

INSTITUTO UNIVERSITÁRIO EGAS MONIZ

MESTRADO INTEGRADO EM MEDICINA DENTÁRIA

A INTEGRAÇÃO DA ROBÓTICA E DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA PRÓTESE DENTÁRIA E IMPLANTOLOGIA ORAL

Trabalho submetido por
Anis Debabeche
para a obtenção do grau de Mestre em Medicina Dentária

Junho de 2025



EGAS MONIZ SCHOOL
of HEALTH & SCIENCE

INSTITUTO UNIVERSITÁRIO
EGAS MONIZ

INSTITUTO UNIVERSITÁRIO EGAS MONIZ

MESTRADO INTEGRADO EM MEDICINA DENTÁRIA

A INTEGRAÇÃO DA ROBÓTICA E DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA PRÓTESE DENTÁRIA E IMPLANTOLOGIA ORAL

Trabalho submetido por
Anis Debabeche
para a obtenção do grau de Mestre em Medicina Dentária

Trabalho orientado por
Jorge Manuel Trinidad Rebola

Junho de 2025

AGRADECIMENTOS

Ao terminar esta etapa importante, agradeço à instituição Egas Moniz pela formação e pelas oportunidades oferecidas. Obrigado a todos os professores, pré-clínicos e clínicos, pelo apoio constante ao longo do percurso.

Sou grato ao meu orientador, professor doutor Jorge Manuel Trinidad Rebola, pela orientação rigorosa e pela partilha generosa do seu conhecimento.

À Madalena, obrigado por estares sempre presente com amizade e apoio.

Aos seguranças, funcionários da limpeza, cafeteria, manutenção e serviços administrativos, o meu sincero agradecimento pelo vosso trabalho discreto mas essencial.

À minha mãe e ao meu pai,

Sem vocês, eu nunca estaria onde estou. O vosso amor, apoio e sacrifícios são indescritíveis.

A minha gratidão é infinita. São os meus faróis, os meus pilares.

Ao meu irmão,

Modelo a seguir, apoio constante. Os teus conselhos e o teu humor foram essenciais neste percurso.

À minha irmã,

Cúmplice e guia, sempre presente. Partilhamos memórias e sorrisos. Obrigado por tudo.

Aos meus tios, tias e primos,

Obrigado pelos laços fortes e os verões cheios de calor, gargalhadas e memórias inesquecíveis.

Ao Pierre e ao Théo,

Os meus "Sanchos", os meus "day one". Amizade e lealdade incondicionais.

À Inès, Héba, Maïssa, Mélissa, Anis, Amine, Manu,

Obrigado pelos "BOB" e por tantos momentos únicos.

Ao Adam, ao Boudin e ao Lucas,

Les capitães qu'ils pensent être

To all the incredible people I met in Lisbon

Thank you for the memories, L., this one is for you !

RESUMO

Esta dissertação apresenta uma revisão narrativa estruturada sobre a integração da inteligência artificial (IA) e da robótica na medicina dentária contemporânea, com ênfase na implantologia e na reabilitação protética. A literatura publicada entre 2018 e 2025 foi recolhida nas bases PubMed, Scopus, Web of Science, IEEE Xplore e Google Scholar, depois filtrada, agrupada e analisada criticamente. Os resultados revelam uma expansão acelerada de aplicações de IA, desde redes convolucionais que detectam alterações ósseas peri-implantares até motores de design que sugerem morfologias de coroas em segundos, bem como o amadurecimento de sistemas robóticos capazes de executar osteotomias sub-milimétricas e de colocar implantes guiados. Estes avanços encurtam ciclos laboratoriais, melhoram a precisão cirúrgica e aproximam a área do modelo 4P, preditivo, preventivo, personalizado, participativo. Persistem quatro desafios: qualidade e enviesamento dos dados, explicabilidade dos algoritmos, cibersegurança e privacidade, e necessidade de formação digital contínua dos clínicos. O trabalho apresenta recomendações práticas para enfrentar estas questões, ajudando profissionais, investigadores e decisores a levar as tecnologias emergentes do laboratório para à cadeira do paciente, mantendo padrões de ética e segurança.

Palavras-chave: “Inteligência Artificial” ; “Robótica” ; “Implantologia” ; “Próteses Dentárias”

ABSTRACT

This dissertation presents a structured narrative review on the integration of artificial intelligence (AI) and robotics in contemporary dental medicine, with a focus on implantology and prosthetic rehabilitation. Literature published between 2018 and 2025 was collected from PubMed, Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, and Google Scholar, then filtered, grouped, and critically analyzed. The findings reveal a rapid expansion of AI applications, from convolutional networks detecting peri-implant bone changes to design engines suggesting crown morphologies in seconds, as well as the maturation of robotic systems capable of performing sub-millimetric osteotomies and guided implant placement. These advances shorten laboratory cycles, improve surgical precision, and bring the field closer to the 4P model: predictive, preventive, personalized, and participatory dentistry. Four key challenges remain: data quality and bias, algorithm explainability, cybersecurity and privacy, and the ongoing need for clinicians' digital training. This work offers practical recommendations to address these issues, helping professionals, researchers, and decision-makers transition emerging technologies from the lab to the dental chair while upholding ethical and safety standards.

Keywords: “Artificial Intelligence” ; “Robotics” ; “Implantology” ; “Dental Prosthetics”

ÍNDICE

I) INTRODUÇÃO	13
II) DESENVOLVIMENTO	15
Metodologia de Investigação.....	15
1) Fundamentos da inteligência Artificial e da Robótica na medicina Dentária	15
1.1) Definições e Conceitos-Chave.....	15
1.1.1) Tipologia da Inteligência Artificial.....	16
1.1.2) Princípios de Funcionamento.....	19
1.1.2.1) Algoritmos	19
1.1.2.2) Aprendizagem automática (Machine learning).....	19
1.1.2.3) Aprendizagem Profunda	20
1.1.2.4) Redes Neurais Artificiais	21
1.1.2.5) Visão por Computador.....	21
1.1.2.6) Processamento de Linguagem Natural.....	21
1.2) A IA e a Robótica no Contexto Dentário.....	22
1.2.1) Desenvolvimento Histórico	22
1.2.2) Função de apoio à decisão	23
1.2.3) Áreas Gerais de Aplicação na dentisteria	24
2) Aplicações da IA e da Robótica em Prótese Dentária e Implantologia	26
2.1) Implantologia Oral.....	26
2.1.1) Rastreamento e Diagnóstico Pré-Implantar.....	26
2.1.2) Planejamento Implantar	26
2.1.3) Cirurgia Assistida	27
2.1.4) Conceção e Fabrico	29
2.1.5) Reabilitação Protética e Manutenção.....	32
2.2) Prótese Dentária (excluindo Implantologia)	36
2.2.1) Fluxo Digital e CAD/CAM	36
2.2.2) Diagnóstico e Planejamento com IA.....	39

2.2.3)	Conceção Protética	41
2.2.4)	Prótese Removível e Integração da IA	44
2.2.5)	Teledentisteria e Monitorização.....	46
3)	Desafios, Impactos e Perspectivas Futuras	48
3.1)	Contribuições e Benefícios	48
3.2)	Limitações e Desafios Técnicos	50
3.3)	Desafios Éticos, Legais e Sociais	52
3.4)	Inovações e Futuro da Dentisteria	54
III)	CONCLUSÕES.....	57
	Bibliografia.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Simulações e automação, fechando o ciclo da tela à cirurgia, criada com o apoio de ferramentas gráficas e inteligência artificial	29
Figura 2: Acompanhamento anual assistido por inteligência artificial, criada com o apoio de ferramentas gráficas e inteligência artificial	37
Figura 3: Transferência digital segura dos dados implantológicos, criada com o apoio de ferramentas gráficas e inteligência artificial	37
Figura 4: Prevenção de emergências por meio de sensores inteligentes, criada com o apoio de ferramentas gráficas e inteligência artificial	39
Figura 5: Radiografia periapical ilustrativa gerada com inteligência artificial, mostrando coroa, restaurações, perda óssea periodontal e segmentação do canal radicular. Ilustração adaptada de Rokaya et al. (2024)	45
Figura 6: Fluxo digital de concepção protética com IA, criada com o apoio de ferramentas gráficas e inteligência artificial	48
Figura 7: Arquitetura de decisão baseada em IA para o fluxo digital da prótese removível, criada com o apoio de ferramentas gráficas e inteligência artificial	52

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Hierarquia das ambições em inteligência artificial: do nível «IA estreita», focado numa única tarefa, até à «IA geral», capaz de igualar ou superar os humanos em múltiplos domínios, segundo Brynjolfsson (2022) e Fei et al. (2022)	17
Tabela 2: Três modos principais de aprendizagem	21
Tabela 3: Evolução da robótica na medicina dentária: principais marcos de 1960 aos anos 2020 (Ahmad et al., 2021)	23
Tabela 4: Impacto da IA no fluxo de trabalho protético digital: acelera etapas-chave, aumenta a precisão e reforça a segurança clínica	35
Tabela 5: A IA aprimora cada fase do fluxo protético digital, aumentando a precisão e reduzindo significativamente o tempo clínico e laboratorial	43

LISTA DE SIGLAS

4P – Predictive, Preventive, Personalized, Participatory

AGI – Artificial General Intelligence

AI – Artificial Intelligence

ANN – Artificial Neural Network

AR – Augmented Reality

CAIS – Computer-Assisted Implant Surgery

CAD – Computer-Aided Design

CAM – Computer-Aided Manufacturing

CBCT – Cone-Beam Computed Tomography

CDSS – Clinical Decision Support System

CNN – Convolutional Neural Network

CSM – Conditional Shape Model

CT – Computed Tomography

DL – Deep Learning

EHR – Electronic Health Record

ExAI – Explainable Artificial Intelligence

FDA – Food and Drug Administration

FEA – Finite Element Analysis

GAN – Generative Adversarial Network

GDPR – General Data Protection Regulation

GPU – Graphics Processing Unit

IA – Inteligência Artificial

ML – Machine Learning

NLP – Natural Language Processing

PCA – Principal Component Analysis

RNN – Recurrent Neural Network

r-CAIS – Robotic Computer-Assisted Implant Surgery

STL – Standard Tessellation Language

ViT – Vision Transformer

VR – Virtual Reality

D) INTRODUÇÃO

Nas últimas duas décadas, a convergência entre Inteligência Artificial (IA) e robótica alterou profundamente o panorama da medicina dentária. Ferramentas de visão computacional capazes de detetar cáries em radiografias, modelos de aprendizagem profunda que prognosticam a estabilidade de implantes e sistemas robóticos que realizam osteotomias com precisão sub-milimétrica já não pertencem apenas aos laboratórios de investigação; começam a chegar às clínicas e aos laboratórios de prótese. Contudo, o rápido crescimento destas inovações gerou um corpo de evidência disperso, com estudos que diferem na metodologia, nas métricas de desempenho e no contexto clínico, dificultando a avaliação rigorosa da sua aplicabilidade diária.

Objetivos específicos:

Reunir, categorizar e analisar criticamente a literatura relevante sobre IA e robótica em implantologia e prótese dentária publicada entre 2018 e 2025.

Avaliar a aplicabilidade clínica das tecnologias emergentes identificadas, determinando o grau de maturidade e o impacto potencial na prática diária.

Identificar limitações, desafios éticos e oportunidades de inovação, elaborando recomendações para investigadores, profissionais e decisores de política de saúde.

Cumprir estes objetivos permitirá clarificar o estado da arte, estabelecer referências de boa prática e propor estratégias que acelerem a translação de inovações do laboratório para a cadeira clínica, salvaguardando padrões de segurança e princípios éticos.

I) DESENVOLVIMENTO

Metodologia de Investigação

O capítulo de Metodologia de Investigação descreve, em detalhe, todas as etapas: estratégia de pesquisa, critérios de inclusão e exclusão, processo de extração e síntese de dados, e métodos de avaliação crítica da qualidade dos estudos. Esta secção garante transparência e permite que outros investigadores repliquem ou actualizem o trabalho.

Esta dissertação responde a esse desafio recorrendo a uma revisão narrativa estruturada enriquecida com elementos próprios de revisões sistemáticas. O foco recai sobre a aplicação da IA e da robótica em duas áreas de elevado impacto clínico, implantologia e prótese dentária, cobrindo publicações entre janeiro de 2018 e dezembro de 2024. Para garantir reprodutibilidade e abrangência, a pesquisa bibliográfica abrangeu cinco bases de dados académicas reconhecidas: PubMed/MEDLINE, Scopus.

Limitações

Esta revisão limita-se a publicações em inglês disponíveis até março de 2025, podendo excluir estudos emergentes ou literatura cinzenta relevante. A heterogeneidade metodológica dos artigos impediu meta-análises quantitativas robustas, impondo cautela na generalização dos resultados.

1) Fundamentos da inteligência Artificial e da Robótica na medicina Dentária

1.1) Definições e Conceitos-Chave

A inteligência artificial (IA) é a busca científica e de engenharia de sistemas informáticos capazes de desempenhar funções cognitivas que normalmente requerem inteligência humana, por exemplo, percepção, compreensão e tomada de decisões complexas (Secinaro et al., 2021). Na literatura da ciência da computação, IA é qualquer técnica que permite aos computadores imitar o comportamento humano e reproduzir, ou até mesmo superar, a tomada de decisões humanas para resolver tarefas complexas de forma independente ou com intervenção humana mínima (Janiesch, Zschech e Heinrich, 2021). As primeiras implementações de IA dependiam

de sistemas especializados explícitos e baseados em regras, mas a IA moderna centra-se cada vez mais em abordagens orientadas por dados que aprendem padrões a partir de conjuntos de dados grandes e heterogêneos (Janiesch et al., 2021). Esta mudança reflete dois objetivos interligados: Velocidade e escala, os sistemas de IA executam operações cognitivas muito mais rapidamente e em fluxos de dados muito maiores do que os operadores humanos conseguem

gerir (Secinaro et al., 2021). O autoaperfeiçoamento contínuo, por meio da exposição iterativa a novos dados, os modelos de IA refinam suas representações internas, aumentando constantemente a precisão e a robustez ao longo do tempo (Janiesch et al., 2021). Dentro dessa definição ampla, o aprendizado de máquina *machine learning* (ML) e o aprendizado profundo *deep learning* (DL) atuam como os principais motores da IA contemporânea. O ML “aprende automaticamente a partir de dados de treino específicos do problema para construir modelos analíticos” (Janiesch et al., 2021), enquanto o DL, baseado em redes neurais artificiais multicamadas, estende essas capacidades a entradas não estruturadas, como imagens ou linguagem natural, e frequentemente atinge um desempenho sobre-humano em tarefas estreitamente definidas (Janiesch et al., 2021). Consequentemente, a IA moderna é melhor compreendida como um ecossistema de algoritmos que, coletivamente, automatizam a percepção, o raciocínio e a tomada de decisões em diversos domínios, incluindo, entre outros, a medicina e a odontologia (Secinaro et al., 2021).

1.1.1) Tipologia da Inteligência Artificial

Os sistemas de inteligência artificial (IA) podem ser compreendidos através da análise de duas dimensões importantes:

1. Qual é a sua capacidade cognitiva
2. Qual é o seu papel em relação aos profissionais humanos.

Colocar qualquer sistema de IA nestes dois eixos ajuda a esclarecer o que ele pode fazer, como pode ser utilizado e quem pode beneficiar com isso. A hierarquia entre os diferentes tipos de IA, da mais restrita à mais geral, é organizada e comparada na Tabela 1.

Tabela 1: Hierarquia das ambições em inteligência artificial: do nível «IA estreita», focado numa única tarefa, até à «IA geral», capaz de igualar ou superar os humanos em múltiplos domínios, segundo Brynjolfsson (2022) e Fei et al. (2022).

Nível	Ambição principal	Notas ilustrativas
IA Estreita (ou “fraca”)	Dominar uma <i>única tarefa bem definida</i> , muitas vezes superando os humanos apenas nesse domínio específico	Exemplos incluem motores de conversão de voz em texto e programas de xadrez (Brynjolfsson, 2022)

Nível	Ambição principal	Notas ilustrativas
IA Semelhante à Humana (HLAI)	Reproduzir a <i>amplitude</i> da cognição cotidiana, visão, linguagem, planeamento flexível visando passar testes tipo Turing	Os avanços no reconhecimento de imagem e voz sugerem que alguns limiares iniciais já foram ultrapassados (Brynjolfsson, 2022)
Inteligência Artificial Geral (AGI)	Igualar ou superar o desempenho humano <i>em diversos domínios</i> , lidar com problemas imprevistos e transferir conhecimento entre contextos	As principais características são a cobertura ampla de tarefas, resiliência e rápida transferência entre domínios (Fei et al., 2022)

Nota: Embora se presuma frequentemente que a AGI se assemelha à inteligência humana, Brynjolfsson enfatiza que a inteligência verdadeiramente geral pode ir muito além das características humanas. Entretanto, Fei et al. sugerem que os grandes modelos multimodais atuais (treinados tanto com imagens quanto com texto) são um passo importante em direção à IGA, graças à sua capacidade de raciocinar com diferentes tipos de dados.

Brynjolfsson também destaca uma segunda distinção importante: por que a IA é usada:

Automação: a IA substitui o trabalho humano, muitas vezes em tarefas repetitivas, perigosas ou que exigem pouca qualificação. Embora isso possa aumentar a eficiência, também pode reduzir o poder de negociação dos trabalhadores e contribuir para a desigualdade (Brynjolfsson, 2022).

Aumento: a IA trabalha com os humanos, melhorando o que eles podem fazer. Por exemplo, na área da saúde, as ferramentas de IA podem detetar anomalias em exames, permitindo que os médicos se concentrem em tomadas de decisão complexas. Essa parceria ajuda a evitar o que Brynjolfsson chama de “armadilha de Turing”, em que os humanos são marginalizados pelas máquinas (Brynjolfsson, 2022).

Ao combinar o escopo funcional e o papel estratégico, podemos definir quatro tipos práticos de IA:

1) Automação Restrita

→ Sistemas estreitos que substituem humanos em tarefas simples e repetitivas, exemplo: robôs industriais que separam e organizam objetos em fábricas.

2) Aumento Restrito

→ Sistemas estreitos que auxiliam os humanos em tarefas específicas, sem os substituir, exemplo: corretores automáticos, assistentes de voz, ferramentas básicas de diagnóstico.

3) Automação Geral

→ Sistemas amplos capazes de substituir humanos em várias funções cognitivas complexas, exemplo futuro: agentes autônomos capazes de assumir responsabilidades clínicas, jurídicas ou pedagógicas.

4) Aumento Amplo

→ Sistemas de IA geral que colaboram com profissionais, oferecendo raciocínio complexo e análise multimodal, exemplo: modelos de linguagem integrados a sistemas clínicos que sugerem hipóteses diagnósticas e planos de tratamento personalizados.

Por que essa distinção importa?

- **Política e Economia:** IA voltada ao aumento pode promover mercados de trabalho mais equilibrados, evitando substituição massiva e concentrando-se na valorização da colaboração humano-máquina.
- **Ética e Segurança:** Quanto mais ampla a capacidade de uma IA, mais rigorosa deve ser sua supervisão, especialmente em áreas sensíveis como a medicina ou justiça.
- **Educação e Formação:** Escolas médicas e faculdades de odontologia devem preparar os futuros profissionais para trabalhar em sinergia com a IA, focando em habilidades que a tecnologia ainda não replica, empatia, julgamento ético, e tomada de decisão crítica.

1.1.2) Princípios de Funcionamento

1.1.2.1) Algoritmos

Os algoritmos podem ser conceituados como protocolos de procedimentos detalhados: sequências fixas de operações que transformam uma determinada entrada (por exemplo, uma radiografia) numa saída determinística (por exemplo, «cárie detectada» ou «sem cárie»). Nos primeiros sistemas de inteligência artificial (IA), predominava este paradigma baseado em regras, com o conhecimento especializado codificado explicitamente na lógica «se-então» (Janiesch, Zschech e Heinrich, 2021). Esses sistemas eram altamente transparentes e facilmente auditáveis, oferecendo uma justificativa clara para os seus resultados. No entanto, a sua incapacidade de acomodar a variabilidade do mundo real, análoga a uma lista de verificação clínica que falha em cenários anatómicos atípicos, mostrou limitações. Essa fragilidade levou ao desenvolvimento de abordagens mais adaptáveis, nas quais os sistemas podiam inferir padrões a partir dos dados, em vez de depender exclusivamente de regras predefinidas.

1.1.2.2) Aprendizagem automática (Machine learning)

Programação baseada em regras para a indução de modelos estatísticos. Janiesch et al. (2021) definem-na como a «capacidade dos sistemas de aprender com dados de treino específicos de problemas para automatizar a construção de modelos analíticos». Em vez de prescrever todos os cenários possíveis, os sistemas de ML aprendem com grandes conjuntos de exemplos anotados, de forma semelhante à forma como os profissionais de medicina dentária desenvolvem competências de diagnóstico através da exposição repetida a imagens clínicas rotuladas. As abordagens de aprendizagem da IA, fundamentais para seu desenvolvimento clínico, são resumidas na Tabela 2.

São utilizados três modos principais de aprendizagem:

Tabela 2: Três modos principais de aprendizagem

Modo	O que o modelo observa	Analogia em contexto dentário
Supervisionado	Imagens com rótulos corretos	O tutor assinala cada lesão nas imagens de treino
Não supervisionado	Apenas imagens	O interno explora exames CBCT, agrupando-os por anatomia sem orientação prévia
Reforço	Feedback por tentativa3erro	Um robot cirúrgico testa ângulos de inserção num simulador e é recompensado quando atinge o posicionamento ideal

1.1.2.3) Aprendizagem Profunda

O **Deep learning (DL)** leva a ML ainda mais longe, «treinando redes neurais artificiais muito profundas, cuja estrutura em camadas permite uma extração progressivamente mais abstrata de características» (Bengio, LeCun e Hinton, 2021). As camadas iniciais atuam como filtros de alto contraste, identificando bordas; as camadas intermédias reúnem essas bordas em dentes; as camadas superiores raciocinam sobre patologias completas. A profundidade é importante: redes superficiais «simplesmente não funcionam tão bem» em tarefas que exigem muita perceção (Bengio et al., 2021). Dois facilitadores tornam o DL prático:

- **Hardware** 3 unidades de processamento gráfico (GPUs) lidam com os vastos cálculos matemáticos envolvidos.
- **Volume de dados** 3 conjuntos de dados grandes e bem anotados evitam o «sobreajuste», o equivalente a memorizar o conjunto de treino em vez de generalizar para novos pacientes (Bengio et al., 2021).

A investigação atual visa desafios mais difíceis, como aprender com rótulos *limitados* ou lidar com digitalizações de dispositivos nunca vistos durante o treino, situações que Bengio et al. chamam de *mudança de distribuição*.

1.1.2.4) Redes Neurais Artificiais

As redes neurais artificiais (ANNs) consistem em unidades de processamento interligadas («neurónios») ligadas através de conexões ponderadas («sinapses»). Durante o treino, o modelo ajusta esses pesos usando retropropagação, um algoritmo de aprendizagem que minimiza a discrepância entre os resultados previstos e os rótulos reais (Janiesch et al., 2021). Ao longo de iterações sucessivas, a rede refina as suas representações internas, por exemplo, aprendendo a identificar lesões periapicais com precisão crescente.

Quando várias camadas ocultas são integradas, a ANN torna-se uma rede neural profunda, capaz de modelar relações complexas e não lineares. Estas arquiteturas sustentam a maioria dos avanços modernos em IA, incluindo reconhecimento de imagens, compreensão de linguagem natural e sistemas de apoio à decisão (Bengio et al., 2021).

1.1.2.5) Visão por Computador

No contexto da análise de imagens, a arquitetura neural dominante é a Rede Neural Convolutiva (CNN). As CNNs processam entradas visuais aplicando filtros compartilhados e localizados que detetam padrões espaciais independentemente da sua posição na imagem. As camadas iniciais capturam características geométricas fundamentais; camadas mais profundas constroem representações de entidades mais complexas, como molares, patologias ou dispositivos protéticos (Janiesch et al., 2021).

Avanços recentes, incluindo redes de cápsulas e transformadores de visão, ampliam as capacidades das CNNs ao modelar hierarquias espaciais e dependências relacionais em dados de imagens tridimensionais. Essas inovações são particularmente relevantes para a radiografia panorâmica e a tomografia computadorizada de feixe cónico (CBCT), onde a precisão espacial e a minimização de artefactos são fundamentais (Bengio et al., 2021).

1.1.2.6) Processamento de Linguagem Natural

O Processamento de Linguagem Natural (NLP) equipa os computadores com a capacidade de interpretar, gerar e raciocinar sobre a linguagem humana. De acordo com McClelland et al. (2020), dois mecanismos fundamentais permitem essa funcionalidade:

- Representações semânticas distribuídas: as palavras são incorporadas em espaços vetoriais de alta dimensão, onde a proximidade reflete a semelhança semântica. Por exemplo, «cavidade» é matematicamente mais próxima de «decadência» do que de «ponte».
- Mecanismos de atenção baseados em transformadores: Estas arquiteturas permitem que os modelos ponderem a relevância de todas as palavras numa frase simultaneamente, facilitando a compreensão matizada e a geração sensível ao contexto.

Essas capacidades permitem aplicações que incluem documentação clínica automatizada, resumo de registos de saúde eletrónicos e geração de materiais de comunicação com pacientes, domínios que tradicionalmente dependiam de entrada manual e conhecimentos linguísticos

1.2) A IA e a Robótica no Contexto Dentário

1.2.1) Desenvolvimento Histórico

A investigação em inteligência artificial entrou no léxico público quando o termo foi cunhado na conferência de Dartmouth, em 1956 (Agrawal & Nikhade, 2022). Os marcos históricos da robótica em odontologia estão organizados cronologicamente (Tabela 3).

A medicina dentária não sentiu o seu impacto imediatamente, mas marcos seminais surgiram pouco tempo depois:

Tabela 3: Evolução da robótica na medicina dentária: principais marcos de 1960 aos anos 2020 (Ahmad et al., 2021).

Década	Marco histórico	Significado
1960s	Jenkins propôs uma “ <i>secretária dentária robótica</i> ” (Ahmad et al., 2021)	Primeira visão de automação de tarefas no contexto clínico.
Meados dos anos 1980	A NASA desenvolveu robots cirúrgicos tele-operados para medicina de campo de batalha e em ambiente espacial	Demonstrou a viabilidade de intervenções remotas com elevada precisão.

A integração da robótica e da inteligência artificial na prótese dentária e implantologia oral

vhb2000– 2001	A FDA aprovou a primeira plataforma robótica laparoscópica; uma colecistectomia transcontinental ao vivo validou a cirurgia por telepresença (Ahmad et al., 2021)	Estabeleceu precedentes técnicos e regulatórios para a robótica médica.
--------------------------	---	---

2002	A equipa de Boesecke realizou a <i>primeira colocação de implante dentário guiada por robot</i>	Assinalou a entrada da robótica na prática operatória dentária.
2012	Protótipo autónomo com seis graus de liberdade (Six-DOF) colocou implantes com formato radicular in vitro	Mostrou que a navegação em tempo real pode substituir a perfuração manual.
2017	YOMI™ tornou-se o primeiro sistema de navegação robótica aprovado pela FDA para osteotomia de implantes; equipas chinesas apresentaram robots de implantes totalmente autónomos	Representou a transição de workflows guiados pelo cirurgião para modelos semi ou totalmente autónomos.
Década de 2020	Estão a ser investigados micro-/nano-robots, simuladores hápticos e ecossistemas de “dentrónica” para administração de fármacos, formação e colaboração clínica (Ahmad et al., 2021)	Indica a convergência da IA, sensores e robótica rumo a uma assistência ubíqua em medicina dentária.

Durante o mesmo período, a IA baseada em dados amadureceu, passando de sistemas especializados baseados em regras para arquiteturas de aprendizagem profunda capazes de interpretar radiografias e exames 3D com precisão quase igual à de especialistas (Fatima et al., 2022), estabelecendo a base computacional sobre a qual os robôs odontológicos contemporâneos operam.

1.2.2) Função de apoio à decisão

A IA moderna age menos como um *oráculo* e mais como um *colega*, fornecendo insights estruturados que ajudam os dentistas a tomar decisões mais rápidas, seguras e baseadas em evidências. Os sistemas de apoio à decisão clínica (CDSS) com redes neurais artificiais e lógica difusa foram treinados para:

- Diagnosticar patologias, por exemplo, fraturas radiculares verticais, perda óssea periodontal ou cáries, diretamente a partir de radiografias ou fotografias (Fatima et al., 2022).
- Avaliar o risco combinando características de imagens com variáveis de registos de saúde eletrónicos para pontuação de peri-implantite ou prognóstico dentário (Fatima et al., 2022).

- Planear o tratamento, como decisões de extração versus preservação ou angulação do implante, por meio de modelos de simulação que aprendem com casos históricos (Agrawal & Nikhade, 2022).

Esses sistemas “eliminam partes rotineiras do trabalho dos dentistas” e reduzem erros de diagnóstico, preservando os elementos humanos de empatia e intuição clínica (Fatima et al., 2022). É importante ressaltar que eles são mais poderosos quando integrados ao hardware robótico: o robô captura imagens padronizadas ou executa o caminho de perfuração planejado; a IA verifica a precisão em tempo real; e o clínico mantém o controle geral.

1.2.3) Áreas Gerais de Aplicação na dentisteria

O panorama atual da robótica com IA abrange praticamente todas as especialidades odontológicas:

1. **Periodontologia** 3 a segmentação automatizada da placa bacteriana, a detecção da gengivite e a medição quantitativa da perda óssea apoiam a intervenção precoce (Fatima et al., 2022).
2. **Endodontia** 3 as CNN localizam a morfologia do canal e as lesões peri apicais; robôs hápticos experimentais treinam a aplicação correta da força durante a cirurgia endodôntica (Ahmad et al., 2021) .
3. **Implantologia** 3 Robôs de navegação como o YOMI™ orientam osteotomias com precisão submilimétrica; sistemas autónomos estão a ser testados para implantes zigomáticos (Ahmad et al., 2021) .
4. **Próteses dentárias e odontologia restauradora** 3 Robôs de arranjo dentário e braços de preparação a laser fabricam dentaduras e coroas com precisão repetível (Ahmad et al., 2021) .
5. **Ortodontia** 3 Plataformas CAD/CAM, como SureSmile®, utilizam robôs de arco otimizados por IA para biomecânica personalizada (Ahmad et al., 2021).
6. **Cirurgia oral e maxilofacial** 3 Braços robóticos auxiliam no reposicionamento ósseo ortognático e ressecções transorais, mitigando tremores e melhorando o acesso (Ahmad et al., 2021).

7. **Radiologia oral** 3 Posicionadores robóticos padronizam o alinhamento dos sensores; a IA classifica as imagens, permitindo sessões de imagem mais rápidas e com doses mais baixas (Ahmad et al., 2021) .
8. **Materiais e higiene dentária** 3 Simuladores de mastigação e robôs de escovagem avaliam o desgaste e a remoção da placa bacteriana com consistência semelhante à humana (Ahmad et al., 2021) .
9. **Educação** 3 «Simuladores de pacientes» humanoides e treinadores hápticos de RV oferecem ensaios imersivos de procedimentos antes que os estudantes tratem pacientes reais (Ahmad et al., 2021) .

Modelos fundacionais multimodais representam um passo decisivo rumo à IA geral ao combinar texto, imagem e dados 3D num mesmo sistema (Fei et al., 2022). Coletivamente, estas aplicações ilustram uma mudança de ferramentas de diagnóstico isoladas para um ecossistema de fluxos de trabalho aprimorados por IA e habilitados por robôs que prometem maior precisão, reprodutibilidade e conforto do paciente em todo o continuum de cuidados odontológicos.

- A jornada da IA desde a teoria da década de 1950 até a realidade da cadeira odontológica é pontuada por avanços robóticos marcantes, culminando em sistemas de navegação e autónomos aprovados pela FDA.
- A IA de apoio à decisão, incorporada ao CDSS, complementa o julgamento clínico ao minerar imagens e registos em busca de padrões acionáveis.
- Praticamente todas as subdisciplinas odontológicas agora utilizam IA ou robótica, demonstrando a versatilidade da tecnologia e sua trajetória rumo a cuidados de saúde bucal integrados e baseados em dados.

2) Aplicações da IA e da Robótica em Prótese Dentária e Implantologia

2.1) Implantologia Oral

2.1.1) Rastreo e Diagnóstico Pré-Implantar

Uma revisão sistemática de 17 estudos sobre inteligência artificial (IA) em implantologia dentária descobriu que os modelos de previsão construídos a partir de variáveis específicas do paciente, idade, estado sistémico, tabagismo, qualidade óssea, índices de higiene e muito mais, previram corretamente a osseointegração ou o sucesso a longo prazo dos implantes em 62,4 %3 80,5 % dos casos (Revilla-León et al., 2021). Em vez de um julgamento binário «adequado/inadequado», esses modelos retornam uma curva de probabilidade que permite aos médicos (i) sinalizar pacientes de alto risco para terapia alternativa e (ii) direcionar fatores modificáveis, como controle glicêmico, antes da cirurgia (Revilla-León et al., 2021). À medida que os conjuntos de dados se expandem, espera-se que as técnicas de agrupamento revelem «fenótipos» de risco, por exemplo, *baixa densidade óssea + higiene deficiente*, que justificam protocolos de carga personalizados em vez de cronogramas únicos para todos.

Análise de imagem (CBCT) e mapeamento automatizado de zonas de perigo

As redes convolucionais de aprendizagem profunda agora segmentam todo o canal mandibular (incluindo a elusiva alça anterior) em tomografias computadorizadas de feixe cónico com 0,997 de precisão global em ≈ 22 s por volume (Oliveira-Santos et al., 2023). A maior precisão ocorre nas secções anterior e média do canal, as regiões mais vulneráveis a lesões iatrogénicas durante a colocação do implante (Oliveira-Santos et al., 2023). Ao fornecer uma via nervosa codificada por cores diretamente no software de planeamento, a ferramenta padroniza as margens de segurança, reduz o tempo de conceção da guia e aumenta a confiança dos médicos que ainda estão a dominar a interpretação da CBCT.

2.1.2) Planeamento Implantar

Os fluxos de trabalho personalizados começam com a restauração pretendida e retrocedem até à posição do implante. A síntese narrativa na odontologia reconstrutiva destaca a IA como a «*porta de entrada*» que funde registos de saúde eletrónicos, digitalizações óticas e dados

CBCT, propondo em seguida o número, o diâmetro e a angulação dos implantes que conciliam as restrições estéticas, funcionais e anatômicas (Joda & Zitzmann, 2022) . O clínico continua no comando, mas a IA reduz a segmentação manual e permite que os especialistas se concentrem nas sutilezas, em vez da geometria de base. O ciclo completo da simulação à cirurgia, assistido por ferramentas digitais, está ilustrado em um exemplo representativo (Figura 1).

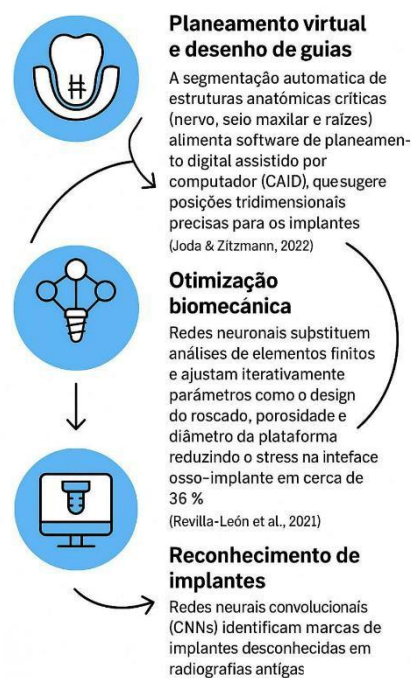


Figura 1: Simulações e automação, fechando o ciclo da tela à cirurgia, criada com o apoio de ferramentas gráficas e inteligência artificial

2.1.3) Cirurgia Assistida

Os modelos guiados eliminam grande parte da variabilidade humana, mas ainda dependem de um posicionamento perfeito e não oferecem correção de erros em tempo real. A assistência robótica preenche essas lacunas, combinando orientação por imagem com controle ativo ou semiativo da peça de mão.

Três conceitos robóticos distintos caracterizam atualmente a cirurgia de implantes. Em primeiro lugar, um robô colaborativo háptico guiado por visão computacional, avaliado por Qiao e

A integração da robótica e da inteligência artificial na prótese dentária e implantologia oral
colegas, permite que o cirurgião avance livremente com a peça de mão, enquanto o robô impõe

a angulação e profundidade pré-planeadas, ao mesmo tempo que compensa os movimentos do paciente. O termo háptico refere-se a sistemas que fornecem feedback tátil ou de força, ou seja, o robô “sente” e reage a limites físicos ou resistências, guiando a mão do operador em conformidade. Num estudo translacional que incluiu 28 implantes *in vivo*, este sistema alcançou desvios médios de $0,53 \pm 0,17$ mm na plataforma, $0,56 \pm 0,13$ mm no ápice e um erro angular de apenas $0,79 \pm 0,23$ graus, superando os referenciais de navegação estática e dinâmica reportados no mesmo artigo (Qiao et al., 2023). Todas as cirurgias foram realizadas sem retalho, em tempos que variaram entre 23 e 70 minutos, demonstrando viabilidade clínica tanto para casos unitários como edêntulos.

Em segundo lugar, Yang e colaboradores descreveram um sistema autónomo (nome comercial “Remebot”) que realiza a osteotomia e a colocação do implante com intervenção humana mínima; o clínico supervisiona e pode intervir, se necessário. Testes experimentais em mandíbulas de porco revelaram desvios coronais de $0,69 \pm 0,15$ mm, apicais de $0,72 \pm 0,16$ mm e desvios angulares de $1,21 \pm 0,54$ graus. Um caso clínico subsequente de arco total superior confirmou que o robô foi capaz de obter ancoragem bicortical, adequada para carga imediata (Yang et al., 2022).

Em terceiro lugar, a plataforma Yomi™, aprovada pela FDA, adota uma abordagem háptica semiativa, na qual o robô cria uma “barreira” física que a broca não pode ultrapassar. Séries clínicas resumidas no estudo de Qiao relatam desvios globais na plataforma e no ápice de cerca de 1 mm, com erros angulares próximos de 2,6 graus, valores ainda superiores aos obtidos com guias estáticos, mantendo, simultaneamente, a liberdade do cirurgião para ajustar a profundidade ou trajetória em tempo real (Qiao et al., 2023).

Em conjunto, estes dados ilustram um espectro que vai desde a assistência háptica controlada pelo cirurgião até à autonomia total. Todos os três sistemas eliminam problemas de adaptação de guias, corrigem movimentos em tempo real e incluem barreiras de segurança que evitam perfuração cortical; os principais fatores diferenciadores são o custo inicial, a complexidade da configuração e o grau de supervisão humana necessário.

Por que razão os robôs são importantes na prática clínica

- Eliminam problemas de adaptação de guias, o braço robótico mantém a trajetória planeada independentemente da compressão dos tecidos moles ou de limitações no acesso cirúrgico.
- Correção de movimentos em tempo real, a visão computacional atualiza a posição da broca centenas de vezes por segundo, compensando movimentos do paciente (Qiao et al., 2023).
- Barreira de segurança háptica, a resistência física impede a perfuração excessiva ou a violação cortical, reduzindo o risco de lesão nervosa.
- Alterações rápidas ao plano, o cirurgião pode ajustar a profundidade ou a angulação durante o procedimento; algo impossível com guias estáticos.

Apesar destas vantagens, ainda persistem desafios como o custo inicial, a curva de aprendizagem e a necessidade de uma fixação rígida da peça de mão (já parcialmente resolvida com um conector “lock-on” que reduziu o erro de plataforma de 0,54 mm para 0,37 mm em testes in vitro). Mesmo assim, os primeiros dados clínicos indicam que a colocação assistida por robô colaborativo (cobot) atinge precisão submilimétrica com tempo de cadeira adicional mínimo.

Embora os guias estáticos já proporcionem precisão na ordem dos milímetros, a sua fiabilidade depende de uma calibração meticulosa e da estabilidade absoluta do guia. Os robôs colaborativos e autónomos acrescentam uma camada extra de segurança interativa, rastreamento em tempo real, limites hápticos e flexibilidade intraoperatória, elevando a precisão cirúrgica ao nível submilimétrico e libertando os clínicos das limitações logísticas associadas aos guias. À medida que a tecnologia evolui, os workflows híbridos, que combinam planeamento orientado por IA, perfuração assistida por robô e supervisão humana, estão prestes a tornar-se o novo padrão em implantologia.

2.1.4) Conceção e Fabrico

Projeto e Biomateriais

As próteses implanto-suportadas modernas já não são esboçadas à mão livre nem fresadas com base em “olho clínico”. Atualmente, percorrem um fluxo praticamente digital do início ao fim, no qual a inteligência artificial (IA) intervém em momentos-chave: captura de dados, modelação geométrica, seleção de materiais e validação da segurança mecânica. Cada etapa é descrita abaixo em linguagem acessível, com base em evidência da literatura atual.

Captura de Dados

A base de uma reabilitação precisa é a obtenção de um “gémeo digital” fiel da situação clínica. No fluxo de trabalho descrito por Lerner et al. (2020), a equipa clínica adquiriu:

- Uma radiografia CBCT ou periapical para determinar a posição do osso e do implante;
- Um scan intraoral da zona do pilar protético e dos dentes adjacentes;
- O ficheiro CAD original do pilar personalizado em zircónia3titânio, quando produzido internamente.

A IA atua aqui como motor de registo: alinha automaticamente a malha digital do scan com a geometria limpa da biblioteca. De forma especialmente relevante, deteta e traça a linha marginal subgingival sem necessidade de cliques manuais, permitindo ao técnico concentrar-se na oclusão e na morfologia.

Implicação clínica:

- **Menos repetições:** o desvio médio entre o pilar planeado e o captado foi de apenas 44 $\mu\text{m} \pm 6,3 \mu\text{m}$, dentro dos limites aceitáveis para o espaço de cimento.
- **Ajuste perfeito à primeira:** 94% das coroas foram cimentadas corretamente na primeira tentativa, sem necessidade de novo scan ou fresagem de urgência (Lerner et al., 2020).

Geometria Guiada por IA: Do Enceramento Virtual ao Design do Pilar

Uma vez obtido um modelo digital limpo, o enceramento protético e a seleção do implante devem respeitar critérios biológicos, estéticos e biomecânicos. Uma revisão de workflows de

precisão descreve como motores de decisão analisam dados CBCT, contornos de tecidos moles e o perfil de emergência da coroa planeada para sugerir o comprimento, diâmetro e tipo de plataforma do implante, alinhando-se com as exigências clínicas e anatômicas (Joda & Zitzmann, 2022).

Esta abordagem revela-se especialmente útil em casos anatomicamente complexos como zonas com altura óssea reduzida junto a estruturas vitais ou espaços mesiodistais limitados nos quais a IA consegue filtrar rapidamente um catálogo extenso para uma lista curta de opções compatíveis, substituindo o planeamento por tentativa e erro.

Otimização de Materiais e Macrodesign

A escolha do tipo de zircónio ou titânio é apenas um dos elementos da biomecânica. A geometria do roscado, o desenho da plataforma e a porosidade da superfície também influenciam a forma como as forças são transmitidas ao osso adjacente. Uma revisão sistemática recente compilou modelos de redes neuronais que atuam como “substitutos” da análise de elementos finitos (FEA), prevendo o comportamento biomecânico sem os elevados custos computacionais do FEA convencional. Estes modelos testam combinações de variáveis e geram mapas de tensão em milissegundos reduzindo o pico de stress na interface osso-implante em **36,6%** face aos designs obtidos apenas por FEA tradicional (Revilla-León et al., 2023).

Implicação clínica: implantes desenhados desta forma distribuem melhor as forças oclusais, reduzindo o risco de sobrecarga cortical e de microfraturas.

Fabrico Assistido por Computador e Controlo de Qualidade: Impressão, Fresagem e Inspeção

Com o design e os materiais definidos, o processo de fabrico assistido por computador (CAM) assume o controlo. Mesmo nesta fase, a IA tem um papel importante:

- **Otimização do percurso da ferramenta:** algoritmos calculam trajetos de corte mais eficientes, reduzindo o tempo de fresagem sem comprometer o acabamento superficial.
- **Inspeção em tempo real:** sistemas de visão baseados em IA monitorizam o desgaste de fresas ou microfraturas durante o processo, minimizando a taxa de repetição.

No estudo de Lerner et al. (2020), as coroas monolíticas de zircônio planeadas por IA apresentaram uma taxa de sobrevivência de **99,0% aos três anos** e uma taxa de sucesso de **91,3%**. As complicações técnicas registadas foram na sua maioria lascamentos menores, não fraturas catastróficas⁴ reforçando que os processos otimizados por IA não comprometem a longevidade clínica. A influência direta da IA no fluxo protético digital é explicitada com comparações objetivas (Tabela 4).

Tableau 4: Impacto da IA no fluxo de trabalho protético digital: acelera etapas-chave, aumenta a precisão e reforça a segurança clínica

Etapa	Processo Tradicional	Melhoria com IA	Benefício Clínico
Alinhamento da digitalização	Ajuste manual, demorado	Correspondência automática entre malha digital e biblioteca ($\leq 44 \mu\text{m}$)	Redução no tempo de produção em laboratório
Delimitação da margem	Traçado manual, sujeito a erros	Detecção automática da linha de margem subgingival	Menor risco de margens abertas
Seleção do implante/munhão	Consulta manual de catálogos	Motor de decisão sugere componentes compatíveis com os limites ósseos e estéticos	Maior segurança em casos complexos
Análise de tensões	Exige conhecimentos em FEA	Redes neuronais simulam milhares de variações em poucos minutos	Desenhos mais duráveis e otimizados

2.1.5) Reabilitação Protética e Manutenção

Uma prótese bem executada representa apenas metade do sucesso terapêutico; é igualmente essencial que os clínicos consigam identificar, monitorizar e manter os implantes ao longo de várias décadas. A inteligência artificial (IA) tem vindo a expandir o seu papel em duas tarefas de elevado valor clínico: identificação instantânea de implantes e seguimento inteligente capaz de prever ou detetar precocemente complicações.

Identificação instantânea de implantes

É comum os pacientes comparecerem a consultas sem registos clínicos completos, e as radiografias antigas podem revelar plataformas desconhecidas. Revilla-León et al. (2023) desenvolveram modelos baseados em redes neuronais convolucionais (CNN), treinados com imagens periapicais e panorâmicas, que atualmente conseguem reconhecer a família do implante, o seu diâmetro e o tipo de conexão com uma precisão entre 93,8 % e 98 %.

fig Ao nível logístico, o conhecimento exato da plataforma utilizada permite uma gestão mais eficiente do inventário, reduzindo os custos associados ao armazenamento de componentes pouco utilizados.

Análise preditiva

No que diz respeito à previsão da longevidade dos implantes, Lyakhov et al. (2022) criaram uma rede neuronal capaz de analisar dados demográficos e clínicos (como idade, presença de doenças sistémicas, qualidade óssea e localização do implante) e prever, com uma precisão de 94,48 %, a sobrevivência de implantes unitários. Este tipo de previsão permite estabelecer protocolos de vigilância mais rigorosos para casos de maior risco, incluindo consultas de manutenção mais frequentes e medidas de higiene orientadas, com o objetivo de prevenir falhas precoces.

Relativamente à previsão de resultados centrados no paciente, Yadalam et al. (2022) analisaram 1032 cirurgias com recurso a um modelo de aprendizagem automática que prevê a dor pós-operatória imediata com uma precisão de 89,6 %. A antecipação do desconforto possibilita a implementação de protocolos analgésicos personalizados e um processo de consentimento mais claro e informado, com impacto direto na satisfação do paciente.

Monitorização remota

Joda & Zitzmann (2022) apresentam uma visão inovadora onde a IA radiográfica, aplicações móveis de fotografia e tecnologia blockchain se integram para criar um “passaporte digital” do implante. Este passaporte inclui tomografias (CBCT), datas cirúrgicas, números de lote, valores de torque e calendários de manutenção. Os algoritmos de imagem monitorizam alterações ósseas peri-implantares ou padrões de afrouxamento de parafusos entre consultas. A equipa clínica apenas é notificada quando a alteração detetada ultrapassa um limiar predefinido, tornando o seguimento verdadeiramente proativo em vez de reativo.

A utilização da IA no acompanhamento clínico anual, a segurança na transferência de dados implantológicos e a aplicação de sensores inteligentes na prevenção de emergências clínicas são evidenciadas de forma sequencial nas ilustrações apresentadas (Figuras 2 a 4).



Figura 2: Acompanhamento anual assistido por inteligência artificial, criada com o apoio de ferramentas gráficas e inteligência artificial

Transferência de Registos



Antes: Registos em papel, dados em falta



Agora: “Passaporte” digital do implante baseado em blockchain partilhado com segurança



Resultado: Continuidade de cuidados entre clínicas

Figura 3: *Transferência digital segura dos dados implantológicos, criada com o apoio de ferramentas gráficas e inteligência artificial*

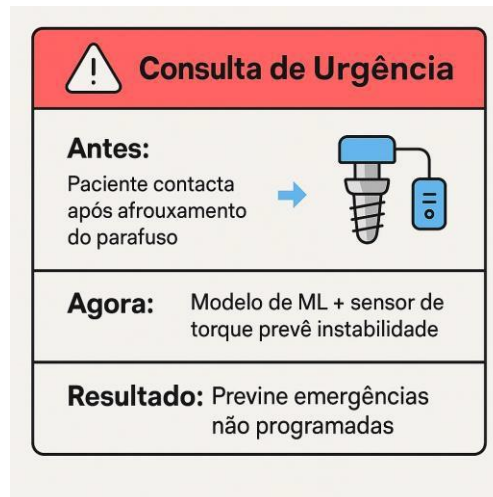


Figura 4: Prevenção de emergências por meio de sensores inteligentes, criada com o apoio de ferramentas gráficas e inteligência artificial

Inteligência Artificial no Seguimento de Implantes: Estratégias para o Sucesso a Longo Prazo

Identificação com um clique: Classificadores baseados em redes neurais convolucionais (CNN) eliminam a incerteza associada à identificação de implantes desconhecidos, permitindo à equipa clínica reconhecer rapidamente o sistema utilizado e planejar intervenções de forma eficiente e segura.

Chamadas de recall orientadas por dados: Algoritmos preditivos, treinados com dados clínicos reais, utilizam indicadores como taxas de sobrevivência e níveis de dor para transformar diretrizes padronizadas em planos de seguimento personalizados, ajustados ao perfil de risco de cada paciente.

Vigilância remota: A combinação de inteligência artificial com ferramentas de teledentisteria permite a monitorização contínua dos implantes, 24 horas por dia, 365 dias por ano, alertando a equipa apenas quando são detetadas alterações clínicas relevantes.

De reativo a preventivo: A incorporação destas tecnologias baseadas em IA promove uma mudança de paradigma, passando de um modelo reativo (“intervir apenas quando falha”) para uma abordagem preventiva e personalizada. Este modelo protege o investimento biológico e financeiro feito tanto pelo clínico como pelo paciente, aumentando a previsibilidade e longevidade do tratamento implantológico.

2.2. Prótese Dentária (excluindo Implantologia)

2.2.1) Fluxo Digital e CAD/CAM

A incorporação da inteligência artificial (IA) na digitalização 3D e no desenho assistido por computador (CAD) está a transformar as próteses dentárias não implanto suportadas, especialmente nas fases de planeamento e fabrico de coroas, pontes e dispositivos removíveis. Esta revisão descreve como a IA é tecnicamente integrada nestes fluxos de trabalho e avalia a sua influência na precisão e na eficiência, com base exclusivamente em evidência recente.

Integração Técnica da IA no CAD Dentário

Os fluxos de trabalho CAD potenciados por IA podem ser divididos em três fases principais, aquisição de dados, geração de modelos e otimização do desenho, cada uma suportada por algoritmos distintos.

Desenho Automatizado de Coroas com Otimização Biomecânica

Um avanço importante é a criação de algoritmos totalmente automatizados para restauração de coroas. Utilizando ajustes de modelos deformáveis combinados com otimização biomecânica, estes sistemas geram formas de coroas que se integram funcional e esteticamente com os dentes adjacentes. Primeiro, é construído um modelo de forma condicional (CSM) a partir de uma biblioteca de digitalizações intraorais; o CSM é depois ajustado à digitalização do paciente para estimar a forma ideal da coroa. O método alinha-se com precisão com a linha de acabamento preparada e adiciona estruturas internas porosas que dispersam as forças oclusais, aumentando assim a longevidade da restauração (Jin et al., 2023).

Transformadores Visuais 3D e IA Explicável na Prótese Dentária

A adopção de transformadores visuais 3D (ViTs) e de inteligência artificial explicável (ExAI) melhorou significativamente as tarefas de classificação e desenho. Ao codificar as digitalizações como vóxeis e outras representações de alta dimensão, os ViTs superam as convolutional neural networks (CNNs) na classificação de digitalizações 3D: um modelo híbrido CNN + ViT alcançou 90 % de precisão de validação, comparado com 80 % de uma

CNN isolada. Os mapas de saliência do ExAI destacam áreas críticas nas preparações cavitárias, conduzindo a resultados impressos em 3D mais precisos (Sifat et al., 2024).

Modelos de Aprendizagem Profunda para Restauração Dentária de Alta Precisão

As redes de deep learning (DL) também estão a reconstruir a morfologia dentária personalizada. O modelo ToothDIT, treinado com incisivos centrais maxilares, cria um modelo implícito que prevê detalhes únicos da superfície de dentes danificados. Ao deformar o modelo para se ajustar aos dados do paciente, o ToothDIT apresenta um erro quadrático médio (RMS) significativamente inferior ao das bibliotecas de formas convencionais, resultando em restaurações de elevada precisão (Chen et al., 2024).

Software Baseado em GAN para Desenho de Coroas

As redes adversariais generativas (GANs) permitiram o desenvolvimento de software de desenho dentário que acelera e aperfeiçoa a criação de coroas. Estudos comparativos demonstram que os fluxos de trabalho baseados em GAN reduzem o tempo de trabalho e, ao mesmo tempo, igualam ou superam a qualidade dos métodos convencionais: as coroas geradas por IA apresentam menor desvio na morfologia oclusal e um ajuste interno superior (Cho et al., 2023).

Impacto na Precisão

- **Otimização Biomecânica e Distribuição de Tensões**

Os algoritmos automatizados de desenho de coroas proporcionam um ajuste preciso e uma biomecânica equilibrada. As estruturas porosas no interior da restauração distribuem as forças de forma uniforme, minimizando picos de tensão localizados que são comuns em desenhos manuais (Jin et al., 2023).

- **Restauração Morfológica e Anatomia Oclusal**

Modelos DL como o ToothDIT alcançam uma morfologia altamente fiel: os seus desvios RMS são substancialmente inferiores aos obtidos com bibliotecas tradicionais, garantindo uma forma e função naturais (Chen et al., 2024).

- **Ajuste Interno e Lacunas Marginais**

As coroas geradas por GAN demonstram uma adaptação interna superior e lacunas marginais menores em comparação com enceramentos convencionais e designs digitais tradicionais, o que favorece uma maior estabilidade a longo prazo (Cho et al., 2023; Liu et al., 2023).

Impacto na Eficiência

- **Redução do Tempo de Desenho**

A IA encurta significativamente as fases de desenho. Em sistemas baseados em GAN, cada etapa, desde a modelação inicial até ao ajuste final, requer menos tempo, especialmente quando se utilizam digitalizações intraorais (Cho et al., 2023).

- **Automatização do Fluxo de Trabalho**

Ao automatizar a geração de formas e o desenho de suportes internos, a IA reduz os passos manuais e a subjetividade do operador, oferecendo resultados consistentes e de elevada qualidade, bem como uma produção rápida de modelos personalizados (Jin et al., 2023; Chen et al., 2024).

- **Produção em Larga Escala e Reprodutibilidade**

A codificação de alta dimensão permite à IA reproduzir desenhos precisos de forma consistente, caso após caso, uma vantagem para laboratórios com elevada carga de trabalho que necessitam de resultados rápidos e fiáveis. A menor variabilidade em relação aos métodos manuais melhora diretamente os resultados clínicos (Sifat et al., 2024; Liu et al., 2023).

A integração da inteligência artificial (IA) na digitalização 3D e no desenho assistido por computador (CAD) melhorou significativamente a precisão e a eficiência das próteses dentárias não implanto suportadas, particularmente no desenho de coroas, pontes e próteses removíveis. Através da aplicação de algoritmos avançados, como a otimização biomecânica, os transformadores visuais 3D, os modelos de aprendizagem profunda e o software baseado em *Generative Adversarial Network* (GAN), a IA tem vindo a simplificar o processo de conceção, a reduzir o tempo de desenho e a melhorar a precisão das restaurações dentárias. Estes avanços representam um contributo promissor para o futuro da odontologia digital, oferecendo soluções fiáveis e eficientes para a produção personalizada de próteses dentárias. Cada fase do fluxo protético beneficiado pela IA é quantificado em termos de precisão e eficiência (Tabela 5).

Tabela 5: A IA aprimora cada fase do fluxo protético digital, aumentando a precisão e reduzindo significativamente o tempo clínico e laboratorial

Fase	IA/Algoritmo-chave	Ganho de precisão	Ganho de eficiência
1. Digitalização & Modelo	CSM + ViT 3D	RMS < 0,04 mm	Modelo gerado sem ajustes manuais
2. Geração da Coroa	GAN 3D / ToothDIT	Morfologia fiel, melhor ajuste interno	design \approx ½ do tempo convencional
3. Otimização Biomecânica	DL + Análise FEM	Distribuição uniforme de tensões	340 \rightarrow 360 % tempo de laboratório
4. Estética & Smile Design	Visão IA + ExAI	Cor & linha do sorriso harmonizadas	Zero idas-e-voltas clínica-laboratório
5. Verificação & Risco	Classificador DL (98 %+)	Lacuna marginal mínima, menor falha	Alerta de risco antes da cimentação

2.2.2) Diagnóstico e Planeamento com IA

A avaliação radiográfica continua a ser a pedra angular do diagnóstico e planeamento terapêutico em prótese dentária, mas a natureza subjetiva da interpretação visual limita frequentemente a consistência dos resultados. Trabalhos recentes demonstram que sistemas de inteligência artificial (IA) em particular, modelos baseados em redes neuronais convolucionais (CNN) são capazes de interpretar imagens bidimensionais e tridimensionais com uma velocidade e objetividade inalcançáveis pelo olho humano.

A análise radiográfica assistida por IA já vai muito além da deteção simples de cáries. Classificadores CNN, popularizados no início da década de 2010, demonstraram uma capacidade notável para “escrutinar imagens dentárias com elevada precisão”, identificando patologias subtis e marcos anatómicos que poderiam passar despercebidos (Iosif et al., 2024). Em imagens panorâmicas ou periapicais, estas redes conseguem, numa única análise, detetar perda óssea periodontal, contornos de canais radiculares, restaurações existentes e lacunas marginais na prática, gerando automaticamente um registo clínico digital que serve de base para decisões subsequentes sobre coroas, pontes ou próteses removíveis (Rokaya et al., 2024). Suites comerciais de imagiologia diagnóstica como o Sidexis 44 já incorporam estes algoritmos, fornecendo alertas em tempo real sempre que o software deteta uma discrepância, o que encurta o ciclo de decisão à cadeira (Cervino et al., 2023).

Uma das funções críticas destes sistemas é a deteção e segmentação. Modelos totalmente treinados conseguem, de forma automática, delinear o canal mandibular em tomografias cone

beam, segmentar o seio maxilar ou identificar todos os dentes e espaços edêntulos numa imagem panorâmica ou CBCT, gerando sobreposições codificadas por cores para orientação clínica (Rokaya et al., 2024). Em radiografias periapicais de alta resolução, o mesmo software distingue materiais restauradores do esmalte natural, quantifica margens de coroas e assinala radiolucências periapicais sugestivas de patologia (Rokaya et al., 2024). Estes “mapas de silhueta” integram-se de forma fluida com plataformas CAD, permitindo aos prostodontistas sobrepor os desenhos planeados à anatomia segmentada com precisão, reduzindo alterações por tentativa e erro em fases posteriores do fluxo de trabalho.

Para além da interpretação ao nível dos píxeis, os painéis de controlo com IA integrada cruzam dados radiográficos com digitalizações intraorais, registos oclusais e variáveis demográficas para construir planos de tratamento preditivos. Através da aprendizagem baseada em milhares de casos concluídos, o software pode sugerir materiais ideais, antecipar zonas de tensão numa estrutura de ponte ou identificar pacientes com risco acrescido de descolamento, muito antes da ocorrência de falhas clínicas (Saini et al., 2022). Estas recomendações são disponibilizadas em segundos e são continuamente atualizadas à medida que novos dados entram no sistema, oferecendo ao clínico uma base de evidência dinâmica sem aumento do tempo de consulta.

A acessibilidade é igualmente relevante. Estudos demonstram que a assistência por IA reduz a variabilidade interobservador, permitindo que clínicos menos experientes atinjam níveis de precisão anteriormente reservados a especialistas com muitos anos de prática (Iosif et al., 2024). Motores baseados na *cloud* democratizam ainda mais esta tecnologia, ao disponibilizar serviços de segmentação e mapeamento clínico a consultórios sem hardware de alto desempenho local, como sublinhado por Cervino et al. (2023).

Implicações práticas para a prostodontia clínica diária

- Os leitores radiográficos assistidos por IA sinalizam precocemente alterações ósseas e defeitos restauradores, favorecendo intervenções mais conservadoras.
- As segmentações podem ser exportadas diretamente para plataformas CAD, orientando o desenho de margens, o dimensionamento de conectores ou a anatomia oclusal, sem necessidade de nova digitalização.
- Módulos preditivos quantificam a probabilidade de descolamento ou má adaptação, permitindo ajustar precocemente os ângulos de preparação ou a escolha de materiais.

Em conjunto, estas capacidades transformam as radiografias de registros estáticos em fluxos dinâmicos de dados que sustentam uma prostodontia de precisão. A análise radiográfica com segmentações automatizadas geradas por IA pode ser consultada na ilustração adaptada de Rokaya et al. (2024) (Figura 5).

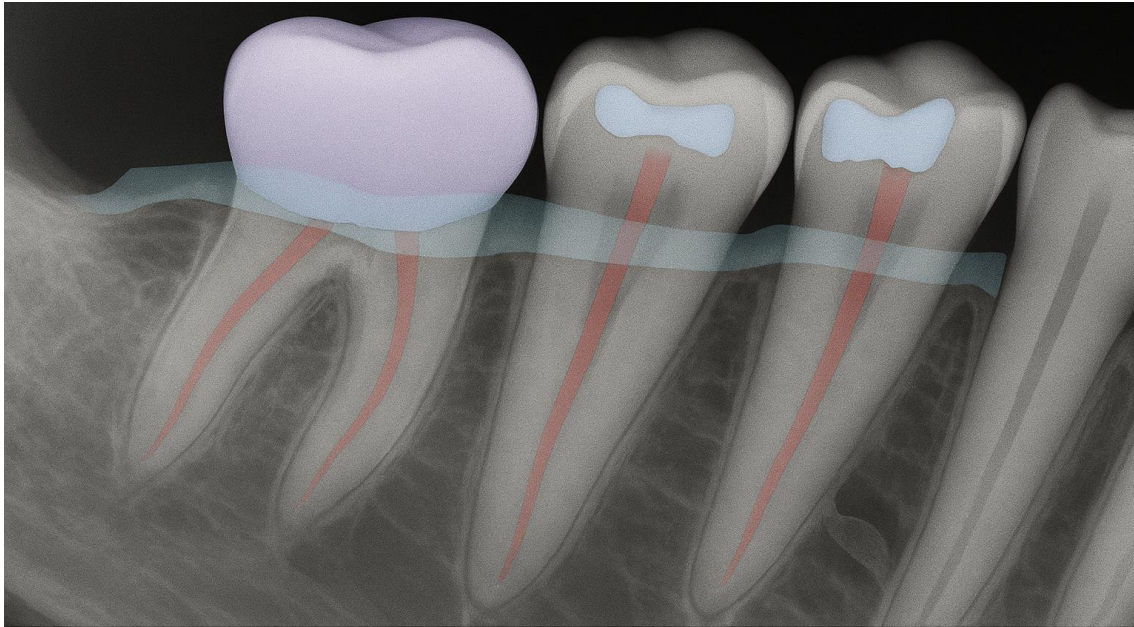


Figura 5: Radiografia periapical ilustrativa gerada com inteligência artificial, mostrando coroa, restaurações, perda óssea periodontal e segmentação do canal radicular. Ilustração adaptada de Rokaya et al. (2024).

2.2.3) Conceção Protética

A transição digital na prostodontia

A transição digital na prostodontia transferiu grande parte do trabalho criativo, como a seleção de formas dentárias, a escultura da anatomia oclusal e o equilíbrio estético, dos enceramentos manuais para motores de design avançados que aprendem com milhares de casos clínicos concluídos. Revisões recentes descrevem uma evolução rápida dos sistemas especialistas baseados em regras para plataformas de aprendizagem profunda orientadas por dados, que hoje abordam praticamente todas as decisões principais no planeamento de coroas e pontes, muitas vezes em segundos em vez de horas (Iosif et al., 2024).

De bibliotecas de modelos a geradores autónomos

Os primeiros pacotes CAD baseavam-se em bibliotecas de dentes estáticas, obrigando os técnicos a alongar e rodar formas genéricas até que parecessem corretas. Atualmente, os

A integração da robótica e da inteligência artificial na prótese dentária e implantologia oral
motores utilizam modelos probabilísticos de forma, treinados em grandes bases de dados de
dentições saudáveis, que depois se deformam para respeitar a linha de acabamento da

preparação, o espaço interarco e a anatomia adjacente. As redes adversariais generativas (GANs) representam o estado da arte: um modelo DCPR-GAN de duas fases produziu coroas de molares com desvios de superfície inferiores a 0,04 mm em relação a dentes naturais, tornando-os clinicamente indistinguíveis (Kong & Kim, 2024). Um fluxo de trabalho paralelo com 3D-DCGAN conseguiu reproduzir a morfologia das cúspides sem necessidade de intervenção manual, mantendo desvios mínimos face à anatomia original (Kong & Kim, 2024).

Deteção automática da linha de acabamento e integridade marginal

As margens de preparação continuam a ser um dos pontos críticos no design digital de coroas. Um pipeline híbrido de CNN que combina análise de curvatura com classificação a nível de píxel demonstrou traçar linhas de acabamento subgingivais com maior precisão do que os melhores módulos CAD comerciais, segundo testes em modelos laboratoriais (Kong & Kim, 2024). A marginação automática fiável liberta os técnicos da tarefa repetitiva de desenhar margens manualmente e elimina uma das principais causas de re-execução.

Cor, translucidez e harmonia do sorriso

A otimização estética ultrapassou a simples escolha de guias de cor. Uma rede convolucional treinada com fotografias de alta resolução avalia tonalidade, valor e croma em comparação com os dentes adjacentes, fornecendo uma lista ordenada de sugestões de blocos cerâmicos (Ueki et al., 2020, em Kong & Kim, 2024). Ao nível da arcada, os sistemas de Digital Smile Design combinam estas ferramentas cromáticas com módulos de análise facial: pontos de referência como lábios, olhos e nariz definem uma grelha base, e o software ajusta as propostas dentárias até que a linha média, a curva incisal e o arco do sorriso se alinhem com os parâmetros definidos pelo utilizador (Iosif et al., 2024). Sistemas como o Smile Designer Pro exportam essa geometria diretamente para o CAD laboratorial, eliminando múltiplas idas e voltas entre clínica e laboratório (Cervino et al., 2023).

Verificação funcional dentro do software

A forma por si só não garante longevidade; é necessário também assegurar a adaptação interna e a distribuição das cargas. Vários complementos comerciais já integram redes neuronais que simulam análises de elementos finitos: uma vez gerada a coroa, o programa assinala, através de mapas de pressão, zonas onde a espessura da cerâmica ou a secção de conectores ficam abaixo dos limites validados (Rokaya et al., 2024). Se a tensão máxima prevista ultrapassar o limiar de fratura do material, o design é automaticamente reajustado, espessando as zonas vulneráveis

até que o teste virtual seja superado. Esta otimização em circuito fechado reduziu o tempo de modelação laboratorial entre 40 % e 60 % em ensaios multicêntricos (Saini et al., 2022).

Previsão de risco de descolamento e re-execução

Classificadores baseados em aprendizagem profunda conseguem já prever se uma coroa CAD/CAM em resina composta terá risco elevado de descolamento, utilizando apenas os dados do ficheiro STL e os metadados da preparação. Num estudo, o modelo alcançou uma precisão de 98,5 %, oferecendo ao clínico uma pontuação de risco antes da cimentação definitiva (Kong & Kim, 2024). Estes alertas precoces permitem ajustes ao tipo de cimento ou ao grau de conicidade enquanto o paciente ainda está presente.

Ecossistemas integrados à cadeira

As principais suítes CAD/CAM, como o 3Shape® Dental System, o Exocad® e o CEREC® Primescan, já integram muitos destes módulos de IA. Funcionalidades como feedback em tempo real sobre a completude da digitalização, remoção automática de colisões em máxima intercuspidação e bibliotecas de materiais na cloud transformam um fluxo de trabalho linear num ciclo interativo de design. Estudos clínicos reportam a entrega de coroas monolíticas em zircónia numa única consulta, com menos ajustes oclusais à cadeira em comparação com os fluxos CAD convencionais (Cho et al., 2023, citado em Kong & Kim, 2024). Como salientam Cervino et al. (2023), o dentista permanece “no controlo”, aprovando cada iteração do design enquanto o software gere automaticamente as verificações geométricas repetitivas. *O fluxo digital de conceção protética com o suporte de IA encontra-se esquematizado de forma clara (Figura 6).*

□

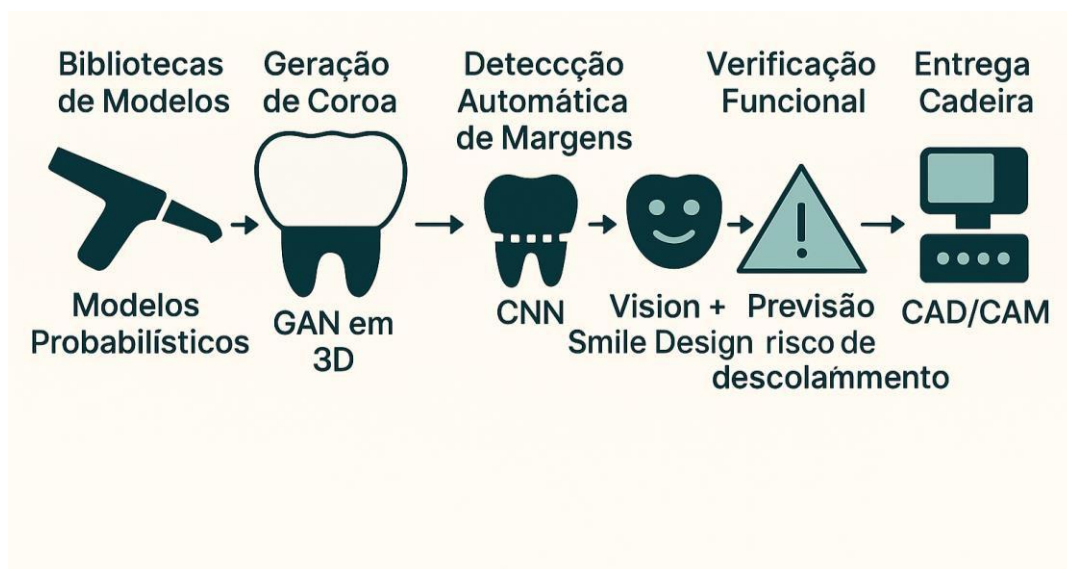


Figura 6: Fluxo digital de concepção protética com IA, criada com o apoio de ferramentas gráficas e inteligência artificial

2.2.4) Prótese Removível e Integração da IA

A prótese removível digital tem sido, tradicionalmente, um processo intensivo em mão de obra: os modelos devem ser articulados, os dentes selecionados e posicionados, e as bases testadas e ajustadas frequentemente em múltiplos ciclos clínicos. Investigação recente demonstra que modelos baseados em inteligência artificial (IA) podem reduzir ou mesmo eliminar muitos destes passos manuais, mantendo, e em alguns casos superando, os padrões convencionais de precisão e estabilidade funcional. A evidência provém, sobretudo, de duas fontes complementares: uma revisão sistemática de 36 estudos sobre fluxos de trabalho protéticos (fixos e removíveis) assistidos por IA (Revilla-León et al., 2021), e uma revisão narrativa centrada em 15 aplicações específicas à prótese removível (Ali et al., 2023). Em conjunto, estes trabalhos traçam o estado atual da IA em cinco domínios críticos.

Na conceção assistida de próteses totais e parciais removíveis, os primeiros sistemas periciais baseavam-se em conhecimento clínico codificado. Estes programas iniciais integravam regras tradicionais de escolha de grampos, seleção de conectores maiores e princípios de alívio de tensões, gerando um esquema protético legível por software. Num conjunto de validação com 104 pacientes, o motor de raciocínio baseado em casos mais recente produziu desenhos de prótese parcial removível com uma precisão média de 0,88, alcançando 100 % de correção nos modelos mandibulares (Chen et al., 2020, citado em Revilla-León et al., 2021). Abordagens mais recentes com redes neuronais convolucionais (CNN) vão ainda mais longe, reconhecendo diretamente as classes de Kennedy a partir de fotografias intraorais: o modelo ResNet152 de Takahashi atingiu uma precisão diagnóstica de 99,5 % no maxilar e 99,7 % na mandíbula, automatizando assim a primeira decisão crítica no planeamento da PPR (Ali et al., 2023).

Para próteses completas, modelos estatísticos de forma e algoritmos de análise de componentes principais (PCA) aprendem formas médias de arcadas e proporções dentárias a partir de bases de dados de pacientes edêntulos, deformando esses modelos de referência para se adaptarem às digitalizações individuais. Motores automáticos de montagem dentária em arcada completa conseguiram replicar arranjos convencionais com erros quadráticos médios (RMS) inferiores a 0,2 mm, sendo aprovados por prostodontistas em avaliações qualitativas, sem necessidade de ajustes adicionais (Revilla-León et al., 2021).

Algoritmos generativos já permitem posicionar os dentes de forma hierárquica primeiro estabelecendo o plano oclusal, e em seguida posicionando caninos, pré-molares e molares com base em vetores interdentários aprendidos. Uma vez validada a disposição virtual, realiza-se

uma subtração booleana entre o bloco dentário e a impressão digitalizada, produzindo uma base personalizada num único passo computacional. Estudos de viabilidade clínica relatam que estas bases desenhadas por IA exigiram menos ajustes oclusais à cadeira do que as suas equivalentes modeladas manualmente em cera. A vantagem é atribuída à capacidade do software de integrar dados tridimensionais de articulação durante o desenho (Ali et al., 2023).

Para além da geometria estática, regressões por aprendizagem automática têm sido treinadas para prever a estabilidade da prótese após inserção. Alimentando variáveis como a morfologia da crista, a área de suporte basal e a espessura da mucosa, uma rede neuronal de retropropagação previu a necessidade futura de reembasamento com uma precisão de 91 % (Revilla-León et al., 2021). Outros modelos correlacionaram a espessura da base e a profundidade do palato com níveis de conforto reportados pelos pacientes, permitindo o ajuste fino de parâmetros de desenho antes da produção.

Ferramentas de segmentação baseadas em CNN originalmente desenvolvidas para planeamento de implantes têm sido adaptadas para arcadas totalmente edêntulas. Estas redes delineiam a crista alveolar, o sulco vestibular e as inserções frenulares em tomografias cone beam ou malhas intraorais de alta resolução, produzindo máscaras codificadas por cores que se integram diretamente no software CAD. Os coeficientes de similaridade de Dice reportados ultrapassam 0,93, assegurando que os limites da prótese respeitam os contornos anatómicos e reduzindo a necessidade de moldagens periféricas (Ali et al., 2023).

Combinando estas capacidades, a IA permite reduzir o número de consultas no fluxo de trabalho da prótese removível de quatro ou cinco para apenas duas: uma para a recolha de impressões digitais e registos maxilomandibulares, e outra para a entrega da prótese. Dados de revisões sistemáticas indicam que pipelines totalmente automatizados reduziram o tempo médio de modelação laboratorial em 40 a 60 %, e que as próteses resultantes necessitaram de menos correções oclusais no momento da inserção (Revilla-León et al., 2021). Estes ganhos de eficiência traduzem-se em menores custos de produção e maior satisfação do paciente, sem comprometer parâmetros funcionais como a eficiência mastigatória ou a fonética. A arquitetura decisional que orienta o processo de confecção de próteses removíveis com base em IA é apresentada esquematicamente (Figura 7).

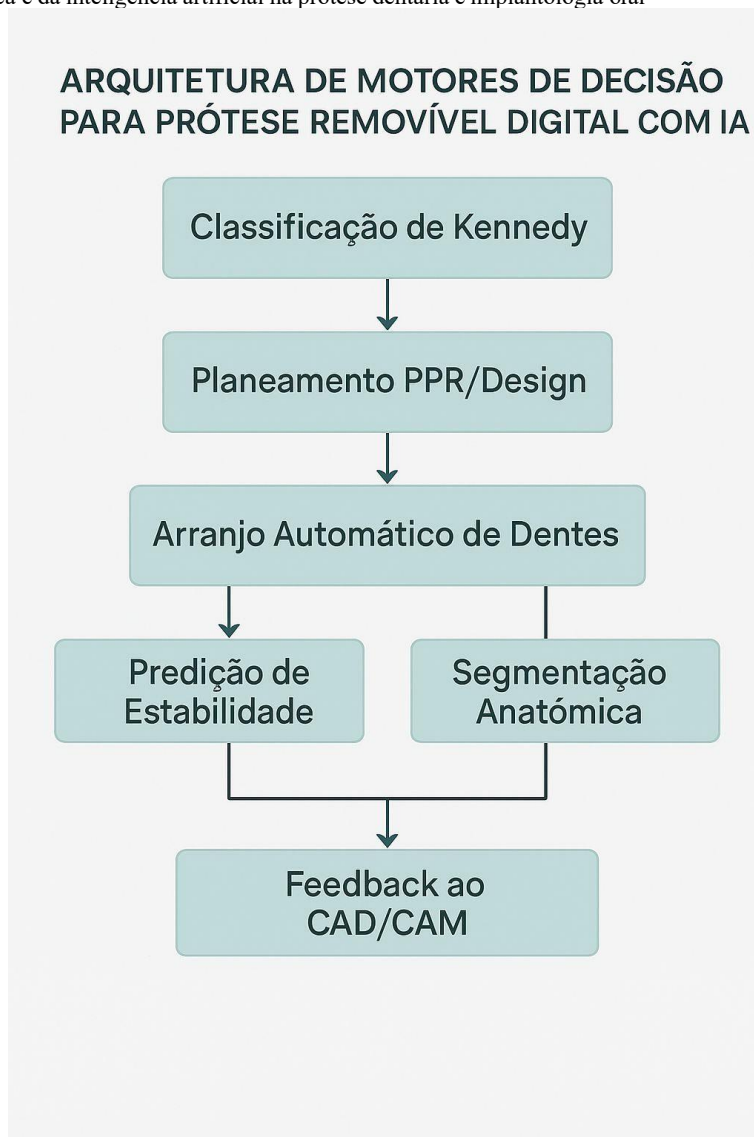


Figura 7: Arquitetura de decisão baseada em IA para o fluxo digital da prótese removível, criada com o apoio de ferramentas gráficas e inteligência artificial

2.2.5) Teledentisteria e Monitorização

O aumento da tele saúde dentária no pós-pandemia coincidiu com a maturação de motores de inteligência artificial capazes de analisar imagens enviadas, monitorizar o progresso do tratamento e emitir alertas clínicos em tempo quase real. Três revisões recentes, Batra et al. (2022), Németh et al. (2023) e Babu et al. (2024), demonstram como estas ferramentas estão a transformar o seguimento à distância, ao mesmo tempo que revelam lacunas persistentes em termos de infraestrutura, privacidade e preparação profissional.

As plataformas de monitorização remota combinam atualmente aplicações móveis, “selfies” com afastadores de bochecha calibrados e classificadores baseados em redes neuronais convolucionais na *cloud*. Sistemas como o Dental Monitoring™ utilizam vídeos semanais dos pacientes para avaliar o encaixe dos alinhadores, o movimento dentário e a integridade dos brackets ortodônticos; desvios além dos limites predefinidos acionam alertas ao clínico, enquanto os casos estáveis recebem automaticamente mensagens de tranquilização, permitindo aumentar com segurança os intervalos entre consultas presenciais (Batra et al., 2022). Pipelines semelhantes de triagem de imagens conseguem detetar precocemente cáries, inflamação gengival e até alterações na coloração da mucosa, que podem indicar lesões orais potencialmente malignas, uma aplicação que Babu et al. (2024) destacam como especialmente valiosa em regiões rurais da Índia, amplamente carenciadas de cuidados de saúde oral.

A evidência atual quanto à adesão é mista. Num inquérito nacional a 171 dentistas húngaros, conferências online e receitas eletrónicas eram praticamente universais, mas apenas metade dos inquiridos tinha conhecimento de sistemas de telemonitorização com IA em tempo real, e apenas 8 % referiram utilizá-los na prática clínica (Németh et al., 2023). Os clínicos mais jovens obtiveram as pontuações mais elevadas no Digital Dental Index do estudo, sugerindo um impulso geracional, mas também evidenciando a necessidade de formação dirigida e interfaces mais simples e intuitivas.

Onde a infraestrutura tecnológica é sólida, os benefícios clínicos já são mensuráveis. Aplicações ortodônticas guiadas por IA detetam alinhadores mal adaptados em poucos dias, permitindo a substituição atempada da goteira ou reparação de attachments antes de ocorrer recidiva significativa; módulos de manutenção peri-implantar quantificam vermelhidão e edema dos tecidos a partir de fotografias calibradas, permitindo definir intervalos de vigilância ajustados ao risco; e ferramentas lúdicas de visualização da placa bacteriana mantêm crianças e idosos motivados entre consultas (Batra et al., 2022; Babu et al., 2024). Estas funcionalidades reduzem o tempo despendido em consultas desnecessárias e permitem concentrar os recursos nos casos clínicos mais complexos, sem comprometer a qualidade dos resultados.

Persistem, no entanto, obstáculos significativos. Tanto Batra et al. (2022) como Babu et al. (2024) sublinham as preocupações com a segurança dos dados e a escassez de ligações de banda larga fora dos grandes centros urbanos. Na amostra de Németh et al. (2023), quase metade dos clínicos não aderentes apontaram a falta de hardware adequado ou de conectividade como principal entrave, e dois terços solicitaram software mais acessível e fácil de usar. A adaptação

das plataformas de IA às normas do RGPD, com encriptação segura e fluxos de consentimento explícitos, juntamente com o investimento na infraestrutura digital rural, parece ser fundamental para permitir uma adoção em larga escala.

Em suma, a teledentisteria potenciada por IA está a evoluir de um modelo informal de troca de fotografias para uma monitorização estruturada, suportada por algoritmos, que permite prever problemas e personalizar intervenções. O sucesso dependerá de avanços simultâneos em conectividade, regulamentação e formação clínica, garantindo que esta tecnologia complementa, e não fragmenta, a relação entre médico dentista e paciente

3) Desafios, Impactos e Perspectivas Futuras

3.1) Contribuições e Benefícios

A medicina dentária digital e robotizada já não se limita a um domínio experimental; proporciona hoje ganhos mensuráveis, tanto à cadeira como no laboratório. Três estudos recentes⁴Rawal (2022), Ahmad et al. (2021) e Wang et al. (2024)⁴mostram como a combinação de inteligência artificial, navegação computadorizada e robótica se traduz em maior precisão técnica, fluxos de trabalho mais eficientes e cuidados cada vez mais orientados por dados do paciente.

No que toca à precisão clínica, a meta-análise de Wang e colaboradores revela que a cirurgia implantológica assistida por computador e guiada por robô (r-CAIS) atinge desvios médios de apenas 0,6 mm na plataforma e 0,7 mm no ápice, com erro angular de 1,62°, resultados substancialmente melhores do que os 131,4 mm e 3,5° obtidos por guias estáticos ou sistemas de navegação dinâmica mais antigos. Os primeiros protótipos autónomos desenvolvidos na China ratificam esta consistência com desvios de entrada de $0,705 \pm 0,145$ mm e erros apicais inferiores a 1 mm em modelos de bancada (Ahmad et al., 2021). Além disso, a estratégia híbrida que combina navegação estática e dinâmica⁴descrita como técnica de duplo factor⁴reduz o erro na plataforma em 38348 % em comparação com qualquer método isolado (Wang et al., 2024). Conjuntamente, estes dados confirmam que o planeamento baseado em IA, aliado à execução robótica ou híbrida, oferece posicionamento mais reprodutível e orientado

proteticamente do que a colocação manual ou com guias únicos, minimizando riscos de lesão nervosa, perfuração do seio maxilar ou falhas estéticas (Rawal, 2022).

Os ganhos de eficiência são igualmente evidentes. Robôs executam fluxos repetitivos indefinidamente, imunes a tremor e fadiga, mantendo assim um padrão de qualidade constante (Ahmad et al., 2021). A integração de digitalização intra-oral com fotogrametria encurta o tempo de cadeira e melhora o conforto do paciente, enquanto fluxos digitais que unem concepção e fabrico facilitam a comunicação entre clínica e laboratório (Wang et al., 2024). Braços robóticos com limites hápticos incorporados dispensam a produção de múltiplos guias em resina, reduzindo etapas de preparação e esterilização (Rawal, 2022). Quando tarefas repetitivas4perfuração, digitalização, moldagem4passam para a máquina, a equipa concentra-se no diagnóstico, no aconselhamento e na tomada de decisões clínicas complexas, áreas onde o discernimento humano continua a superar qualquer algoritmo.

Em paralelo, os cuidados tornam-se mais personalizados. Dados multimodais4CBCT, digitalizações intra-orais, imagens faciais4são agora fundidos em modelos 4D dinâmicos do paciente, permitindo testar trajetórias oclusais e resultados estéticos antes de intervir (Wang et al., 2024). As brocas robóticas ajustam força e velocidade em tempo real para manter a trajetória planeada mesmo quando a densidade cortical varia (Rawal, 2022). Além disso, robôs autónomos ou tele-operados registam dados intra- e pós-operatórios de forma contínua, viabilizando seguimentos baseados em IA e até módulos formativos robotizados no ensino clínico (Ahmad et al., 2021). Este conjunto de capacidades desloca a prática de protocolos genéricos para uma medicina oral de precisão, na qual cada decisão4comprimento do implante, trajecto da broca, intervalo de recall4é sustentada por dados digitais específicos do indivíduo.

Em síntese, a evidência recente indica que robôs e navegação híbrida alcançam erros de colocação inferiores a 0,7 mm, a automação digital reduz significativamente tempos operatórios e laboratoriais, e a integração de modelos virtuais 4D com feedback háptico alinha a terapêutica à anatomia e aos objetivos de cada paciente.

3.2) Limitações e Desafios Técnicos

A inteligência artificial (IA) promete níveis inéditos de precisão diagnóstica e eficiência operacional; no entanto, o seu desempenho na prática clínica dentária diária continua condicionado por três fatores técnicos interligados: a qualidade dos dados que alimentam os modelos, a fiabilidade do ecossistema de software e hardware em que operam, e o grau de explicabilidade das suas decisões perante clínicos e pacientes. Uma análise crítica destas dimensões, baseada em estudos empíricos recentes e artigos de posicionamento, revela tanto a fragilidade das soluções actuais como as bases para uma estratégia robusta de mitigação.

Qualidade dos dados

Os modelos de IA aprendem associações estatísticas a partir de imagens, registos eletrónicos de saúde e dados de sensores recolhidos para treino. Quando esses dados contêm lacunas sistemáticas, erros de medição ou enviesamentos demográficos, os algoritmos resultantes acabam por propagar os mesmos preconceitos que deveriam corrigir. Uma análise multi-centro de falhas em IA clínica demonstrou que a sub-representação de grupos minoritários e pacientes com múltiplas comorbilidades elevou as taxas de erro até 25 % quando os modelos foram testados fora do local de desenvolvimento, um fenómeno que os autores designam por “iceberg oculto” do enviesamento dos conjuntos de dados (Li, Haley, Boyd, & Bernstam, 2023). Para além do desequilíbrio demográfico, os conjuntos de dados dentários rotineiros enfrentam problemas como tamanhos de voxel heterogéneos, configurações de exposição variáveis e padrões de anotação inconsistentes, o que compromete a generalização dos modelos perante imagens obtidas com outro software ou equipamento (Sáez, Ferri, & García-Gómez, 2024).

As consequências clínicas são concretas. Uma rede de segmentação nervosa calibrada com tomografias cone beam de alta resolução pode não detetar o canal mandibular num aparelho de baixa dose; um detetor de cáries oclusais treinado com imagens de adolescentes pode subdiagnosticar lesões radiculares em pacientes idosos. A mitigação começa por pipelines de curadoria de dados proactivos, com sinalização sistemática de valores em falta, harmonização dos metadados dos scanners e rotulagem consensual entre vários especialistas 4, seguida por modelos de aprendizagem contínua que actualizam os pesos da rede à medida que surgem novos casos mais equilibrados (Sáez et al., 2024). Pilotos de aprendizagem federada na Europa acrescentam uma camada de privacidade ao partilhar apenas actualizações do modelo em vez

de imagens brutas, reduzindo a divergência entre clínicas e respeitando os regulamentos do RGPD (Kelly, Karthikesalingam, Suleyman, Corrado, & King, 2019).

Fiabilidade dos sistemas

Ao contrário dos dispositivos médicos convencionais, os algoritmos de aprendizagem são dinâmicos, evoluem voluntariamente através de re-treino periódico ou involuntariamente por deriva de dados. A revisão TASS (Technical, Stakeholder and Society) de mais de 300 publicações sobre IA médica revelou que a validação interna excessivamente otimista é prática comum, enquanto a validação externa e multi-centro continua a ser uma exceção (Li et al., 2023). Quando modelos são implementados sem esta validação alargada, pequenas alterações acumuladas, uma atualização de firmware num scanner intraoral, uma mudança no protocolo de exposição ou o surgimento de uma nova patologia, degradam gradualmente a precisão. Sáez et al. (2024) propõem a criação de laboratórios de garantia de IA com responsabilidade pelo controlo contínuo do desempenho dos modelos; quando os indicadores de erro ultrapassam um limiar definido, o sistema aciona automaticamente um re-treino ou uma revisão por humanos.

Os reguladores começam a convergir nesta visão de ciclo de vida. A FDA (Administração de Alimentos e Medicamentos dos EUA) exige agora um plano pré-definido de controlo de alterações que detalhe como um modelo pode “aprender mantendo-se seguro e eficaz” após a sua entrada no mercado (Li et al., 2023). A cibersegurança representa uma camada adicional: a violação de dados da WotNot, em 2024, demonstrou como repositórios na cloud mal protegidos podem expor em massa radiografias e documentos pessoais, enquanto ataques adversariais de prova de conceito conseguiram alterar diagnósticos de cárie através de manipulações invisíveis de pixéis (Khan, Shah, & Shaikh, 2025). Assim, a encriptação de ponta-a-ponta dos pipelines de dados, os treinos adversariais e os registos de auditoria seguros são pilares indispensáveis da engenharia de fiabilidade.

Explicabilidade

Uma elevada precisão preditiva raramente basta para convencer um dentista a aceitar uma linha de margem gerada por IA ou a trajetória de um implante proposta por um sistema autónomo. Na síntese temática realizada por Li et al. (2023), a “falta de explicabilidade” emergiu como a barreira técnica mais citada à adoção, transversal a todos os grupos de interesse. Paralelamente, a legislação europeia de proteção de dados consagra agora o direito do paciente a “informações compreensíveis” sobre decisões algorítmicas que influenciem os seus cuidados de saúde (Kelly et al., 2019).

As ferramentas de IA explicável (XAI), como mapas de saliência, gráficos SHAP e exemplos contrafactuais, oferecem alguma transparência ao indicar as regiões da imagem ou variáveis mais determinantes para a decisão. No entanto, Bharati, Mondal e Podder (2023) alertam que explicações demasiado simplistas podem omitir interações críticas entre variáveis, enquanto as demasiado complexas anulam o propósito da transparência. Além disso, revelar totalmente o percurso da decisão pode expor a arquitetura do modelo, comprometendo a sua proteção comercial. O consenso emergente favorece arquiteturas híbridas, que combinam camadas transparentes baseadas em regras com redes neuronais de alta capacidade, complementadas por uma avaliação centrada no utilizador sobre a utilidade das explicações no contexto clínico (Sáez et al., 2024).

Sob o olhar clínico da medicina dentária, estas limitações traduzem-se em riscos reais. Um modelo de segmentação CBCT não calibrado pode falhar na localização do canal alveolar inferior após uma atualização de scanner; um algoritmo de desenho de coroas sujeito a deriva pode introduzir erros incrementais de adaptação, prolongando os tempos de ajuste à cadeira; uma trajetória robótica opaca pode minar a confiança do cirurgião, levando à intervenção manual que anula os ganhos de eficiência esperados. A resposta a estes desafios passa por uma estratégia tripla: gestão rigorosa dos dados ao longo de todo o ciclo de aquisição e anotação, plano de fiabilidade que inclua validação externa e monitorização pós-mercado, e ferramentas de explicabilidade adaptadas ao contexto clínico, que clarifiquem, em vez de obscurecer, a lógica por detrás das decisões algorítmicas.

3.3) Desafios Éticos, Legais e Sociais

Desafios Éticos e Jurídicos na Implementação da IA na Medicina Dentária

A promessa técnica da medicina dentária aumentada por inteligência artificial (IA) só poderá concretizar-se plenamente se os direitos dos pacientes forem preservados, as linhas de responsabilidade se mantiverem claras e se os profissionais estiverem preparados para supervisionar sistemas de aprendizagem que continuam a evoluir após a sua implementação. Uma análise da literatura fornecida, Williamson e Prybutok (2024), Murdoch (2021), Naik et al. (2022) e McKee e Wouters (2022), revela três desafios convergentes, bem como as salvaguardas que começam a emergir em resposta.

Conformidade com o RGPD

O Regulamento Geral sobre a Proteção de Dados (RGPD) impõe princípios como limitação de finalidade, minimização dos dados e o “direito ao apagamento” por parte do paciente. No entanto, os pipelines de IA dependem de conjuntos de dados longitudinais e multimodais, recorrendo frequentemente a registos de auditoria imutáveis como blockchain, criando o que Williamson e Prybutok (2024) denominam de “paradoxo privacidade3progresso”.

Três pontos de fricção dominam o debate atual:

- **Controlo distribuído:** Em blockchains sem permissões ou com múltiplas instituições, nenhuma entidade cumpre, de forma clara, a definição de “responsável pelo tratamento de dados” prevista no RGPD, dificultando a atribuição de responsabilidades e a notificação de violações (Williamson & Prybutok, 2024).
- **Apagamento versus imutabilidade:** Registos que apenas permitem adicionar dados (append-only) dificultam a correção ou eliminação a posteriori, desafiando os Artigos 16 e 17 do RGPD (Murdoch, 2021).
- **Minimização de dados:** Os modelos de aprendizagem contínua tendem a expandir o número de variáveis utilizadas ao longo do tempo, afastando-se do princípio de armazenar apenas o necessário (Williamson & Prybutok, 2024).

A medicina dentária digital e robotizada já não pertence ao domínio experimental; actualmente oferece ganhos mensuráveis tanto à cadeira como no laboratório. Três fontes recentes mostram como a inteligência artificial, a navegação e a robótica se traduzem em maior precisão, fluxos de trabalho mais eficientes e cuidados orientados por dados (Rawal, 2022; Ahmad et al., 2021; Wang et al., 2024).

Em termos de precisão clínica, a cirurgia implantológica assistida por computador e guiada por robô (r-CAIS) atinge desvios médios de apenas 0,6 mm na plataforma e 0,7 mm no ápice, com erro angular de 1,62°, valores significativamente inferiores aos 131,4 mm / 3,5° obtidos por guias estáticos ou navegação dinâmica mais antiga. Protótipos autónomos iniciais na China confirmaram esta consistência, registando $0,705 \pm 0,145$ mm de desvio de entrada e erros apicais < 1 mm em modelos de bancada; e a chamada técnica “duplo factor”, que combina navegação estática e dinâmica, reduz o erro na plataforma em 38348 %. Planeamento baseado em IA aliado a execução robótica ou híbrida permite assim posicionamento mais reprodutível

e orientado proteticamente, diminuindo riscos de lesão nervosa, perfuração do seio ou comprometimento estético.

No plano da eficiência, robôs executam fluxos repetitivos por tempo indefinido, insensíveis a tremor ou fadiga. A digitalização intra-oral combinada com fotogrametria encurta o tempo de cadeira e melhora o conforto do paciente, enquanto fluxos digitais que ligam concepção e fabrico facilitam a comunicação clínica-laboratorial. Além disso, braços robóticos com limites hápticos dispensam a impressão de múltiplos guias em resina, reduzindo etapas de preparação e ciclos de esterilização. Ao delegar perfuração, digitalização ou moldagem às máquinas, a equipa pode concentrar-se no diagnóstico, no aconselhamento e nas decisões clínicas complexas, onde o discernimento humano permanece superior.

Quanto à personalização, dados multimodais (CBCT, scans intra-orais, imagens faciais) são integrados em modelos 4D de “paciente virtual”, permitindo testar trajetórias oclusais e resultados estéticos antes de intervir. A resistência em tempo real devolvida por brocas robóticas mantém a trajetória planeada mesmo com variações de densidade óssea, ajustando força e velocidade à anatomia individual. Por fim, robôs autónomos ou tele-operados recolhem dados intra- e pós-operatórios de forma contínua, alimentando seguimentos baseados em IA e até módulos formativos robotizados.

Em suma, a adopção destes sistemas resulta em erros de colocação inferiores a 0,7 mm, cortes significativos de tempo operatório e laboratorial, e terapêutica alinhada à anatomia e aos objectivos funcionais de cada paciente.

3.4) Inovações e Futuro da Dentisteria

A inteligência artificial está a passar gradualmente de protótipos de investigação isolados para ferramentas que os médicos dentistas utilizam diariamente, lado a lado com o espelho e a sonda exploradora. Esta transição é moldada por duas trajetórias principais: por um lado, a integração prática da IA nas rotinas clínicas quotidianas; por outro, a emergência da chamada medicina dentária “4P” : preditiva, preventiva, personalizada e participativa.

Integração da IA na prática clínica quotidiana

Funções de IA que anteriormente operavam em ambientes de investigação isolados estão agora integradas diretamente em softwares de imagiologia, programas CAD e painéis de gestão

clínica. Plug-ins baseados em redes neuronais convolucionais já conseguem realçar cáries, perda óssea periodontal e roscas de implantes enquanto a radiografia ainda está visível no ecrã, fornecendo sugestões em tempo real sem interromper o fluxo de trabalho (Schwendicke, Samek, & Krois, 2020). Do lado administrativo, plataformas na cloud combinam estes motores de diagnóstico com agendamento automático de consultas, faturação e triagem por chatbot, aliviando a carga não clínica ao mesmo tempo que o volume de dados cresce de forma exponencial (Rahim et al., 2024). Paralelamente, módulos de “inteligência aumentada” sugerem ajustes no desenho de coroas ou no protocolo de cimentação diretamente dentro do software CAD, reduzindo repetições laboratoriais e correções à cadeira (Kamath et al., 2024).

Apesar disso, a adoção generalizada continua a ser limitada por conjuntos de dados fragmentados, qualidade inconsistente dos estudos e uma visão ainda incompleta dos rácios custo-benefício (Schwendicke et al., 2020). Para colmatar estas lacunas será necessário promover o intercâmbio de dados entre instituições, idealmente através de modelos de aprendizagem federada que salvaguardem a privacidade, bem como estabelecer normas transparentes de reporte e análises económicas claras que convençam tanto clínicas universitárias como consultórios independentes (Rahim et al., 2024).

Medicina dentária 4P: a IA como motor de cuidados preditivos, preventivos, personalizados e participativos

Olhando para o futuro, espera-se que os sistemas de IA maduros sustentem um modelo de medicina dentária que deixa de ser episódico para passar a ser continuamente informado por fluxos de dados (Schwendicke et al., 2020):

- Algoritmos preditivos treinados em milhares de casos longitudinais poderão prever a falência de restaurações ou a peri-implantite meses antes da manifestação clínica, permitindo intervenções prévias em vez de terapias de salvamento (Schwendicke et al., 2020).
- Aplicações móveis preventivas, combinadas com modelos de visão computacional, alertam os pacientes quando os níveis de placa aumentam ou os alinhadores se descolam, substituindo os intervalos fixos de controlo por alertas baseados na necessidade (Rahim et al., 2024).
- Regras de tratamento personalizadas emergem quando dados multimodais, genómicos, comportamentais, radiográficos, alimentam motores de risco que ajustam a escolha de

materiais, frequência de recall e parâmetros de desenho protético a cada paciente (Joda et al., 2020).

- Dispositivos participativos e painéis de controle para o paciente promovem a automonitorização e a tomada de decisão partilhada; desta forma, a IA potencia tanto o julgamento clínico como a autonomia do paciente (Kamath et al., 2024).

Joda e colaboradores (2020) defendem que a concretização plena da visão 4P exige coordenação em três domínios fundamentais: uma gestão robusta dos dados em saúde digital, aplicações de IA validadas clinicamente e modelos de prestação de cuidados que estendam os benefícios além dos primeiros adotantes. Sem essa coerência, até os algoritmos tecnicamente mais avançados correm o risco de se tornarem “tecnologias órfãs” que falham na transformação efetiva dos cuidados de saúde oral.

Perspetivas

A IA aplicada à cadeira deixou de ser especulativa. À medida que os conjuntos de dados multicêntricos e curados se expandem e as interfaces explicáveis amadurecem, algoritmos que outrora existiam apenas em posters de congressos começarão a integrar-se diretamente em unidades de fotopolimerização, fresadoras e portais do paciente. Nesse momento, o papel do médico dentista evolui: deixa de ser um mero coletor de dados para assumir-se como intérprete de dados e defensor do paciente, validando os resultados produzidos pela máquina, contextualizando-os com base nos valores humanos, e assegurando que a promessa da abordagem 4P se traduz em ganhos reais para a saúde oral.

II) CONCLUSÕES

A presente dissertação teve como propósito cartografar, escrutinar criticamente e, por fim, apontar caminhos concretos para a incorporação segura e eficaz da Inteligência Artificial (IA) e da robótica na medicina dentária atual. Através de uma revisão narrativa estruturada, das publicações entre 2018 e 2025, constatou-se um crescimento exponencial de soluções algorítmicas e mecânicas nos domínios do diagnóstico por imagem, do planeamento cirúrgico, da reabilitação protética, do fabrico digital e da gestão clínica. Em paralelo, registou-se uma sofisticação progressiva dos sistemas robóticos, sobretudo na implantologia, onde a colocação guiada e a osteotomia sub-milimétrica se aproximam do uso quotidiano.

Contudo, este entusiasmo tecnológico é apenas o primeiro passo. A análise detalhada revelou **cinco eixos de atenção** que condicionam, ou potenciarão a adoção responsável:

1. **Qualidade e governação de dados.** Modelos treinados em bases restritas ou enviesadas podem perpetuar disparidades diagnósticas; urge fomentar iniciativas de dados federados, interoperáveis e auditáveis.
2. **Explicabilidade e confiança clínica.** Sem transparência na tomada de decisão algorítmica, o profissional hesita em delegar tarefas críticas; XAI robusta e interfaces intuitivas são prioridades de desenvolvimento.
3. **Ciber-segurança e privacidade.** A proteção de imagens radiográficas e registos de saúde deve alinhar-se com o RGPD, recorrendo a encriptação ponta-a-ponta, anonimização forte e protocolos de consentimento dinâmico.
4. **Responsabilidade e enquadramento legal.** A partilha clara de responsabilidade entre clínico, desenvolvedor, fornecedor e instituição, bem como diretrizes regulatórias adaptativas, evitará zonas cinzentas de culpa em caso de falha.
5. **Literacia digital e formação contínua.** A integração curricular de fundamentos de IA e de ética tecnológica, desde o pré-graduado ao desenvolvimento profissional contínuo, emergiu como condição sine qua non para a translação clínica.

Face a estes eixos, propõem-se **quatro direções estratégicas**:

- **Construir consórcios multicêntricos** que produzam datasets padronizados, diversificados e rotulados por especialistas, reforçando a validade externa dos modelos.

- **Adotar modelos de IA “human-in-the-loop”** que mantenham o cirurgião-dentista como decisor final, mas beneficiem de processamento algorítmico em tempo real para suporte preditivo e preventivo.
- **Desenvolver guidelines de custo-efetividade** que quantifiquem ganhos clínicos, económicos e de tempo, facilitando a decisão de investimento em clínicas de pequena e média escala.
- **Ancorar a inovação no paradigma 4P:** Predictive, Preventive, Personalized, Participatory, garantindo que cada avanço técnico traduza valor tangível para o paciente, reduza variabilidade de tratamento e promova corresponsabilização.

Perspetivas futuras

À medida que algoritmos e robôs se tornam mais acessíveis, estudos longitudinais, randomizados e multicêntricos deverão avaliar não só desempenho técnico, mas também impacto em saúde pública, sustentabilidade financeira e pegada ecológica. Paralelamente, o diálogo entre engenheiros, clínicos, legisladores e pacientes será crucial para co-criar uma medicina dentária digital ética, segura e verdadeiramente centrada na pessoa.

Em síntese, IA e robótica oferecem à medicina dentária uma oportunidade única de evoluir de um modelo predominantemente reativo para outro preditivo, preventivo, personalizado e participativo. A materialização plena desse potencial dependerá da nossa capacidade coletiva de equilibrar inovação com responsabilidade, entusiasmo com pensamento crítico e tecnologia com humanidade.

Bibliografia

- Ahmad, et al. (2021).** *Dental Robotics : A Disruptive Technology*. Sensors, 21(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/s21103308>
- Agrawal, P., & Nikhade, P. (2022).** *Artificial intelligence in dentistry: Past, present, and future*. Cureus, 14(7), e27405. <https://doi.org/10.7759/cureus.27405>
- Ali, I. E., et al. (2023).** *Applications and performance of artificial intelligence models in removable prosthodontics: A literature review*. Journal of Prosthodontic Research, 68(3), 358–367. https://doi.org/10.2186/jpr.JPR_D_23_00073
- Babu, B., et al. (2024).** *The rise of artificial intelligence in teledentistry: A comprehensive review*. Journal of Oral Medicine, Oral Surgery, Oral Pathology and Oral Radiology, 10(4), 2473253. <https://doi.org/10.18231/j.jooo.2024.049>
- Bengio, Y., Lecun, Y., & Hinton, G. (2021).** *Deep learning for AI*. Communications of the ACM, 64(7), 58–65. <https://doi.org/10.1145/3448250>
- Bharati, S., et al. (2023).** *A Review on Explainable Artificial Intelligence for Healthcare: Why, How, and When?* IEEE Transactions on Artificial Intelligence, 5(4), 1429–1442. <https://doi.org/10.1109/TAI.2023.3266418>
- Brynjolfsson, E. (2022).** *The Turing Trap: The Promise & Peril of Human-Like Artificial Intelligence*. Daedalus, 151(2), 272–287. https://doi.org/10.1162/daed_a_01915
- Cervino, G., et al. (2023).** *The Use of AI for Prosthodontic Restoration: Predictable and Safer Dentistry*. Engineering Proceedings, 56(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/ASEC2023-15304>
- Chen, D., et al. (2024).** *Precise tooth design using deep learning-based templates*. Journal of Dentistry, 144, 104971. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.104971>
- Chen, Y.-W., Stanley, K., & Att, W. (2020a).** *Artificial intelligence in dentistry: Current applications and future perspectives*. Quintessence International, 51(3), 248–257. <https://doi.org/10.3290/j.qi.a43952>
- Cho, J.-H., et al. (2023).** *Time efficiency, occlusal morphology, and internal fit of anatomic contour crowns designed by dental software powered by generative adversarial network: A comparative study*. Journal of Dentistry, 138, 104739. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2023.104739>
- Department of Orthodontics, et al. (2022).** *Artificial Intelligence in Teledentistry*. Discoveries, 10(3), e153. <https://doi.org/10.15190/d.2022.12>
- Fatima, A., et al. (2022).** *Advancements in Dentistry with Artificial Intelligence: Current Clinical Applications and Future Perspectives*. Healthcare, 10(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/healthcare10112188>
- Fei, N., et al. (2022).** *Towards artificial general intelligence via a multimodal foundation*

Iosif, L., et al. (2024). *AI in Prosthodontics: A Narrative Review Bridging Established Knowledge and Innovation Gaps Across Regions and Emerging Frontiers*. Prosthesis, 6(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/prosthesis6060092>

Janiesch, C., Zschech, P., & Heinrich, K. (2021). *Machine learning and deep learning*. Electronic Markets, 31(3), 685–695. <https://doi.org/10.1007/s12525-021-00475-2>

Jin, X., et al. (2023). *Automated tooth crown design with optimized shape and biomechanics properties*. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 11. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1216651>

Joda, T., et al. (2021). *Disruptive Innovation in Dentistry: What It Is and What Could Be Next*. Journal of Dental Research, 100(5), 448–453. <https://doi.org/10.1177/0022034520978774>

Joda, T., & Zitzmann, N. U. (2022). *Personalized workflows in reconstructive dentistry: Current possibilities and future opportunities*. Clinical Oral Investigations, 26(6), 4283–4290. <https://doi.org/10.1007/s00784-022-04475-0>

Kamath, P., et al. (2024). *A Brief Exploration of Artificial Intelligence in Dental Healthcare: A Narrative Review*. F1000Research, 13, 37. <https://doi.org/10.12688/f1000research.140481.1>

Khan, M. M., Shah, N., & Shaikh, N. (2025). *Towards secure and trusted AI in healthcare: A systematic review of emerging innovations and ethical challenges*. International Journal of Medical Informatics, 195, 105780. <https://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2024.105780>

Kelly, C. J., et al. (2019). *Key challenges for delivering clinical impact with artificial intelligence*. BMC Medicine, 17, 195. <https://doi.org/10.1186/s12916-019-1426-2>

King Khalid University, et al. (2022). *Investigation on the application of artificial intelligence in prosthodontics*. INPLASY - International Platform of Registered Systematic Review and Meta-analysis Protocols. <https://doi.org/10.37766/inplasy2022.12.0096>

Kong, H. J., & Kim, Y. L. (s. d.). *Application of artificial intelligence in dental crown prosthesis: A scoping review*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4493582/v1>

Lerner, H., et al. (2020). *Artificial intelligence in fixed implant prosthodontics: A retrospective study of 106 implant-supported monolithic zirconia crowns inserted in the posterior jaws of 90 patients*. BMC Oral Health, 20(1), 80. <https://doi.org/10.1186/s12903-020-1062-4>

Li, L. T., et al. (2023). *Technical/Algorithm, Stakeholder, and Society (TASS) barriers to the application of artificial intelligence in medicine: A systematic review*. Journal of Biomedical Informatics, 147, 104531. <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2023.104531>

Liu, C.-M., Lin, W.-C., & Lee, S.-Y. (2024). *Evaluation of the efficiency, trueness, and clinical application of novel artificial intelligence design for dental crown prostheses*. Dental Materials, 40(1), 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2023.10.013>

Lyakhov, P. A., et al. (2022). *Neural network system for analyzing statistical factors of patients for predicting the survival of dental implants*. Frontiers in Neuroinformatics, 16. <https://doi.org/10.3389/fninf.2022.1067040>

McClelland, J. L., et al. (2020). *Placing language in an integrated understanding system: Next steps toward human-level performance in neural language models*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 117(42), 25966–25974. <https://doi.org/10.1073/pnas.1910416117>

McKee, M., & Wouters, O. J. (2022). *The Challenges of Regulating Artificial Intelligence in*

- Healthcare*. International Journal of Health Policy and Management, 1. <https://doi.org/10.34172/ijhpm.2022.7261>
- Murdoch, B. (2021)**. *Privacy and artificial intelligence: Challenges for protecting health information in a new era*. BMC Medical Ethics, 22(1), 122. <https://doi.org/10.1186/s12910-021-00687-3>
- Naik, N., et al. (2022)**. *Legal and ethical considerations in artificial intelligence in healthcare: Who takes responsibility?* Frontiers in Surgery, 9, 862322. <https://doi.org/10.3389/fsurg.2022.862322>
- Németh, O., et al. (2023)**. *The impact of digital healthcare and teledentistry on dentistry in the 21st century: A survey of Hungarian dentists*. BMC Oral Health, 23(1), 1025. <https://doi.org/10.1186/s12903-023-03770-w>
- Qiao, S.-C., et al. (2023)**. *Accuracy and safety of a haptic operated and machine vision controlled collaborative robot for dental implant placement: A translational study*. Clinical Oral Implants Research, 34(8), 839–849. <https://doi.org/10.1111/clr.14112>
- Rahim, A., et al. (2024)**. *Artificial intelligence-powered dentistry: Probing the potential, challenges, and ethicality of artificial intelligence in dentistry*. DIGITAL HEALTH, 10, 20552076241291345. <https://doi.org/10.1177/20552076241291345>
- Rawal, S. (2022)**. *Guided innovations: Robot-assisted dental implant surgery*. The Journal of Prosthetic Dentistry, 127(5), 673–674. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2022.03.029>
- Revilla-León, M., et al. (2023)**. *Artificial intelligence models for tooth-supported fixed and removable prosthodontics: A systematic review*. The Journal of Prosthetic Dentistry, 129(2), 276–292. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2021.06.001>
- Rokaya, D., et al. (2024)**. *Artificial intelligence in dentistry and dental biomaterials*. Frontiers in Dental Medicine, 5. <https://doi.org/10.3389/fdmed.2024.1525505>
- Sáez, C., Ferri, P., & García-Gómez, J. M. (2024)**. *Resilient Artificial Intelligence in Health: Synthesis and Research Agenda Toward Next-Generation Trustworthy Clinical Decision Support*. Journal of Medical Internet Research, 26, e50295. <https://doi.org/10.2196/50295>
- Schwendicke, F., Samek, W., & Krois, J. (2020)**. *Artificial Intelligence in Dentistry: Chances and Challenges*. Journal of Dental Research, 99(7), 769–774. <https://doi.org/10.1177/0022034520915714>
- Secinaro, S., et al. (2021)**. *The role of artificial intelligence in healthcare: A structured literature review*. BMC Medical Informatics and Decision Making, 21(1), 125. <https://doi.org/10.1186/s12911-021-01488-9>
- Sifat, F. A., et al. (2024)**. *An Application of 3D Vision Transformers and Explainable AI in Prosthetic Dentistry*. Applied AI Letters, 5(4), e101. <https://doi.org/10.1002/ail2.101>
- Ueki, K., Wakamatsu, H., & Hagiwara, Y. (2020)**. *Evaluation of dental prosthesis colors using a neural network*. In *Proceedings of the 2020 IEEE 5th International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP)* (pp. 113–118). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSIP49896.2020.9339381>
- Wang, J., et al. (2024)**. *Recent Advances in Digital Technology in Implant Dentistry*. Journal of Dental Research, 103(8), 787–799. <https://doi.org/10.1177/00220345241253794>
- Williamson, S. M., & Prybutok, V. (2024)**. *Balancing privacy and progress: A review of privacy challenges, systemic oversight, and patient perceptions in AI-driven healthcare*. Applied Sciences, 14(2), 675. <https://doi.org/10.3390/app14020675>

Yadalam, P. K., et al. (2022). *Machine Learning Predicts Patient Tangible Outcomes After Dental Implant Surgery.* IEEE Access, 10, 131481–131488. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3228793>

Yang, S., et al. (2022). *Autonomous Robotic Surgery for Immediately Loaded Implant-Supported Maxillary Full-Arch Prosthesis: A Case Report.* Journal of Clinical Medicine, 11(21), 6594. <https://doi.org/10.3390/jcm11216594>