ReGeo ISSN: 2177-3246

GÊMEOS DIGITAIS E ALGORITMOS GENÉTICOS: OTIMIZAÇÃO VISUAL DE CABINES DE PERFURAÇÃO OFFSHORE

DIGITAL TWINS AND GENETIC ALGORITHMS: VISUAL OPTIMIZATION OF OFFSHORE DRILLING CABINS

GEMELOS DIGITALES Y ALGORITMOS GENÉTICOS: OPTIMIZACIÓN VISUAL DE CABINAS DE PERFORACIÓN OFFSHORE

https://doi.org/10.56238/revgeov17n8-152

Data de submissão: 28/06/2026 **Data de publicação:** 12/08/2026

Robson da Cunha Santos
Doutor em Engenharia
Instituição: Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)
E-mail: santos.robson@gsuite.iff.edu.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-1720-8185
Lattes: http://lattes.cnpq.br/3337432920672784

Gerson Gomes Cunha
Doutor em Engenharia
Instituição: Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)
E-mail: gerson@lamce.coppe.ufrj.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-7752-9090
Lattes: http://lattes.cnpq.br/0799282373201889

Douglas Motta Oliveira
Graduando em Engenharia Mecânica
Instituição: Instituto Federal Fluminense (IFF)
E-mail: motta22@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0009-0000-0571-3593
Lattes: http://lattes.cnpq.br/9560408008415473

RESUMO
Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema baseado no conceito de Gêmeos Digitais (GD) integrado a Algoritmos Genéticos (AGs) para otimizar o arranjo físico e o posicionamento de cabines de controle automatizadas (Driller's Cabin) em sondas de perfuração de petróleo offshore, visando eliminar pontos cegos que comprometem a visibilidade e a segurança do sondador. Fundamentada nos conceitos de Realidade Virtual imersiva, na linguagem de modelagem VRML e em teorias de otimização heurística, a pesquisa realizou a modelagem computacional tridimensional detalhada do piso de perfuração (Drill Floor), atuando como a réplica digital fiel da plataforma real. Integrando restrições geométricas e medidas antropométricas do operador, um Algoritmo Genético estruturado com funções objetivo quantitativas e qualitativas foi empregado para buscar de forma automatizada a localização espacial ideal da cabine. O sistema foi validado por meio de testes experimentais utilizando os cenários operacionais das plataformas P-XIII e P-XXIII da Petrobras, localizadas na Bacia de Campos. Os resultados obtidos demonstraram a eficácia do método em expandir o campo visual do sondador e mitigar riscos ergonômicos e operacionais, comprovando o

potencial dos Gêmeos Digitais associados a algoritmos inteligentes na melhoria da segurança industrial em águas profundas.

Palavras-chave: Gêmeos Digitais. Realidade Virtual. Algoritmos Genéticos. Cabine de Perfuração. Otimização Espacial.

ABSTRACT
This paper presents the development of a system based on the concept of Digital Twins (DT) integrated with Genetic Algorithms (GAs) to optimize the layout and positioning of automated drillers' cabins (Driller's Cabin) on offshore oil drilling rigs, aiming to eliminate blind spots that compromise the operator's visibility and safety. Grounded in immersive Virtual Reality concepts, the VRML modeling language, and heuristic optimization theories, the research conducted a detailed three-dimensional computer modeling of the drill floor, acting as the digital replica of the physical rig. Integrating geometric constraints and anthropometric measurements of the driller, a Genetic Algorithm structured with quantitative and qualitative objective functions was employed to automatedly search for the ideal spatial location of the cabin. The system was validated through experimental tests using real operational scenarios from Petrobras' P-XIII and P-XXIII platforms, located in the Campos Basin. The results demonstrated the method's effectiveness in expanding the driller's visual field and mitigating ergonomic and operational risks, proving the potential of combining Digital Twins with intelligent algorithms to improve industrial safety in deepwater operations.

Keywords: Digital Twins. Virtual Reality. Genetic Algorithms. Driller's Cabin. Spatial Optimization.

RESUMEN
Este trabajo presenta el desarrollo de un sistema basado en el concepto de Gemelos Digitales (GD) integrado a Algoritmos Genéticos (AG) para optimizar el arreglo físico y el posicionamiento de cabinas de control automatizadas (Driller's Cabin) en plataformas de perforación de petróleo offshore, con el objetivo de eliminar puntos ciegos que comprometen la visibilidad y la seguridad del perforador. Fundamentada en los conceptos de Realidad Virtual inmersiva, en el lenguaje de modelado VRML y en teorías de optimización heurística, la investigación realizó la modelación computacional tridimensional detallada de la plataforma de perforación (Drill Floor), actuando como la réplica digital fiel de la plataforma real. Integrando restricciones geométricas y medidas antropométricas del operador, un Algoritmo Genético estructurado con funciones objetivo cuantitativas y cualitativas fue empleado para buscar de forma automatizada la ubicación espacial ideal de la cabina. El sistema fue validado por medio de pruebas experimentales utilizando los escenarios operacionales de las plataformas P-XIII y P-XXIII de Petrobras, ubicadas en la Cuenca de Campos. Los resultados obtenidos demostraron la eficacia del método en expandir el campo visual del perforador y mitigar riesgos ergonómicos y operacionales, comprobando el potencial de los Gemelos Digitales asociados a algoritmos inteligentes en la mejora de la seguridad industrial en aguas profundas.

Palabras clave: Gemelos Digitales. Realidad Virtual. Algoritmos Genéticos. Cabina de Perforación. Optimización Espacial.

1 INTRODUÇÃO

O avanço da exploração petrolífera em águas ultraprofundas e no Pré-Sal tem concentrado esforços na automação e na virtualização de processos por meio da transformação digital (GAZPROM NEFT, 2022). Em ambientes marítimos (*offshore*), caracterizados por operações de alta periculosidade no piso de perfuração (*Drill Floor*), o monitoramento deve ser ininterrupto. Visando retirar o operador da exposição direta a riscos mecânicos graves, as modernas sondas de perfuração adotaram o conceito de Gêmeos Digitais (*Digital Twins*) acoplados a cabines automatizadas de controle, conhecidas como *Driller's Cabins* (CONSTELLATION, 2022; IJIRSET, 2025). A Figura 1 ilustra uma plataforma semi-submersível operando em águas profundas na Bacia de Campos.

Figura 1. Plataforma Semi-submersível



Fonte: Petronotícias, 2015

Embora essas cabines isolem o trabalhador de agentes de risco direto, a estrutura física necessária para sua proteção — que inclui paredes, colunas de suporte e grades de aço nos vidros — fragmenta o campo visual do operador, criando pontos cegos críticos (STUDIES PUBLICAÇÕES, 2023). A Figura 2 ilustra uma dessas cabines automatizadas real instalada em ambiente *offshore*. Essa restrição visual degrada a consciência situacional e força o sondador a adotar posturas anti-ergonômicas e movimentos restritos para tentar visualizar o manejo de tubulações e ferramentas (REVISTA AÇÃO ERGONÔMICA, 2025). Tradicionalmente, os arranjos físicos industriais são validados apenas na fase de prototipagem física, momento em que as modificações de projeto demandam custos exorbitantes e tempo de inatividade operacional (RESEARCHGATE, 2023).

Figura 2. Driller's Cabin - Plataforma P - XXIII



Fonte: Do Autor

Nesse cenário, a modelagem de Gêmeos Digitais surge como uma ferramenta revolucionária para a engenharia de fatores humanos. Ao replicar virtualmente os ativos físicos por meio de Realidade Virtual (RV) e da linguagem descritiva VRML, torna-se possível testar interativamente diversos cenários operacionais sem riscos ou custos reais (MDPI, 2024; SCIENCEDIRECT, 2021). O objetivo geral deste trabalho é desenvolver e validar um sistema baseado no conceito de Gêmeos Digitais que integra ambientes virtuais tridimensionais paramétricos e Algoritmos Genéticos (AGs) para automatizar e otimizar o posicionamento espacial e o arranjo físico de cabines de controle no *Drill Floor* (p. 5). A validação prática do modelo computacional foi conduzida utilizando os dados geométricos e parâmetros operacionais reais de duas unidades de perfuração da Petrobras na Bacia de Campos: as plataformas P-XIII e P-XXIII).

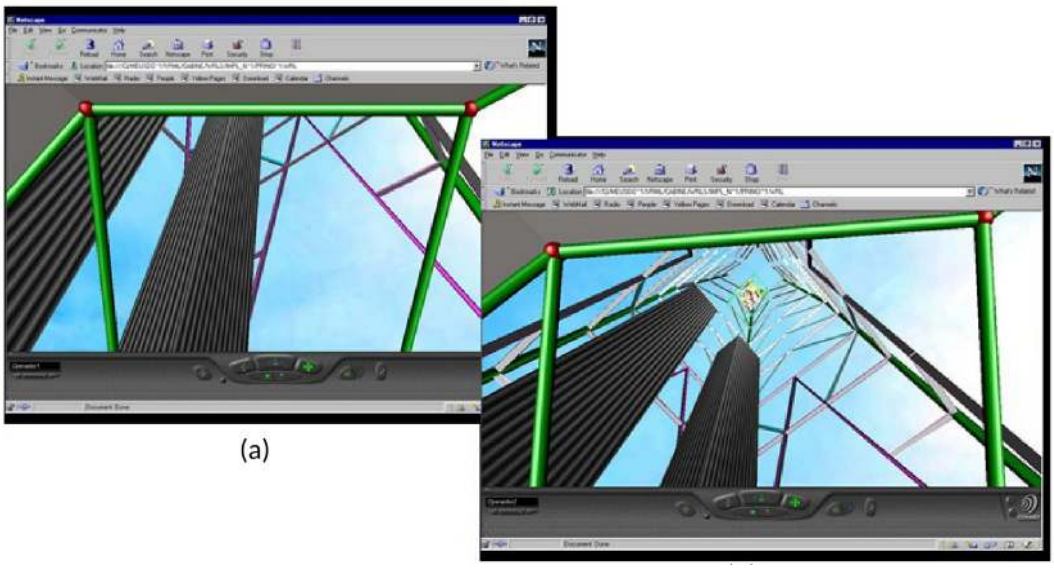
Como objetivos específicos, a pesquisa buscou:

- Construir a réplica digital e paramétrica em 3D dos principais componentes mecânicos e estruturais utilizando a linguagem VRML;
- Mapear as restrições humanas e geométricas incorporando as variáveis de visão e as medidas antropométricas do sondador;
- Formular e codificar as funções objetivo (quantitativas e qualitativas) do Algoritmo Genético para rastrear o espaço amostral;

• Validar o modelo em unidades industriais reais avaliando a capacidade do algoritmo em mitigar riscos visuais.

As Figuras 3a e 3b demonstram claramente a utilidade prática dessa simulação, evidenciando como uma sutil variação posicional na cabine virtual é capaz de resgatar uma ferramenta crítica que antes estava completamente oculta no ponto cego do sondador. Enquanto a Figura 3a evidencia a restrição de visibilidade do sondador em relação à ferramenta instalada no topo da plataforma, a Figura 3b demonstra que a reconfiguração posicional da cabine eliminou esse ponto cego, restituindo o campo visual do operador (SCIENCEDIRECT, 2025).

Figura 3. (a) Vista 1 do Sondador evidenciando ponto cego, (b) Vista 2 do Sondador com ganho de campo visual
campo visual



Fonte: Elaborada pelos autores

A consolidação de Gêmeos Digitais na engenharia conceitual e no gerenciamento de ativos *offshore* justifica-se pela necessidade crítica de prever falhas de arranjo físico e mitigar riscos humanos antes ou durante a fabricação física e reforma das estruturas. A restrição visual crônica em cabines automatizadas é um problema crítico que gera fadiga e potenciais acidentes, conforme exposto na Figura 4. O desenvolvimento da réplica virtual inteligente permite reproduzir dinamicamente a visão exata do operador no piso de perfuração sob variadas condições biomegânicas, eliminando gastos financeiros pesados com alterações físicas tardias e preservando a integridade dos trabalhadores sem afetar o tempo de atividade da sonda.

Figura 4. Vista interna de uma Driller's Cabin real evidenciando os elementos estruturais que limitam a visibilidade do operador

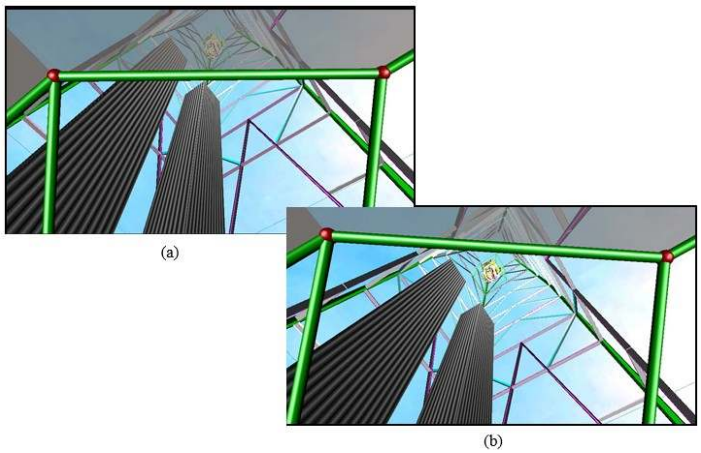


Fonte: SLB, 2026

Ademais, a busca pelo posicionamento espacial ideal de uma cabine em um ambiente repleto de estruturas móveis e complexas (como o *top drive* e o *setback*) constitui um desafio combinatorial de difícil resolução manual ou puramente intuitiva. A incorporação de Algoritmos Genéticos a essa arquitetura justifica-se por sua capacidade de vasculhar espaços de busca complexos de forma autônoma e heurística, convergindo para posições geométricas que equilibram perfeitamente a segurança ergonômica do operador com a máxima eficiência produtiva das manobras de tubulações.

Sob a ótica da Engenharia de Fatores Humanos e da Ergonomia Física, a validação antecipada do arranjo físico por simulação computacional mitiga diretamente os impactos deletérios à saúde dos operadores e eleva os níveis de segurança das operações *offshore*. Em primeiro lugar, o restabelecimento do cone visual dinâmico ideal preserva a integridade musculoesquelética do sondador, impedindo que o trabalhador adote posturas nocivas e movimentos crônicos de flexão e torção do tronco e pescoço para tentar contornar os pontos cegos das colunas estruturais. Essa prevenção atua na raiz do surgimento de fadiga visual e distúrbios osteomusculares ocupacionai. Em segundo lugar, ao garantir uma postura neutra em sua poltrona de comando e uma consciência situacional plena, o sistema reduz a probabilidade de falhas humanas na coordenação de manobras complexas. Diante do histórico industrial de acidentes severos e fatalidades decorrentes da exposição direta à força humana e falhas de comunicação visual, a automação visual guiada pelo Gêmeo Digital surge como uma barreira de segurança indispensável para preservar vidas sem comprometer a eficiência produtiva do ativo. O contraste posicional e a recuperação da linha de visada obtida pelo algoritmo heurístico são detalhados nas Figuras 5a e 5b.

Figura 5. (a) Obstrução visual de ferramenta crítica no topo da estrutura; (b) Recuperação do campo visual do sondador após reconfiguração posicional algorítmica da cabine.



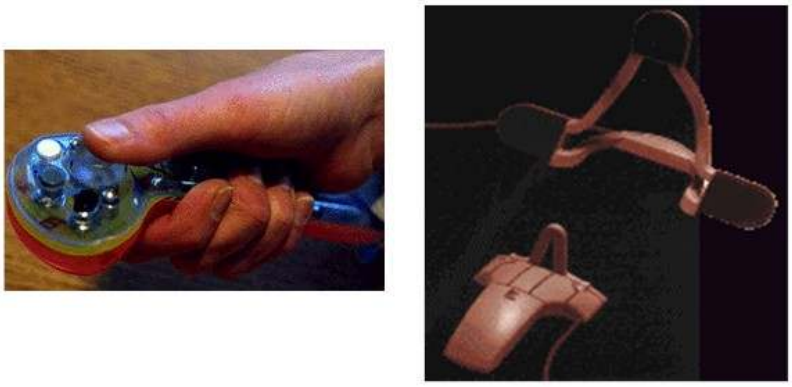
Fonte: Do Autor

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 GÊMEOS DIGITAIS E REALIDADE VIRTUAL NA INDÚSTRIA OFFSHORE

O conceito de Gêmeos Digitais (GD) refere-se à criação de uma réplica virtual de um sistema físico com o propósito de monitorar, simular e otimizar processos em tempo real (El-Shorbagy *et al.*, 2025). Na engenharia de fatores humanos e segurança ocupacional, os Gêmeos Digitais atuam como plataformas imersivas que reproduzem a física e o arranjo espacial de plantas complexas (Wanyan *et al.*, 2024). Essa tecnologia é associada a sistemas de Realidade Virtual (RV), os quais englobam interfaces avançadas capazes de transferir o conhecimento intuitivo do usuário a respeito do mundo real para um ambiente sintético tridimensional. A transposição desse conhecimento e o controle interativo das variáveis espaciais no ambiente virtual ocorrem por meio de periféricos dedicados, como manetes (*joysticks*) e mouses tridimensionais que traduzem os comandos manuais (Figura 6), associados a rastreadores ou traçadores de posição que mapeiam a orientação espacial do operador em tempo real (Figura 7).

Figura 6. Exemplos de Joystick e Mouse



Fonte: Do Autor

Figura 7. Exemplo de Traçadores de posição



Fonte: OptiTrack, 2026

De acordo com o relacionamento entre o usuário e o ambiente virtual, os sistemas de RV podem variar de abordagens não imersivas baseadas em monitores convencionais — denominadas sistemas de mundo em janela (*Window on World* - WoW) — até sistemas imersivos baseados em salas de projeção ou óculos acoplados à cabeça (*Head Mounted Displays* - HMD). Ambientes industriais complexos exigem que o Gêmeo Digital incorpore a exata fidelidade geométrica dos ativos para mapear campos visuais, restrições ergonômicas cognitivas e interações biomegânicas sem expor os operadores a acidentes ou paradas de produção não planejadas (Wanyan *et al.*, 2024). Contudo, a evolução dos motores gráficos fotorrealistas e dos softwares dedicados à análise de fatores humanos permite, na atualidade, projetar cones de visibilidade dinâmicos com mapas de calor e janelas de visão direta em tempo real integradas a manequins digitais antropométricos adaptáveis (Figura 8), elevando o rigor científico na validação de cabines offshore.

Figura 8. Exemplos de Visão Estéreo



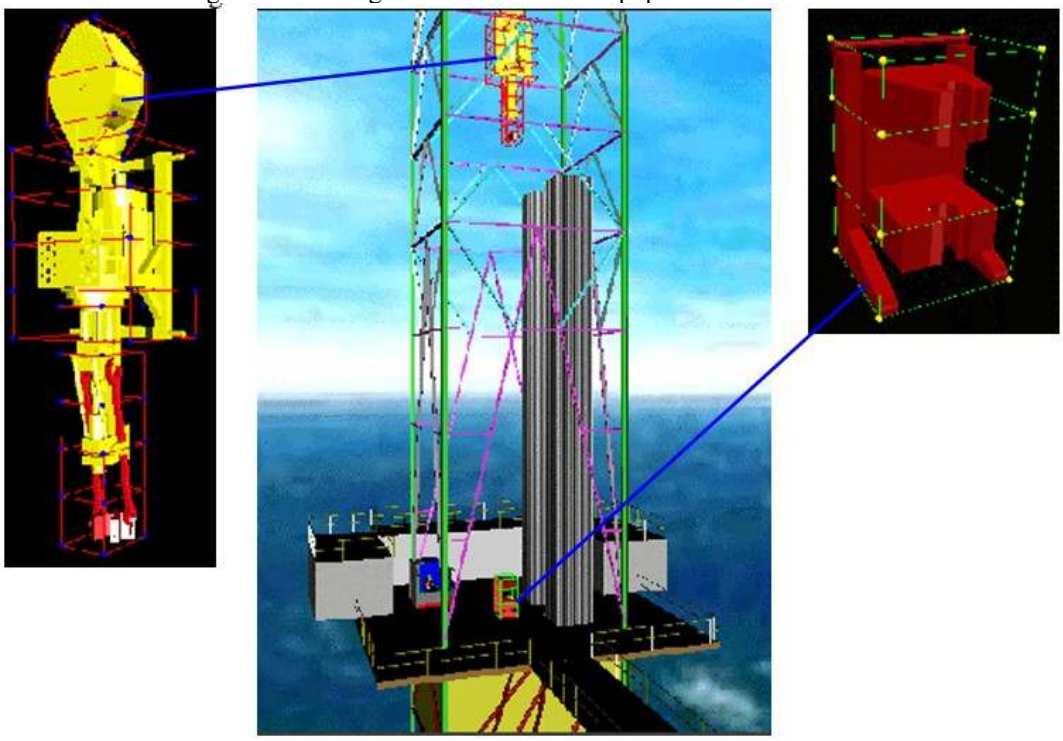
Fonte: Imagem gerada por IA, 2026

2.2 A LINGUAGEM VRML PARA MODELAGEM ESPACIAL

A modelagem estrutural das réplicas computacionais é viabilizada pela *Virtual Reality Modeling Language* (VRML), uma linguagem independente de plataforma concebida para descrever simulações e cenários tridimensionais interativos na rede. Arquivos estruturados em formato ASCII ou UTF-8 descrevem características ambientais como coordenadas cartesianas, cores puras, texturas e transformações geométricas (escala, translação e rotação).

A arquitetura do VRML baseia-se em componentes fundamentais denominados nós (*nodes*), que servem como abstrações geométricas dos objetos físicos. O nó de geometria (*geometry node*) descreve as formas tridimensionais sólidas primitivas, tais como caixas (*Box*), cones (*Cone*), cilindros (*Cylinder*) e esferas (*Sphere*). Para simular a dinâmica operacional do Gêmeo Digital, os nós filhos (*children nodes*) são agrupados hierarquicamente para herdar as transformações de seus nós pais. O intercâmbio de mensagens e estímulos reativos entre esses objetos digitais em tempo real ocorre por meio de eventos (*events*) direcionados via rotas de comunicação (*routes*).

Figura 9. Modelagem da Plataforma e Equipamentos com VRML



Fonte: Do Autor

2.3 OPERADORES E PARÂMETROS DOS ALGORITMOS GENÉTICOS

Os Algoritmos Genéticos (AGs) são heurísticas de busca e otimização global fundamentadas nos princípios biológicos da seleção natural e da evolução das espécies. Em problemas de engenharia com espaços amostrais complexos e múltiplos critérios de restrição, os AGs atuam gerando uma população inicial de soluções potenciais representadas por estruturas de dados conhecidas como cromossomos. Cada cromossomo passa por uma avaliação matemática conduzida por uma função de aptidão (*fitness function*) para determinar seu nível de adaptabilidade ao problema (Wang e Romanosky, 2025).

O processo evolutivo do algoritmo é governado por três operadores genéticos principais:

- Seleção: Direciona o algoritmo para priorizar a reprodução dos indivíduos mais aptos da geração corrente, propagando suas características benéficas.
- Cruzamento (Crossover): Combina segmentos de código genético de dois cromossomos genitores para gerar descendentes com novas combinações espaciais.
- Mutação: Introduz perturbações aleatórias residuais nos genes dos novos indivíduos, prevenindo a convergência prematura e assegurando a diversidade genética da busca.

Na figura 10 é mostrado um exemplo de algoritmo genético. Durante esse processo, os melhores indivíduos, assim como alguns dados estatísticos, podem ser coletados e armazenados para avaliação.

Figura 10: Exemplo de um código de Agoritimo Genético

```
Procedimento AG {
        t = 0;
        inicia_população (P, t)
        avaliação (P, t);
        repita até (t = d) {`
            t = t +1;
            seleção_dos_pais (P,t);
            recombinação (P, t);
            mutação (P, t);
            avaliação (P, t);
            sobrevivem (P, t)
        }
}
```

Fonte: Do Autor

3 METODOLOGIA / SOLUÇÃO PROPOSTA

Este capítulo descreve a abordagem metodológica baseada no desenvol-vimento de um Gêmeo Digital interativo utilizando a Linguagem de Modelagem em Realidade Virtual (VRML) e a posterior otimização espacial via Algoritmos Genéticos (AG) para o posicionamento de cabines de controlenas sondas.

3.1 MODELAGENS

A base conceitual da solução proposta apoia-se na criação de um Gêmeo Digital tridimensional de alta fidelidade das instalações de perfuração. Utilizando a linguagem VRML, os elementos físicos do ambiente real são codificados e simulados através de mundos virtuais tridimensionais, gerando cenários mais leves e interativos que reduzem custos de projeto. Essa tecnologia viabiliza a geração de um ecossistema virtual capaz de responder a interações e eventos geométricos em tempo real. A modelagem espacial foi estruturada de forma hierárquica por meio de nós subordinados (*Children nodes*), onde as transformações de translação, rotação e escala aplicadas a uma estrutura pai se propagam fielmente aos seus componentes operacionais.

3.2 MODELAGEM DA SONDA DE PERFURAÇÃO

0A macroestrutura que suporta a atividade foi modelada transpondo-se as características de engenharia das sondas para o ambiente virtual. A torre metálica, altura de 40m, foi replicada com precisão em seus eixos estruturais primários para servir como o limitador físico do cenário 3D. Definiu-se o arranjo geométrico tridimensional do piso da sonda (*Drill Floor*), considerando as restrições físicas de layout para a inserção das unidades operacionais tanto em estruturas como a apresentada na Figura 11a, que se apoia em flutuadores submarinos abaixo da zona de ação das ondas, quanto na disposição centralizada típica de perfuração exibida na Figura 1.1b.

Figura 11: (a) Sonda Semi-Submersível; (b) Navio Sonda de Perfuração

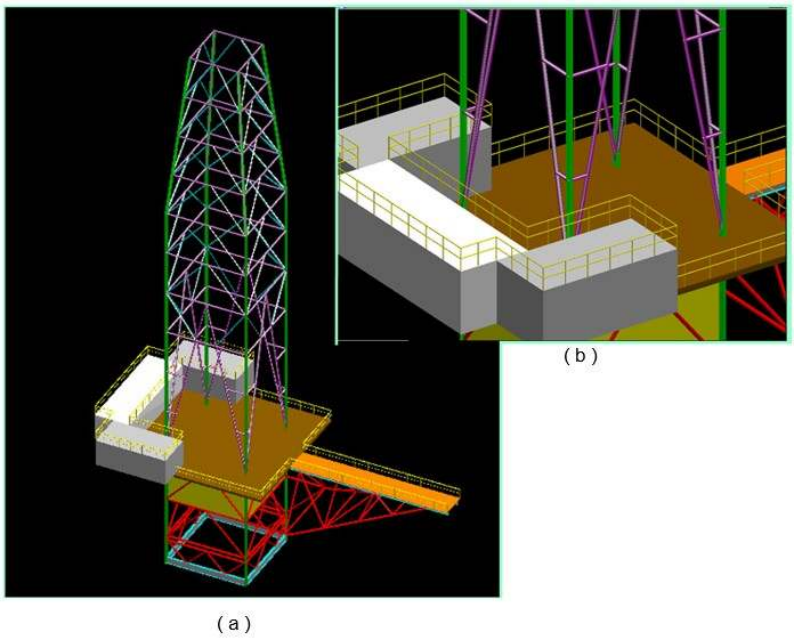


(a) (b)

Fonte: Petronotícias, 2026

Para a integração com o sistema de otimização, o modelo tridimensional da sonda foi mapeado como o espaço de busca tridimensional e restritivo do Algoritmo Genético. O volume geométrico do Drill Floor e as adjacências da torre foram discretizados em uma matriz de coordenadas cartesianas, delimitando as fronteiras físicas exatas onde a cabine de controle pode ser transladada e rotacionada. Essa modelagem matemática da sonda impõe as restrições de contorno (constraints) no algoritmo, impedindo que a rotina evolutiva gere soluções inviáveis ou que resultem em colisões espaciais com as tubulações, guindastes e demais áreas de segurança estáticas mapeadas na plataforma. Essa parametrização computacional do espaço restritivo de busca é representada graficamente através da Figura 12a: Modelagem da Sonda de perfuração da Plataforma P-XIII, que exibe a malha estrutural externa, e da Adjacente Figura 12b: Detalhamento do Drill Floor da P-XIII, evidenciando o mapeamento da área do piso operacional.

Figura 12. (a) Modelagem da Sonda de Perfuração P-XIII; (b) Modelagem do Drill Floor P-XIII

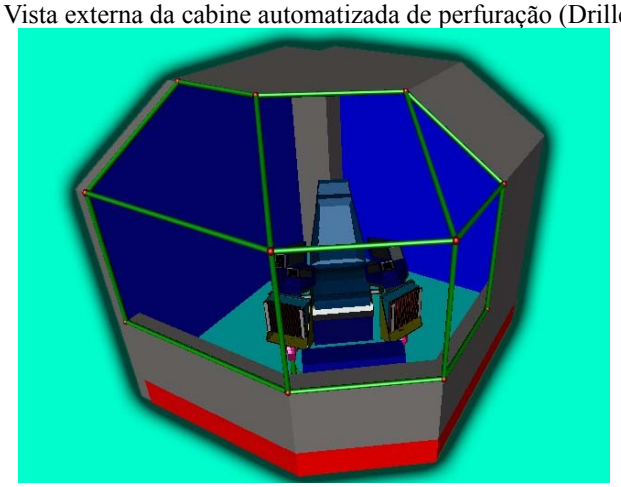


Fonte: Do Autor.

3.3 MODELAGEM DAS CABINES DE CONTROLE

Neste estágio, desenvolveu-se o invólucro geométrico da cabine automatizada (*Driller's Cabin*). Foram mapeadas todas as suas paredes opacas e as superfícies transparentes destinadas às janelas de visualização. Para simular rigorosamente as condições de visibilidade reais e a obstrução provocada pelos mecanismos de segurança, incorporou-se ao modelo tridimensional o desenho exato das barras de ferro e das telas de aço que revestem os vidros externos, baseando-se nas características estruturais e funcionais da cabine real de operação apresentada na Figura 13.

Figura 13. Vista externa da cabine automatizada de perfuração (Driller's Cabin).



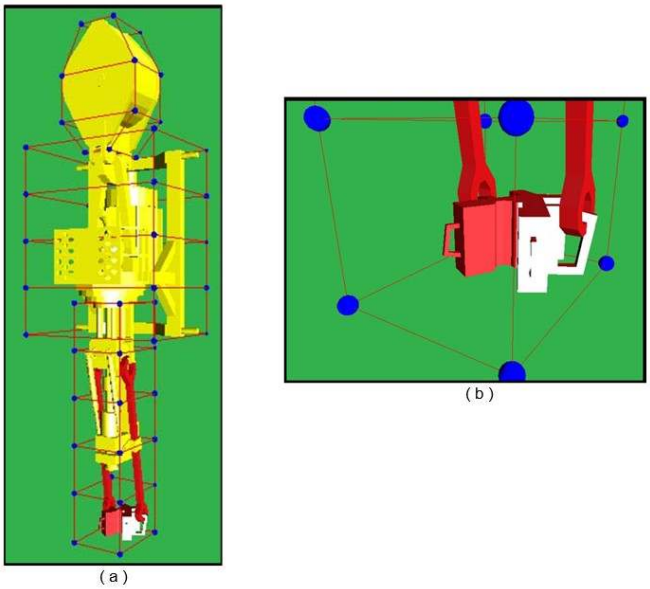
Fonte: IADC, 2023

3.4 MODELAGEM DO TOP DRIVE

O sistema de acionamento superior (*Top Drive*) foi modelado como um corpo dinâmico suspenso na torre da sonda. Por se tratar de um equipamento crítico que executa a rotação e o deslocamento vertical da coluna de perfuração, suas coordenadas espaciais em tempo real são parametrizadas no simulador de Realidade Virtual, permitindo que o operador acompanhe seu curso de translação ao longo da torre durante as manobras operacionais para evitar acidentes e avaliar a perda de eficiência por restrição de movimentos.

Para otimizar o desempenho computacional durante a execução das rotinas de busca do algoritmo, optou-se por desconsiderar a malha complexa de polígonos originais do equipamento nesta etapa. Em seu lugar, implementou-se uma representação simplificada baseada em cubos (*Bounding Boxes*), mapeando e processando apenas os seus vértices essenciais para o cálculo geométrico de visibilidade (Figura 14), o que garante um processamento substancialmente mais rápido do sistema. Contudo, após a convergência do algoritmo e a definição do posicionamento ótimo, o modelo tridimensional completo do *Top Drive* é reestabelecido e renderizado com todos os seus detalhes visuais na interface 3D final para a análise do usuário.

Figura 14. (a) Modelagem do Top Drive; (b) Detalhe do Bounding Box



Fonte: Do Autor

3.5 MODELAGEM DO IRON ROUGHNECK (PLATAFORMISTA MECÂNICO)

Visando a automação e o aumento da segurança dos profissionais embarcados, modelou-se tridimensionalmente o plataformista mecânico (*Iron Roughneck*). Esse equipamento substitui o manuseio manual agressivo de ferramentas pesadas de perfuração, como as chaves flutuantes que

dependiam diretamente da força humana. Na Figura 15, encontram-se plataformistas trabalhando na perfuração, observa-se o antigo cenário operacional de alta intensidade física e risco de mutilação que a modelagem automatizada deste componente visa mitigar ao transferir o controle físico para o ambiente interno da cabine.

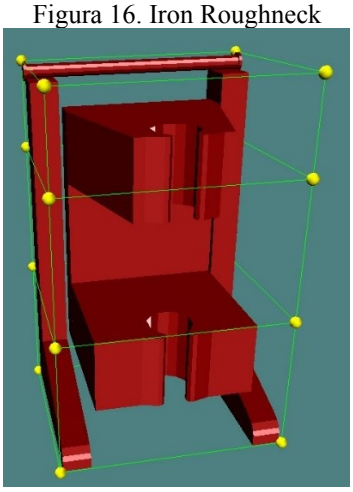
Figura 15. Plataformistas em Operação Manual



Fonte: Do Autor

A introdução do *Iron Roughneck* no cenário produtivo veio para eliminar definitivamente esse histórico de riscos e acidentes graves no *Drill Floor*, uma vez que todo o seu acionamento hidráulico passa a ser controlado remotamente pelo sondador a partir do interior protegido do módulo. Devido a essa mudança crítica de controle físico para o ambiente interno, torna-se imperativo que o operador possua uma visão completa, direta e totalmente desobstruída do equipamento durante os ciclos de acoplamento de tubos, justificando a inclusão deste componente como um dos alvos prioritários na modelagem matemática de visibilidade. Para demonstrar a transposição dessa ferramenta para o ambiente computacional, a Figura 16 a seguir apresenta a reconstrução tridimensional detalhada do equipamento utilizada nas simulações.

Figura 16. Iron Roughneck



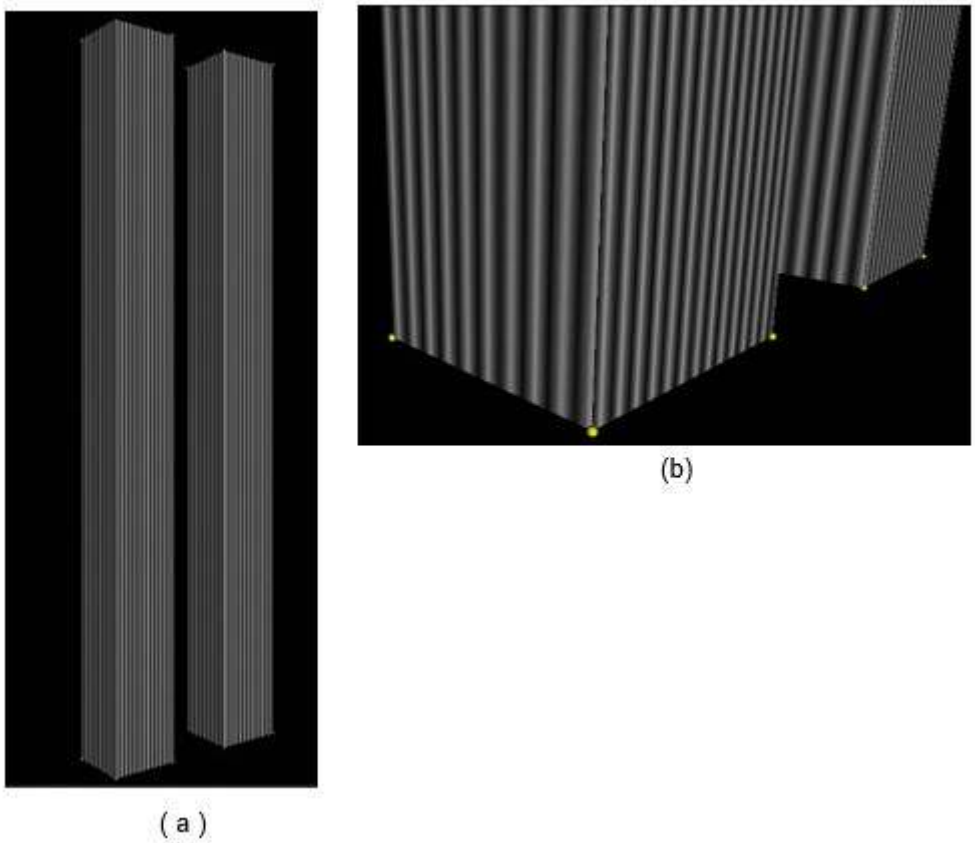
Fonte: Do Autor

3.6 MODELAGEM DOS TUBOS ESTALEIRADOS NO “SETBACK”

A área de armazenamento vertical de tubos (*SetBack*) foi mapeada a fim de simular o comportamento de preenchimento do campo visual periférico do operador. Segmentos metálicos de tubulação com comprimentos padronizados e organizados em seções foram replicados geometricamente e inseridos na retaguarda e nas laterais do piso de perfuração. A densidade de tubos estaleirados atua como um obstáculo volumétrico passivo no simulador, essencial para analisar se o acúmulo de material bloqueia linhas de visão estratégicas do sondador.

A capacidade do sondador de visualizar continuamente todos os tubos estaleirados é de suma importância para a segurança operacional, pois permite monitorar em tempo real a integridade da estaleiragem, antecipar potenciais falhas de travamento e coordenar as manobras de içamento com precisão absoluta. Para representar fielmente esse cenário obstrutivo dentro do motor computacional, os elementos estruturais foram projetados em ambiente virtual, conforme ilustrado na Figura 17, que indica a modelagem do *SetBack* e tubulações estaleiradas a seguir.

Figura 17. (a) Modelagem do Tubos Estaleirados; (b) Detalhe do Bounding Box



Fonte: Do Autor

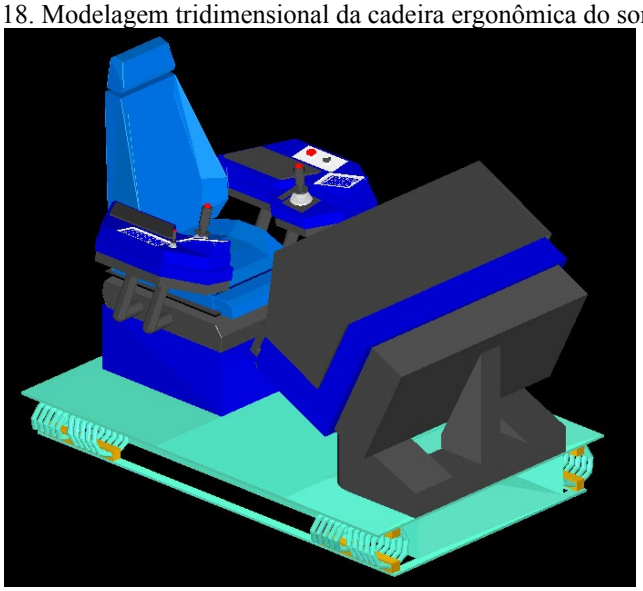
3.7 MODELAGEM DA CADEIRA E POSTO DE TRABALHO

Como núcleo da interface homem-máquina integrada ao Gêmeo Digital, a modelagem tridimensional do posto de comando centrou-se na poltrona cibernética especializada do sondador. Para garantir o máximo realismo geométrico, utilizou-se como base o modelo digital nativo em ambiente CAD fornecido diretamente pelo fabricante industrial do equipamento. Essa malha vetorial complexa passou por um processo de engenharia de dados geométricos no software *MicroStation*, onde foi otimizada, simplificada e, por fim, exportada para a sintaxe estrutural do formato VRML. O modelo resultante replica com precisão milimétrica a disposição física de todos os consoles de controle, botões de acionamento, pedais e *joysticks* bifuncionais que o operador manipula ativamente durante as manobras no poço de perfuração.

Do ponto de vista computacional e ergonômico, o Gêmeo Digital incorpora os graus de liberdade físicos do assento, permitindo simular a regulagem dinâmica de altura e o recuo horizontal para acomodar diferentes perfis de operadores. Toda a distribuição espacial dos comandos foi validada para que os alcances funcionais fiquem rigorosamente posicionados ao nível das articulações e dos movimentos cinemáticos naturais do sondador, eliminando sobrecargas estáticas musculares. Essa configuração garante que o modelo atenda estritamente às normas técnicas e aos padrões

antropométricos consolidados de ergonomia. A transposição desse posto operacional para o ambiente virtual de otimização, contendo o detalhamento de seus componentes de interface, é ilustrada na Figura

Figura 18. Modelagem tridimensional da cadeira ergonômica do sondador



Fonte: Do Autor

3.8 MEDIDAS DE ANTROPOMETRIA

3.8.1 Medidas de antropometria e fatores humanos

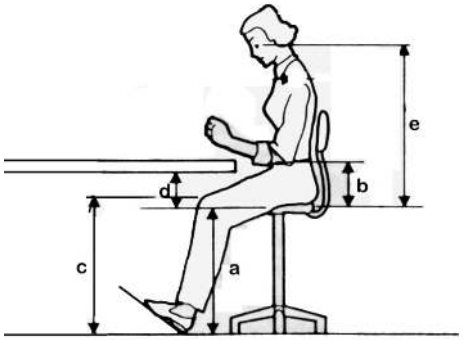
A determinação dos parâmetros iniciais do Gêmeo Digital exige o mapeamento do campo de visão do sondador, uma vez que as barreiras físicas da cabine — como as paredes opacas e as colunas de fixação dos vidros — atuam como restrições geométricas que geram pontos cegos. Para estimar com exatidão a posição espacial dos olhos do operador em relação ao cenário operacional e modelar os eixos visuais, incorporou-se ao sistema computacional um estudo detalhado focado nas características biométricas e nos movimentos dos usuários.

O dimensionamento baseou-se em dados de antropometria estática da população brasileira, utilizando uma amostra de 3.100 trabalhadores do Rio de Janeiro. No algoritmo, foram parametrizadas as seguintes métricas masculinas para os cálculos ergonômicos: Estatura de 169,5 cm (Percentil 50%) e 181,9 cm (Percentil 97%); Altura dos olhos a partir do assento com o corpo ereto de 77,5 cm (Percentil 50%) e 83,0 cm (Percentil 95%); e Altura da cabeça a partir do assento de 88,0 cm (Percentil 50%) e 94,0 cm (Percentil 95%). Essa base estatística serve como aproximação para dimensionar o posto de trabalho e simular as variações físicas do operador.

Como o perfil do usuário final varia, o projeto busca acomodar uma faixa segura de 95% da população trabalhadora através de ajustes mecânicos de altura e recuo simulados na cadeira de controle. No motor do Gêmeo Digital, esses dados determinam o posicionamento dinâmico das

câmeras virtuais e dos pontos de emissão de raios de visibilidade. O mapeamento dessas variáveis físicas e das distâncias de alcance funcional necessárias para a validação ergonômica do operador sentado é ilustrado na Figura 19: Parâmetros antropométricos do operador sentado e eixos de alcance funcional no posto de controle a seguir.

Figura 19. Parâmetros antropométricos do operador



Fonte: Do Autor

3.9 FORMULAÇÃO GEOMÉTRICA DO CAMPO VISUAL E ANÁLISE DE INTERSEÇÃO

A determinação da localização ótima da cabine de controle (*Driller's Cabin*) no piso da sonda baseia-se em algoritmos de geometria computacional aplicados às malhas tridimensionais dos equipamentos adjacentes. O campo visual do sondador é condicionado por restrições antropométricas estáticas — dado o posicionamento predeterminado da cadeira de comando — e por restrições físicas de oclusão impostas pela geometria opaca da própria cabine, tornando as superfícies envidraçadas os únicos canais de visibilidade externa utilizáveis.

Para a modelagem matemática do problema, define-se o centro dos olhos do operador como um ponto de origem fixa no espaço, denotado por $P_0(x_0, y_0, z_0)$. O conjunto de feixes visuais em direção aos alvos de monitoramento é discretizado a partir dos vértices das caixas envolventes (*Bounding Boxes*), planos e baricentros dos equipamentos modelados. Seja $P_1(x_1, y_1, z_1)$ um ponto genérico pertencente a essa amostragem de interesse, a linha de visada que liga o observador ao alvo é descrita analiticamente por uma reta paramétrica r(t) no espaço tridimensional (R^3)

$$r(t): \begin{cases} x = x_0 + t(x_1 - x_0) \\ y = y_0 + t(y_1 - y_0) \\ z = z_0 + t(z_1 - z_0) \end{cases} \text{ com t } \ni R \qquad (1)$$

O algoritmo computacional processa esses dados estruturados em matrizes e vetores para avaliar a visibilidade de cada coordenada. Um ponto P_1 é classificado como visível se, e somente se, a respectiva reta r(t) interceptar a superfície de um dos vidros da cabine antes de sofrer qualquer oclusão por elementos opacos.

Cada faceta envidraçada é modelada como um plano coplanar infinito β. A equação geral de um plano β que contém três vértices conhecidos do vidro, A(xA, yA, zA), B(xB, yB, zB) e C(xC, yC, zC), é obtida impondo que o determinante da matriz de coplanaridade seja nulo para um ponto genérico (x, y, z):

$$det\begin{bmatrix} x-x_A & y-y_A & z-z_0 \\ x_B-x_A & y_B-y_A & z_B-z_A \\ x_C-x_A & y_C-y_A & z_B-z_A \end{bmatrix}=0 \qquad (2)$$

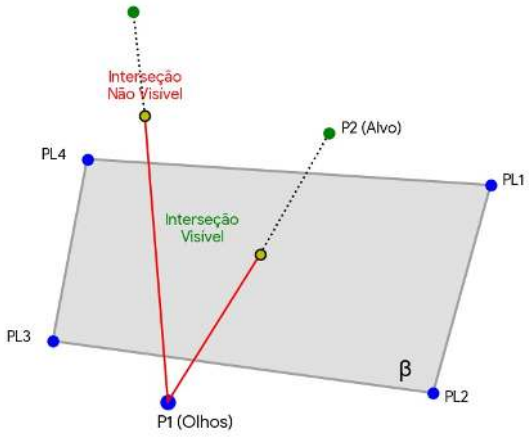
A resolução simultânea do sistema linear composto pela reta paramétrica r(t) e pelo plano β fornece o ponto exato de interseção Pint. Por fim, o algoritmo valida se Pint pertence aos limites poligonais restritos do vidro amostrado e se o parâmetro de distância atende à condição de ordenação visual ($0 < t \leq 1$), computando com precisão matemática o percentual de visibilidade da cabine em uma dada coordenada da plataforma.

Após a determinação analítica das coordenadas cartesianas (X*i*, Y*i*, Z*i*) do ponto de interseção (denotado por *Pint*), o algoritmo executa a etapa crítica de validação espacial. Como o plano β possui extensão infinita, a existência de uma interseção matemática não garante, isoladamente, a visibilidade do alvo. É imperativo verificar se *Pint* está contido na região delimitada pelo polígono convexo que define geometricamente a janela física da cabine.

Como ilustrado na Figura 20, o vidro é mapeado por um polígono plano delimitado por quatro vértices coplanares: PL_1, PL_2, PL_3 *e* PL_4. A classificação de visibilidade do ponto é binária e segue as seguintes condições:

- Ponto de Interseção Visível: Ocorre quando a linha de visada que parte de P_1 (origem visual) intercepta o plano β em um ponto interno ao perímetro do polígono, indicando que o raio visual atravessa fisicamente a área envidraçada para atingir o alvo P_2.
- Ponto de Interseção Não Visível: Ocorre quando o ponto calculado cai fora dos limites dos quatro vértices, o que significa que o vetor de visada colide com as estruturas opacas da parede da cabine.

Figura 20. Análise topológica de inclusão para classificação de visibilidade sobre o plano polígononal β



Fonte: Do Autor

Para computar essa verificação em código de forma robusta e independente da orientação do plano no espaço, o algoritmo utiliza o Critério da Soma dos Ângulos. O ponto *Pint* é transposto junto aos vértices para um sistema local e calcula-se a soma dos ângulos formados entre *Pint* e cada par de vértices consecutivos ($\theta i = \angle\ PLi\ Pint\ PLi_1$):

$$\sum_{i=1}^{4} \theta i = ¿¿ \qquad (3)$$

Se a restrição poligonal for satisfeita, o ponto do equipamento é computado na matriz de desempenho como uma coordenada geometricamente visível pelo sondador.

3.10 GÊMEOS DIGITAIS E ALGORITMOS GENÉTICOS: OTIMIZAÇÃO VISUAL DE CABINES DE PERFURAÇÃO OFFSHORE

A determinação do arranjo físico espacial ótimo para a cabine de controle (*Driller's Cabin*) sobre o piso de perfuração (*Drill Floor*) configurou-se como o principal desafio do modelo computacional proposto. Inicialmente, investigou-se a aplicabilidade de métodos clássicos de programação matemática e pesquisa operacional, tais como o Método Simplex e o algoritmo *Branch & Bound*. Contudo, essas abordagens determinísticas demandaram uma complexidade matemática excessiva na modelagem de restrições geométricas tridimensionais, além de incorrerem em elevada latência computacional para a convergência de soluções complexas.

Com o propósito de viabilizar um método de resolução expedito, robusto e caracterizado pela eficiência no gerenciamento de memória e tempo de Unidade Central de Processamento (CPU), a arquitetura metodológica foi direcionada para a aplicação de Algoritmos Genéticos (AG) de busca heurística global, fundamentados em implementações estruturadas pelo *Massachusetts Institute of*

Technology (MIT). Os AGs atuam como ferramentas heurísticas de otimização estocástica inspiradas nos mecanismos de seleção natural e evolução biológica, demonstrando elevada resiliência e adaptabilidade a problemas combinatórios multiobjetivo.

Nessa abordagem evolutiva, as técnicas de busca mapeiam um espaço amostral de soluções que abrange a totalidade das configurações espaciais cinematicamente possíveis para a cabine. Cada solução potencial (indivíduo) é codificada parametritamente e submetida a uma função objetivo (função de aptidão ou *fitness*), responsável por avaliar quantitativamente e qualitativamente o arranjo proposto. A função objetivo atribui um índice escalar de aptidão a cada indivíduo da população, de modo que valores de nota progressivamente elevados denotam maior proximidade matemática em relação à solução de posicionamento espacial considerada ótima sob a ótica da visibilidade livre e da conformidade ergonômica.

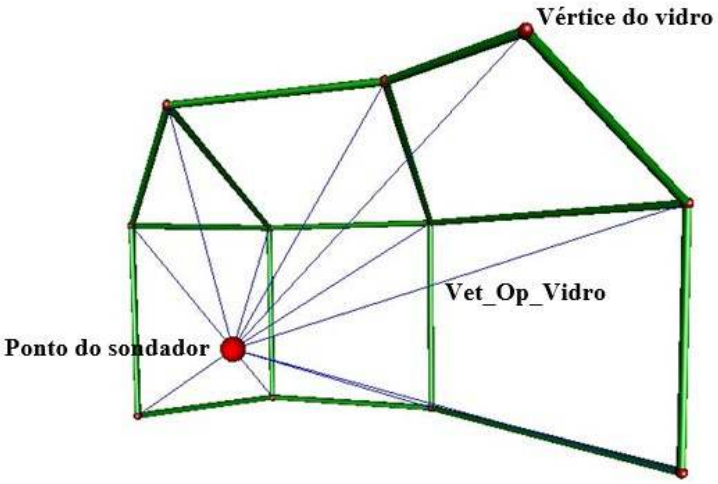
3.11 REPRESENTAÇÃO DO PROBLEMA NO AG

No escopo da arquitetura que integra Gêmeos Digitais e Algoritmos Genéticos para a otimização visual de cabines de perfuração *offshore*, a parametrização do problema exige a modelagem geométrica do arranjo físico espacial. O objetivo central é determinar o posicionamento ótimo da cabine sobre o piso de perfuração. Todavia, a variável independente que governa as translações do sistema é o ponto tridimensional correspondente ao centro dos olhos do sondador. Como o operador permanece sentado em sua cadeira de controle, qualquer deslocamento desse ponto focal implica que a cabine e seus componentes estruturais associados sejam recalculados de forma solidária.

Para vincular cinematicamente a variação posicional dos olhos do operador à superestrutura geométrica da cabine, foram gerados vetores espaciais direcionais denominados Vet_Op_Vidro. Conforme ilustrado na Figura 21, esses vetores conectam a origem da visada do sondador a cada um dos vértices que delimitam as janelas da estrutura. Desse modo, quando o Algoritmo Genético propõe uma nova coordenada para o operador, o modelo atualiza automaticamente a malha geométrica dos vidros da cabine adicionando os vetores geométricos previamente mapeados às novas coordenadas basais.

Coord.dos Vidros Atual. = Novas Coord. do Operador + Vet_Op_Vidro

Figura 21. Representação dos vetores Vet_Op_Vidro



Fonte: Do Autor

Para viabilizar o processamento evolucionário desse arranjo, cada solução geométrica potencial é estruturada como um indivíduo dentro de uma população de cromossomos. O conjunto das coordenadas cartesianas tridimensionais (x, y, z) do ponto do operador define um espaço de busca n-dimensional para a convergência global do algoritmo.

Adotando a abordagem tradicional de cadeias de *bits*, o ponto do operador é codificado em um cromossomo linear com extensão total de 72 *bits*. Esta estrutura de dados é fracionada em três subcadeias independentes de 24 *bits*, em que cada segmento quantifica numericamente uma variável de decisão espacial:

- Subcadeia X (24 bits): Representa a posição linear longitudinal do operador.
- Subcadeia Y (24 bits): Representa a posição linear transversal do operador.
- Subcadeia Z (24 bits): Representa a cota altimétrica (altura) do operador.

A correspondência matemática entre o espaço de parâmetros geométricos e a sua respectiva representação binária discretizada no cromossomo segue o arranjo estrutural padronizado:

Parâmetros Espaciais (Exemplo): X = 1.00124

Y = 1.655

Z = -1.25607

Representação das coordenadas no cromossomo:

110001010100110101110110	111000101010101011010110	101000111011101011010110
24bits – coordenadas X	24bits – coordenadas Y	24bits – coordenadas Z

Fonte: Elaborada pelos autores

3.12 CONFIGURAÇÃO E PARAMETRIZAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO

A otimização heurística fundamenta-se no algoritmo *GA (simple)* da biblioteca do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), operando com populações não sobrepostas (*non-overlapping*). Empregou-se o mecanismo de elitismo para garantir a preservação do indivíduo mais apto entre as gerações consecutivas, mitigando perdas decorrentes dos operadores de recombinação e mutação.

O espaço de busca tridimensional delimita a variação posicional do centro dos olhos do sondador com base nas restrições físicas da sonda de perfuração. A partir de uma coordenada referencial inicial (X, Y, Z), os intervalos operacionais admissíveis são definidos por:

- Eixo X (Longitudinal): Xmin = X - 1.5m e Xmax = X + 1.0m.
- Eixo Y (Transversal): Ymin = Y e Ymax = Y + 1.5m (restrição física contra submersão abaixo do piso da sonda).
- Eixo Z (Vertical): Zmin = Z - 2.0m e Zmax = Z (zona limite para evitar colisão estrutural com a torre de perfuração).

Os parâmetros operacionais calibrados para a execução do algoritmo evolutivo compreendem (pp. 2-3):

- Tamanho da População: 20 indivíduos (fenótipos) por geração.
- Critério de Parada Temporal: Limite fixado em 50 gerações sucessivas.
- Taxa de Recombinação (Crossover): 70% para a introdução acelerada de novas estruturas.
- Taxa de Mutação: 5% para a manutenção da diversidade estocástica global.

Os cromossomos possuem extensão de 72 *bits*, estruturados em três subcadeias independentes de 24 *bits* associadas a cada coordenada espacial. A conversão fenotípica das coordenadas binárias para o domínio decimal é processada pela rotina computacional interna GABin2DecGenome.

3.13 FORMULAÇÃO DAS FUNÇÕES OBJETIVO

A avaliação do desempenho do Gêmeo Digital utiliza as coordenadas espaciais (x, y, z) do sondador como variáveis de entrada em duas formulações matemáticas distintas de aptidão.

3.14 FUNÇÃO OBJETIVO QUANTITATIVA

A abordagem quantitativa visa maximizar estritamente o número total de alvos operacionais externos visíveis a partir da coordenada avaliada, desconsiderando a centralidade da visada nos vidros. O algoritmo executa testes geométricos de intersecção baseados em *Ray-Casting* para cada indivíduo da população.

Se um ponto externo projeta uma linha de visada desobstruída através de pelo menos uma das janelas da cabine, ele recebe um sinalizador (*Flag*) de visibilidade positiva; caso contrário, é computado como ponto cego. O processo encerra-se prematuramente se uma solução atingir a visibilidade total de 100% dos pontos antes do limite de gerações.

3.15 FUNÇÃO OBJETIVO QUALITATIVA

A formulação qualitativa refina o modelo anterior ao otimizar a ergonomia visual do sondador, forçando com que os pontos críticos projetados fiquem o mais próximo possível do baricentro (centro geométrico) de cada vidro. Atribui-se pesos diferenciados (*Vi*) e (*NVj*) aos alvos em função da sua criticidade operacional, conferindo menor peso numérico à “boca do poço” e à cunha de sustentação para priorizar sua centralização visual.

O algoritmo busca a minimização da função de custo acumulada de distância (Soma_Dist):

$$Soma_{Dist} = \sum_{i=1}^{m} V_i \times D_i + \left(10 \times \sum_{j=1}^{n} NV_j \times D_j\right) \quad (4)$$

onde:

Vi – Peso do ponto visível

Di – Menor distância do ponto de interseção, gerado pela reta e o plano do vidro, em relação ao baricentro do vidro que o ponto é visível.

NVj – Peso do ponto não visível

Dj – Menor distância do ponto de interseção, gerado pela reta e o plano do vidro, em relação ao baricentro de cada vidro

A minimização de (*Soma_Dist*) eleva a nota de aptidão (*fitness*) do cromossomo. Esse arranjo matemático garante que os pontos teoricamente obstruídos permaneçam adjacentes às bordas dos vidros, tornando-os prontamente recuperáveis na prática através de pequenas rotações na região cervical do operador.

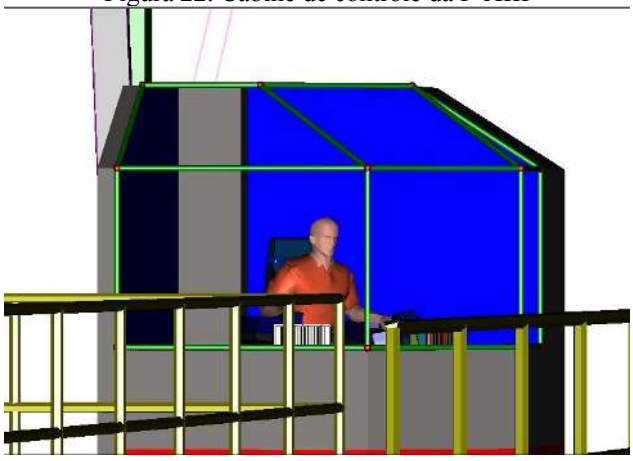
4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES

4.1 ESTUDO DE CASO I: PLATAFORMA SEMI-SUBMERSÍVEL P-XIII

4.1.1 Apresentação do cenário operacional e diagnóstico visual

A plataforma P-XIII consiste em uma unidade semi-submersível de perfuração originalmente projetada para lâminas d'água de baixa profundidade, atuando transitoriamente como unidade de produção na Bacia de Campos com uma capacidade de processamento de 12.000 bbl/dia. No âmbito do projeto de modernização (*upgrade*) da sua sonda, previu-se a substituição de componentes críticos — incluindo a introdução de sistemas automatizados como o *Top Drive* e o *Iron Roughneck* (plataformista mecânico) — além da instalação de uma nova cabine de controle avançada fornecida pela empresa Hitec (Figura 22).

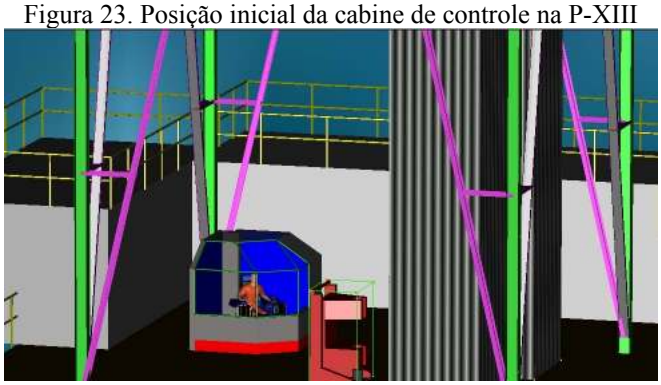
Figura 22. Cabine de controle da P-XIII



Fonte: Do Autor

Historicamente, o arranjo físico dessas cabines em projetos de modernização adota uma convenção puramente empírica: o módulo é posicionado na periferia do *Drill Floor*, orientado diretamente para a rampa de engate de tubos e *risers*, fixado rigidamente ao nível zero do piso da sonda, sem qualquer elevação estrutural (Figura 23).

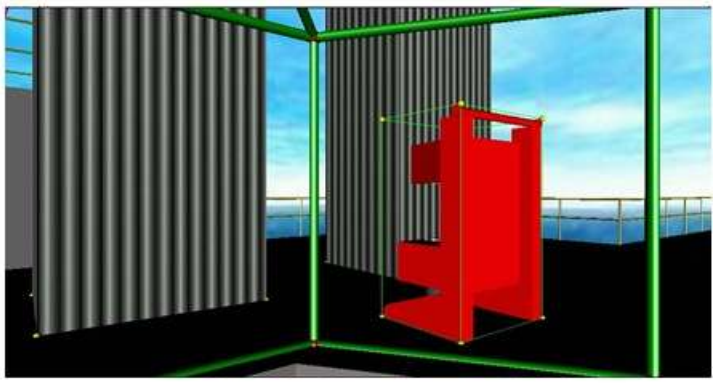
Figura 23. Posição inicial da cabine de controle na P-XIII



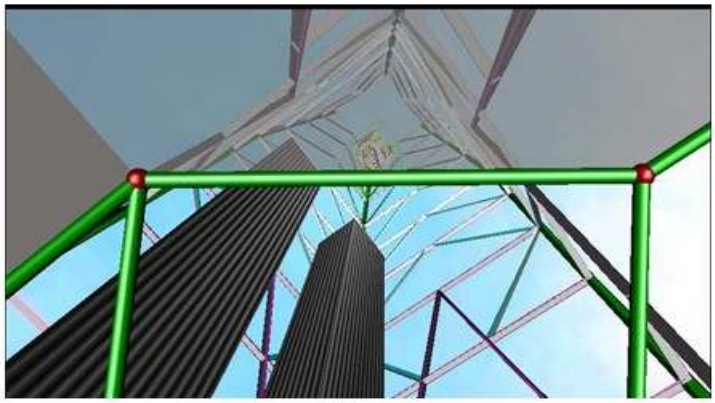
Fonte: Do Autor

Por meio do desenvolvimento do Gêmeo Digital tridimensional do ativo, acoplou-se uma câmera virtual representativa do campo de visão dinâmico e da linha de visada real do operador para diagnosticar a eficácia dessa configuração convencional. Os ensaios de simulação computacional demonstraram que, embora o arranjo inicial garanta uma linha de visada satisfatória em direção às tarefas do *Iron Roughneck* e à base dos tubos (Figura 24a), o teto e as colunas de suporte da própria cabine geram pontos cegos severos que obstruem completamente o monitoramento do *Top Drive* na torre (Figura 24b). Essa oclusão degrada a consciência situacional e impõe ao operador a necessidade de executar flexões e torções repetitivas do tronco e da região cervical para tentar restabelecer o contato visual.

Figura 24. (a) Visão completa do Iron Roughneck e base dos tubos; (b) Top Driver não visível ao sondador



(a)

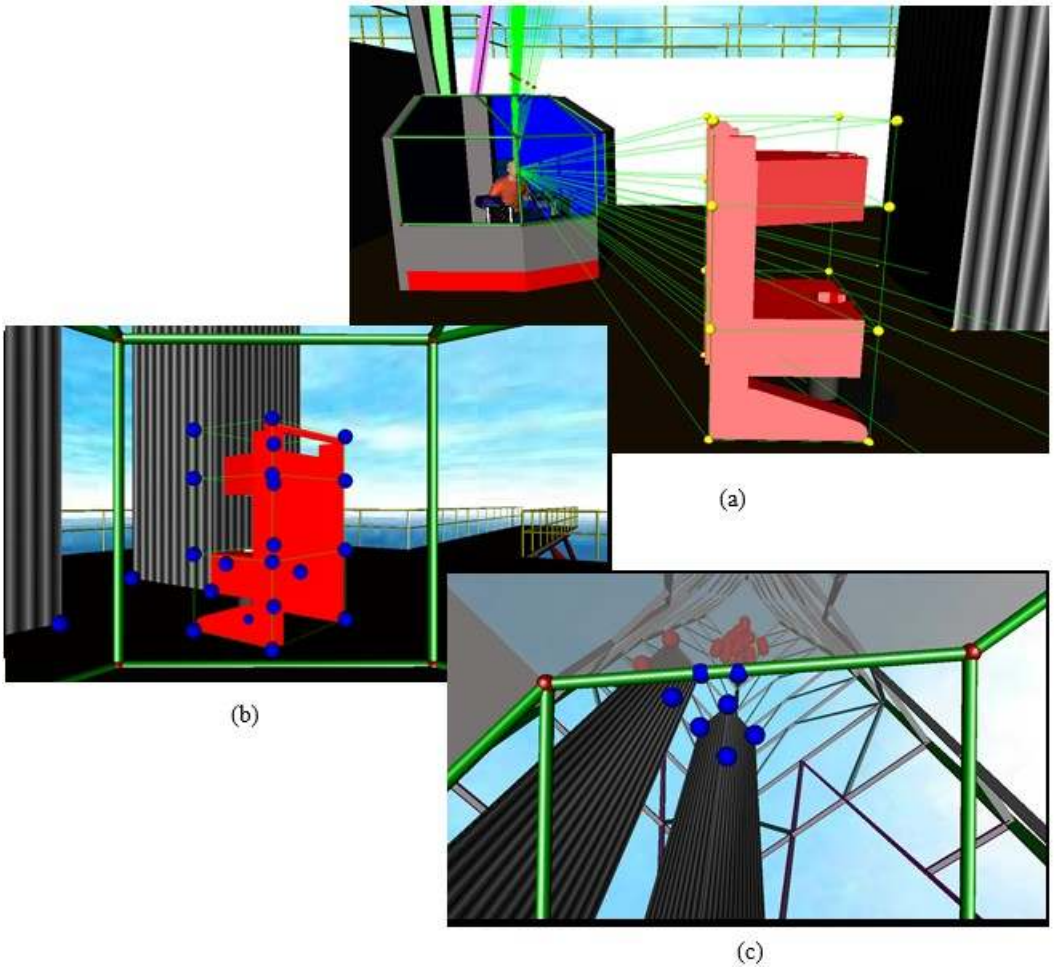


(b)

Fonte: Elaborada pelos autores

Para quantificar a severidade dessas obstruções visuais antes da aplicação das rotinas evolutivas, mapeou-se um universo discreto composto por 93 pontos de controle distribuídos sobre a volumetria dos equipamentos da sonda. Utilizando técnicas geométricas de *Ray-Casting* a partir da coordenada inicial dos olhos do sondador (X = -5,80m); (Y = 0,00m); (Z = 5,70m), o algoritmo computou que apenas 35 dos 93 pontos mapeados eram efetivamente visíveis (Figuras 25a, 25b e 25c), ratificando a ineficiência do arranjo físico convencional.

Figura 25. (a) Modelagem das retas e dos pontos de interseção; (b) Visualização dos pontos visíveis; (c) Visualização dos pontos visíveis e dos não visíveis



Fonte: Do Autor

4.1.2 Otimização via algoritmo genético e análise comparativa

Com o propósito de maximizar a segurança operacional e ergonômica, o arranjo espacial da cabine foi submetido ao processo evolutivo estocástico guiado pelas duas variantes da função objetivo formuladas na metodologia.

4.1.3 Análise sob a ótica da função objetivo quantitativa

Ao parametrizar a busca heurística com foco exclusivo no ganho numérico de visibilidade (Função Quantitativa), o algoritmo convergiu para uma coordenada ótima final que propiciou a visualização de 63 pontos do universo amostral, representando um incremento linear de aproximadamente 30% na capacidade de monitoramento em relação ao arranjo empírico de referência.

Esse ganho foi obtido por meio de deslocamentos sutis nas três coordenadas cartesianas, cujos deltas de translação espacial e variações paramétricas estão consolidados na Tabela 1. As linhas de

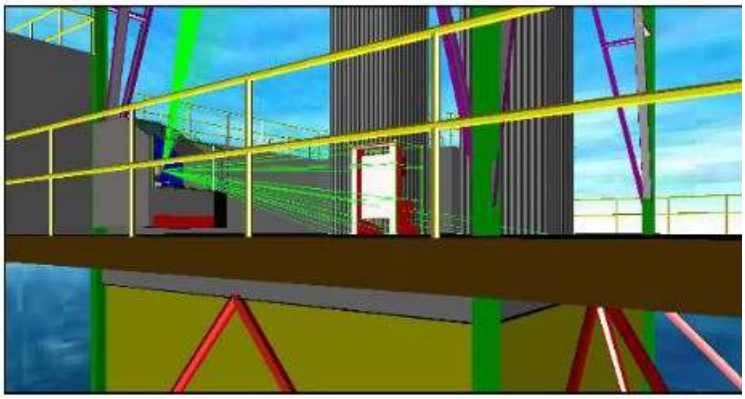
visada resultantes e os pontos remanescentes de obstrução são ilustrados graficamente nas Figuras 27a e 27b.

Tabela 1. Variação das coordenadas espaciais da cabine da P-XIII via Função Quantitativa

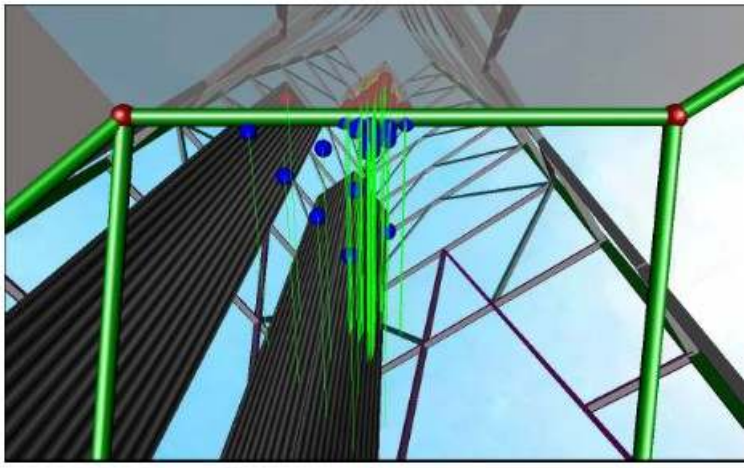
Mapeamento de Posição	Pontos Visíveis	Coordenada X (m)	Coordenada Y (m)	Coordenada Z (m)
Posição Inicial	35	-5,80000	0,00000	5,70000
Posição Final	63	-5,99619	0,25531	6,15481
Deslocamento	+28	-0,19619	+0,25531	+0,45481

Fonte: Do Autor

Figura 26. (a) Visualização da nova posição da cabine da P-XIII; (b) Visualização dos pontos visíveis e dos não visíveis



(a)



(b)

Fonte: Do Autor

Embora a rotina quantitativa maximize o número absoluto de alvos interceptados, ela falha sob a perspectiva de fatores humanos por tratar todos os pontos com igual relevância. No processamento pós-otimização, calculou-se a distância euclidiana entre a projeção dos raios visuais e o baricentro das janelas para monitorar a excentricidade da visada (Tabela 2). Evidenciou-se que o Ponto 21 (associado ao *Top Drive*) permaneceu na condição de oclusão visual, posicionando-se a uma distância crítica de

85,56 cm em relação ao baricentro do vidro mais próximo, inviabilizando sua recuperação sem esforços posturais acentuados.

Tabela 2. completa: Flags dos pontos, suas distâncias e ponto mais distante aos baricentros Plataforma P-XIII – Quantitativa

Ponto	Flag	Distância ao baricentro mais próximo (m)	Ponto	Flag	Distância ao baricentro mais próximo (m)
1	Flag [1]	0.505933	48	Flag [1]	0.773986
2	Flag [0]	0.837941	49	Flag [1]	0.730515
3	Flag [0]	0.811095	50	Flag [1]	0.747622
4	Flag [0]	0.806364	51	Flag [0]	0.791505
5	Flag [0]	0.832775	52	Flag [1]	0.722573
6	Flag [0]	0.805052	53	Flag [1]	0.767229
7	Flag [1]	0.777670	54	Flag [1]	0.739853
8	Flag [0]	0.791813	55	Flag [0]	0.784927
9	Flag [0]	0.818448	56	Flag [1]	0.714183
10	Flag [0]	0.806212	57	Flag [1]	0.760092
11	Flag [0]	0.833659	58	Flag [1]	0.777671
12	Flag [1]	0.772094	59	Flag [1]	0.731286
13	Flag [0]	0.800110	60	Flag [1]	0.752230
14	Flag [0]	0.818818	61	Flag [1]	0.704939
15	Flag [0]	0.790739	62	Flag [1]	0.603990
16	Flag [0]	0.807487	63	Flag [1]	0.518392
17	Flag [1]	0.779210	64	Flag [1]	0.303354
18	Flag [0]	0.851591	65	Flag [1]	0.301419
19	Flag [0]	0.789676	66	Flag [1]	0.630761
20	Flag [0]	0.795088	67	Flag [1]	0.436204
21	Flag [0]	0.855635	68	Flag [1]	0.218523
22	Flag [0]	0.792327	69	Flag [1]	0.433383
23	Flag [1]	0.727992	70	Flag [1]	0.083656
24	Flag [1]	0.734730	71	Flag [1]	0.193100
25	Flag [0]	0.797552	72	Flag [1]	0.257091
26	Flag [1]	0.783997	73	Flag [1]	0.229841
27	Flag [0]	0.847343	74	Flag [1]	0.350835
28	Flag [1]	0.720926	75	Flag [1]	0.0574833
29	Flag [0]	0.786853	76	Flag [1]	0.161841
30	Flag [0]	0.842875	77	Flag [1]	0.397115
31	Flag [1]	0.778031	78	Flag [1]	0.566271
32	Flag [1]	0.781112	79	Flag [0]	0.835372
33	Flag [1]	0.713510	80	Flag [1]	0.718456
34	Flag [1]	0.771754	81	Flag [1]	0.546798
35	Flag [0]	0.838167	82	Flag [1]	0.491548
36	Flag [1]	0.705717	83	Flag [1]	0.796090
37	Flag [1]	0.775083	84	Flag [1]	0.675934
38	Flag [0]	0.809194	85	Flag [1]	0.346577
39	Flag [1]	0.768536	86	Flag [1]	0.461440
40	Flag [1]	0.761932	87	Flag [1]	0.618061
41	Flag [0]	0.803611	88	Flag [1]	0.526613
42	Flag [0]	0.786471	89	Flag [1]	0.299907
43	Flag [1]	0.745188	90	Flag [1]	0.640496
44	Flag [1]	0.738043	91	Flag [1]	0.570754
45	Flag [1]	0.780391	92	Flag [1]	0.472238
46	Flag [0]	0.797723	93	Flag [1]	0.335325
47	Flag [1]	0.754971	Σ distâncias		61.40890

Fonte: Do Autor

4.5 ANÁLISE SOB A ÓTICA DA FUNÇÃO OBJETIVO QUALITATIVA

Para mitigar a limitação do modelo anterior, aplicou-se a Função Objetivo Qualitativa, que penaliza desvios geométricos em relação ao baricentro dos vidros e estabelece pesos diferenciados para blindar alvos vitais, como a "Boca do Poço". Para salvaguardar este ponto, incorporou-se uma restrição matemática estrita que aplica uma penalidade de 10.000 unidades à função de custo caso a linha de visada com a boca do poço seja interceptada, tornando soluções de oclusão geneticamente inviáveis.

O algoritmo sob a abordagem qualitativa convergiu para uma configuração posicional refinada (Tabela 3), alcançando o mesmo teto numérico de 63 pontos desobstruídos, porém assegurando uma distribuição visual ergonomicamente superior.

Tabela 3. Variação das coordenadas espaciais da cabine da P-XIII via Função Qualitativa

Mapeamento de Posição	**Pontos Visíveis**	**Coordenada X (m)**	**Coordenada Y (m)**	**Coordenada Z (m)**
Posição Inicial	35	-5,80000	0,00000	5,70000
Posição Final	63	-5,99305	0,17947	6,19030
Deslocamento	+28	-0,19305	+0,17947	+0,49030

Fonte: Do Autor

Tabela 4. Flags dos pontos e suas distâncias aos baricentros Plataforma P-XIII - Qualitativa

Ponto	Flag	Distância ao baricentro mais próximo (m)	Ponto	Flag	Distância ao baricentro mais próximo (m)
1	Flag [1]	0.489132	48	Flag [1]	0.773861
2	Flag [0]	0.83766	49	Flag [1]	0.730448
3	Flag [0]	0.810845	50	Flag [1]	0.747468
4	Flag [0]	0.806142	51	Flag [0]	0.791292
5	Flag [0]	0.832521	52	Flag [1]	0.722525
6	Flag [0]	0.804882	53	Flag [1]	0.76712
7	Flag [1]	0.777533	54	Flag [1]	0.739713
8	Flag [0]	0.791639	55	Flag [0]	0.784726
9	Flag [0]	0.818242	56	Flag [1]	0.714155
10	Flag [0]	0.805965	57	Flag [1]	0.759999
11	Flag [0]	0.83338	58	Flag [1]	0.777485
12	Flag [1]	0.771965	59	Flag [1]	0.731163
13	Flag [0]	0.799947	60	Flag [1]	0.752158
14	Flag [0]	0.818583	61	Flag [1]	0.704936
15	Flag [0]	0.790537	62	Flag [1]	0.580272
16	Flag [0]	0.807292	63	Flag [1]	0.496994
17	Flag [1]	0.779049	64	Flag [1]	0.283597
18	Flag [0]	0.851255	65	Flag [1]	0.280868
19	Flag [0]	0.789412	66	Flag [1]	0.616662
20	Flag [0]	0.79482	67	Flag [1]	0.419502
21	Flag [0]	0.855297	68	Flag [1]	0.2038
22	Flag [0]	0.792203	69	Flag [1]	0.427078
23	Flag [1]	0.727949	70	Flag [1]	0.099454
24	Flag [1]	0.734675	71	Flag [1]	0.187539
25	Flag [0]	0.797417	72	Flag [1]	0.263986
26	Flag [1]	0.783737	73	Flag [1]	0.254047
27	Flag [0]	0.847008	74	Flag [1]	0.359133
28	Flag [1]	0.720899	75	Flag [1]	0.0684918
29	Flag [0]	0.786741	76	Flag [1]	0.179405
30	Flag [0]	0.84254	77	Flag [1]	0.412761
31	Flag [1]	0.777775	78	Flag [1]	0.551602
32	Flag [1]	0.781012	79	Flag [0]	0.835231
33	Flag [1]	0.713501	80	Flag [1]	0.718573
34	Flag [1]	0.771502	81	Flag [1]	0.528212
35	Flag [0]	0.837834	82	Flag [1]	0.483016
36	Flag [1]	0.705726	83	Flag [1]	0.796134
37	Flag [1]	0.774996	84	Flag [1]	0.676262
38	Flag [0]	0.808956	85	Flag [1]	0.332727
39	Flag [1]	0.768348	86	Flag [1]	0.452513
40	Flag [1]	0.761754	87	Flag [1]	0.618349
41	Flag [0]	0.80338	88	Flag [1]	0.526983
42	Flag [0]	0.78632	89	Flag [1]	0.287524
43	Flag [1]	0.745091	90	Flag [1]	0.637553
44	Flag [1]	0.73796	91	Flag [1]	0.571292
45	Flag [1]	0.780251	92	Flag [1]	0.472917
46	Flag [0]	0.7975	93	Flag [1]	0.329661
47	Flag [1]	0.754804	Σ distâncias		61.2552

Fonte: Do Autor

A convergência qualitativa reduziu a métrica global de excentricidade visual (∑distâncias) de 61,40 m para 61,25 m, aproximando as projeções dos alvos críticos em direção ao centro geométrico dos vidros da cabine. A variação espacial no pior cenário de obstrução (Ponto 21) decresceu para 85,52 m. Devido ao confinamento severo do espaço de busca imposto pelas estruturas metálicas da sonda, o delta de melhora geométrica para os pontos cegos absolutos fixou-se em 0,0338 cm.

Contudo, o ganho de segurança operacional é expressivo: enquanto o modelo quantitativo negligencia a criticidade dos setores da plataforma, a inclusão do algoritmo genético qualitativo amparado pelo Gêmeo Digital assegura de forma perpétua a visibilidade livre da Boca do Poço, minimizando a necessidade de torções posturais e preservando a saúde ocupacional do operador (Tabela 5).

Tabela 5. Síntese comparativa de desempenho entre os modelos de otimização para a P-XIII

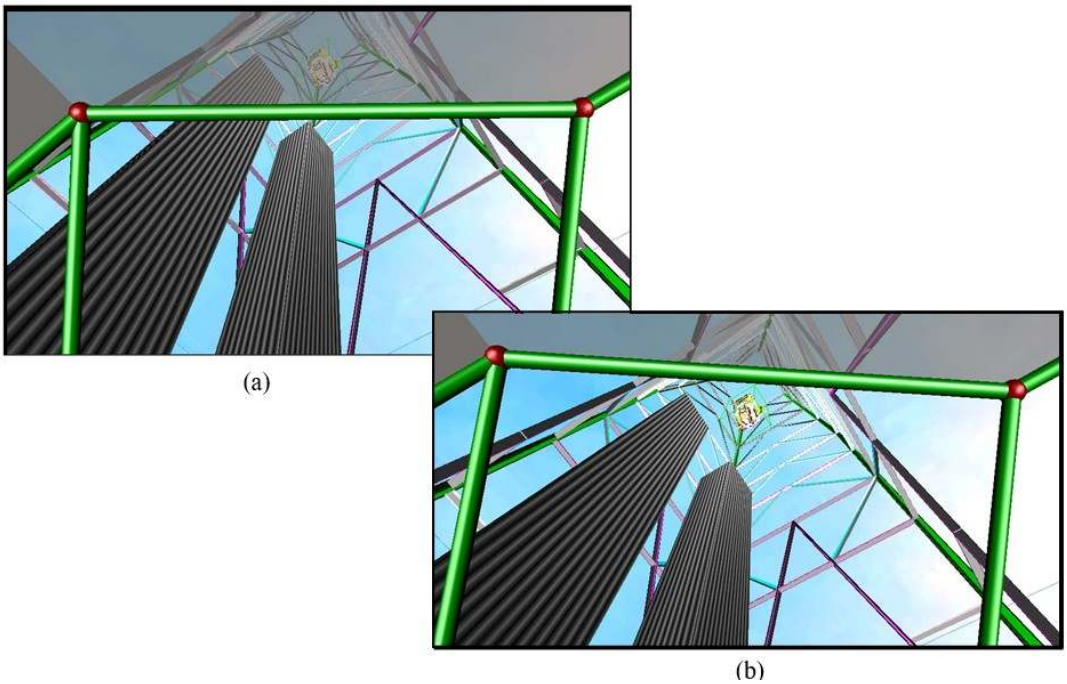
Abordagem Heurística	**Pontos Visíveis Obtidos**	**Identificação do Pior Ponto Ocluso**	**Distância Crítica ao Baricentro (m)**	**Somatório Acumulado das Distâncias ($\sum D_i$) (m)**
Modelo Quantitativo	63	Ponto 21 (*Top Drive*)	0,855635	61,4089
Modelo Qualitativo	63	Ponto 21 (*Top Drive*)	0,855297	61,2552

Fonte: Do Autor

5 CONCLUSÃO

A aplicação do Algoritmo Genético (AG) integrado ao conceito de Gêmeo Digital e à Realidade Virtual demonstrou alta eficácia no reposicionamento estratégico da cabine de controle da plataforma P-XIII. Esta abordagem automatizada substituiu o método empírico tradicional — baseado puramente em estimativas de projetistas ou em plantas de sondas antigas — por uma solução matemática de engenharia de alta precisão. No modelo convencional de design, a cabine seria instalada em uma posição inicial na qual o sondador conseguiria visualizar apenas 35 dos 93 pontos críticos de monitoramento propostos. Com a utilização do programa de AG, foram processadas de forma otimizada as funções objetivo quantitativa e qualitativa dentro do espaço restrito de deslocamento da plataforma. O algoritmo calculou o vetor de translação exato da cabine em relação à Boca do Poço, determinando que o módulo deve ser deslocado em X = -599,305 cm, em Y = +17,947 cm e em Z = +619,030 cm, o que resulta no ponto de coordenadas finais da cabine igual a (-5.999305, +0.17947, +6.19030).

Figura 27. (a) Visualização da posição 1 do sondador; (b) Visualização da posição 2 do sondador.



Fonte: Do Autor

A simulação visual tridimensional no ambiente de Gêmeo Digital validou a eficiência desse resultado matemático. As imagens geradas pelo sistema (Fig. 28a e 28b) comprovaram que, embora a nova posição ainda contasse com alguns pontos originalmente não visíveis devido aos limites físicos, o intervalo residual ficou extremamente próximo ao visor. Dessa forma, o Gêmeo Digital demonstrou de maneira prática que uma variação ergonômica sutil na postura do operador para a frente (transição da visualização na posição 1 para a posição 2) é suficiente para que o sondador visualize todos os 93 pontos com total facilidade. Em suma, a pesquisa conclui que a convergência entre o Algoritmo Genético para otimização espacial e o Gêmeo Digital para homologação por Realidade Virtual representa uma ferramenta indispensável para a engenharia offshore, superando o empirismo dos fabricantes e garantindo máxima visibilidade, segurança operacional e conformidade ergonômica para o período de reformas da P-XIII.

REFERÊNCIAS

CONSTELLATION. Operações: Gêmeos digitais, operação remota, automação e monitoramento. Rio de Janeiro: Constellation, 2022. Disponível em: theconstellation.com. Acesso em: 10 jun. 2026.

EL-SHORBAGY, M. A. *et al.* Digital Twin Frameworks for Oil and Gas Processing Plants: A structured synthesis on topside and offshore systems. Processes, Basel, v. 13, n. 11, p. 3488, out. 2025.

GAZPROM NEFT. Gazprom Neft, ADNOC step up efforts to commercialize digital technology. Journal of Petroleum Technology (JPT), St Petersburg, 16 fev. 2022. Upstream Tech. Disponível em: spe.org. Acesso em: 06 jul. 2026.

IJIRSET. VR oil drilling simulator: an immersive virtual platform for industrial safety training. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (IJIRSET), (S. l.), v. 14, n. 3, p. 1245-1251, mar. 2025. Disponível em: ijirset.com. Acesso em: 01 jul. 2026.

MDPI. Shipbuilding 4.0: a systematic literature review and virtual platform insights. Applied Sciences, Basel, v. 14, n. 14, p. 6363, jul. 2024. DOI: 10.3390/app14146363. Disponível em: mdpi.com. Acesso em: 16 mai. 2026.

RESEARCHGATE. The use of digital human modeling in ergonomic design and product development. ResearchGate Review Articles, (S. l.), p. 1-15, jul. 2023. Disponível em: researchgate.net. Acesso em: 02 jul. 2026.

REVISTA AÇÃO ERGONÔMICA. Ergonomia cognitiva e rastreamento ocular na tomada de decisão em atividades de controle de poço. Revista Ação Ergonômica, São Paulo, v. 19, n. 2, e202506, jun. 2025. DOI: 10.4322/rae.v19n2.e202506. Disponível em: revistaacaoergonomica.org. Acesso em: 02 abr. 2026.

SCIENCEDIRECT. Development of offshore drilling platform simulation for virtual onboard experience. Journal of Ocean Engineering and Science, (S. l.), v. 6, n. 4, p. 321-332, dez. 2021. DOI: 10.1016/j.joes.2021.02.001. Disponível em: sciencedirect.com. Acesso em: 08 jul. 2026.

SCIENCEDIRECT. Optimization of drilling rate based on genetic algorithms and intelligent parameter hyper-tuning. Journal of Petroleum Science and Engineering, (S. l.), v. 235, p. 100105, mar. 2025. Disponível em: sciencedirect.com. Acesso em: 09 abr. 2026.

STUDIES PUBLICAÇÕES. Cognitive ergonomics in the analysis of work on offshore production units. Social and Health Sciences Journal, Curitiba, v. 4, n. 2, p. 89-102, jul. 2023. Disponível em: studiespublicacoes.com.br. Acesso em: 03 jul. 2026.

WANG, L.; ROMANOSKY, K. Human-centric assembly in smart factories: leveraging collaborative intelligence and mixed reality. CIRP Annals, ScienceDirect, v. 74, n. 2, p. 789-812, maio 2025.

WANYAN, S. *et al.* Digital twin technology and ergonomics for comprehensive improvement of safety in the petrochemical industry. Process Safety Progress, Wiley Online Library, v. 43, n. 1, p. 56-68, jan. 2024.