

CONSTRUÇÃO ITERATIVA DE ROTAS COM CAPTAÇÃO DE PONTOS EM SISTEMAS DE COBERTURA GEOGRÁFICA

Márcio André Araújo Gonçalves

Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) - Programa de Engenharia de Produção
Av. Horácio Macedo - Cidade Universitária, Rio de Janeiro – RJ (Bloco F)
marcio.goncalves@pep.ufrj.br

Virgílio José Martins Ferreira Filho

Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) - Programa de Engenharia de Produção
Av. Horácio Macedo - Cidade Universitária, Rio de Janeiro – RJ (Bloco F)
virgilio@coppe.ufrj.br

RESUMO

Este artigo apresenta um modelo iterativo para geração de rotas a partir da seleção de pontos iniciais, usando a abordagem do Problema do Caixeiro Viajante, de forma a garantir a cobertura de uma área geográfica, com a captura de pontos pelas rotas, em função de um raio de cobertura. Tal modelo consiste em determinar rotas em áreas geográficas onde não existem pontos a serem visitados, sendo necessário, dessa forma, a geração desses pontos, denominados *waypoints*, para que o modelo apresente uma rota ótima a ser realizada. O trabalho apresenta uma metodologia inovadora para otimização de varreduras marítimas, com aplicação em atividades de exploração do leito submarino, levantamentos batimétricos, localização de objetos submersos e na identificação de possíveis ameaças submarinas, contribuindo para segurança da navegação marítima.

PALAVRAS CHAVE. Problema do caixeiro viajante, Problema de Cobertura, Varredura.

Tópicos: (OC) Otimização Combinatória, (PM) Programação Matemática, (D&SP) – PO em Defesa e Segurança Pública.

ABSTRACT

This article presents an iterative model for route generation based on the selection of initial points, using the Traveling Salesman Problem approach. The goal is to ensure coverage of a geographical area by capturing points along the routes within a specified coverage radius. This model determines routes in geographical areas where no predefined points exist for visitation. Consequently, it involves generating additional points, referred to as waypoints, to optimize the resulting route. The work introduces an innovative methodology for optimizing maritime surveys, applicable to activities such as exploring the seabed, conducting bathymetric surveys, locating submerged objects and identifying potential underwater threats, thereby enhancing maritime safety.

KEYWORDS. Traveling Salesman Problem. Coverage Problem. Sweep.

Paper topics: (OC) Combinatorial Optimization, (PM) Mathematical Programming, (D&SP) OR in Defense and Public Safety.

1. Introdução

O território marítimo brasileiro, conhecido como Amazônia Azul, abrange uma área de cerca de 4,5 milhões de quilômetros quadrados, equivalente a mais da metade da área do Brasil continental. De acordo com a COMISSÃO INTERMINISTERIAL PARA OS RECURSOS DO MAR (CIRM), um estudo sobre o limite exterior da Plataforma Continental Brasileira foi encaminhado à Organização das Nações Unidas (ONU), visando a ampliação da Amazônia Azul, totalizando 5,7 milhões de km² de área marítima. Essa região possui uma grande importância estratégica, econômica e ambiental para o país, pois nela se encontram recursos naturais, energéticos e biológicos de alto valor [Abreu 2007]. Conforme a LEI Nº 8.617, DE 4 DE JANEIRO DE 1993, que dispõe sobre o mar territorial e a zona econômica exclusiva e a Plataforma Continental brasileiros, a exploração e a conservação desses recursos exigem uma atuação efetiva do Estado brasileiro, que deve garantir a soberania nacional e a sustentabilidade da Zona Econômica Exclusiva (ZEE), onde o Brasil tem direitos exclusivos sobre as atividades econômicas realizadas no mar.

Para garantir a proteção e o uso racional da Amazônia Azul, o Brasil precisa contar com uma presença naval efetiva e permanente nas suas águas jurisdicionais. De acordo com o DECRETO Nº 5.129, DE 6 DE JULHO DE 2004, que dispõe sobre a patrulha naval, o patrulhamento naval é um instrumento indispensável para a vigilância contínua e a resposta rápida a eventuais ameaças nas águas jurisdicionais brasileiras. Essa atividade não só reforça a segurança nacional, mas também contribui para a conservação dos ecossistemas marinhos, ao detectar e neutralizar ameaças subaquáticas, como poluição, pesca ilegal e mineração clandestina.

Nesse sentido, o desenvolvimento tecnológico traz soluções inovadoras para os desafios subaquáticos, como os Veículos Autônomos Subaquáticos (*Autonomous Underwater Vehicles - AUVs*), que são capazes de realizar missões militares, comerciais e científicas sem intervenção humana [Souza 2018]. Tal categoria de veículos contribuirá, sobremaneira, para o desenvolvimento de diversas aplicações marítimas.

O uso de veículos autônomos subaquáticos (AUVs) representa uma abordagem inovadora, permitindo a cobertura eficiente de áreas remotas e de difícil acesso. Segundo um estudo de [Bellingham 2001], os AUVs têm a capacidade de realizar missões de varredura de forma autônoma, coletando dados valiosos e reduzindo a dependência de embarcações tripuladas.

2. Descrição do Problema

A condução eficiente de operações de varredura submarina é crucial para a segurança e estabilidade de áreas marítimas estratégicas. Essas atividades, realizadas por meio de equipamentos especializados, seguem rotas predefinidas com base em doutrinas específicas. No entanto, um desafio significativo emerge na falta de precisão no controle da distância percorrida durante essas missões, prejudicando a assertividade na cobertura das áreas demarcadas.

A ausência de mecanismos precisos para avaliar o percentual de varredura dentro das coordenadas geográficas designadas agrava a complexidade operacional. A falta de dados confiáveis compromete a eficácia global das missões, deixando áreas críticas suscetíveis a possíveis ameaças não detectadas. Esse dilema também impacta a capacidade de análise pós-missão, impedindo uma compreensão abrangente do desempenho e dificultando melhorias contínuas nas estratégias de varredura.

Diante desse cenário desafiador, a oportunidade de melhoria reside no desenvolvimento de um sistema avançado de monitoramento e avaliação. A integração de tecnologias de rastreamento preciso da distância percorrida e análise detalhada do percentual de varredura em áreas demarcadas é essencial. A consecução desse domínio não apenas aprimorará a eficácia das operações de varredura submarina, mas também abrirá caminho para o aumento sustentável no número de missões, impulsionado por dados confiáveis e uma compreensão mais profunda das operações.

Este trabalho propõe o uso de um método interativo em que se calcula a cobertura a partir da rota obtida para utilização do equipamento de varredura, considerando um aumento sucessivo

na seleção de pontos visitados, ou *waypoints*, até o atingimento do nível mínimo de cobertura definido. Para garantir a eficiência das rotas, as mesmas são obtidas via solução de um problema do caixeiro viajante.

Como fator de diferenciação dos modelos encontrados na literatura, o modelo proposto aborda o conceito de captura de pontos dentro de uma área geográfica, sendo composto por captura de pontos fixo, a partir do posicionamento estratégico dos meios navais dispostos na área, como também pela captura de pontos pelas rotas definidas no modelo de roteamento, desde que dentro do raio definido pelo equipamento de detecção, garantindo, assim, um determinado patamar de atendimento ao serviço de varredura da área.

3. Referencial Teórico

3.1. Atividade de Varredura Submarina

A varredura submarina, uma atividade metodicamente conduzida, representa um campo essencial para diversas aplicações marítimas. Além de sua participação crucial em operações de busca e salvamento, a varredura submarina desempenha um papel fundamental na exploração de recursos marinhos e na vigilância submarina. A literatura destaca a relevância dessas operações para a segurança marítima e a importância de aprimorar constantemente as técnicas e tecnologias associadas.

No contexto da exploração de recursos naturais, a varredura submarina desempenha um papel crucial na identificação e mapeamento de depósitos minerais no fundo do mar. De acordo com [Galvão et al. 2008], a capacidade de detectar e avaliar os recursos submarinos permite a gestão sustentável desses recursos, contribuindo para o desenvolvimento econômico e a preservação ambiental.

A localização de objetos submersos, como destroços de embarcações, é outra aplicação vital da varredura submarina. A atividade é essencial em operações de busca e salvamento, onde a rapidez e precisão são fundamentais. Estudos como o de [Rodrigues et al. 2021] enfatizam a necessidade de técnicas avançadas para otimizar a cobertura de áreas extensas, possibilitando, em casos de emergências, uma resposta bem mais eficiente.

No âmbito da segurança marítima, a varredura submarina desempenha um papel preventivo e estratégico. A identificação de possíveis ameaças submersas, como minas navais, é crucial para garantir a segurança de rotas marítimas. [Gonçalves 2021] destaca a importância dos navios varredores, e novas tecnologias como os veículos autônomos, equipados com tecnologias avançadas de sonar na detecção precoce de ameaças, contribuindo para a defesa eficaz de áreas estratégicas.

3.2. Cobertura de Área Geográfica

O presente trabalho apresenta um modelo de cobertura de área geográfica, delimitada por pontos fornecidos de latitude x longitude, onde não existem pontos a serem definidos como “*waypoints*” para solução do problema do caixeiro viajante. Ou seja, trata-se de cobrir uma área marítima “limpa” (Figura 1), onde qualquer elemento que nela se encontre, passa a ser considerado restrição à navegação ou simplesmente, um obstáculo a ser evitado.

Figura 1 – Delimitação de uma área geográfica.



Fonte: Elaborado pelo Autor

3.3. Problema do Caixeiro Viajante (PCV)

O Problema do Caixeiro Viajante (*Traveling Salesman Problem* - TSP) destaca-se como um dos problemas mais proeminentes e estudados em otimização combinatória. Sua formulação clássica consiste em encontrar o caminho mais curto que visita cada ponto em um conjunto exatamente uma vez, retornando ao ponto de origem. Essa problemática, apesar de sua aparente simplicidade, tem implicações significativas no roteamento de veículos, desencadeando uma vasta gama de estudos e pesquisas na busca por soluções eficientes.

O TSP é intrinsecamente ligado à otimização de rotas de veículos, onde a busca pelo caminho mais curto tem implicações diretas na redução de custos operacionais e no aumento da eficiência logística. [Lawler et al. 1985] ressaltam que a resolução eficiente do TSP é fundamental para a tomada de decisões estratégicas no roteamento, impactando diretamente a economia de recursos e a satisfação do cliente.

A complexidade computacional do TSP, classificado como um problema NP-completo, desafia os pesquisadores a desenvolverem algoritmos eficientes para encontrar soluções ótimas ou aproximadas. Diversas abordagens, como a heurística do vizinho mais próximo e algoritmos genéticos, têm sido exploradas para enfrentar essa complexidade e encontrar soluções viáveis em tempo hábil.

Dado um grafo $G = (N, M)$ onde $N = \{1, \dots, n\}$ é um conjunto de vértices ou localidades de uma rede e $M = \{1, \dots, m\}$ um conjunto de arestas ou estradas que ligam as localidades da rede, o problema consiste em definir a rota de menor custo que ligue todas as localidades, considerando que o caixeiro motorista do veículo visite cada localidade uma única vez. A cada aresta $(i, j) \in M$ está associado um custo, c_{ij} , que representa o custo do deslocamento da localidade i para a j , e uma variável binária x_{ij} , que representa a utilização da aresta (i, j) pelo caixeiro e terá valor 1 se a aresta (i, j) é utilizada e 0, caso contrário. Com base nestas informações, tem-se o modelo matemático clássico do TSP, proposto por [Dantzig et al. 1954].

Minimizar:

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in \mathcal{N}} c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in \mathcal{N}} x_{ij} = 1 \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{N}} x_{ij} = 1 \quad j = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in \mathcal{N} \setminus S} x_{ij} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subset N, S \neq \emptyset \quad (4)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad i, j = 1, \dots, n, i \neq j \quad (5)$$

A função objetivo expressa na equação (1) realiza o cálculo do custo do percurso do caixeiro. As restrições (2) e (3) garantem que toda localidade da rede, o caixeiro chega apenas uma vez na localidade e sai apenas uma vez da localidade. A restrição (4) assegura a formação de uma única rota que visita todas as localidades da rede uma única vez.

O Problema do Caixeiro Viajante continua a ser uma pedra angular na otimização de rotas de veículos, desafiando a comunidade científica a desenvolver abordagens inovadoras e adaptáveis às demandas emergentes da logística moderna.

4. Metodologia

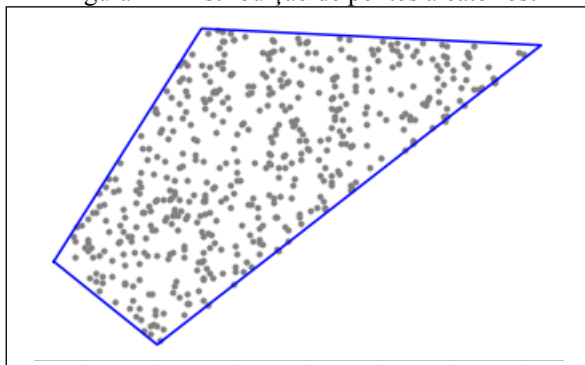
A metodologia proposta neste trabalho visa aprimorar a realização da atividade de varredura, estabelecendo uma abordagem estruturada para a delimitação da área geográfica, e a seleção eficiente de pontos de interesse a serem utilizados no processo de roteamento. Inicialmente, foram empregadas duas abordagens distintas para a seleção dos pontos iniciais à área geográfica delimitada.

4.1. Atribuição de Pontos Iniciais à Área Geográfica

Na primeira abordagem, os pontos iniciais são atribuídos de forma aleatória dentro dessa área. Esse método proporciona uma distribuição diversificada de pontos iniciais, garantindo uma cobertura abrangente da região em questão (Figura 2).

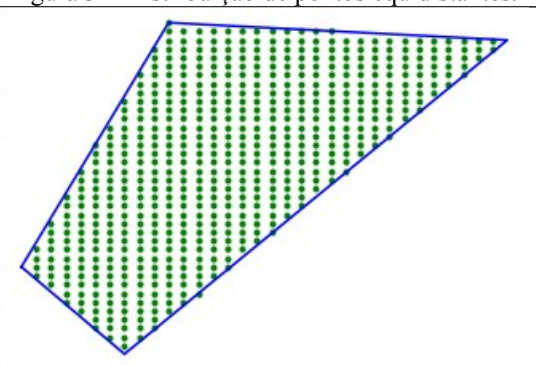
Na segunda abordagem, a área é subdividida em uma grade com espaçamento igualmente distribuído entre os pontos iniciais. Essa estratégia busca otimizar a eficiência na varredura, assegurando uma cobertura sistemática e completa da região (Figura 3).

Figura 2 – Distribuição de pontos aleatórios.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 3 – Distribuição de pontos equidistantes.



Fonte: Elaborado pelo Autor

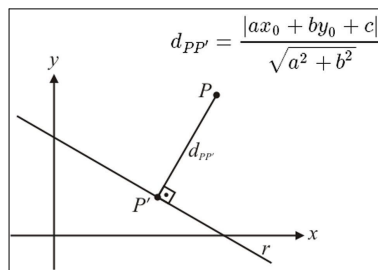
4.2. A Processo de Captura de Pontos

O presente trabalho utiliza o conceito de distância do ponto a reta como forma de identificar pontos que estejam a uma distância \underline{d} de qualquer segmento de reta \underline{r} gerado pelo roteamento. Tal conceito pode ser mais bem visualizado pela Figura 4, onde, dada a equação geral da reta $r: ax_o + by_o + c$, e o ponto $P(x_o, y_o)$, temos:

- \underline{a} é o coeficiente angular da reta ou a inclinação da reta;
- \underline{b} o coeficiente linear da reta ou o sentido da reta (crescente ou decrescente);
- \underline{c} é o termo constante ou a distância vertical da reta em relação à origem; e
- (x_o, y_o) são as coordenadas do ponto P .

Como processo de captura de pontos pelas rotas definidas como solução do modelo de PCV, os pontos selecionados como *waypoints* e os pontos captados pelas rotas, são desconsiderados da próxima rodada de escolhas, quando do não atingimento do percentual de cobertura mínimo.

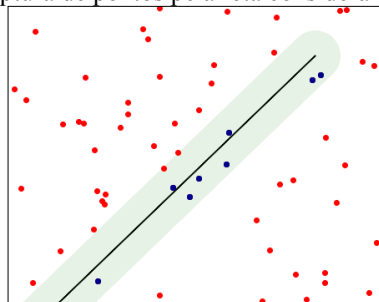
Figura 4 – Representação gráfica e formulação distância do ponto a reta.



Fonte: [Kilhian 2013]

A aplicação desta fórmula permite a identificação de pontos que estão a uma distância específica de uma reta, formando uma região similar a uma “faixa” ou “corredor” em torno da reta. Esta região é delimitada por duas retas paralelas à reta original da solução do roteamento, cada uma distante d de ambos os lados, conforme mostra a Figura 5.

Figura 5 – Captura de pontos pela reta considerando distância d .



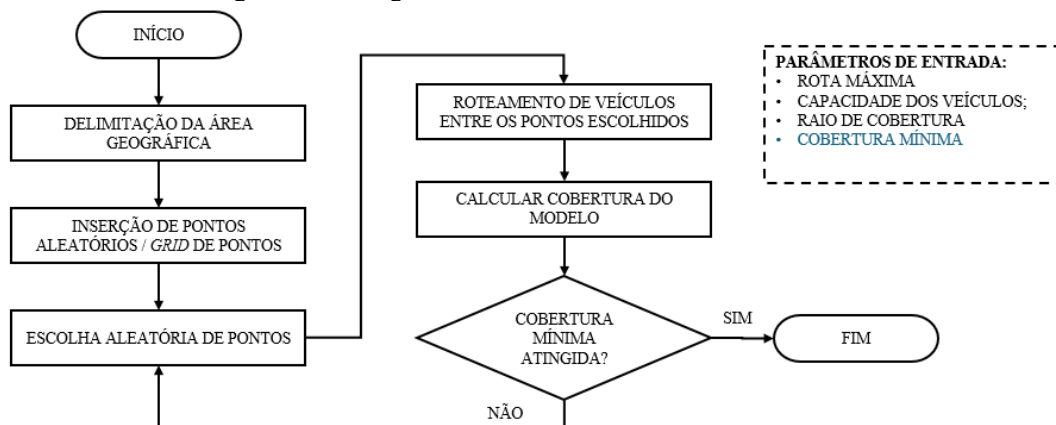
Fonte: Elaborado pelo Autor

5. O Método Iterativo de Roteamento com Cobertura de Área Geográfica

O roteamento iterativo, proposto no trabalho, trabalha com a seleção de pontos de forma gradativa, onde se espera o retorno de uma rota e o cálculo da cobertura de pontos iniciais, para, a partir de então, uma nova seleção de “waypoint”, dentro dos pontos iniciais do modelo, desconsiderando os pontos já captados pelas rotas anteriores, e assim sucessivamente, até o atingimento do percentual de cobertura mínimo definido (Figura 6).

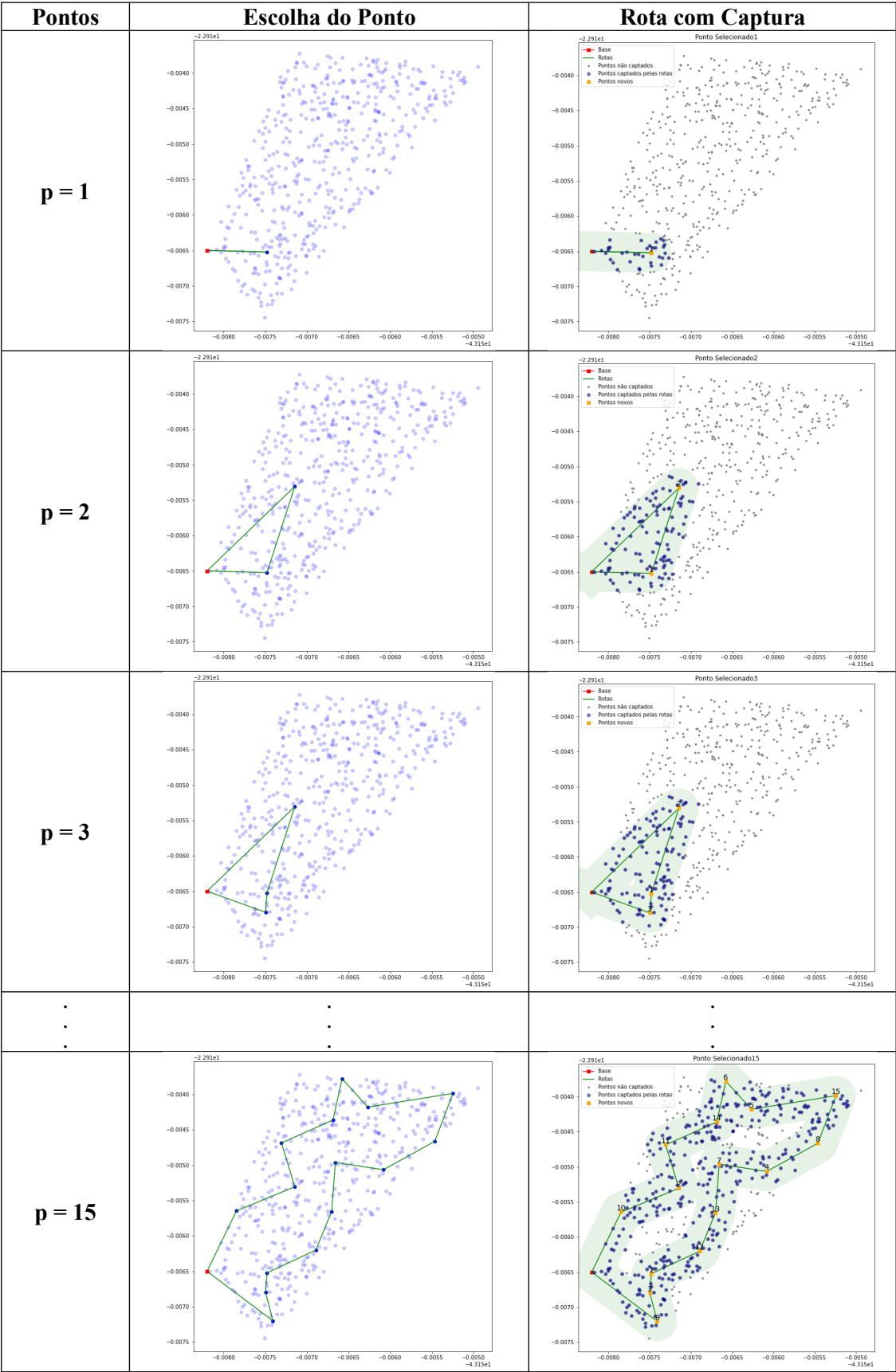
A cada iteração, o modelo recalcula a rota utilizando o modelo do PCV, apresentado no item 3.3 deste trabalho, em função de uma nova configuração geográfica dos pontos selecionados (Figura 7).

Figura 6 – Fluxograma do modelo de Roteamento Iterativo.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 7 – Modelo de Rotas Iterativas com Pontos Aleatórios (Seleção de Pontos)



Fonte: Elaborado pelo Autor

Um aspecto observado no modelo exposto neste trabalho diz respeito à complexidade computacional a ser encontrada, visto que dependendo da área a ser explorada, e do raio de cobertura do equipamento a ser utilizado, o número de “waypoints” a serem escolhidos para cobertura da área aumentará significativamente, o que tornará o problema exponencialmente mais complexo.

6. Resultados Computacionais

Para avaliação do modelo, foram realizadas 9 análises com parâmetros variando raio de cobertura e percentual de cobertura mínima a ser atingido (Tabela 1). Foi implementado utilizando o auxílio da linguagem *Python®*, utilizando o *solver Gurobi Optimizer version 9.5.2 build v9.5.2rc0*, para resolução do modelo matemático do PCV, e executados em equipado com processador *11th Gen Intel(R) Core(TM) i5-1135G7 @ 2.40GHz 2.42 GHz*, 8 GB de memória RAM, sob o sistema operacional *Microsoft Windows 10 de 64 Bits*.

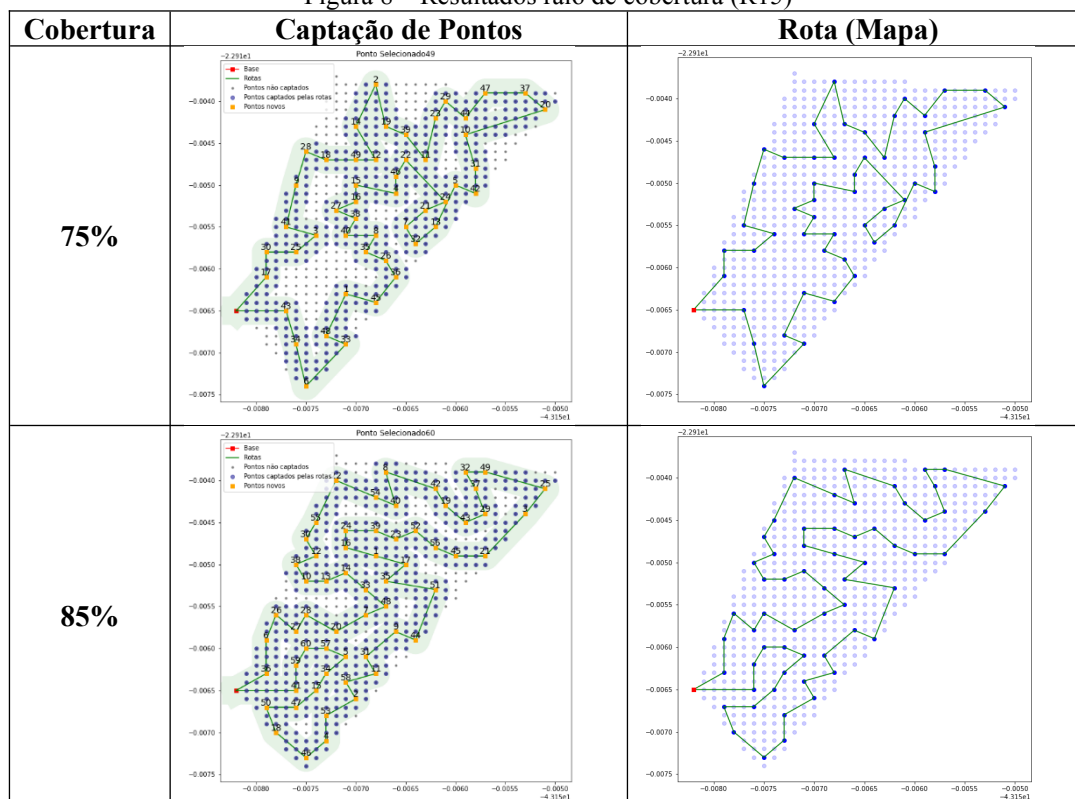
Tabela 1 – Parâmetros simulação

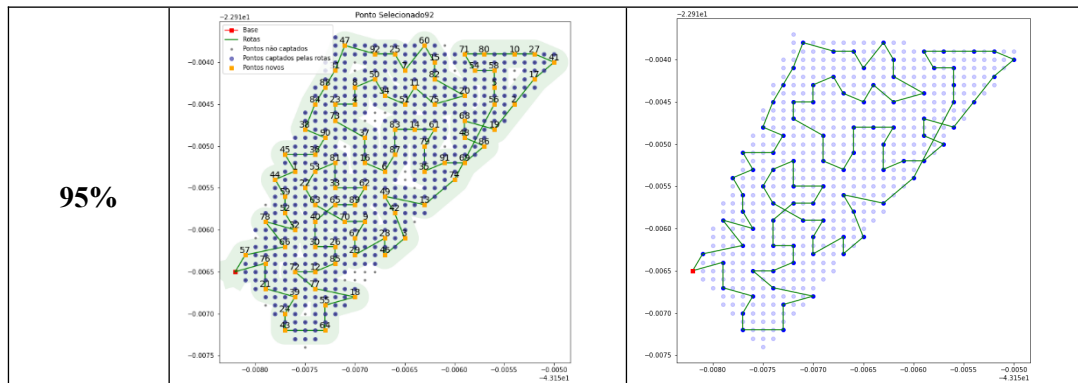
Raio de cobertura	% Cobertura mínimo
15, 20 e 25	75, 85, 95

Fonte: Elaborado pelo Autor

Os resultados apresentados, referem-se ao cenário com pontos equidistantes:

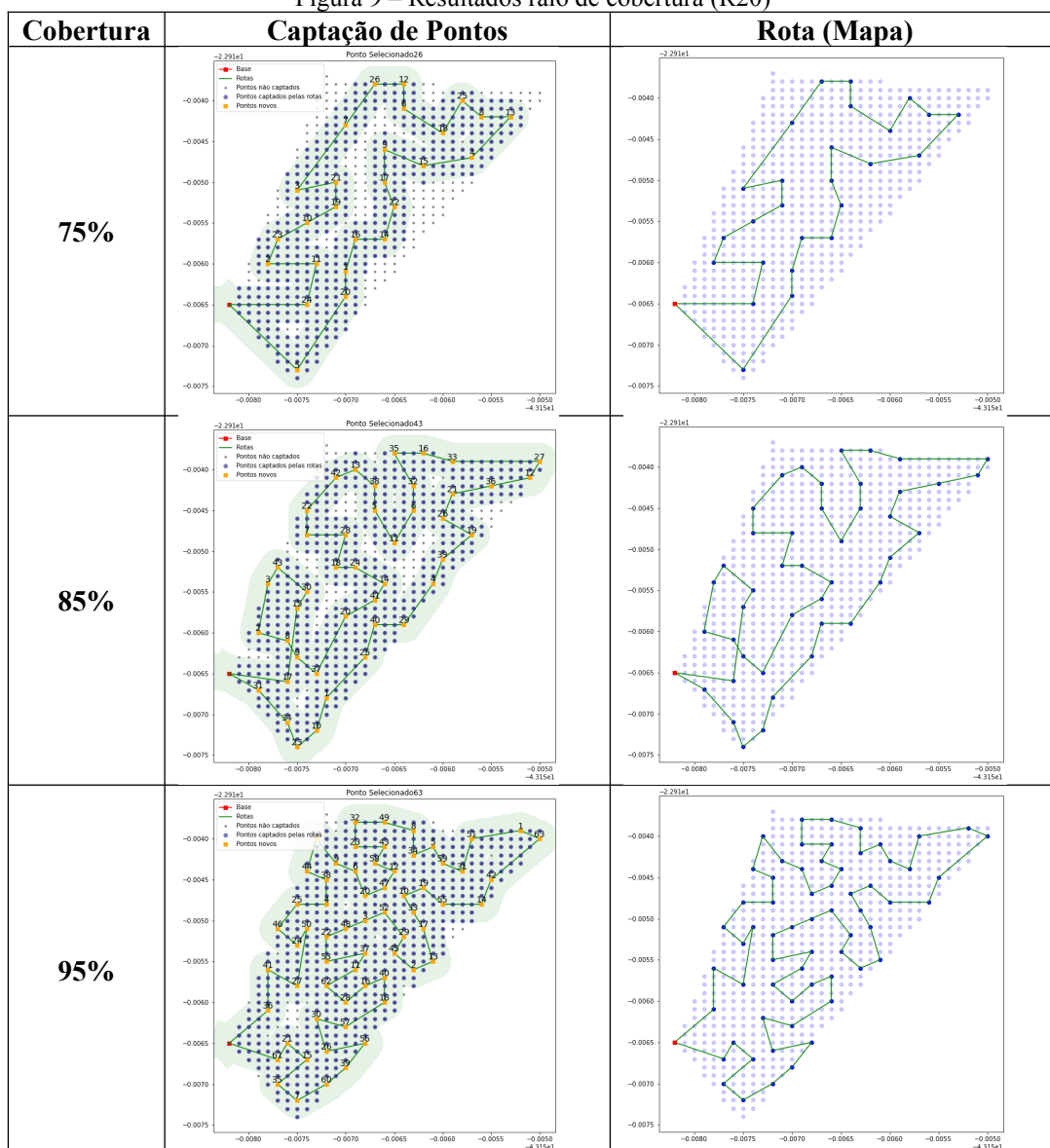
Figura 8 – Resultados raio de cobertura (R15)





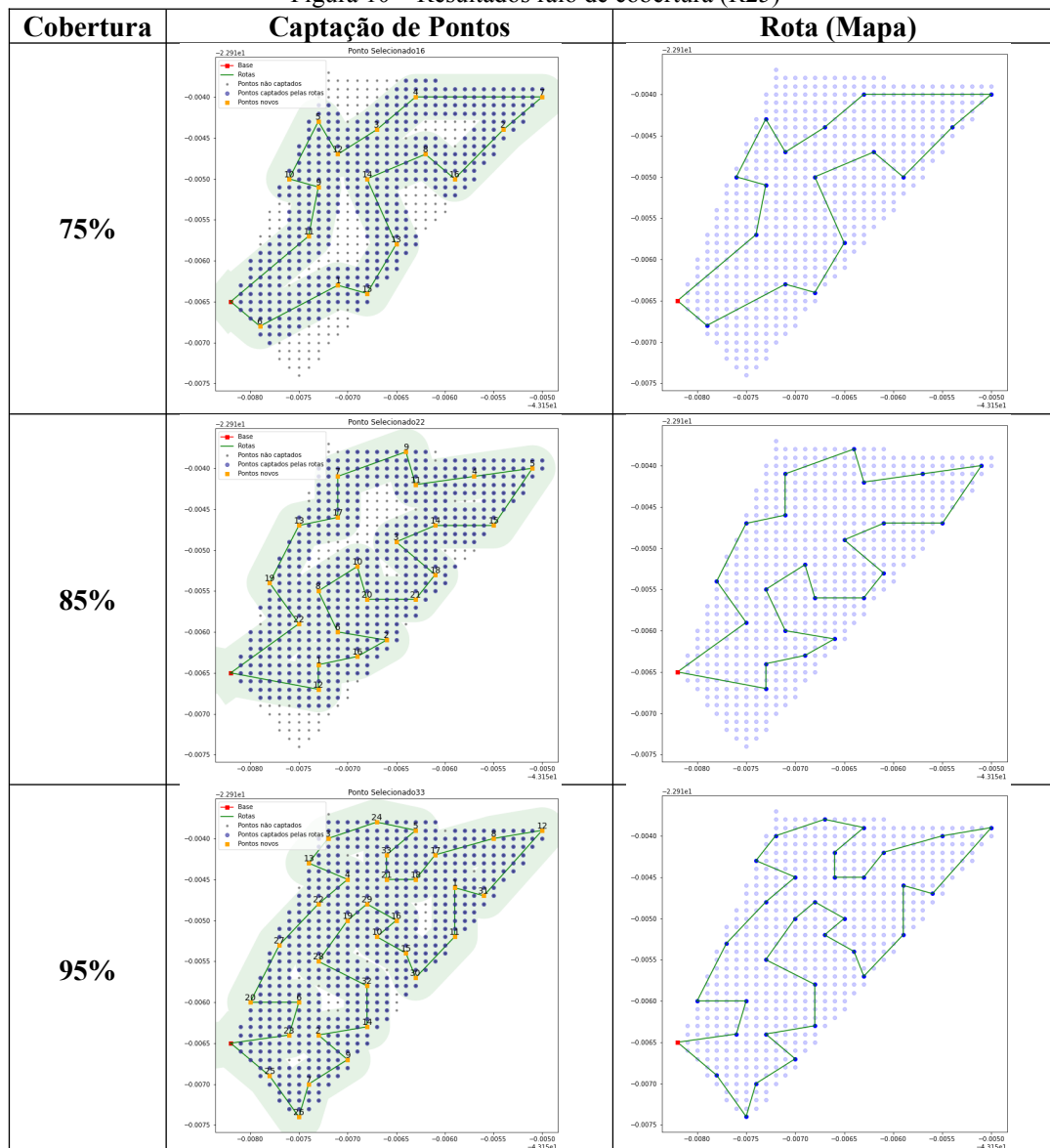
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 9 – Resultados raio de cobertura (R20)



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 10 – Resultados raio de cobertura (R25)



Fonte: Elaborado pelo Autor

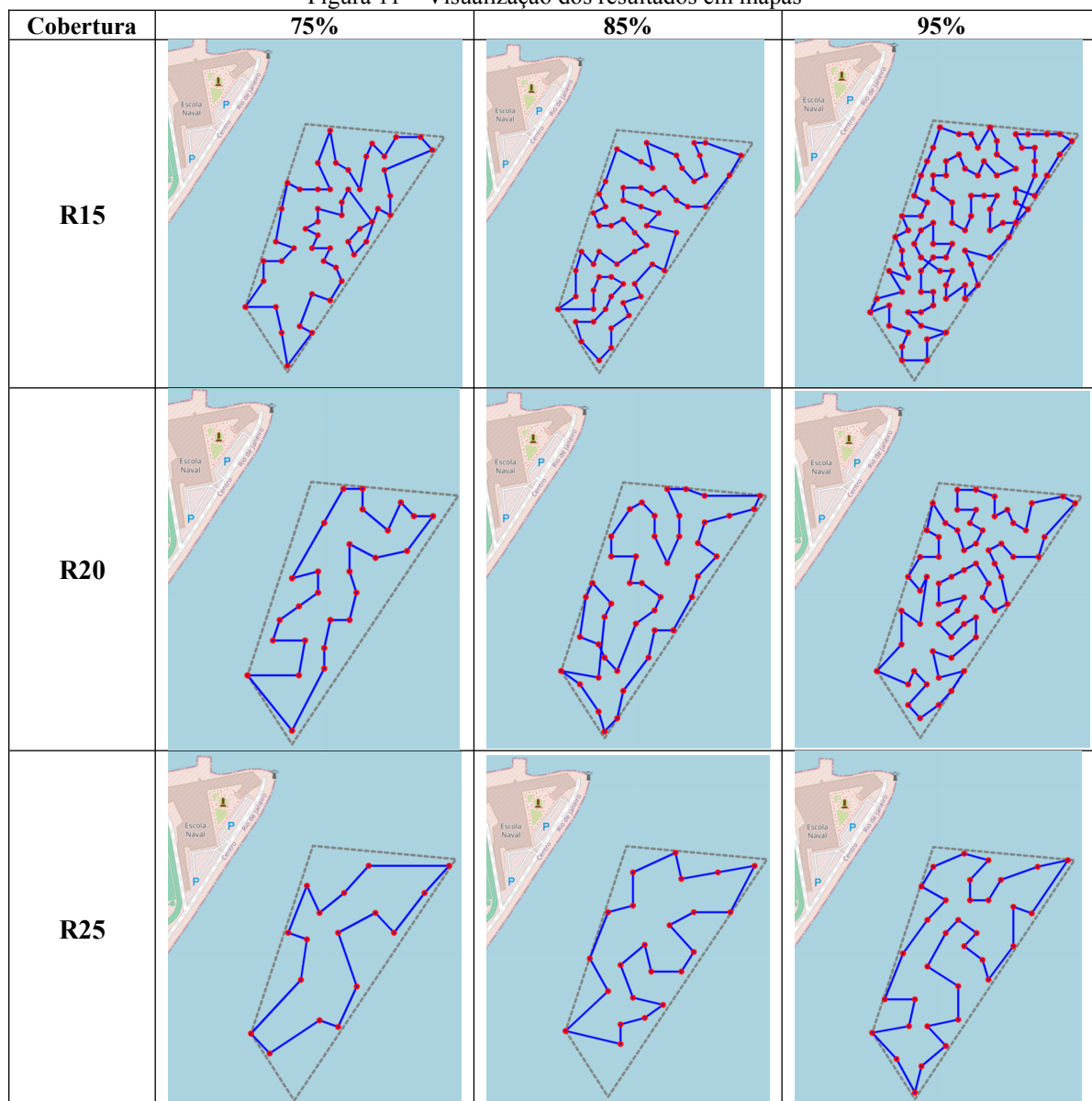
Com base nos resultados, pode-se avaliar comparativamente o impacto no incremento de unidades de raio de cobertura, conforme apresentado na Tabela 2:

Tabela 2 – Análise comparativa dos incrementos nos resultados por unidade de parâmetro

Parâmetros	Cobertura 75%			Cobertura 85%			Cobertura 95%		
	R15	R20	R25	R15	R20	R25	R15	R20	R25
Nº Pontos	49	26	16	60	43	22	92	63	33
Tempo Computacional (s)	166,6	30,3	11,5	479,8	94,6	54,9	1911	678,1	146,2
Distância Acumulada (km)	1,9	1,4	1,2	2,05	1,89	1,36	2,68	2,21	1,76

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 11 – Visualização dos resultados em mapas



Fonte: Elaborado pelo Autor

7. Conclusão

Em operações de varredura submarina, a eficiência da operação pode garantir o êxito nas atividades de busca e salvamento, bem como da agilidade no que tange a tempos de respostas em incidentes hídricos.

Através dos resultados, percebeu-se que qualquer incremento na unidade de medida dos raios de cobertura, bem como na variação no nível de cobertura mínimo exigido, há uma variação considerável no número de pontos a serem utilizados no roteamento para efetuar a cobertura total da região em estudo, o que impulsiona uma elevação na complexidade do modelo.

Um dos grandes desafios em utilizar o modelo proposto é o tempo computacional para resolução do problema, em alguns casos, dependendo do tamanho do raio de cobertura em relação a área a ser explorada, não será simples chegar à solução ótima em um curto espaço de tempo. Por isso para trabalhos futuros, pretende-se utilizar heurísticas clássicas para a resolução do problema do caixeiro viajante com números elevados de pontos, como por exemplo, a Heurística do Vizinho mais Próximo (*Nearest Neighbor Heuristic*) e a Heurística GRASP

aplicada ao modelo de PCV. Por fim, pretende-se realizar tal estudo em outras regiões delimitadas.

Referências

Abreu, G. M. (2007). A Amazônia Azul: o mar que nos pertence. *Cadernos de Estudos Estratégicos*, n. 6, p. 17-66.

Bellingham, J. (2001). *Autonomous underwater vehicles* (AUVs). *Sea*, v. 7, n. 915, p. 980. DOI: 10.1006/rwos.2001.0303.

BRASIL. Lei nº 8.617, de 4 de janeiro de 1993. Dispõe sobre o mar territorial, a zona contígua, a zona econômica exclusiva e a Plataforma Continental brasileiros, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L8617.htm>. Acesso em: 03 mai. 2024.

BRASIL. Decreto nº 5.129, de 6 de julho de 2004. Dispõe sobre a Patrulha Naval e dá Outras Providências. Brasília, 2004a. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d5129.htm>. Acesso em: 03 mai. 2024.

Dantzig, G., Fulkerson, R., Johnson, S. (1954). *Solution of a large-scale traveling-salesman problem*. *Journal of the operations research society of America*, v. 2, n. 4, p. 393-410.

Galvão, A. C. F. et al. (2008). Mar e Ambientes Costeiros. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Brasília/DF. Disponível em: <https://repositorio.mcti.gov.br/bitstream/mctic/5320/1/2007_mar_e_ambientes_costeiros.pdf>. Acesso em: 22 mai. 2024.

Gonçalves, F. B. (2021). Guerra de minas. *Revista Passadiço*, v. 34, n. 41, p. 80-80.

Kilhian, K. (2013). Web page. <https://www.obaricentrodamente.com/2013/06/distancia-de-um-ponto-uma-reta.html/>. Acessado: 2024-05-16.

Lawler, E. L., Lenstra, J. K., Rinnooy Kan, A. H. G., Shmoys, D. B. (1985). *The Traveling Salesman Problem: A Guided Tour of Combinatorial Optimization*. Wiley.

Rodrigues, M. B. de A. et al. (2021). Estratégia Eficiente com Alta Disponibilidade para Provisionamento Dinâmico de Pontos de Acesso em Redes sem Fio de Grande Escala. In: *Anais Estendidos do XI Simpósio Brasileiro de Engenharia de Sistemas Computacionais*. SBC, p. 110-115.

Sousa, J. V. N. (2018). Características gerais dos veículos autônomos submarinos. *Revista Marítima Brasileira*, v. 138, n. 01/04, p. 137-150.