas distintas, além do fato de que há uma cidade origem que deve ser retornada no fim do trajeto. Desse modo, houve a necessidade de inserir as restrições (5) e (6) para eliminação dessas sub-rotas.

Na segunda execução (solução parcial 2), novamente encontrou-se uma solução ótima após 0,6 segundos com distância igual à 409 km, novamente com a presença de sub-rotas, sendo elas: (L) Limoeiro do Norte → Q (Quixeré) e A (Aracati) → F (Fortaleza) → R (Russas). Desse modo, novamente houve a necessidade de inserir as restrições (5) e (6) para a eliminação dessas sub-rotas.

Na terceira execução, encontrou-se como solução ótima a rota $F \rightarrow R \rightarrow Q \rightarrow L \rightarrow A \rightarrow F$, totalizando uma distância percorrida de 437 km após 0,4 segundos de execução. Uma vez constituindo um ciclo hamiltoniano, essa é a solução ótima final encontrada pelo modelo matemático.

4.2.2 Solução do PCV pelas Heurísticas

Para a heurística do vizinho mais próximo, decidiu-se implementá-la partindo-se de cada cidade individualmente, ao invés de escolher uma cidade inicial de maneira aleatória, para então avaliar a melhor sequência obtida. Dessa forma, obteve-se um total de 5 soluções, na qual foi escolhida aquela com menor distância. Após a execução do algoritmo, encontrou-se a sequência $R \rightarrow Q \rightarrow L \rightarrow A \rightarrow F \rightarrow R$ como candidata à solução, com distância total de 437 km, após um milissegundo.

Para a heurística do subcircuito inverso, escolheu-se como rota inicial aquela encontrada pela heurística anterior. A solução resultou também na sequência $R \rightarrow Q \rightarrow L \rightarrow A \rightarrow F \rightarrow R$ após três milissegundos de execução, o que nos mostra que nenhuma permutação foi capaz de melhorar a rota parcial corrente.

Um resumo sobre esses resultados pode ser visualizado na tabela 2 a seguir:

Tabela 2 – Comparativo das rotas em relação as distâncias		
Rota analisada	Sequência da rota	Distância (Km)
Rota Atual	$F \rightarrow A \rightarrow R \rightarrow L \rightarrow Q \rightarrow F$	451
Rota ótima	$F \rightarrow R \rightarrow Q \rightarrow L \rightarrow A \rightarrow F$	437
Subcircuito inverso	$R \rightarrow Q \rightarrow L \rightarrow A \rightarrow F \rightarrow R$	437
Vizinho mais próximo	$R \rightarrow Q \rightarrow L \rightarrow A \rightarrow F \rightarrow R$	437

Fonte: Autores (2021)

Percebe-se que, nas soluções encontradas, os resultados se mostraram melhores que a rota atualmente empregada pela empresa, com as heurísticas encontrando a solução ótima neste problema. Nos resultados obtidos é demonstrado uma melhora de 3,10% entre a rota ótima e as demais, o que pode parecer pouco, mas, considerando que a rota é realizada semanalmente, logo, 52 vezes anualmente, essa porcentagem é considerável.

Levando em consideração que o veículo faz em média 9 quilômetros por litro de gasolina, com o preço médio do litro desse combustível, de acordo com a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2021) sendo R\$ 5,93 (dato referente ao mês de janeiro de 2021 da cidade Fortaleza), foi organizado na Tabela 3, um comparativo entre as distâncias das rotas e o custo para percorrê-las em um período de um mês e um ano.

Tabela 3 - Comparativo das distâncias das rotas em um mês e um ano

	Mês		Ano	
	Distância (km)	Custo (R\$)	Distância (Km)	Custo (R\$)
Rota Atual	1804	R\$ 1.188,64	23452	R\$ 15.452,26
Rota alternativas	1748	R\$ 1.151,74	22724	R\$ 14.972,59

Fonte: Autores (2021)

Dessa forma, se for considerado que a empresa passe a adotar as rotas alternativas (ótima, vizinho mais próximo ou subcircuito inverso), ela terá uma economia de aproximadamente R\$ 36,90 por mês e cerca de R\$ 479,67 por ano em relação à rota atualmente utilizada. Se for levado em conta a utilização da rota ótima desde o início da empresa, o valor de economia seria de R\$ 2.398,36, considerando que a empresa realiza a rota há cinco anos. Uma vez diminuindo os custos logísticos, a empresa passa a ter maior lucratividade sob o serviço exercido, podendo este ser um elemento de diferenciação diante os concorrentes.

De outro modo, a economia concebida acarreta diretamente em menores custos para a empresa. Neste trabalho, desconsiderou-se a existência de possíveis limitantes externas, assim, a rota minimizada pode então ser utilizada. Essa mudança implicaria, no final de um ano, em 728 km a menos de percurso, com uma economia anual de R\$ 479,67, valor este que poderia ter sido investido em outras áreas deficientes da empresa.

5. Considerações Finais

Foram utilizadas para a resolução do problema do caixeiro viajante, tanto um método exato, que trouxe uma solução ótima, quanto métodos heurísticos, que, em geral, geram uma solução subótima. No entanto, ambas as heurísticas obtiveram o mesmo resultado da solução ótima, o que chama atenção, uma vez que uma das desvantagens dos métodos heurísticos em relação aos exatos, é o fato de não garantirem encontrar uma solução ótima, ou seja, geralmente, não se tem o conhecimento do quão próxima a solução subótima está da solução ótima.

Por outro lado, uma vantagem dos métodos heurísticos comparados aos métodos exatos, é a maior flexibilidade no processamento das características de um problema, como pode ser exemplificado na queda, mesmo que irrisória, do tempo de processamento. Além disso, as heurísticas podem ofertar mais de uma solução, permitindo aumentar as possibilidades de decisão, sobretudo quando existem fatores que não podem ser facilmente introduzidos ao modelo, mas que devem ser considerados.

Tem-se, a partir do desenvolvimento deste trabalho, uma referência de como o uso de ferramentas e tecnologias são capazes de conduzir as empresas a altos níveis de competitividade. Hoje as empresas buscam a melhor gestão dos suprimentos e na execução dos serviços, logo, a otimização de rotas manifesta-se como uma alternativa na contração de custos logísticos, aumentando a competitividade da organização.

Referências

ABIA. Associação Brasileira da Indústria de Alimentos. **Relatório anual de 2019**. Disponível em: https://www.abia.org.br/downloads/relatorioAnual_2020.pdf. Acesso em: 24 abr. 2021.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Sistema de levantamento de preços**. Disponível em: https://preco.anp.gov.br/include/Resumo_Ultimos_Meses_Index.asp. Acesso em: 17 mar. 2021.

ARENALES, M.; MORABITO, R.; ARMENTANO, V. A.; YANASSE, H. H. **Pesquisa Operacional**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

BARBOSA, M. A.; DECKMANN, R. A. **Iniciação à Pesquisa Operacional no Ambiente de Gestão**. 3. ed. Curitiba: InterSaber, 2015.

BELFIORE, P.; FÁVERO, L. P. **Pesquisa Operacional para cursos de Engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

COLIN, E. C. **Pesquisa operacional: 170 aplicações em estratégia, finanças, logística, produção, marketing e vendas**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

CAUCHICK-MIGUEL, P. A.; SOUSA, A. O método do estudo de caso na Engenharia de Produção. In: CAUCHICK-MIGUEL, P. A. (Coo.). **Metodologia de pesquisa em Engenharia de Produção e gestão de operações**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. p. 131-147.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à Pesquisa Operacional**. 9. ed. Porto Alegre: McGraw Hill Brasil, 2013.

GAMEIRO, A. H.; ROCCO, C. D.; CAIXETAFILHO, J. V. Modelo matemático para otimização e avaliação de unidade produtora de leite caracterizada pela integração lavoura-pecuária: consideração de parâmetros econômicos, logísticos e ambientais. In CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, 49, Belo Horizonte, **Anais...**, SOBER, 2011.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. 2. Ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.

MOREIRA, D. A. **Pesquisa Operacional: curso introdutório**. São Paulo: Thomson Learning, 2010.

SEBRAE. Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. **O Impacto da pandemia de coronavírus nos Pequenos Negócios** – 2ª edição, 2020. Disponível em: <https://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/o-impacto-da-pandemia-de-coronavirus-nos-pequenos-negocios,192da538c1be1710VgnVCM1000004c00210aRCRD>. Acesso em: 16 jun. 2021.

SEBRAE. Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. **Relatório Especial**, 2015. Disponível em: [https://bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/db16fac96aa7a4f7f1b8af2dc5e000a1/\\$File/5986.pdf](https://bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/db16fac96aa7a4f7f1b8af2dc5e000a1/$File/5986.pdf). Acesso em: 24 abr. 2021.

TAHA, H. A. **Pesquisa Operacional: uma visão geral**. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.