



THIAGO DIAS BARCELOS

**MINIMIZAÇÃO DO DESLOCAMENTO EM ROTAS DE INSPEÇÃO:
UM ESTUDO DE CASO**

**Ouro Preto, MG
2023**

THIAGO DIAS BARCELOS

**MINIMIZAÇÃO DO DESLOCAMENTO EM ROTAS DE INSPEÇÃO:
UM ESTUDO DE CASO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de especialista em Especialização em Sistemas Inteligentes: Ênfase em Ciência de Dados.

Área de concentração: Otimização

Orientador: Prof. Luciano Perdigão Cota, D.Sc.
Coorientadora: Profa. Tatianna A. P. Beneteli, D.Sc.

**Ouro Preto, MG
2023**

Título: Minimização do deslocamento em rotas de inspeção: um estudo de caso
Classificação: () Confidencial () Restrita () Uso Interno (X) Pública

Informações Confidenciais - Informações estratégicas para o Instituto e sua Mantenedora. Seu manuseio é restrito a usuários previamente autorizados pelo Gestor da Informação.

Informações Restritas - Informação cujo conhecimento, manuseio e controle de acesso devem estar limitados a um grupo restrito de empregados que necessitam utilizá-la para exercer suas atividades profissionais.

Informações de Uso Interno - São informações destinadas à utilização interna por empregados e prestadores de serviço.

Informações Públicas - Informações que podem ser distribuídas ao público externo, o que, usualmente, é feito através dos canais corporativos apropriados.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação(CIP)

B218m
Barcelos, Thiago Dias Minimização do deslocamento em rotas de inspeção: um estudo de caso. Thiago Dias Barcelos... [et al.] - Ouro Preto, MG: ITV, 2023.
33 p.: il.
Monografia (Especialização <i>latu sensu</i>) - Instituto Tecnológico Vale, 2023. Orientador: Luciano Perdigão Cota Coorientadora: Tatianna A. P. Beneteli
1. Manutenção. 2. Rotas de Inspeção. 3. Otimização. 4. Heurísticas Construtivas. 5. Solução Gulosa. I. Cota, Luciano Perdigão. II. Beneteli, Tatianna A. P. III. Título.
CDD.23. ed. 629.892

Thiago Dias Barcelos

MINIMIZAÇÃO DO DESLOCAMENTO EM ROTAS DE INSPEÇÃO: UM ESTUDO DE CASO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de especialista *lato sensu* em [Sistemas Inteligentes: Ênfase em Ciência de Dados].

Orientador: Prof. D.Sc. Luciano Perdigão Cota

Trabalho de conclusão de curso defendido e aprovado em 21 de novembro de 2023 pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. D.Sc. Luciano Perdigão Cota
Orientador – Instituto Tecnológico Vale

Prof.^a D.Sc. Tatianna Aparecida Pereira Beneteli
Coorientadora – Instituto Tecnológico Vale

Prof. MSc. Thomás Vargas Barsante e Pinto
Membro interno – Instituto Tecnológico Vale

MSc. Diego Gomes Coelho
Membro externo – Stellantis

Os Signatários declaram e concordam que a assinatura será efetuada em formato eletrônico. Os Signatários reconhecem a veracidade, autenticidade, integridade, validade e eficácia deste Documento e seus termos, nos termos do art. 219 do Código Civil, em formato eletrônico e/ou assinado pelas Partes por meio de certificados eletrônicos, ainda que sejam certificados eletrônicos não emitidos pela ICP-Brasil, nos termos do art. 10, § 2º, da Medida Provisória nº 2.200-2, de 24 de agosto de 2001 (“MP nº 2.200-2”).

PROTOCOLO DE ASSINATURA(S)

O documento acima foi proposto para assinatura digital na plataforma Portal de Assinaturas Vale. Para verificar as assinaturas clique no link: <https://vale.portaldeassinaturas.com.br/Verificar/112D-A612-52B1-F835> ou vá até o site <https://vale.portaldeassinaturas.com.br:443> e utilize o código abaixo para verificar se este documento é válido. The above document was proposed for digital signature on the platform Portal de Assinaturas Vale . To check the signatures click on the link: <https://vale.portaldeassinaturas.com.br/Verificar/112D-A612-52B1-F835> or go to the Website <https://vale.portaldeassinaturas.com.br:443> and use the code below to verify that this document is valid.

Código para verificação: 112D-A612-52B1-F835



Hash do Documento

DD0EB1B92FB4B9C66345E87DCF1BC723A08D647CDD3BAC2AB795A9068A7E2BEF

O(s) nome(s) indicado(s) para assinatura, bem como seu(s) status em 28/12/2023 é(são) :

- Tatianna Aparecida Pereira Beneteli (Signatário) - em 27/12/2023 16:28 UTC-03:00

Tipo: Assinatura Eletrônica

Identificação: Por email: tatianna.beneteli@pq.itv.org; Código de acesso: 1

Evidências

Client Timestamp Wed Dec 27 2023 16:28:56 GMT-0300 (Horário Padrão de Brasília)

Geolocation Latitude: -21.7725823 Longitude: -43.3095146 Accuracy: 100

IP 186.235.100.215

Hash Evidências:

270693CC4CB27B25C7C7A28B79F36818D1998C9FF9D09247D04CBD815374E5C1

- Thomás Vargas Barsante e Pinto (Signatário) - 115.302.536-16 em 27/12/2023 16:06 UTC-03:00

Tipo: Assinatura Eletrônica

Identificação: Por email: thomas.pinto@itv.org; Código de acesso: 1

Evidências

Client Timestamp Wed Dec 27 2023 20:06:54 GMT+0100 (Horário Padrão da Europa Central)

Geolocation Location not shared by user.

IP 81.36.148.124

Hash Evidências:

1BA6F0FE3C99D30D79B6D62D7B8C2EC5E8B5A4E04952EA5E306C772C205A488E

Luciano Perdigão Cota (Signatário) - 067.976.936-67 em 27/12/2023 15:50 UTC-03:00

Tipo: Assinatura Eletrônica

Identificação: Por email: luciano.p.cota@itv.org; Código de acesso: 1

Evidências

Client Timestamp Wed Dec 27 2023 15:51:09 GMT-0300 (Horário Padrão de Brasília)

Geolocation Latitude: -20.108567 Longitude: -43.058249 Accuracy: 332

IP 143.202.54.161

Hash Evidências:

97E2A738E4D26EECCABD60270DEC5720EB93F6637FBCA16EA1071B3891FAA764

Diego Gomes Coelho (Signatário) - em 27/12/2023 15:46 UTC-03:00

Tipo: Assinatura Eletrônica

Identificação: Por email: diegogomescoelho@gmail.com; Código de acesso: 1

Evidências

Client Timestamp Wed Dec 27 2023 15:46:13 GMT-0300 (Horário Padrão de Brasília)

Geolocation Latitude: -22.852751 Longitude: -46.3180356 Accuracy: 18.352

IP 161.69.53.21

Hash Evidências:

FDA64E1757C8D8850302EA68ED3A3855C4046C6482BFBB1983216D7DB9219826



Ao meu amado filho, à minha querida esposa e aos colegas que compartilharam esta jornada comigo, pela paciência, apoio e amizade. Aos meus orientadores, pela orientação valiosa e inspiração. Este trabalho é dedicado a todos vocês.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos que tornaram possível o aprendizado e a realização do meu Trabalho de Conclusão de Curso. Agradeço à meus orientadores por sua dedicação e *insights* valiosos. À minha família e amigos, pelo apoio incondicional. Aos colegas, pelos debates enriquecedores. Cada um de vocês desempenhou um papel crucial nessa jornada e sou profundamente grato por isso.

Agradeço o apoio da Vale S.A., do Instituto Tecnológico Vale e das agências brasileiras de fomento CAPES e CNPq.

“A vida é como andar de bicicleta. Para manter o equilíbrio, você deve se manter em movimento.”

Albert Einstein

RESUMO

Este trabalho aborda o problema da criação de rotas de inspeção otimizadas. As rotas de inspeção são formadas por uma série de equipamentos que devem ser checados periodicamente. Os itens a serem checados são cadastrados de forma a conduzir o inspetor a uma verificação de modos de falha dos equipamentos ou sinais de desvios operacionais. Atualmente, as rotas de inspeção são definidas de forma manual na Vale S.A., baseados no conhecimento e experiência dos profissionais das áreas de manutenção e operação. Esse estudo busca criar uma metodologia capaz de gerar rotas de inspeções de forma automatizada com base no tempo de deslocamento entre os pontos de inspeção, buscando a redução do tempo total gasto pelo inspetor. Essa ferramenta facilitará a definição de novas rotas de inspeção, assim como a atualização das rotas já existentes, por exemplo, em casos de parada de algum equipamento para manutenção. Para validação do estudo, a metodologia desenvolvida é aplicada a um estudo de caso de uma rota de inspeção em uma usina de pelotização da Vale S.A. no Espírito Santo, Brasil.

Palavras-chave: Manutenção. Rotas de inspeção. Otimização. Heurísticas construtivas. Solução gulosa.

Fase da Cadeia: Manutenção.

ABSTRACT

This work addresses the problem of the creation of optimized inspection routes. Inspection routes comprise a series of equipment that must be checked periodically. The items checked are recorded, leading the inspector to identify equipment failure modes or signs of operational deviations. Currently, inspection routes are defined manually at Vale S.A., based on the knowledge and experiences of professionals in the maintenance and operation areas. This study seeks to create a methodology capable of generating inspection routes in an automated manner based on travel time between inspection points, seeking to reduce the total time spent by the inspector. This tool will facilitate the definition of new inspection routes and the updating of existing routes, for example, equipment downtime for maintenance. The proposed methodology is applied to a case study of an inspection route at a Vale S.A. pelletizing plant in Espírito Santo, Brazil, to validate the proposal.

Keywords: Maintenance. Inspection routes. Optimization. Constructive heuristics. Greedy solution.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Quadro de Rotas	16
Figura 2 – Exemplo de solução para uma rota de inspeção com cinco pontos . . .	23
Figura 3 – Representação da Solução - Rota de inspeção com cinco pontos	24
Figura 4 – Rota de inspeção da gerência de operação aplicada ao pelotamento da usina 8	26
Figura 5 – Pontos de inspeção - Disco de pelotamento e desagregador	27
Figura 6 – Rota de inspeção criada - Estudo de caso	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Matriz de distâncias para uma rota de inspeção com cinco pontos . . .	23
Tabela 2 – Possível solução para uma rota de inspeção com cinco pontos	23
Tabela 3 – Tempo de inspeção - Estudo de caso	28
Tabela 4 – Solução gulosa para rota de inspeção - Estudo de caso	29

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- CAPES - Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
- CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
- ITV - Instituto Tecnológico Vale
- KPI - Key Performance Indicator, ou Indicador-Chave de Desempenho em Português
- MI - Mineração
- PCV - Problema do Caixeiro do Viajante

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Motivação	16
1.2	Objetivo Geral	17
1.3	Objetivos Específicos	18
1.4	Organização do Trabalho	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
3	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	22
3.1	Exemplo Didático	22
4	METODOLOGIA	24
4.1	Representação da solução	24
4.2	Avaliação da solução	24
4.3	Algoritmo construtivo guloso	24
5	ESTUDO DE CASO	26
5.1	Cenários	26
5.2	Resultados	27
6	CONCLUSÕES	30
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	31
	REFERÊNCIAS	32

1 INTRODUÇÃO

O ato de inspecionar consiste em verificar se os ativos encontram-se em suas condições ideais conforme recomendações do fabricante ou mesmo preestabelecidas pela empresa. A inspeção é um importante ponto na gestão da manutenção, porque identifica falhas antes mesmo destas acontecerem, diminuindo o ônus com manutenções corretivas e possíveis paradas no processo produtivo. Faz parte do processo de inspeção o registro das anomalias identificadas e as ações para promover a sua eliminação, evitando sua reincidência.

Os processos de inspeção de um parque operacional e de seus ativos seguem uma metodologia integrada, ou seja, associada a observação multidisciplinar dos ativos, obtendo diagnósticos e direcionamentos para ações preventivas e preditivas. A multidisciplinaridade integra as especialidades de manutenções mecânica, elétrica, automação e instrumentação, incluindo também os itens de análise de óleo e vibração.

A inspeção operacional é realizada de maneira sensitiva, não utilizando instrumentos para avaliação e diagnóstico. Na inspeção sensitiva, o inspetor utiliza os sentidos (visão, audição, olfato e tato) para avaliar a situação do ativo. Essa prática é muito utilizada na gestão de manutenção, em conjunto com tecnologias que facilitam a identificação ou indícios de falhas nos equipamentos industriais. Esse tipo de manutenção não se beneficia de dispositivos remotos de inspeção e necessita invariavelmente de mão de obra para realizar seus apontamentos.

A inspeção sensitiva se torna mais eficiente se combinada com outras técnicas de manutenção preditiva (por exemplo, sensores de vibração e temperatura). O conceito de manutenção integrada abrange o processo de inspeção sensitiva e as informações de manutenção preditiva sistêmica (por exemplo, coleta de sensor fixo, contínuo ou periódico). As duas inspeções se complementam diretamente e permitem análises mais pertinentes.

Um plano de rotas de inspeção é essencial para o controle das tarefas de inspeção que precisam ser realizadas. A elaboração de um plano de rotas é baseada na importância e criticidade dos ativos do processo produtivo, estabelecendo procedimentos que visam evitar que as falhas ocorram. No plano são definidas quais serão as atividades realizadas e qual a periodicidade em que essas devem ser executadas, tendo em vista a frequência de uso do ativo, histórico de funcionamento e de falhas e, principalmente, o impacto que o ativo tem sobre o processo produtivo. Pontos críticos e que podem causar prejuízos ao processo devem ser acompanhados com maior frequência. Além disso, o plano define quem irá executar as tarefas previstas, de acordo com a especialização necessária para melhor executar a tarefa. Nesse aspecto, capacitações específicas podem ser requisitadas aos inspetores (por exemplo, treinamentos de pessoal podem se tornar necessários).

Após a definição de quais atividades precisam ser realizadas no plano de rotas de

inspeção, são criadas as rotas de inspeção. As rotas indicam o caminho que o inspetor deve percorrer no chão fabril para coleta da informação de ativos. Elas são criadas com o objetivo de minimizar o tempo de deslocamento e a segurança do inspetor. A observação dos ativos, na frequência e abrangência de itens inspecionáveis necessária, muitas vezes esbarra no quantitativo finito de recursos de mão de obra. Em casos aplicáveis a evolução para sensoriamento remoto, automatizando o monitoramento e até o diagnóstico, reduzem ou eliminam a necessidade do inspetor. Em outros casos há a necessidade de que o recurso humano seja utilizado de maneira racional de forma a atender as necessidades de inspeção de maneira otimizada.

1.1 Motivação

Atualmente, nas unidades da Vale S.A., as rotas operacionais de inspeção são criadas a partir do conhecimento técnico e da experiência da equipe responsável. Os deslocamentos são roteirizados de forma intuitiva, não utilizando ferramentas de otimização.

Hoje, na unidade de pelotização de Tubarão, localizada na cidade de Vitória, Brasil, há uma demanda de 78 rotas ativas, conforme apresentado na Figura 1. Essas rotas foram definidas de forma empírica, utilizando o conhecimento das equipes de manutenção e operação.

Figura 1 – Quadro de Rotas

Gerência	Cumprimento Rotas				Conformidade das Rotas Executadas - Aderência aos pontos de Inspeção existentes			
	Total Rotas	Atrasadas	OK	% OK	Total Pontos	Executados	% Execução	
MECÂNICA US. 1 a 4	65	1	64	98,5%	32.435	31.603	97,4%	
ELÉTRICA/INSTR. US. 1 a 8	267	10	257	96,3%	115.349	105.173	91,2%	
MECÂNICA US. 5 a 7	63	4	59	93,7%	30.628	26.540	86,7%	
PREDITIVA TUBARÃO	19	2	17	89,5%	3.254	2.633	80,9%	
VARGEM GRANDE	69	10	59	85,5%	56.375	48.689	86,4%	
SÃO LUIS	182	14	168	92,3%	60.614	57.232	94,4%	
MECÂNICA US. 8	54	12	42	77,8%	29.474	26.236	89,0%	
AUTOMAÇÃO. US. 1 A 8	33	-	33	100,0%	2.497	2.493	99,8%	
SERVIÇOS AMBIENTAIS TUBARÃO	44	-	44	100,0%	20.450	20.022	97,9%	
OPERAÇÃO US. 1 a 4	12	-	12	100,0%	3.200	3.193	99,8%	
OPERAÇÃO US. 5 a 7	35	2	33	94,3%	10.486	9.927	94,7%	
OPERAÇÃO US. 8	31	3	28	90,3%	3.410	2.880	84,5%	
OPERAÇÃO UTILIDADES	2	-	2	100,0%	53	53	100,0%	
Total	874	58	818	93,4%	368.225	336.674	91,4%	

Fonte: Elaboração própria.

Na pelotização as rotas de inspeção podem ser divididas em rotas de manutenção ou de operação. A seguir, faremos uma breve descrição de como se dá o processo de criação e controle das rotas de operação, que serão o escopo desse trabalho.

A criação de rotas operacionais está subordinada a gerência de Confiabilidade Operacional. Essa gerência é responsável pela programação de novas rotas e a manutenção

das já existentes, atendendo aos sites da pelotização no Brasil, que incluem usinas em Minas Gerais, Maranhão e Espírito Santo. A etapa de criação das rotas conta com a participação de um time multidisciplinar que propõe os equipamentos a serem inspecionados, os itens a serem inspecionados em cada equipamento e a rota de inspeção a ser executada.

A frequência de inspeção de um determinado equipamento é definida pela criticidade do ativo, incidência de desvios e demanda oriunda da área operacional. A exemplo, a frequência de inspeção de determinado item pode ser alterada de acordo com a entrada de novos pontos de inspeção, necessidade observada durante uma análise de falha, inclusão de uma nova rotina e/ou incidência de desvio associado a itens inspecionáveis.

As rotas programadas são então disponibilizadas remotamente para o dispositivo associado a um determinado grupo de operadores inspetores que executam a rota em suas respectivas usinas. Os dados de inspeção são registrados em um tablet e, ao fim da rota, transferidos remotamente para uma base de dados do sistema gestor.

Por fim, o controle do desvio observado é abordado de acordo com sua criticidade. A abordagem pode variar de uma medida corretiva de pronto atendimento à programação de uma ordem de manutenção que é avaliada e direcionada para as equipes de manutenção.

Portanto, é possível perceber que o processo de inspeção operacional dos equipamentos em uma usina de pelotização é uma tarefa que demanda um tempo significativo do turno de trabalho dos operadores. Como sabemos, a demanda por otimização de recursos é sempre uma realidade em processos industriais, seja este recurso humano ou de natureza material. No setor operacional são comuns questionamentos relacionados ao tempo excessivo dedicado na rotina dos operadores das usinas de pelotização ao cumprimento das tarefas de inspeção. Atrelado a esses relatos, acrescenta-se a percepção dos operadores de que existe um deslocamento em excesso durante a execução de rotas operacionais.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é elaborar uma metodologia capaz de gerar rotas de inspeções de forma automatizada com base no tempo de deslocamento entre os pontos de inspeção, buscando a redução do tempo total gasto pelo inspetor.

Optamos por mensurar o deslocamento realizado por cada inspetor através do tempo médio, em segundos, para se locomover de um ponto A até um ponto B. Essa escolha está diretamente ligada ao objetivo de reduzir o tempo dedicado à inspeção. No entanto, sabe-se que deslocamentos medidos em unidades de tempo são influenciados por fatores como subidas, descidas e trechos não lineares, resultando em tempos diferentes para a mesma distância medida em metros. Por exemplo, o tempo gasto para subir uma escada é geralmente maior do que o tempo gasto no deslocamento de uma mesma distância em metros em uma superfície plana.

A ferramenta proposta irá facilitar a definição de novas rotas de inspeção, assim como a atualização das rotas já existentes em casos de parada de algum equipamento

para manutenção, por exemplo. Além disso, a ferramenta ainda poderá ser aplicada às rotas já existentes, buscando atender ao apelo das unidades operacionais para que seja realizada a releitura de rotas já em curso, sugerindo rotas que melhor utilizem a mão de obra disponível e otimizem os tempos dedicados as inspeções.

1.3 Objetivos Específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre rotas de manutenção;
- Realizar uma revisão bibliográfica sobre o problema do caixeiro viajante;
- Caracterizar o problema estudado;
- Desenvolver uma heurística construtiva para a criação de rotas de inspeção;
- Validar a proposta com dados reais da unidade de pelotização de Tubarão.

1.4 Organização do Trabalho

O restante do trabalho está organizado da seguinte forma:

- **Capítulo 2 - Referencial Teórico:** apresenta uma revisão bibliográfica sobre o tema;
- **Capítulo 3 - Caracterização do problema:** apresenta a caracterização do problema e traz um exemplo didático;
- **Capítulo 4 - Metodologia:** apresenta o algoritmo construtivo proposto;
- **Capítulo 5 - Estudo de caso:** os experimentos computacionais são apresentados nesse capítulo;
- **Capítulo 6 - Conclusões:** nesse capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho;
- **Capítulo 7 - Sugestões:** o capítulo final apresenta os trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Ao considerar a utilização de técnicas de inspeções visuais em processos de manutenção e de forma semelhante em áreas operacionais, podemos localizar as inspeções tratadas neste projeto como uma técnica simples e amplamente divulgada. Ambrosio (2022) tratou a aplicação de inspeções em correias transportadoras e as manutenções de integridade de suas estruturas. Segundo ele, a inspeção visual é um método de inspeção não destrutivo, mais simples e amplamente utilizado, destinado a avaliar a condição ou propriedades de um componente, estrutura ou solda.

Conforme descrito por Rezende e Gomes (2016), a inspeção sensitiva é o tipo de inspeção que abrange praticamente todos os modos de falhas do equipamento ou instalação industrial. Apesar de ser, normalmente, limitada ao uso dos sentidos naturais do inspetor, é possível diagnosticar anomalias em estágio mediano de degradação.

Diversos trabalhos abordam o planejamento das inspeções, definindo os equipamentos que precisam ser inspecionados, a periodicidade das inspeções e as equipes que deveram realizá-las. Teles (2007) elabora um método para planejamento de inspeções de equipamentos dividido em três fases. Na primeira, denominada elaboração da matriz amostral, é definido quais e quantos equipamentos inspecionar. Na segunda, intitulada distribuição da matriz amostral no tempo, é descrito quando as inspeções devem ser realizadas. Por fim, na terceira fase, denominada alocação de recursos humanos para execução da matriz amostral, é estabelecido quem deve realizar essas inspeções.

No entanto, no que diz respeito ao desenvolvimento de métodos e procedimentos para a criação de rotas de inspeção, não foram encontrados trabalhos na literatura que abordam esse tema. O problema da criação de uma rota de inspeção possui algumas características que o aproxima de outros problemas tratados na literatura. A seguir, as principais características consideradas nesse trabalho são destacadas:

- Toda rota de inspeção precisa ser iniciada em um determinado ponto e o operador deve retornar a esse mesmo ponto ao final da rota de inspeção;
- Todas as inspeções precisam ser realizadas uma e somente uma vez a cada rota de inspeção.

Dessa forma, podemos perceber que o problema da criação de uma rota de inspeção se assemelha ao Problema do Caixeiro Viajante (PCV). Nos anos de 1800, problemas relacionados com o PCV começaram a ser desenvolvidos por dois matemáticos: o escocês William Rowan Hamilton e o britânico Thomas Penyngton Kerkman. A forma geral do PCV parece ter sido modelada por matemáticos pela primeira vez nos anos de 1930 em Harvard e Viena. O problema foi posteriormente estudado por Hassler Whitney e Merrill Flood em Princeton. E, excetuando pequenas variações ortográficas, como *traveling vs*

travelling salesman vs salesman's, o nome do problema ficou globalmente conhecido por volta do ano 1950 (LUCENA, 2022).

O PCV é um problema de otimização combinatória no qual busca-se determinar a rota de menor custo entre um grupo de pontos, que podem ser representações de cidades, localidades ou de outros elementos tratados em problemas de designação. Além da aplicação clássica, o problema do caixeiro viajante pode ser aplicado em diversos outros contextos. A seguir, alguns trabalhos que tratam esse problema são apresentados.

Em Pizzolato, Vásquez e D'Ávila (1999) é relatada uma aplicação real no planejamento da produção em uma empresa química, que produz conforme a demanda dos clientes. É mencionado que várias particularidades dificultaram o uso direto dos modelos do tipo lote econômico de produção demandando outras abordagens. O trabalho relata alguns desafios encontrados e discute as opções adotadas referentes aos custos de *setup*, à sequência de produção e à produção de pequenas ordens, as quais exigem pouco tempo produtivo mas longos tempos de *setup*. O trabalho prossegue com o desenvolvimento de uma proposta de metodologia de sequenciamento da produção baseada no problema do caixeiro viajante, seguida de um algoritmo para reduzir as penalidades de antecipação e atraso na produção das várias ordens. Os resultados demonstraram que a solução inicial do caixeiro viajante reduz o tempo de produção mensal para 21 dias, mas gera penalidades de antecipação/atraso elevadas. Por outro lado, outras heurísticas estudadas aumentam o tempo total de produção para 22 ou 23 dias, mas conseguem reduzir significativamente as penalidades abordadas. Apesar de exigir mais tempo, a Heurística 3, apresentada no artigo, é a mais recomendada devido a menores penalidades. A abordagem proposta apresenta vantagens como simplicidade, flexibilidade para lidar com mudanças nas datas de entrega e fácil inclusão de restrições adicionais.

Fenato (2008) trata da otimização do tempo de preparação de uma máquina produtora de tubetes visando minimizar o tempo de preparação do equipamento, podendo este ser minimizado pela redução do número de trocas de bolachas realizadas entre a confecção dos tubetes. Dois modelos para a minimização destas trocas são apresentados: um via caixeiro viajante e outro via caixeiro viajante generalizado. Os resultados das simulações com o solver *Xpress-MP* foram significativamente melhores do que os métodos atualmente utilizados pela empresa, com reduções de até 37% no número de trocas.

Em seu trabalho, Resende e Scarpel (2011) aplicam um método de geração de agrupamentos, baseado no problema do caixeiro viajante, para facilitar a análise de dados. Diferente dos métodos tradicionais, nesse método o número ideal de agrupamentos é determinado de forma automática, não necessitando de nenhum critério subjetivo para sua determinação. O método de geração de agrupamentos proposto elimina a subjetividade na determinação do número de agrupamentos e requer menos esforço por parte do analista em comparação com métodos tradicionais, como hierárquicos e k-médias. No entanto, tal método tem como desvantagem a ineficiência na resolução de grandes problemas de

otimização combinatória, exigindo o uso de meta-heurísticas. Os autores pretendem, em trabalhos futuros, aplicar o método em grandes bases de dados e explorar meta-heurísticas para melhorar a eficiência.

Silva e Barcelos (2019) realizaram um estudo de caso do processo de entrega em uma distribuidora situada na cidade de João Monlevade. Inicialmente, buscou-se coletar dados sobre o transporte de mercadorias realizado pela organização para a construção de um modelo matemático, de acordo com a metodologia do PCV. Posteriormente, converteu-se essa modelagem em uma programação computacional a fim de se obter a rota ótima utilizando o solver *AMPL*.

Silva (2019) aborda o setor de pães e bolos, que está em crescimento global em vendas, consumo e complexidade. O objetivo do trabalho é resolver um problema de otimização relacionado ao sequenciamento de produção e transporte nesse contexto, para o qual não foram encontradas referências diretas na literatura. O autor desenvolveu novas formulações dos problemas do caixeiro viajante e de sequenciamento de tarefas, conduzindo análises poliédricas e experimentos computacionais para determinar a formulação mais adequada para resolver os desafios propostos. O estudo incluiu a comparação das formulações, dominância, qualidade de solução e aderência ao problema. Os resultados mostram que a nova abordagem melhorou a margem de contribuição da empresa em cerca de 15% e trouxe benefícios adicionais, como agilidade no planejamento e controle de estoque.

Em uma abordagem voltada ao turismo, Gusson (2023) utilizou um método heurístico do PCV para proporcionar roteiros otimizados que permitam aos turistas aproveitar ao máximo sua experiência, facilitando a visita ao maior número de locais por meio da otimização da rota. Para tanto, foram consideradas as escolhas do viajante e a localização das propriedades rurais.

Em uma aplicação prática, Ferreira (2023) recorreu ao PCV para modelar uma nova rota de ônibus voltada para o público universitário da cidade de Araguaína, Tocantins. Apesar de contribuir para a melhoria do serviço ofertado, o trabalho limitou-se a 8 instituições de ensino superior.

Apesar de ser amplamente estudado em diversas aplicações, não encontramos na literatura trabalhos em que o problema do caixeiro viajante seja utilizado para abordar o problema de criação de rotas de inspeção.

3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Este trabalho propõe a elaboração de uma ferramenta capaz de gerar rotas de inspeções de forma automatizada com base no tempo de deslocamento entre os pontos de inspeção, buscando a redução do tempo total gasto pelo inspetor. As rotas operacionais são fluxos com deslocamentos previamente definidos que visam avaliar equipamentos industriais em itens de inspeção de cunho operacional e não utilizando instrumentos, ou seja, é uma ação sensível. A seguir, o problema da criação de uma rota de inspeção é caracterizado.

1. Pontos de inspeção (P)
 - a) Cada ponto de inspeção $i \in P$ é fixo e possui uma localização L_i ;
 - b) O tempo de deslocamento, em segundos, entre dois pontos de inspeção é dado por Td_{ij} ;
 - c) Cada ponto de inspeção $i \in P$ deve ser visitado uma única vez;
 - d) Todos os pontos de inspeção de uma rota $z \in R$ devem ser visitados;
 - e) O tempo de inspeção em cada ponto $i \in P$ é dado por Tv_i , em segundos.
2. Inspetores (S)
 - a) Cada rota $z \in R$ é realizada por apenas um operador inspetor $k \in S$.
 - b) O operador inspetor $k \in S$ pode não ser fixo em uma rota;
 - c) O operador inspetor $k \in S$ conhece a área operacional em que inspeciona;
3. Rotas de Inspeção (R)
 - a) Cada rota de inspeção $z \in R$ deve ser iniciada e finalizada em determinado ponto $i \in P$;
 - b) Cada rota de inspeção $z \in R$ possui x pontos de inspeção;
 - c) Há a possibilidade de entrada ou retirada de novos pontos de inspeção na rota $z \in R$. Essa situação representa, por exemplo, a retirada de operação dos equipamentos em manutenção. Nesse caso, a rota precisa ser refeita.

3.1 Exemplo Didático

A seguir, para facilitar o entendimento, apresenta-se um exemplo de pequeno porte do problema de criação de uma rota de inspeção para a montagem estrutural durante execução de um projeto de implantação. Neste exemplo, tem-se cinco áreas (pontos de inspeção) e apenas um inspetor.

Na Tabela 1 é exibida a matriz de distâncias de deslocamento do inspetor, em segundos. Para pleno atendimento da inspeção a ser realizada, é necessário que o inspetor visite os locais de P1 a P5 apenas uma vez com saída e chegada em seu canteiro de obras no ponto, identificado por P0. Para efeito de simplificação, os tempos de inspeção foram

desconsiderados.

Tabela 1 – Matriz de distâncias para uma rota de inspeção com cinco pontos

Locais	P0	P1	P2	P3	P4	P5
P0	0	25	125	225	475	275
P1	25	0	125	200	450	250
P2	125	125	0	175	375	125
P3	225	200	175	0	175	225
P4	475	450	375	175	0	250
P5	275	250	125	225	250	0

Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 2 é exibida uma solução possível para o problema de criação de rotas de inspeção. O inspetor desloca-se do ponto de partida P0 em direção ao local P4 e realiza sua inspeção. Após inspeção, desloca-se do ponto P4 para o ponto P3, realizando sua inspeção. Na sequência, desloca-se para o ponto P1, repetindo sua rotina de inspeção e realizando novo deslocamento para o ponto P2. Após finalizada a inspeção do ponto P2, o inspetor desloca-se novamente para o último local de montagem, o ponto P5, e retorna para seu ponto de partida, o ponto P0.

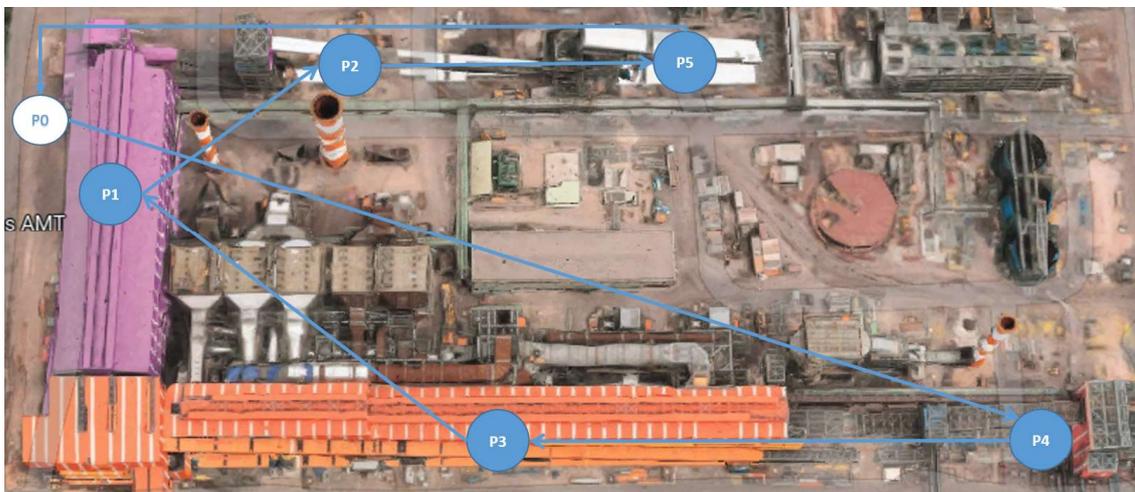
Tabela 2 – Possível solução para uma rota de inspeção com cinco pontos

Rota	Custo (segundos)
P0 ⇒ P4 ⇒ P3 ⇒ P1 ⇒ P2 ⇒ P5 ⇒ P0	1375

Fonte: Elaboração própria.

Observe que, para a possível solução apresentada, o tempo de deslocamento é de 1375, ou seja, o valor da função objetivo é 1375. A Figura 2 ilustra o deslocamento realizado pelo inspetor.

Figura 2 – Exemplo de solução para uma rota de inspeção com cinco pontos



Fonte: Elaboração própria.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentado o algoritmo construtivo proposto inicialmente para tratar o problema em estudo. Inicialmente, implementamos um método de solução exata baseado no problema do caixeiro viajante. Por se tratar de uma classe de problemas NP-difícil (OLIVEIRA, 2015), o método implementado não foi capaz de encontrar a solução ótima em tempo hábil para a instância em análise. Por esse motivo optamos por implementar um algoritmo construtivo.

4.1 Representação da solução

Uma solução s é representada por um vetor de inteiros com n posições, sendo que cada elemento do vetor representa um ponto de inspeção visitado. n indica a quantidade de pontos de inspeção pertencentes a rota em análise. O posicionamento no vetor representa a ordem de execução das inspeções. A Figura 3 ilustra a representação de uma possível solução para o problema com cinco pontos de inspeção apresentado na Seção 3.1.

Figura 3 – Representação da Solução - Rota de inspeção com cinco pontos

4	3	1	2	5
---	---	---	---	---

Fonte: Elaboração própria.

4.2 Avaliação da solução

Uma solução s é avaliada através da função de avaliação $g(\cdot)$, descrita a seguir:

$$g(i) = Td_{ni} \quad \forall i \in P \quad (1)$$

onde Td é o tempo de deslocamento entre o ponto de inspeção atual n e o ponto i .

Observe que a função de avaliação $g(\cdot)$ permite identificar o membro do conjunto de elementos candidatos P com o valor mais favorável, isto é, aquele que insere o menor tempo de deslocamento na rota a ser criada.

4.3 Algoritmo construtivo guloso

Uma heurística construtiva tem por objetivo construir uma solução, elemento por elemento. A forma de escolha de cada elemento a ser inserido a cada passo varia de acordo com a função de avaliação adotada e do problema abordado. Nas heurísticas clássicas, os elementos candidatos são geralmente ordenados segundo uma função gulosa, que estima o

benefício da inserção de cada elemento, e somente o *melhor* elemento é inserido a cada passo. É importante mencionar que não há garantia de que a solução final produzida por uma heurística seja a ótima.

Rocha e Dorini (2004) definem que uma solução globalmente ótima pode ser alcançada fazendo-se uma escolha localmente ótima (gulosa), isto é, aquela que parece ser a melhor naquele momento, desconsiderando-se resultados de subproblemas. No entanto, Oliveira et al. (2019) mencionam que a solução encontrada pela busca gulosa nem sempre é ótima, uma vez que esta estratégia sempre expande o nó mais perto do objetivo, sem levar em consideração o custo do caminho.

O problema das rotas de inspeção aqui tratadas têm como objetivo reduzir os deslocamento até os equipamentos a serem inspecionados. O pseudocódigo a seguir mostra a construção de uma solução para o problema utilizando a função de avaliação $g(\cdot)$.

Algoritmo 1: *Construção de uma solução gulosa*

procedimento: $ConstrucaoGulosa(g(\cdot), s, Tv)$
 $s \leftarrow \emptyset$
 $tempo \leftarrow \emptyset$
 Inicialize o conjunto P de pontos de inspeção de candidatos;
enquanto ($P \neq \emptyset$) **faça**
 $g(i_{min}) = \min\{g(i) | i \in P\};$
 $s \leftarrow s \cup \{i_{min}\};$
 $tempo = tempo + g(i_{min}) + Tv(i_{min})$
 Atualize o conjunto P de pontos de inspeção candidatos;
fim-enquanto
retorne $s, tempo$

5 ESTUDO DE CASO

O algoritmo construtivo proposto foi implementado usando o software Google Colab[®] em linguagem *Python* e os experimentos foram realizados em um computador Intel Core i5-10310U 2,1Ghz com 8 GB de RAM e sistema operacional Windows 10.

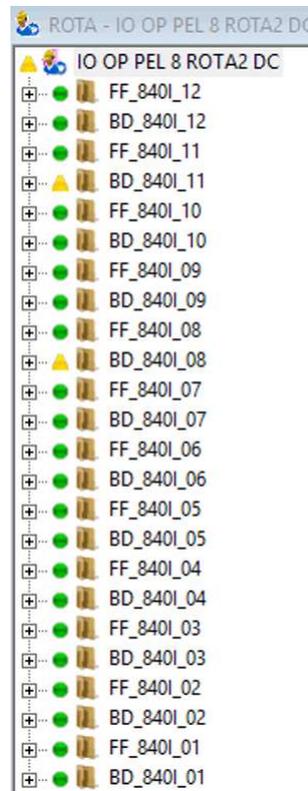
As instâncias com os dados dos pontos de inspeção foram armazenados em uma planilha de Excel[®] e inseridos como dados de entrada do algoritmo implementado.

5.1 Cenários

Para avaliar o algoritmo proposto utilizamos dados reais da usina de pelotização Tubarão, localizada em Vitória, Brasil. Conforme apresentado na Seção 1.1, atualmente nessa unidade existem 78 rotas ativas.

Restringindo o escopo do trabalho, uma rota de inspeção da gerência de operação aplicada ao pelotamento da usina 8, localizada em Vitória - Espírito Santo, Brasil, será analisada. Essa rota será identificada aqui como “*IO OP PEL 8 ROTA2 DC*” e conta com 24 pontos de inspeção. Essa rota é apresentada na Figura 4.

Figura 4 – Rota de inspeção da gerência de operação aplicada ao pelotamento da usina 8



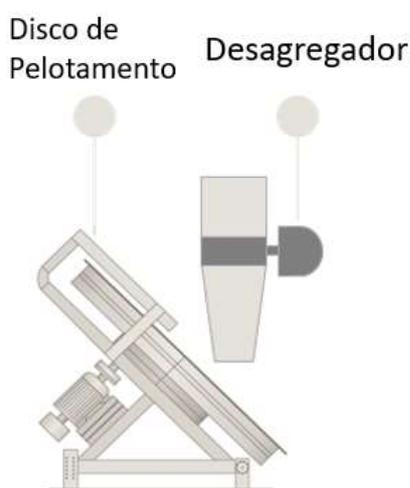
Fonte: Elaboração própria.

A rota abordada no projeto trata-se de uma inspeção operacional a ser realizada

em pontos denominados discos de pelotamento e desagregadores. O disco de pelotamento é o equipamento responsável por realizar transformação das partículas de minério de ferro em pequenos aglomerados denominados pelotas. Os desagregadores são responsáveis por garantir que a massa de minério fornecida ao disco de pelotamento esteja livre de aglomerados previamente formados.

Esses equipamentos foram ilustrados na Figura 5. É importante ressaltar que os 24 equipamentos a serem inspecionados podem ser agrupados em dois conjuntos distintos: o primeiro formado por 12 discos de pelotamento e o segundo formado por 12 desagregadores, que devem se inspecionados de forma semelhante.

Figura 5 – Pontos de inspeção - Disco de pelotamento e desagregador



Fonte: Elaboração própria.

A rota de inspeção em análise possui início na sala do operador da área do pelotamento. E, após inspecionar todos os equipamentos, o operador deve retornar ao local de partida. Habitualmente a rota é realizada a cada turno de 12h, ou seja, 2 vezes ao dia.

Devido às grandes dimensões, uma planilha com a matriz de distância entre os pontos de inspeção é disponibilizada em <<https://encr.pw/MatrizDistancias>>. Essa matriz é composta pelo tempo que o inspetor gasta para se deslocar de um ponto $i \in P$ até qualquer outro ponto dentro do conjunto de pontos de inspeção P . O tempo de deslocamento é dado em segundos.

Buscando tornar o tempo indicado para a rota de inspeção mais próximo ao tempo gasto pelo inspetor em sua execução, é necessário conhecer e incluir o tempo gasto para inspecionar cada um dos pontos de inspeção contidos na rota. Os tempos de inspeção (Tv) são apresentados na Tabela 3, em segundos.

5.2 Resultados

A solução encontrada pelo algoritmo construtivo para a instância em análise é exibida na Figura 6, que ilustra o deslocamento realizado pelo inspetor. A rota de inspeção

Tabela 3 – Tempo de inspeção - Estudo de caso

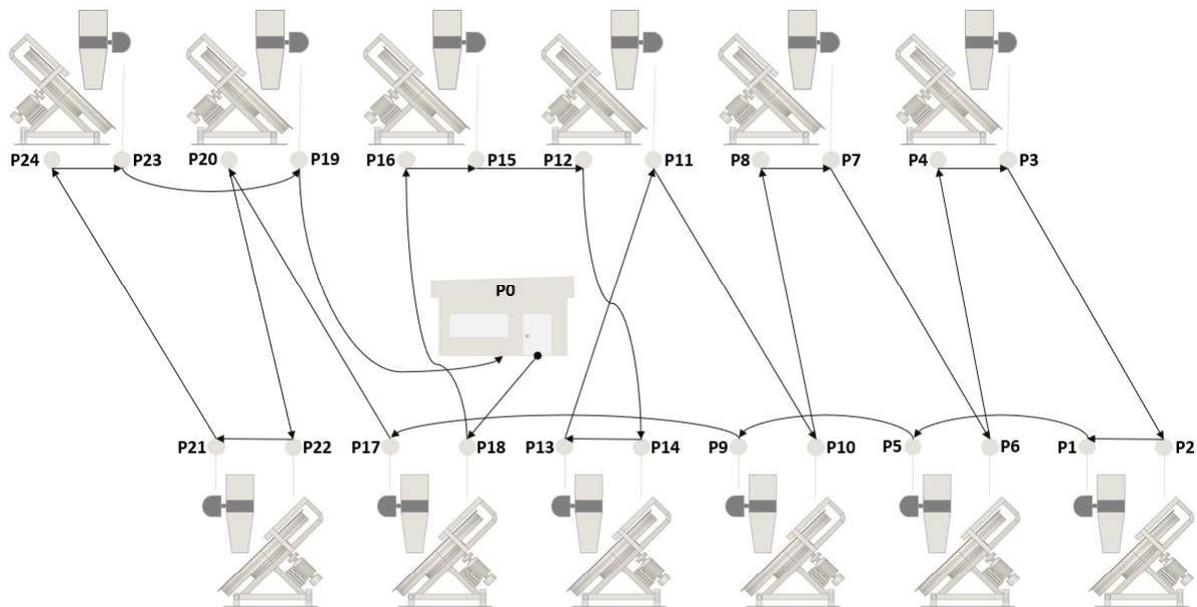
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
Tempo (s)	90	240	90	240	90	240	90	240	90	240	90	240

	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24
Tempo (s)	90	240	90	240	90	240	90	240	90	240	90	240

Fonte: Elaboração própria.

criada cumpre as regras estabelecidas: tem como local de partida e chegada o ponto P0 (sala do operador) e todos os 24 equipamentos são inspecionados, sendo os pontos ímpares os desagregadores e os pontos pares os discos de pelotamento.

Figura 6 – Rota de inspeção criada - Estudo de caso



Fonte: Elaboração própria.

Partindo da sala do operador (P0), o primeiro equipamento inspecionado é o disco de pelotamento localizado no ponto P18, seguido pelo disco de pelotamento localizado em P16 e do desagregador localizado em P15. Após essas inspeções, o operador se desloca até os pontos P12 e P14, onde realiza a inspeção dos discos de pelotamento. Na sequência são inspecionados os desagregadores localizados em P13 e P11, seguidos pelos discos de pelotamento localizados em P10 e P8. O operador então se dirige ao ponto de inspeção P7 (desagregador) e segue para os pontos P6 (disco de pelotamento) e P4 (disco de pelotamento). Após realizar as inspeções, o operador se dirige até o desagregador localizado em P3, realiza a inspeção e se dirige para o disco de pelotamento localizado em P2. A rota continua com a inspeção dos desagregadores localizado em P1, P5, P9 e P17. Em segurança, o operador se desloca para o ponto de inspeção P20 (disco de pelotamento), vai até o ponto P22 (disco de pelotamento) e segue para inspecionar o ponto

P21 (desagregador). Posteriormente são inspecionados o disco de pelotamento localizado em P24 e os desagregadores localizados em P23 e P19. Por fim, o operador retorna para P0 (sala do operador).

Na Figura 6, podemos observar um deslocamento não intuitivo de P18 para P16. Apesar do desagregador localizado em P17 aparentar estar mais perto do ponto P18, devido a uma diferença de nível, é necessário utilizar uma escada para acessá-lo, assim como para acessar os demais desagregadores. Isso implica em um tempo de deslocamento superior para esse percurso, quando comparado ao deslocamento realizado no plano entre discos adjacentes, como de P18 à P16, por exemplo. Esse padrão descrito se repete ao longo da rota.

Por fim, na Tabela 4 é exibida a solução encontrada pelo algoritmo construtivo para a instância em análise.

Tabela 4 – Solução gulosa para rota de inspeção - Estudo de caso

Rota	Custo (segundos)
P0 ⇒ P18 ⇒ P16 ⇒ P15 ⇒ P12 ⇒ P14 ⇒ P13 ⇒ P11 ⇒ P10 ⇒ P8 ⇒ P7 ⇒ P6 ⇒ P4 ⇒ P3 ⇒ P2 ⇒ P1 ⇒ P5 ⇒ P9 ⇒ P17 ⇒ P20 ⇒ P22 ⇒ P21 ⇒ P24 ⇒ P23 ⇒ P19 ⇒ P0	4.462,28

Fonte: Elaboração própria.

Observe que, de acordo com a solução encontrada, a rota de inspeção criada deverá ser realizada em 4.462,28 segundos (aproximadamente 1 hora e 15 minutos). Esse tempo de execução inclui 3960 segundos gastos para realizar as inspeções e 502,28 segundos gastos pelo inspetor para se deslocar de um ponto a outro.

A rota de inspeção atual é executado em 4.441,48 segundos, incluindo 3.960 segundos para inspeções e 481,48 segundos para o deslocamento do inspetor entre pontos de inspeção. Embora a solução proposta demande 20,8 segundos a mais para realizar o deslocamento total, o método proposto possui diversos benefícios, como a geração rápida da rota de inspeção e a eliminação da necessidade de reuniões multidisciplinares para definição do deslocamento da rota, mantendo-o como uma opção atrativa para apoiar a construção da rota.

Além disso, o modelo proposto destaca-se pela capacidade de realizar a criação e revisões rotas existentes em curtos intervalos de tempo. Conforme um equipamento é removido da rota, a matriz de deslocamento pode ser facilmente adaptada e a criação de uma nova rota é executada em poucos segundos. Ao contrário do processo atual, em que a retirada de um equipamento demanda uma nova rodada de conversas multidisciplinares para entender como adaptar a rota existente às novas necessidades. Desta maneira, o modelo proposto também permite que a necessidade de hibernação de um determinado equipamento seja facilmente tratada.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho propõe a elaboração de uma ferramenta capaz de gerar rotas de inspeções de forma automatizada com base no tempo de deslocamento entre os pontos de inspeção, buscando a redução do tempo total gasto pelo inspetor.

As rotas de inspeção são formadas por uma série de equipamentos que devem ser checados periodicamente e indicam o caminho que o inspetor deve percorrer no chão fabril para coleta da informação de ativos. A observação dos ativos, na frequência e abrangência de itens inspecionáveis necessária, muitas vezes esbarra no quantitativo finito de recursos de mão de obra. Portanto, há a necessidade de que o recurso humano seja utilizado de maneira racional de forma a atender as necessidades de inspeção de maneira otimizada.

Atualmente, nas unidades da Vale S.A., as rotas operacionais de inspeção são criadas de forma manual e intuitiva, a partir do conhecimento técnico e da experiência dos profissionais da área de manutenção e operação.

A ferramenta proposta facilitará a definição de novas rotas de inspeção, assim como a atualização das rotas já existentes em casos de parada de algum equipamento para manutenção, por exemplo. Além disso, a ferramenta ainda poderá ser aplicada às rotas já existentes, buscando otimizar os tempos dedicados às inspeções.

Para avaliar o algoritmo proposto um estudo de caso utilizando dados reais da usina de pelotização Tubarão, localizada em Vitória, foi realizado. Buscando tornar o tempo indicado para a rota de inspeção mais próximo ao tempo gasto pelo inspetor em sua execução, o algoritmo proposto considerou o tempo gasto para inspecionar cada um dos pontos de inspeção contidos na rota.

Os resultados obtidos validam a ferramenta proposta com uma ferramenta de apoio à criação de rotas de inspeção, buscando reduzir o tempo de deslocamento do inspetor e trazendo uma estimativa mais realista do tempo total dedicado à rotina de inspeção.

Comprovada a eficiência da ferramenta proposta, o potencial de aplicação da ferramentas em outras rotas e unidades operacionais mostra-se promissor, uma vez que a estrutura das rotas operacionais e das especialidades de manutenção são muito semelhantes.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No contexto deste estudo, foram identificadas diversas direções promissoras para pesquisas futuras na criação de rotas de inspeção otimizadas. Como trabalhos futuros, sugere-se os seguintes estudos:

1. Validar a solução obtida pela heurística construtiva proposta em campo e comparar com as rotas existentes;
2. Avaliar outros métodos para a obtenção da distância ou tempo de deslocamento entre os pontos de inspeção, como a planta das instalações, KPIs ou utilização de coordenadas geográficas dos pontos de inspeção;
3. Implementar uma metaheurística capaz de obter boas soluções para o problema;
4. Aplicar a ferramenta proposta em novas rotas, na adaptação de rotas já existentes e também em rotas regulares, buscando a redução do deslocamento;
5. Estender a implementação da ferramenta proposta para outras unidades operacionais da Vale S.A., considerando a semelhança na estrutura das rotas operacionais;
6. Investigar abordagens de otimização multicritério para considerar não apenas o tempo de deslocamento, como também outros fatores relevantes: custos, prioridades de inspeção e recursos disponíveis;
7. Explorar a integração de dados em tempo real, como informações de sensores e condições operacionais atuais, buscando adaptar dinamicamente as rotas de inspeção à medida que o cenário operacional se modifica.

REFERÊNCIAS

AMBROSIO, J. P. **Técnicas de inspeção em correias transportadoras por manutenção de integridade estrutural: o caso de uma indústria de mineração**. Ouro Preto: Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Ouro Preto, 2022. Citado na página 19.

FENATO, A. J. **Um Modelo de Caixeiro Viajante Generalizado para Minimizar o Tempo de Preparação de uma Máquina Tubeteira**. Londrina: Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica - Universidade Estadual de Londrina, 2008. Citado na página 20.

FERREIRA, M. d. S. **Proposta de roteirização para o transporte público universitário de Araguaína, TO**. Araguaína: Trabalho de conclusão de curso em Tecnologia em Logística - Universidade Federal do Tocantins, 2023. Citado na página 21.

GUSSON, D. **Plataforma para elaboração de roteiros turísticos otimizados por meio de heurísticas do Caixeiro Viajante com enfoque no Agroturismo**. Cachoeiro de Itapemirim: Trabalho de conclusão de curso em Sistemas de Informação - Instituto Federal do Espírito Santo, 2023. Citado na página 21.

LUCENA, R. **Algoritmos Caixeiro Viajante**. 2022. Disponível em: <<https://blog.renatolucena.net/post/algoritmos-caixeiro-viajante>>. Citado na página 20.

OLIVEIRA, A. F. M. de A. **Extensões do Problema do Caixeiro Viajante**. 2015. Dissertação (Mestrado em Matemática) — Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2015. Citado na página 24.

OLIVEIRA, R. de; OLIVEIRA, M. A. de; SANTOS, G. G. dos; TEIXEIRA, M. C.; BARTH, V. B. de O. Ambientes virtuais para o ensino de inteligência artificial. **Profiscientia**, n. 12, p. 104–125, 2019. Citado na página 25.

PIZZOLATO, N. D.; VÁSQUEZ, S. G. G.; D'ÁVILA, S. L. G. O problema do seqüenciamento da produção em uma indústria química: avaliação de uma aplicação real. **Gestão & Produção**, SciELO Brasil, v. 6, p. 16–29, 1999. Citado na página 20.

RESENDE, C. B. de; SCARPEL, R. A. Aplicação de um método de geração de agrupamentos, baseado no problema do caixeiro viajante, para segmentação de mercado. **Revista Eletrônica Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento**, v. 3, n. 3, p. 186–200, 2011. Citado na página 20.

REZENDE, E. C.; GOMES, D. L. Análise dos resultados obtidos com aplicação de princípios da gestão de ativos no processo de inspeção de equipamentos em uma pelotização. In: . Recife: **Anais do IV Simpósio de Engenharia de Produção (SIMEP)**, 2016. p. 1–13. Citado na página 19.

ROCHA, A.; DORINI, L. B. **Algoritmos gulosos: definições e aplicações**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2004. Notas de Aula. Citado na página 25.

SILVA, F. A. M. da. **Estudo de formulações do problema do caixeiro viajante e sequenciamento de tarefas e suas aplicações em um problema prático de produção na indústria de pães e bolos.** Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campinas, 2019. Citado na página 21.

SILVA, V. R. d.; BARCELOS, B. F. Aplicação do problema do caixeiro viajante para otimizar rota de entrega em uma distribuidora. **Faculdade Doctum de João Monlevade**, 2019. Citado na página 21.

TELES, C. D. **Desenvolvimento de um método para o planejamento da inspeção de equipamentos.** Porto Alegre: Dissertação submetida o programa de pós graduação em Engenharia de Produção - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007. Citado na página 19.