

INSTITUTO UNIVERSITÁRIO EGAS MONIZ

MESTRADO INTEGRADO EM MEDICINA DENTÁRIA

AVANÇOS DA TECNOLOGIA DIGITAL NA PRÁTICA DA MEDICINA DENTÁRIA: UMA ANÁLISE ATUALIZADA

Trabalho submetido por

Enguerrand Fausto Joseph CANTAYRE

para a obtenção do grau de Mestre em Medicina Dentária

janeiro de 2025

INSTITUTO UNIVERSITÁRIO EGAS MONIZ

MESTRADO INTEGRADO EM MEDICINA DENTÁRIA

AVANÇOS DA TECNOLOGIA DIGITAL NA PRÁTICA DA MEDICINA DENTÁRIA: UMA ANÁLISE ATUALIZADA

Trabalho submetido por

Enguerrand Fausto Joseph CANTAYRE

para a obtenção do grau de Mestre em Medicina Dentária

Trabalho orientado por

Prof. Doutor João Dias

DEDICATÓRIA

Pour toi, grand-mère,

Gillette.

*« Le vrai tombeau des morts, c'est le cœur
des vivants. » Jean Cocteau*

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer em primeiro lugar ao meu orientador, Professor Doutor João Dias, pelo seu apoio, disponibilidade e pedagogia que permitiu a realização desta tese de mestrado.

Gostaria de agradecer também aos professores e cada pessoa que trabalha para o Instituto Universitário Egas Moniz, que acompanharam o meu percurso e permitiram o meu crescimento enquanto médico dentista, tanto na vertente académica como na vertente pessoal, ao transmitirem valores de altruísmo, compaixão, generosidade.

Un immense merci à ma famille, que se soit à mes parents Papa et Maman qui sans vous, rien n'aurait pu être possible. À mes frères Tancrede et Sixte qui m'avez toujours soutenu.

À toute ma famille, cousins, papi, mamine et grand-pilou, vous qui avez fait en sorte que je ne manque de rien, et qui ont toujours cru en moi, merci.

À mes frères de Bagnères, Big Bleusaille dans mes veines, je l'ai fait les gars.

Para ti, Sofia. graças a ti, Portugal tornou-se muito mais do que apenas um país, tornou-se verdadeiramente um lar. O teu amor, o teu apoio e a tua luz tornaram esta aventura possível, e sem ti, nada disto teria o mesmo sentido.

À Costa, pampa, ao Portugal, aos portugueses e às portuguesas, o meu mais profundo agradecimento por me terem acolhido de braços abertos e enriquecido a minha vida com a vossa cultura, hospitalidade e generosidade.

Bioxo, Npz, la vie est destinée aux bons amis et aux grandes aventures. Quels moments passés, Khail le plus vieux de mes frères, gros coquin, tu es une source de savoir et de vie,

Gustavo en mode barrel shaka brother,

Yugo 22 le rigolo, 1m92 de pur bonheur, jeammichmich merci,

Bibos le boss, mon frère, mon ami, mon réveil, partenaire particulier, surfbro, matta, dylann, lost, dhd, chiliconcarne, porc au caramel, t'es un tueur restes tel que tu es,

Koko, mon parceiro, binôme, mon frère, tu seras le meilleur d'entre nous tous, ne changes rien des principes et des valeurs que tu incarnes, continues à sourire et faire sourire,

Tom, pas d'inspi. Merci budbud pour le toit.

A todos, obrigado por estes anos que passámos juntos.

RESUMO

As tecnologias digitais tornaram-se indissociáveis da prática clínica na Medicina Dentária, refletindo a sua crescente integração no quotidiano da sociedade e nos procedimentos médicos. Inicialmente limitadas pelo elevado custo, tornaram-se progressivamente mais acessíveis, permitindo a sua aplicação em diversos contextos clínicos e revolucionando tanto o diagnóstico como o tratamento. A crescente utilização destas ferramentas reflete a sua capacidade de otimizar processos, melhorar a precisão e garantir resultados mais previsíveis.

A tecnologia CAD/CAM é uma das mais marcantes neste cenário, possibilitando a digitalização precisa das arcadas dentárias, a criação de modelos virtuais e o fabrico de próteses fixas altamente ajustadas, dispensando a necessidade de modelos físicos. Paralelamente, os *scanners* intraorais destacam-se pela sua elevada precisão, simplificando o planeamento protético e garantindo maior eficiência nos procedimentos restauradores.

Além destas ferramentas, outras tecnologias têm expandido as possibilidades clínicas. A impressão 3D tem revolucionado a personalização de dispositivos protéticos, permitindo a produção rápida e precisa de guias cirúrgicas, próteses e modelos de estudo. Sistemas de imagiologia avançada, como a Tomografia Computorizada de Feixe Cónico (CBCT), têm proporcionado diagnósticos mais detalhados e fundamentados, essenciais em tratamentos complexos. *Softwares* de planeamento digital contribuem ainda para abordagens mais integradas e interdisciplinares, especialmente na reabilitação oral.

Esta tese apresenta uma análise abrangente e atualizada sobre os impactos destas tecnologias na prática clínica da Medicina Dentária. Tem por objetivo explorar os contributos das ferramentas digitais, desde a simplificação de procedimentos básicos até ao suporte em intervenções complexas. Pretende também demonstrar como estas inovações têm impulsionado a eficiência clínica e melhorado os resultados terapêuticos, consolidando a tecnologia digital como um pilar essencial na evolução da Medicina Dentária moderna.

Palavras-chave: Reabilitação Oral; Tecnologia Digital ; CAD/CAM; Inteligência Artificial

ABSTRACT

Digital technologies have become inseparable from clinical practice in Dentistry, reflecting their growing integration into the daily life of society and medical procedures. Initially limited by high costs, these technologies have progressively become more accessible, enabling their application across various clinical contexts and revolutionising both diagnosis and treatment. Their increasing use highlights their ability to optimise processes, enhance precision, and ensure more predictable outcomes.

Among these advancements, CAD/CAM technology stands out as particularly transformative, enabling precise digital scanning of dental arches, the creation of virtual models, and the production of highly customised fixed prostheses without the need for physical models. In parallel, intraoral scanners play a pivotal role by offering high accuracy, simplifying prosthetic planning, and ensuring greater efficiency in restorative procedures.

Beyond these tools, other technologies have further expanded clinical possibilities. Three-dimensional printing has revolutionised the personalisation of prosthetic devices, facilitating the rapid and precise production of surgical guides, prostheses, and study models. Advanced imaging systems, such as Cone Beam Computed Tomography (CBCT), have enabled more detailed and informed diagnoses, which are essential for complex treatments. Additionally, digital planning software has supported more integrated and interdisciplinary approaches, particularly in oral rehabilitation.

This thesis provides a comprehensive and updated analysis of the impact of digital technologies on clinical practice in Dentistry. Its aim is to explore the contributions of these tools, from simplifying basic procedures to supporting complex interventions. It also seeks to demonstrate how these innovations have enhanced clinical efficiency and improved therapeutic outcomes, establishing digital technology as a cornerstone in the advancement of modern Dentistry.

Keywords: Oral Rehabilitation; Digital Technology; CAD/CAM ; Intelligence Artificial

ÍNDICE GERAL

I. INTRODUÇÃO.....	9
1.1 Contextualização.....	9
1.2 Objetivos da Pesquisa.....	10
II. DESENVOLVIMENTO	13
2.1 Tecnologias na Prática de Medicina Dentária	13
2.1.1. Evolução das Tecnologias em Medicina Dentária	13
2.1.2. Impacto das Novas Tecnologias na Medicina Dentária	15
2.1.3. Benefícios para Pacientes e Profissionais	16
2.2 Tecnologia CAD/CAM (Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing)	17
2.2.1 Desenvolvimento e Evolução do CAD/CAM	17
2.2.1.1. Perspetiva histórica	17
2.2.1.2. Estado Atual	17
2.2.2 Vantagens e Desvantagens do CAD/CAM	20
2.3 Inteligência Artificial e Aprendizagem Automática	23
2.3.1 Desenvolvimento e Evolução da IA.....	23
2.3.2 Aplicações em Medicina Dentária	28
2.4 Outras tecnologias dentárias	30
2.4.1 Impressão 3D.....	30
2.4.2 Imagiologia Digital.....	32
2.4.2.1 Radiologia digital.....	32
2.4.2.2 A tomografia computadorizada de feixe cónico (CBCT).....	33
2.4.2.4 Sistema Intraoral	34
2.4.4 Ortodontia Digital	35
2.4.5 Tecnologias robóticas.....	38

2.5	Desenvolvimento das Novas Tecnologias na Medicina Dentária	43
2.5.1	Pesquisa e Desenvolvimento em Tecnologias Dentárias	43
2.5.2	Parcerias e Colaborações Tecnológicas	44
2.5.3	Perspetivas Futuras.....	44
III.	CONCLUSÃO.....	47
IV.	BIBLIOGRAFIA.....	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vários <i>scanners</i> utilizados neste estudo: (a) Trios 3, (b) Trios 4, (c) iTero Element, (d) iTero 2, (e) iTero 5D Element, (f) dental Wings, (g) Panda, (h) Medit i500, (i) Planmeca Emerald Tm, and (j) Aoralscan. Amornvit et al.,2021.....	18
Figura 2 - Várias medições nos eixos X, Y and Z. Amornvit et al. 2021.	19
Figura 3 - Fluxo de trabalho digital em medicina dentaria reabilitadora com projeto assistido por computador e fabrico assistido por computador (CAD/CAM). Adaptado de Yeslam et al., 2024.....	22
Figura 4 - Conceito de inteligência artificial. Adaptado de Banerjee et al., 2024.	23
Figura 5 - A combinação de modelos humanos e de inteligência artificial pode criar uma tomada de decisão assistida por IA extremamente poderosa. Adaptado de Hulsen, 2023.	26
Figura 6 - IA hoje e amanhã com XAI. Adaptado de Chamola. Et al.. 2023.	27
Figura 7 - Segmentação baseada em inteligência artificial das estruturas esqueléticas maxilofaciais (mandíbula e esqueleto facial), dentes e canal mandibular. Shujaat et al., 2021.	28
Figura 8 - Diferentes goteiras ortodônticas de um tratamento. Imagem cedida pelo Laboratório Ezaligner.....	36
Figura 9 – Máquina de impressão 3D Anycubic. Imagem cedida pelo Laboratório Ezaligner.	37
Figura 10 - Máquina de termoformagem. Imagem cedida pelo Laboratório Ezaligner.....	37
Figura 11 - Sistema robótico Yomi preparado para procedimento cirúrgico, incluindo o sistema operacional do computador, o braço robótico e o braço de rastreamento. Isufi et al. 2024.....	40
Figura 12 - Visão geral do sistema cirúrgico autónomo para cirurgia oral e maxilofacial. Liu et al., 2023.	41

LISTA DE ABREVIATURAS

CAD/CAM = Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing

CCD = Charge Coupled Device

CMOS = Complementary Metal-Oxide-Semiconductor

CEREC = Chairside Economical Restoration of Esthetic Ceramics

FDA = Food and Drug Administration

GDPR = General Data Protection Regulation

IA = Inteligência Artificial

IBM = International Business Machine Corporation

LIME = Local Interpretable Model-agnostic Explanations

SHAP = SHapley Additive exPlanations

TRIOS = Time Reduction In Operative Solutions

XAI = Explainable Artificial Intelligence

3D = 3 Dimensional

I. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

Nos últimos anos, a medicina dentária tem experienciado uma transformação profunda devido ao desenvolvimento exponencial das tecnologias digitais, que revolucionaram a forma como os cuidados dentários são prestados. Estas inovações aumentaram não apenas a precisão dos procedimentos clínicos, mas também elevaram a qualidade dos tratamentos e promoveram uma experiência significativamente mais satisfatória e personalizada para os pacientes. Ferramentas avançadas, como os sistemas CAD/CAM (projeto e fabrico assistidos por computador), integrados à inteligência artificial (IA), têm desempenhado um papel essencial na simplificação e personalização dos processos restaurativos, permitindo resultados mais eficientes e previsíveis (Yeslam et al., 2024).

A integração das tecnologias digitais na prática clínica representa uma verdadeira mudança de paradigma, redefinindo os métodos de diagnóstico, planeamento e execução dos tratamentos dentários. Estas inovações têm proporcionado melhorias substanciais na precisão diagnóstica, na eficiência terapêutica e na personalização dos cuidados. A inteligência artificial, em particular, tem demonstrado uma capacidade extraordinária de analisar imagens radiográficas, superando em muitos casos as limitações do olho humano. Esta tecnologia tem sido fundamental na deteção precoce de cáries dentárias e de outras patologias orais, permitindo uma abordagem mais preventiva e proativa no tratamento (Negi et al., 2024; Zhang et al., 2020).

Entre as tecnologias mais disruptivas na área encontra-se a impressão tridimensional (3D), que revolucionou a produção de dispositivos dentários personalizados, como coroas, guias cirúrgicas e alinhadores ortodônticos. Baseada em modelos digitais altamente precisos, esta tecnologia tem reduzido significativamente os tempos de tratamento, aumentado o conforto do paciente e minimizado os erros associados aos métodos tradicionais. Além disso, a impressão 3D tem-se revelado particularmente útil no planeamento cirúrgico, permitindo a criação de protótipos que facilitam intervenções mais seguras e eficazes (Alaoffey et al., 2024).

No campo da inteligência artificial, os avanços em algoritmos de aprendizagem profunda têm permitido processar grandes quantidades de dados clínicos e identificar padrões complexos em radiografias dentárias. Esta tecnologia não só apoia o diagnóstico e o

planeamento do tratamento, como também prevê a eficácia de diferentes abordagens terapêuticas, promovendo uma personalização sem precedentes dos cuidados prestados. Este nível de sofisticação contribui para a otimização dos resultados clínicos e para uma maior longevidade das soluções terapêuticas propostas (Yeslam et al., 2024; Zhang et al., 2020).

A digitalização da medicina dentária tem também facilitado a colaboração interdisciplinar, possibilitando a partilha de informações detalhadas, como modelos 3D e imagens radiográficas, entre diferentes especialistas. Este fluxo de dados em tempo real melhora a comunicação entre profissionais, promovendo uma abordagem integrada e multidisciplinar nos cuidados de saúde oral (Alaoffey et al., 2024).

Em conclusão, os avanços tecnológicos nas últimas décadas têm transformado profundamente a prática da medicina dentária, desde o diagnóstico até à execução dos tratamentos. Estas inovações não apenas contribuem para resultados clínicos mais eficazes e previsíveis, como também redefinem a interação entre o profissional e o paciente, promovendo soluções mais personalizadas e de alta qualidade. Com a contínua evolução da inteligência artificial e da impressão 3D, espera-se que a medicina dentária permaneça na vanguarda da inovação tecnológica, oferecendo soluções cada vez mais eficazes e adaptadas às necessidades individuais dos pacientes (Yeslam et al., 2024; Negi et al., 2024; Alaoffey et al., 2024).

1.2. Objetivos da Pesquisa

O objetivo desta tese é analisar de forma abrangente o impacto das tecnologias digitais na prática clínica da Medicina Dentária, destacando o seu papel transformador na precisão, eficácia e personalização dos cuidados. Pretende-se explorar de que forma ferramentas como CAD/CAM, impressão 3D, inteligência artificial (IA) e softwares de previsão têm contribuído para avanços significativos nesta área (Yeslam et al., 2024).

A tecnologia CAD/CAM será examinada pelo seu impacto na conceção e fabrico de dispositivos dentários, permitindo uma maior precisão e eliminando a necessidade de modelos físicos. Paralelamente, será analisada a impressão 3D, que possibilita a criação rápida e personalizada de dispositivos como guias cirúrgicas, próteses e modelos ortodônticos. Esta inovação não apenas reduz os prazos de tratamento, mas também melhora a previsibilidade e o conforto para os pacientes (Alqahtani et al., 2024).

A tese também se debruçará sobre os *softwares* de previsão utilizados em ortodontia, que permitem planeamentos mais detalhados e eficientes, otimizando os resultados do alinhamento dentário e reduzindo os tempos de tratamento. Além disso, será explorado o papel da IA no diagnóstico e na personalização de planos terapêuticos, bem como a sua capacidade de prever resultados com elevada precisão (Zhang et al., 2020).

Por fim, pretende-se avaliar os benefícios e desafios associados à implementação destas tecnologias, destacando como estas ferramentas estão a redefinir a prática clínica e a melhorar significativamente a experiência dos profissionais e dos pacientes, consolidando a Medicina Dentária como uma área de vanguarda na era digital (Alqahtani et al., 2024).

II. DESENVOLVIMENTO

2.1 Tecnologias na Prática de Medicina Dentária

2.1.1. Evolução das Tecnologias em Medicina Dentária

A história da medicina dentária é marcada por uma série de inovações introduzidas por visionários que desempenharam um papel fundamental na transformação desta área. Estas figuras pioneiras não apenas revolucionaram as práticas clínicas, mas também estabeleceram os alicerces que sustentam a medicina dentária contemporânea (Haidar ZS, 2023).

Entre os mais notáveis está *Pierre Fauchard* (1678-1761), amplamente reconhecido como o "pai da medicina dentária moderna". Este cirurgião-dentista francês introduziu mudanças revolucionárias que marcaram o início de uma abordagem científica à prática dentária. Antes do seu trabalho, os cuidados dentários eram frequentemente realizados por barbeiros ou indivíduos sem formação formal, muitas vezes considerados “charlatões”. Fauchard rompeu com esta tradição, baseando a sua prática em rigorosas observações clínicas. A sua obra, *Le Chirurgien Dentiste*, publicada em 1728, é considerada o primeiro tratado completo de medicina dentária. Nesta obra, descreveu técnicas pioneiras, como o uso de instrumentos específicos para a remoção de cáries e a criação de próteses dentárias com bases de marfim, um avanço significativo para a época. Além disso, Fauchard introduziu conceitos fundamentais em ortodontia, como a utilização de fios para alinhar os dentes, estabelecendo as bases para a ortodontia moderna (Haidar ZS, 2023).

Horace Wells (1815-1848) um dentista americano, é um dos pioneiros da anestesia. Antes da sua inovação, os procedimentos dentários eram extremamente dolorosos, o que aterrorizava muitos pacientes. Em 1844, Wells experimentou o uso do protóxido de azoto, vulgarmente conhecido como gás hilariante, como anestésico. Demonstrou a eficácia desta técnica ao realizar uma extração dentária sem dor, abrindo caminho para a anestesia moderna. Infelizmente, a sua descoberta não foi imediatamente reconhecida, e Wells lutou para que a sua inovação fosse aceite pela comunidade médica (Haidar ZS, 2023).

Charles Goodyear (1800-1860) embora não fosse dentista, foi um inventor americano que teve um impacto significativo na medicina dentária ao descobrir o processo de vulcanização da borracha. Em 1839, Goodyear desenvolveu este processo, que permite endurecer a borracha, mantendo uma certa flexibilidade. Este material foi rapidamente adotado na medicina dentária para a confecção de bases de próteses dentárias, substituindo materiais mais pesados e menos confortáveis, como o metal. Esta inovação tornou as próteses

mais acessíveis e confortáveis para os pacientes, permitindo aos dentistas oferecer soluções protéticas de melhor qualidade (Haidar ZS, 2023).

Alfred Einhorn (1856-1917) químico alemão, é conhecido por ter sintetizado a novocaína (procaína) em 1905, um anestésico local que transformou as práticas médicas e dentárias. Antes da invenção da novocaína, a cocaína era usada como anestésico, mas era altamente viciante e tinha efeitos colaterais perigosos. A novocaína foi rapidamente adotada na medicina dentária, permitindo que os profissionais realizassem intervenções mais complexas sem dor para o paciente. Esta descoberta teve um impacto imenso na forma como os cuidados dentários eram prestados, tornando os tratamentos mais acessíveis e toleráveis (Haidar ZS, 2023).

Per-Ingvar Brånemark (1929-2014) um cirurgião ortopédico sueco, é considerado o "pai da implantologia moderna". Nos anos 1950, durante pesquisas sobre microcirculação, descobriu acidentalmente que o titânio podia unir-se biologicamente com o osso, fenômeno a que chamou osteointegração. Esta descoberta revolucionou a cirurgia dentária, permitindo o desenvolvimento de implantes dentários de titânio, uma solução duradoura e eficaz para substituir dentes em falta. *Brånemark* passou décadas a aperfeiçoar esta técnica, que hoje é amplamente utilizada em reabilitações dentárias a nível mundial (Haidar ZS, 2023; Kezian, 2020).

Frans Van Hassel, embora menos conhecido, desempenhou um papel crucial na modernização da medicina dentária graças ao seu trabalho nas tecnologias CAD/CAM nos anos 1980. Estas tecnologias, que permitem a conceção assistida por computador e a conceção assistida por computador, revolucionaram a criação de restaurações dentárias, como coroas, pontes e próteses. Com o CAD/CAM, as restaurações podem ser concebidas com extrema precisão e fabricadas rapidamente, reduzindo o tempo de tratamento e melhorando a qualidade dos cuidados (Kezian, 2020).

Estas figuras relevantes, cada uma à sua maneira, contribuíram decisivamente para que a medicina dentária se tornasse a disciplina moderna e avançada que é hoje. Graças às suas descobertas e inovações, a medicina dentária tornou-se uma especialidade mais precisa, eficaz e acessível, marcando uma era em que os cuidados dentários são não só mais confortáveis para os pacientes, mas também mais seguros e personalizados (Haidar ZS, 2023; Kezian, 2020).

2.1.2. Impacto das Novas Tecnologias na Medicina Dentária

Os avanços tecnológicos têm transformado profundamente diversos setores, incluindo a medicina dentária. A integração de tecnologias digitais e inovadoras tem impulsionado melhorias significativas, tanto no desempenho clínico como na experiência dos pacientes. Os estudos realizados por Almoharib et al. (2020) e Zimmermann e Seitz (2023) oferecem uma análise detalhada sobre estas transformações.

As ferramentas digitais, como o desenho e a conceção assistidos por computador (CAD/CAM), os *scanners* intraorais e a imagiologia digital, tornaram-se elementos centrais da prática dentária moderna. Almoharib et al. (2020) destacam que estas tecnologias permitem alcançar maior precisão e eficiência, reduzindo os erros associados aos métodos tradicionais. Por exemplo, os *scanners* intraorais substituem as impressões físicas por modelos digitais em tempo real, tornando o processo mais rápido e confortável para os pacientes.

Os avanços na imagiologia, como a tomografia computadorizada por feixe cónico (CBCT), transformaram a forma como os diagnósticos são realizados. Zimmermann e Seitz (2023) sublinham que esta tecnologia proporciona uma visualização tridimensional detalhada das estruturas dentárias e maxilofaciais, facilitando um planeamento mais rigoroso dos tratamentos, particularmente em implantologia e cirurgia oral, reduzindo simultaneamente o risco de erros clínicos.

A impressão 3D também desempenha um papel crucial na medicina dentária contemporânea. Segundo Kong et al. (2022) esta tecnologia é utilizada na criação de próteses, modelos dentários e guias cirúrgicas personalizadas, oferecendo um elevado nível de precisão. Além disso, a impressão 3D é rápida e económica, tornando os cuidados dentários mais acessíveis e adaptados às necessidades específicas de cada paciente.

A inteligência artificial (IA) tem um impacto crescente na medicina dentária, automatizando tarefas complexas. Como aponta Schwendicke et al. (2020) a IA é utilizada na análise de radiografias, identificação de patologias e previsão de resultados terapêuticos. Estas aplicações não só melhoram a precisão diagnóstica, como também permitem aos profissionais concentrarem-se em aspetos mais complexos dos tratamentos.

Para além dos benefícios clínicos, as tecnologias digitais também melhoram significativamente a experiência global do paciente. Almoharib et al. (2020) salientam que a digitalização reduz os tempos de espera e facilita a comunicação entre o dentista e o paciente,

permitindo, por exemplo, a visualização de simulações de resultados de tratamentos através de softwares de planejamento implantar antes de qualquer intervenção.

2.1.3. Benefícios para Pacientes e Profissionais

As tecnologias modernas na medicina dentária trazem inúmeros benefícios tanto para os pacientes quanto para os profissionais. Para os pacientes, a melhoria do conforto é um dos principais benefícios. Por exemplo, os *scanners* intraorais capturam imagens digitais dos dentes e dos tecidos bucais com grande precisão, eliminando frequentemente a necessidade de moldagens tradicionais desconfortáveis. Estes *scanners* também permitem uma comunicação mais fluida com os laboratórios, acelerando a produção de próteses dentárias personalizadas e reduzindo o número de consultas necessárias (Serrano-Velasco et al., 2024).

A impressão 3D permite, por sua vez, a confecção de coroas, próteses e outras restaurações perfeitamente ajustadas às características específicas de cada paciente. Proporciona maior rapidez e eficiência, tornando o processo mais agradável para os pacientes e melhorando os resultados estéticos e funcionais (Oberoi et al., 2018). Além disso, a planificação de intervenções complexas, como os implantes dentários, torna-se mais precisa graças aos modelos 3D (guias cirúrgicas) o que diminui os riscos de erro (Schweiger et al., 2016).

Do lado dos profissionais, os *scanners* intraorais e as tecnologias de inteligência artificial (IA) contribuem para a otimização dos procedimentos, automatizando certas tarefas, como a análise de imagens e a concepção de próteses, permitindo assim que os dentistas se concentrem em aspetos mais complexos dos cuidados. A IA também melhora a precisão dos diagnósticos, particularmente na análise de radiografias dentárias, reduzindo os erros humanos e permitindo uma intervenção mais rápida (Semerci e Yardımcı, 2024).

Estas inovações tecnológicas não só melhoram a experiência dos pacientes, aumentando o conforto e a rapidez dos tratamentos, como também permitem que os profissionais ganhem em eficiência, ao mesmo tempo que aumentam a precisão e a qualidade dos cuidados prestados.

2.2 Tecnologia CAD/CAM (*Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing*)

2.2.1 Desenvolvimento e Evolução do CAD/CAM

2.2.1.1 Perspetiva histórica

A tecnologia CAD/CAM foi introduzida no campo da medicina dentária na década de 1980, com sistemas como o CEREC® (*Chairside Economical Restoration of Esthetic Ceramics*). Desenvolvido originalmente por Dr. Werner Mörmann e Dr. Marco Brandestini na Universidade de Zurique, o CEREC® permitiu pela primeira vez a confecção de restaurações dentárias em cerâmica diretamente no consultório dentária que marcaram um ponto de viragem ao permitir a criação de restaurações numa única consulta (Hamzah et al., 2021), (Roperto et al., 2018).

Desde então, a tecnologia evoluiu consideravelmente. Os primeiros sistemas estavam focados principalmente na fresagem de blocos de cerâmica, enquanto os sistemas modernos integram *scanners* intraorais, softwares avançados de conceção e tecnologias inovadoras de fabrico, como a impressão 3D, trazendo novas possibilidades para os fluxos de trabalho digitais na medicina dentária (Suganna et al., 2022).

Essas evoluções não só aumentaram a precisão e rapidez dos tratamentos, como também abriram portas para o futuro da integração de modalidades de imagem nos fluxos digitais, melhorando significativamente os resultados clínicos e a experiência dos pacientes (Shujaat et al., 2021).

2.2.2.2 Estado Atual

Os avanços tecnológicos na medicina dentária, particularmente com a integração do *scanner* intraoral TRIOS® (*Time Reduction In Operative Solutions*) e dos sistemas CAD/CAM, transformaram profundamente as práticas clínicas, melhorando tanto a eficácia dos tratamentos como a qualidade dos cuidados. O TRIOS5, com a sua capacidade de capturar dados dentários com elevada precisão, simplifica a conceção e a produção de próteses dentárias, tornando os tratamentos mais rápidos e confortáveis para os pacientes (Fieldhouse, 2021).

Um estudo conduzido por Amornvit et al. (2021) examinou diversas tecnologias CAD/CAM utilizando um modelo maxilar produzido através de impressão 3D. A pesquisa avaliou dez *scanners* intraorais, como os modelos Trios 3 e 4 (3Shape) e iTero Element, com o intuito de investigar a precisão e a confiabilidade desses equipamentos (Fig. 1).

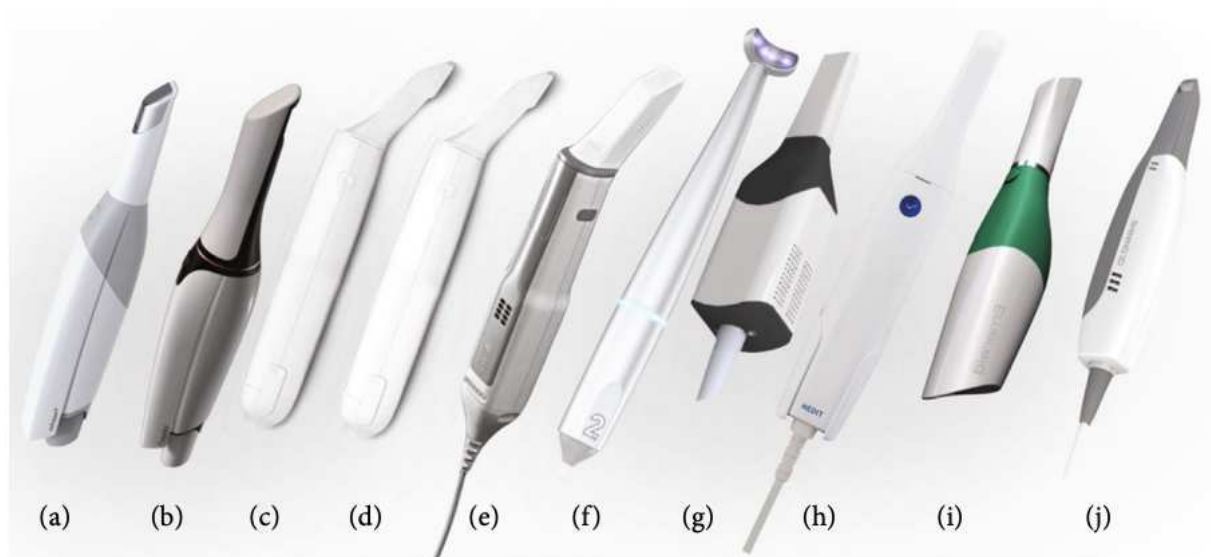


Figura 1 - Vários scanners utilizados neste estudo: (a) Trios 3, (b) Trios 4, (c) iTero Element, (d) iTero 2, (e) iTero 5D Element, (f) dental Wings, (g) Panda, (h) Medit i500, (i) Planmeca Emerald Tm, and (j) Aoralscan. Amornvit et al., 2021.

A precisão diz respeito ao grau de diferença entre os resultados gerados pelos *scanners* e o modelo de referência. Este parâmetro avalia a capacidade dos dispositivos de reproduzirem com exatidão as dimensões e formas do modelo dentário (Amornvit et al. 2021).

A confiabilidade relaciona-se à uniformidade dos resultados obtidos quando o mesmo *scanner* realiza repetidamente o mesmo processo, assegurando a consistência dos dados (Amornvit et al. 2021).

Os *scanners* intraorais marcam um avanço relevante na prática dentária, pois combinam rapidez, conforto e alta precisão. O estudo destacou o desempenho superior dos modelos TRIOS, embora tenha identificado possíveis limitações relacionadas a fatores externos, como a humidade e o nível de experiência do operador. Além disso, o trabalho enfatizou a necessidade de adotar boas práticas para reduzir erros e promover o uso mais amplo das tecnologias digitais na medicina dentária contemporânea (Amornvit et al. 2021)(Fig. 2).

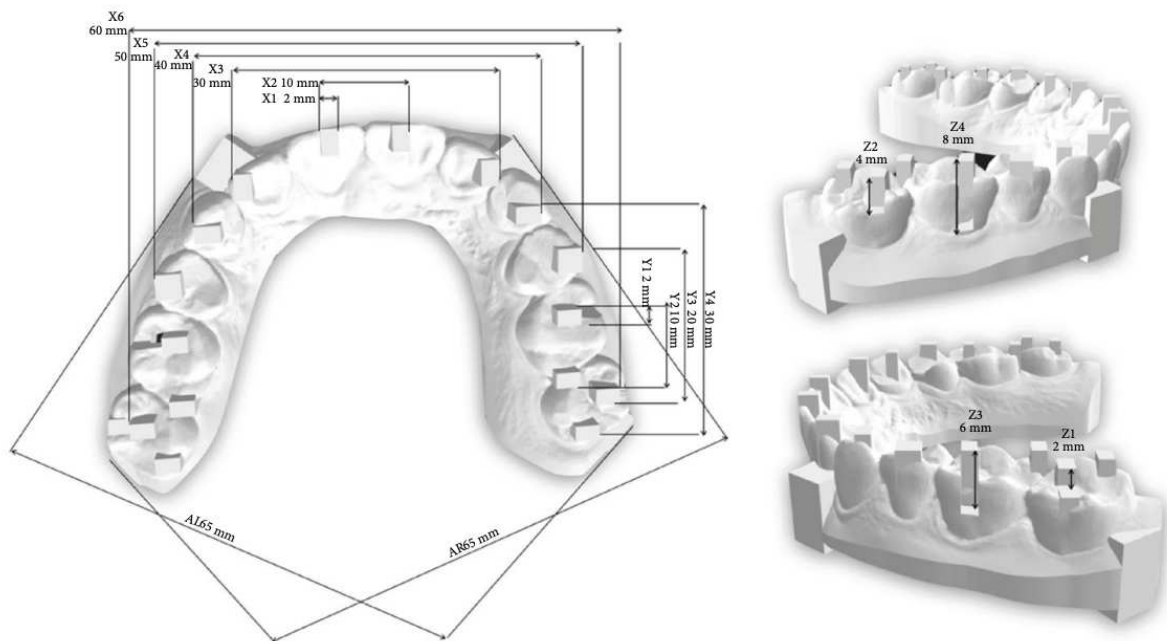


Figura 2 - *Várias medições nos eixos X, Y and Z. Amornvit et al. 2021.*

Além disso, os sistemas CAD/CAM, que integram processos de concepção e fabrico assistidos por computador, permitem criar restaurações personalizadas com uma precisão excecional, reduzindo os erros humanos comuns nas técnicas tradicionais (Duffaut, 2018). Um estudo recente demonstrou que *scanners* intraorais são particularmente eficazes na redução do tempo de tratamento e na melhoria do conforto dos pacientes, em comparação com as técnicas convencionais de impressão (De Razza et al., 2024).

Os *softwares* CAD/CAM mais recentes também possibilitam uma personalização mais detalhada das restaurações dentárias, incluindo funcionalidades avançadas como o planeamento virtual de implantes e a simulação dos resultados clínicos. Além disso, a integração da inteligência artificial nestes sistemas melhora significativamente a precisão dos diagnósticos e a concepção dos tratamentos (Siqueira et al., 2024).

A confecção aditiva, está se tornando cada vez mais relevante na prática dentária, com aplicações que incluem a produção de guias cirúrgicos, próteses personalizadas e modelos anatómicos precisos. De acordo com Javaid e Haleem (2019), esta tecnologia apresenta vantagens significativas, como maior flexibilidade no design, redução de custos em comparação com métodos tradicionais e a capacidade de criar geometrias complexas com alta precisão. Os autores também destacam que a impressão 3D tem transformado o processo de personalização no campo da medicina dentária, permitindo que tratamentos sejam adaptados

de forma mais eficaz às necessidades individuais de cada paciente. No entanto, é sublinhado que alguns desafios como a padronização dos processos, a biocompatibilidade dos materiais e a validação em cenários clínicos reais ainda precisam ser enfrentados. Apesar disso, a confecção aditiva continua a abrir novas possibilidades em medicina dentária, complementando e, em alguns casos, substituindo métodos convencionais.

Por outro lado, a confecção subtrativa, como apontado em estudos anteriores, já é uma tecnologia amplamente consolidada e oferece maior controle dimensional e precisão nos ajustes clínicos das restaurações. A fresagem subtrativa remove material de um bloco sólido, garantindo resultados altamente consistentes e previsíveis, especialmente para coroas e pontes, além de ser mais rápida em certos casos (Bae et al., 2017).

Enquanto a técnica subtrativa é conhecida pela sua confiabilidade e ampla validação clínica, a aditiva ainda enfrenta desafios relacionados à biocompatibilidade dos materiais e à padronização dos processos. No entanto, a aditiva é mais eficiente no uso de material e pode superar a subtrativa em aplicações que exigem personalização extrema e *design* complexo. Assim, ambas as técnicas desempenham papéis complementares: a subtrativa para restaurações precisas e rápidas e a aditiva para inovações personalizadas e *designs* mais elaborados. (Bae et al., 2017 ; Javaid & Haleem, 2019)

2.2.2 Vantagens e Desvantagens do CAD/CAM

A tecnologia CAD/CAM trouxe uma série de vantagens significativas para a medicina dentária, tornando-se uma ferramenta indispensável no tratamento restaurador e protético. Uma das principais vantagens é a elevada precisão no fabrico de próteses e restaurações. O uso de *scanners* intraorais permite capturar imagens digitais detalhadas da cavidade oral, criando uma impressão altamente precisa que pode ser utilizada para confeccionar próteses personalizadas. Isso elimina a subjetividade do processo manual de moldagem, garantindo um ajuste superior (Maiti et al., 2023).

Além disso, o CAD/CAM proporciona uma economia de tempo considerável tanto para os profissionais quanto para os pacientes. Em muitos casos, restaurações que antigamente exigiam várias consultas podem agora ser concluídas numa única visita ao consultório, utilizando sistemas CAD/CAM *chairside* (Maiti et al., 2023). Esta vantagem

resulta numa maior eficiência clínica e numa experiência mais conveniente para os pacientes, reduzindo o desconforto associado a múltiplas consultas e procedimentos longos.

Outro ponto relevante é a variedade de materiais disponíveis para o uso com a técnica CAD/CAM, permitindo a seleção de materiais mais adequados para cada situação clínica. O dissilicato de lítio, frequentemente utilizado em restaurações CAD/CAM, oferece uma combinação excepcional de resistência e estética, sendo ideal para áreas de alta carga mastigatória. De Abreu et al. (2024) corroboram esta visão, ressaltando que as restaurações em dissilicato de lítio, assim como as de zircónia, apresentam uma adaptação marginal excelente quando produzidas pela técnica CAD/CAM, como demonstrado em suas análises *in vitro* com microscópio comparador. A capacidade de personalizar as restaurações também é uma vantagem importante, permitindo uma adaptação perfeita às características individuais do paciente.

Os *scanners* intraorais utilizados em sistemas CAD/CAM oferecem uma vantagem importante no que se refere à manutenção da assepsia. Diferentemente das técnicas tradicionais de moldagem, que envolvem o uso de materiais físicos e podem gerar riscos de contaminação cruzada, os *scanners* digitais garantem maior segurança ao captar diretamente as estruturas bucais de forma virtual, sem a necessidade de contato prolongado com materiais externos. Esses dispositivos também proporcionam uma coleta de dados mais ágil e precisa, com imagens geradas em tempo real, minimizando possíveis erros associados à manipulação manual ou à deformação de moldes. Além de simplificar o trabalho do profissional, essa tecnologia melhora significativamente a experiência do paciente, eliminando o desconforto causado pelos métodos convencionais de moldagem (Barenghi et al., 2019; Maiti et al., 2023).

A longevidade das restaurações CAD/CAM também é notável. Steinmassl et al. (2018) demonstram que as próteses e restaurações produzidas com esta tecnologia apresentam um ajuste melhorado e, conseqüentemente, uma maior durabilidade em comparação com as fabricadas por métodos convencionais. Este ajuste mais preciso contribui para a redução de falhas de adaptação e diminui a necessidade de ajustes pós-tratamento.

Embora a técnica de confecção aditiva, como a impressão 3D, ainda esteja em desenvolvimento, as tecnologias subtrativas, como a fresagem CAD/CAM, já demonstraram ser altamente eficazes em termos de qualidade e consistência dos resultados clínicos.

Estudos comparativos entre os processos de fabrico subtrativo e aditivo indicam que o primeiro proporciona um controlo mais rigoroso sobre a precisão dimensional e o ajuste clínico das restaurações, o que tem sido amplamente validado na prática dentária (Earar et al., 2020). A fresagem subtrativa permite um controle mais rigoroso dos parâmetros de fabrico, o que contribui para a previsibilidade dos resultados e o sucesso dos tratamentos (Fig. 3).



Figura 3 - Fluxo de trabalho digital em medicina dentária reabilitadora com projeto assistido por computador e fabrico assistido por computador (CAD/CAM). (Adaptado de Yeslam et al., 2024.)

O investimento inicial em sistemas CAD/CAM pode constituir um obstáculo significativo para algumas práticas de medicina dentária, devido aos elevados custos envolvidos, não só na aquisição dos equipamentos e softwares, mas também na sua manutenção e nas atualizações indispensáveis para o seu funcionamento adequado (Earar et al., 2020). Além disso, a utilização destes sistemas exige uma formação especializada para os dentistas e respetivas equipas, uma vez que a curva de aprendizagem pode ser extensa, especialmente face às constantes inovações tecnológicas. Para acompanhar estas evoluções e novas funcionalidades que aprimoram essas tecnologias, é frequentemente necessária uma formação contínua (Wendler et al., 2017). Por fim, a dependência da tecnologia introduz riscos adicionais, como falhas de *hardware* ou software, que podem interromper os tratamentos e implicar reparações dispendiosas, afetando o planeamento clínico (Al-Jawoosh et al., 2018).

2.3 Inteligência Artificial e Aprendizagem Automática

2.3.1 Desenvolvimento e Evolução da IA

A inteligência artificial tem raízes antigas, com representações mitológicas de dispositivos automatizados na Grécia Antiga, mas tornou-se uma realidade concreta graças aos avanços tecnológicos do século XX. A transformação significativa da IA começou com os trabalhos pioneiros de Alan Turing, seguidos pela invenção dos primeiros computadores programáveis. Com o tempo, a IA passou a integrar várias áreas científicas, como a informática, a matemática e as ciências cognitivas, refletindo o desejo humano de simular e, eventualmente, superar as capacidades intelectuais humanas (Banerjee et al., 2024).

Durante o seu desenvolvimento, a IA enfrentou períodos de estagnação, conhecidos como "Invernos da IA", em que as expectativas em torno da tecnologia superaram os resultados alcançados. No entanto, marcos importantes, como a vitória do *Deep Blue* da IBM (*International Business Machines Corporation*) contra Garry Kasparov em 1997 e a criação de sistemas sofisticados como o Google Duplex, demonstraram o enorme potencial da IA, especialmente em tarefas que exigem grandes capacidades analíticas (Rastogi et al., 2024).

Atualmente, os principais avanços da IA baseiam-se em dois pilares fundamentais: a aprendizagem automática (*machine learning*) e a aprendizagem profunda (*deep learning*) (Fig. 4).

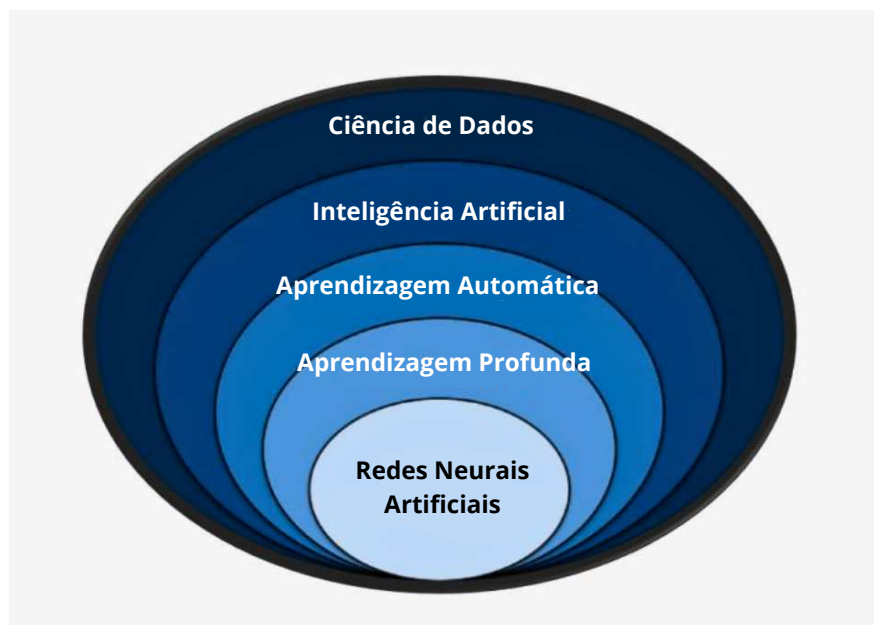


Figura 4 - Conceito de inteligência artificial. (Adaptado de Banerjee et al., 2024.)

Estas tecnologias permitem que as máquinas processem e analisem grandes quantidades de dados, gerando modelos preditivos e de apoio à tomada de decisão. Com esses sistemas, a IA consegue realizar tarefas anteriormente reservadas aos humanos, como o reconhecimento facial ou a compreensão da linguagem natural (Nagarajappa et al., 2024). A IA não se limita a imitar os processos cognitivos humanos, mas procura aprimorá-los, abrindo novas perspectivas em diversas áreas, incluindo a saúde e, mais especificamente, a medicina dentária.

A IA baseia-se no processamento de vastos conjuntos de dados, que constituem a base indispensável para o seu funcionamento. Tal como o cérebro humano aprende a partir do tratamento de informações e experiências diversificadas, a IA utiliza dados variados, como imagens, textos e ficheiros áudio, para realizar tarefas de forma autónoma. Bonny et al. (2023) explicam que esses dados permitem à IA identificar padrões complexos e melhorar a precisão das análises.

O processo de aprendizagem da IA é orientado por algoritmos, que são conjuntos de regras que estruturam as etapas de análise e execução. Esses algoritmos processam os dados para identificar regularidades ou estruturas comuns. Segundo Vodanović et al. (2023), existem várias abordagens para treinar uma IA: a aprendizagem supervisionada, em que a máquina é treinada com dados rotulados (como imagens classificadas como "gato" ou "não gato"); a aprendizagem não supervisionada, onde a IA explora os dados para identificar padrões sem intervenção externa; e a aprendizagem por reforço, que utiliza um mecanismo de recompensa e penalização para orientar as decisões da máquina. Thurzo et al. (2022) destacam que esses métodos permitem à IA adaptar-se a diferentes contextos e melhorar continuamente o seu desempenho.

Uma vez treinada, a IA desenvolve um modelo que lhe permite processar novas informações e realizar tarefas específicas. Esses modelos podem ser aplicados em vários domínios, como o reconhecimento de imagens, assistentes virtuais capazes de executar comandos de voz ou ferramentas de tradução automática, como o Google Tradutor. Na medicina dentária, por exemplo, um modelo treinado com milhares de radiografias consegue identificar anomalias dentárias ou lesões de cáries com elevada precisão (Vodanović et al., 2023).

Uma das principais características da IA é a sua capacidade de melhoria contínua. À medida que processa dados adicionais, os seus modelos tornam-se mais eficientes, precisos e adaptados a novas situações. Bonny et al. (2023) salientam que esta capacidade de evolução permanente permite à IA ampliar as suas aplicações práticas e otimizar os processos existentes. Isso é particularmente visível na medicina dentária, onde a IA contribui para afinar os diagnósticos, personalizar os tratamentos e reduzir os erros humanos.

Assim, embora a inteligência artificial se inspire no modo de aprendizagem humano, exige volumes de dados muito mais elevados e uma estruturação rigorosa dos algoritmos. Graças ao seu processo de melhoria contínua e aos seus modelos avançados, a IA tornou-se uma ferramenta indispensável em diversos setores, incluindo a medicina dentária. Thurzo et al. (2022) destacam as perspetivas promissoras que ela oferece na medicina dentária, onde melhora a qualidade dos cuidados e a eficácia dos tratamentos, ao mesmo tempo que responde às necessidades individuais dos pacientes.

A explicabilidade na Inteligência Artificial, conhecida como *Explainable Artificial Intelligence* (XAI), tem como objetivo tornar os modelos de IA mais transparentes e compreensíveis para os usuários. Esta abordagem é particularmente relevante em áreas críticas, como saúde, justiça e segurança, onde decisões baseadas em IA podem ter consequências significativas. Os modelos de IA frequentemente utilizam arquiteturas complexas, como redes neurais profundas, que são percebidas como "caixas pretas". Embora ofereçam alta precisão, a falta de transparência desses sistemas reduz a confiança de especialistas e usuários. Hulsen (2023) destaca a importância de evoluir para sistemas mais transparentes, especialmente em aplicações médicas, como a análise de imagens para detecção de tumores ou o processamento de relatórios clínicos. Além disso, a explicabilidade é fundamental para atender a requisitos regulatórios, como o *General Data Protection Regulation* (GDPR), que exige maior clareza no uso de algoritmos que manipulam dados pessoais sensíveis.

Existem diferentes abordagens para implementar a XAI, incluindo modelos intrinsecamente claros, como árvores de decisão, ou técnicas de explicação *pós-hoc*, que adicionam interpretações a sistemas mais complexos. Métodos como *Local Interpretable Model-agnostic Explanations* (LIME) e *SHapley Additive exPlanations* (SHAP) são amplamente usados para identificar como características específicas influenciam as previsões de um modelo (Chamola et al. 2023).

Os métodos *pós-hoc* são estratégias desenvolvidas para interpretar as previsões de um modelo da aprendizagem de máquina após ele ter sido treinado. Diferentemente de modelos intrinsecamente claros, como as árvores de decisão, esses métodos são aplicados a modelos mais sofisticados e complexos, como redes neurais, adicionando uma camada de interpretação sem alterar sua estrutura ou funcionamento. Eles podem ser utilizados para analisar o comportamento geral do modelo (métodos globais) ou para compreender previsões específicas (métodos locais). Por exemplo, o LIME® cria um modelo simplificado em torno de um exemplo específico para identificar quais características tiveram maior influência, enquanto o SHAP® usa princípios da teoria dos jogos para calcular a contribuição justa de cada característica em uma previsão. Embora estas abordagens tornem os modelos complexos mais compreensíveis, elas evidenciam o dilema entre a transparência e o desempenho, já que modelos mais precisos geralmente são menos explicáveis (Hulsen 2023).

Entretanto, conforme discutido por Chamola et al. (2023), há um desafio constante de equilibrar explicabilidade e desempenho. Modelos mais transparentes tendem a sacrificar parte de sua precisão, criando um dilema entre *confiabilidade* e *eficiência*.

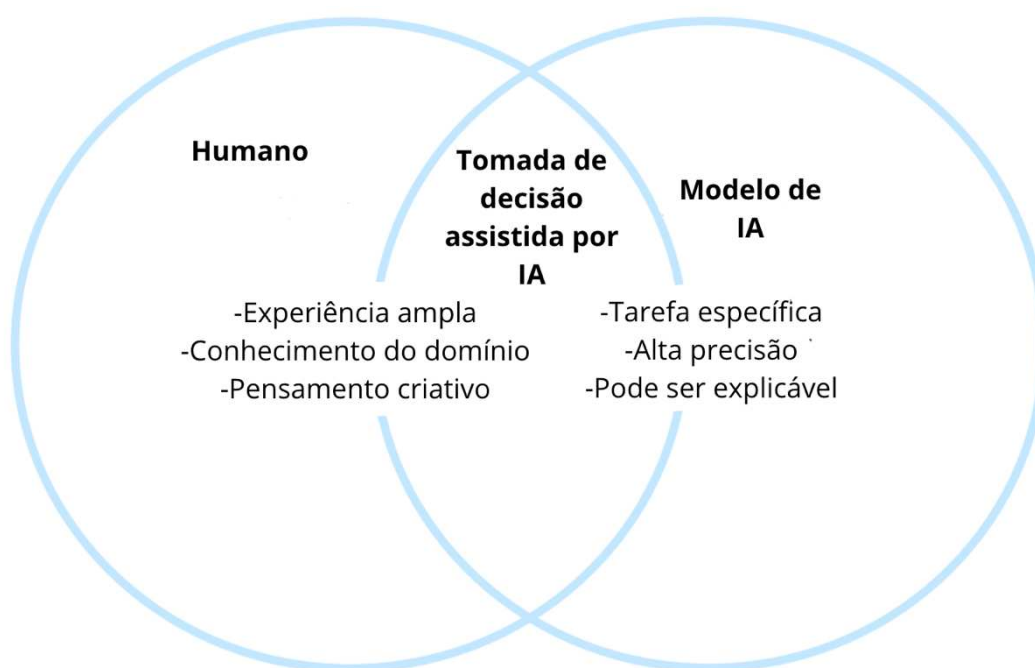


Figura 5 - A combinação de modelos humanos e de inteligência artificial pode criar uma tomada de decisão assistida por IA extremamente poderosa. (Adaptado de Hulsen, 2023.)

No setor da saúde, a XAI desempenha um papel crucial ao permitir que profissionais compreendam os fundamentos das previsões algorítmicas, facilitando a interação entre

humanos e máquinas (Fig. 5). Hulsen (2023) argumenta que esta interação melhora a aceitação dos sistemas de IA pelos profissionais e contribui para sua utilização eficaz em cenários críticos.

A explicabilidade em IA é, portanto, mais do que uma questão técnica; trata-se de um elemento ético essencial para sua adoção responsável (Fig. 6). Ao oferecer maior transparência e cumprir exigências legais, a XAI reforça a confiança dos usuários e promove uma implementação mais ética e eficiente da tecnologia. Contudo, ainda é necessário enfrentar desafios técnicos e éticos para que a XAI alcance plenamente; seu potencial em diferentes setores (Chamola et al. 2023).

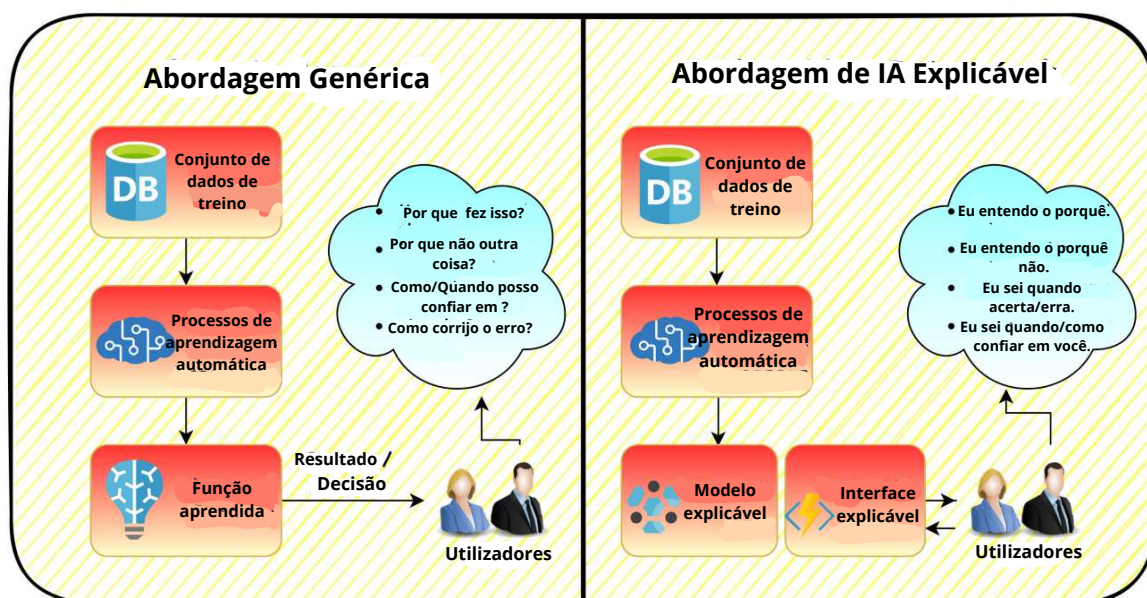


Figura 6 - IA hoje e amanhã com XAI. (Adaptado de Chamola. et al.. 2023.)

Neste contexto, a utilização da inteligência artificial em processos de segmentação digital tem demonstrado uma grande relevância no campo da Medicina Dentária. Os processos de segmentação digital na Medicina Dentária consistem em isolar e identificar dentes, ossos e outras estruturas em imagens médicas, como radiografias e tomografias. Podem ser realizados de forma manual, semiautomática ou automática. Com o avanço da inteligência artificial, especialmente por meio de redes neurais convulsionais, tornou-se possível segmentar estas estruturas com alta precisão e eficiência, mesmo em imagens com ruídos ou artefatos. Estas técnicas são fundamentais para a criação de modelos

tridimensionais, o planejamento de tratamentos e a otimização dos fluxos de trabalho digitais (Chamola et al. 2023).

Nos últimos anos, surgiram várias redes baseadas em IA projetadas para corrigir erros comuns na segmentação e, simultaneamente, tornar os fluxos de trabalho digitais mais eficientes. Estas redes, ancoradas no machine-learning e deep-learning, têm sido aplicadas com sucesso na segmentação de dentes e estruturas esqueléticas, demonstrando elevada precisão mesmo na presença de interferências ou artefactos (Shujaat et al., 2021).

2.3.2 Aplicações em Medicina Dentária

Segundo Shujaat et al. (2021), estruturas dentomaxilofaciais segmentadas por uma plataforma *online* baseada em nuvem e redes neurais 3D, destacam o avanço da IA na prática clínica, com benefícios para o diagnóstico e o planeamento dentário (Fig. 7).

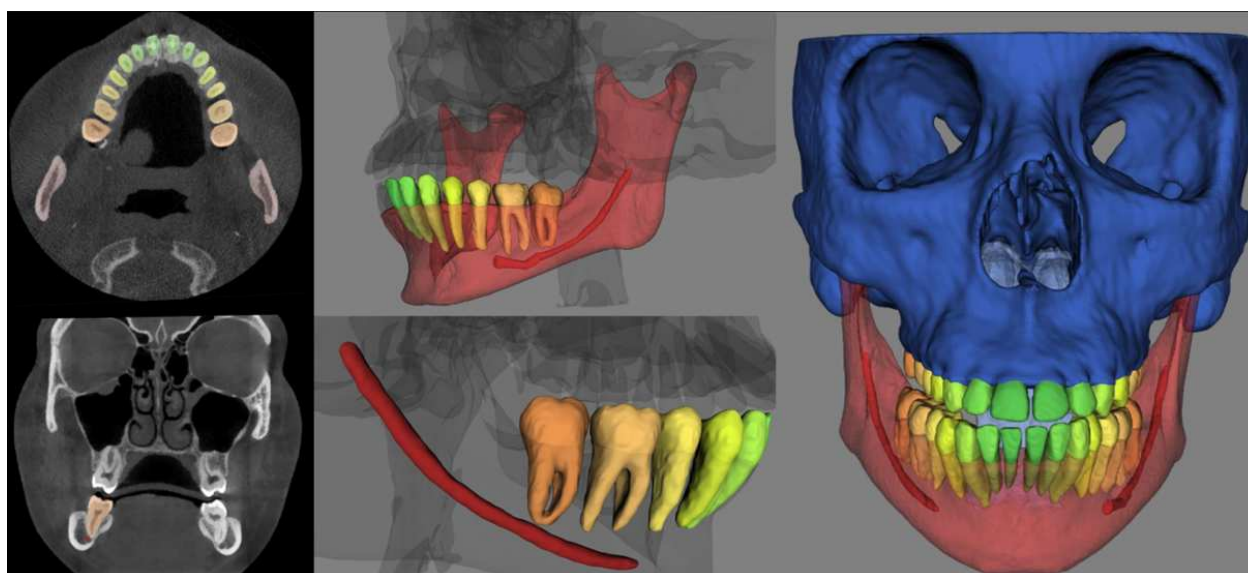


Figura 7 - Segmentação baseada em inteligência artificial das estruturas esqueléticas maxilofaciais (mandíbula e esqueleto facial), dentes e canal mandibular. (Shujaat et al., 2021.)

Na área da medicina dentária, a introdução da IA tem transformado significativamente as práticas clínicas, sobretudo no que diz respeito ao diagnóstico, planeamento de tratamentos e gestão dos pacientes. A IA revela-se um aliado fundamental na análise de imagens radiográficas uniformizar para (Fig. 7), uma área onde a precisão é essencial para a deteção precoce de patologias dentárias. Programas como o Allisone®, baseados em algoritmos de aprendizagem profunda, conseguem analisar radiografias panorâmicas com um grau de precisão que muitas vezes supera o exame visual humano, sendo particularmente eficazes na

identificação de lesões cariosas interproximais, difíceis de detetar (Banerjee et al., 2024). Conforme afirmado por Chakravorty et al. (2023), a IA também melhora a capacidade de diagnóstico global, ao aumentar a velocidade e a precisão das análises radiográficas, minimizando assim o risco de erros humanos. Na implantologia, ferramentas como o SpotIMPLANT® permitem uma identificação extremamente precisa dos implantes dentários a partir de simples radiografias retroalveolares. Este sistema apoia-se numa vasta base de dados e em algoritmos de *deep learning* que comparam as imagens a milhares de modelos de implantes, inclusive aqueles que já não estão no mercado. Esta abordagem facilita a resolução de problemas complexos de identificação e gestão de implantes, otimizando o processo de tomada de decisão clínica (L et al., 2024). Como afirmam Xie et al. (2024), a utilização de IA na implantologia não só aumenta a precisão dos tratamentos como também reduz as complicações associadas, facilitando a tomada de decisões mais informadas.

No campo da ortodontia, as inovações trazidas pela IA também são notórias. O sistema Invisalign®, por exemplo, utiliza tecnologias de modelação digital e preditiva para planear os movimentos dentários. Este *software* permite ao profissional visualizar os resultados esperados desde o início do tratamento, possibilitando ajustes em cada etapa de acordo com a evolução clínica. A IA não substitui o médico dentista, mas oferece um suporte tecnológico que otimiza a eficiência e a precisão dos tratamentos ortodônticos (Rastogi et al., 2024). Dhopte e Bagde (2023) destacam que estas inovações tecnológicas, ao tornarem os tratamentos mais personalizados e preditivos, contribuem para melhorar a experiência do paciente, reduzindo também o tempo de intervenção.

Além disso, a IA está a ser amplamente utilizada na gestão quotidiana dos gabinetes dentários. Sistemas como o DentalXrai Pro® facilitam a análise automatizada de radiografias, identificando não só restaurações e lesões apicais, mas também doenças periodontais, gerando ainda relatórios diagnósticos detalhados. Estas tecnologias não só permitem poupar tempo nos processos diagnósticos como também melhoram a comunicação entre o clínico e o paciente, oferecendo explicações visuais mais claras e acessíveis (Martins et al., 2024).

A inteligência artificial apresenta, assim, um imenso potencial para a medicina dentária moderna. Ao otimizar a precisão dos diagnósticos, facilitar a gestão dos cuidados e melhorar a comunicação com os pacientes, a IA integra-se perfeitamente no modelo da "dentisteria 4P": precisa, preventiva, personalizada e participativa. Contudo, a IA não deve ser

vista como um substituto da *expertise humana*, mas sim como um complemento que enriquece as capacidades do profissional. À medida que estas tecnologias continuam a evoluir, espera-se que transformem profundamente a prática clínica diária, contribuindo para uma melhor qualidade dos cuidados dentários e promovendo uma interação mais dinâmica entre o paciente e o seu médico dentista (Banerjee et al., 2024; L et al., 2024; Rastogi et al., 2024; Chakravorty et al., 2023; Xie et al., 2024; Dhopte & Bagde, 2023).

2.4 Outras tecnologias dentárias

2.4.1 Impressão 3D

A impressão 3D, também conhecida como manufatura aditiva, tornou-se uma tecnologia crucial na dentisteria, permitindo a criação de objetos tridimensionais camada por camada. Esta técnica é amplamente utilizada na confecção de coroas, pontes, alinhadores ortodônticos e modelos diagnósticos, e foi viabilizada pela evolução das resinas dentárias e dos *scanners* digitais, proporcionando maior precisão na conversão de modelos digitais em objetos físicos (Alageel, 2022). As técnicas e os materiais utilizados têm sido aprimorados ao longo do tempo, buscando melhorar a exatidão, durabilidade e funcionalidade dos dispositivos produzidos (Lee, 2024).

As aplicações clínicas de impressão 3D são variadas e vão desde a confecção de próteses e restaurações a impressão 3D permite a produção rápida e precisa de próteses dentárias, coroas e pontes, com materiais biocompatíveis que asseguram tanto a funcionalidade quanto a estética (Lee, 2024). A ortodontia com alinhadores transparentes personalizados são fabricados a partir de impressões digitais, permitindo um ajuste preciso para os tratamentos ortodônticos (Alageel, 2022). O planejamento cirúrgico com a impressão 3D possibilita a criação de modelos anatômicos para o planejamento de intervenções cirúrgicas, melhorando assim a precisão e a segurança dos procedimentos (Sfondrini et al., 2022).

A impressão 3D na medicina dentária oferece uma vantagem significativa no que diz respeito à precisão e personalização. Dispositivos como coroas e próteses são projetados a partir de modelos digitais extremamente precisos, obtidos por meio de *scanners* intraorais. Isso permite que os profissionais criem restaurações sob medida que se ajustam perfeitamente à anatomia oral de cada paciente, resultando numa melhoria na qualidade dos cuidados e no conforto dos pacientes, além de reduzir os tempos de produção. Como consequência, os

tratamentos tornam-se mais rápidos e frequentemente mais eficazes (Sfondrini et al., 2022). Além disso, esta tecnologia contribui para a redução do desperdício de materiais, o que pode gerar benefícios económicos a longo prazo (Liu et al., 2024).

A utilização da impressão 3D, em conjunto com *scanners* intraorais, trouxe melhorias significativas em termos de assepsia nos consultórios dentários. Diferente das técnicas tradicionais, que dependem de materiais de moldagem como alginato ou silicone, muitas vezes difíceis de higienizar e com risco de contaminações cruzadas, os *scanners* capturam impressões digitais de forma direta e sem necessidade de contacto prolongado com materiais físicos. Estas impressões digitais são posteriormente utilizadas para criar modelos ou dispositivos através da impressão 3D, eliminando assim os riscos associados ao armazenamento e manuseamento de moldes físicos contaminados. Este avanço contribui para elevar os padrões de higiene e segurança tanto para os profissionais como para os pacientes (Lee, 2024; Liu et al., 2024).

A impressão 3D também tem um impacto positivo na organização dos consultórios dentários, permitindo uma utilização mais eficiente do espaço através do uso de modelos digitais. As moldagens tradicionais, frequentemente realizadas em gesso ou alginato, necessitam de armazenamento físico que pode ocupar bastante espaço nos consultórios. Com os *scanners* intraorais, estas impressões são convertidas em ficheiros digitais, que podem ser armazenados em bases de dados, tornando-os facilmente acessíveis e organizados. Esta mudança para um formato digital reduz o volume de materiais físicos armazenados, otimiza a gestão dos registos dos pacientes e oferece uma solução mais prática, moderna e sustentável para os consultórios (Liu et al., 2024).

No entanto, apesar das suas vantagens, a impressão 3D em medicina dentária apresenta algumas limitações importantes. Um dos principais desafios reside na limitação dos materiais atualmente disponíveis. Embora tenha havido progressos, alguns materiais utilizados na impressão 3D ainda carecem da durabilidade e resistência necessárias para restaurações de longo prazo, quando comparados com métodos tradicionais. Atualmente, os materiais disponíveis incluem resinas fotopolimerizáveis, amplamente utilizadas para a produção de coroas provisórias, guias cirúrgicos e modelos dentários, que oferecem alta precisão, mas possuem resistência limitada. Polímeros de elevado desempenho são usados em próteses e componentes de implantes devido à sua biocompatibilidade e resistência mecânica, mas o elevado custo restringe o seu uso. Cerâmicas 3D, conhecidas pela estabilidade e

estética, ainda enfrentam dificuldades tecnológicas que limitam a sua aplicação prática. Compósitos dentários, que combinam polímeros e partículas de reforço, e materiais metálicos, como crômio-cobalto e titânio para implantes, são opções disponíveis, embora muitas vezes exijam equipamentos especializados e caros. Por fim, os materiais biocompatíveis são úteis em dispositivos temporários ou protótipos, mas ainda carecem da resistência necessária para aplicações de longo prazo. Além disso, a própria tecnologia requer uma elevada competência técnica, e o processo de aprendizagem para operar os equipamentos e *softwares* pode ser complexo para alguns profissionais. A manutenção regular das impressoras e a calibração precisa são também fundamentais para garantir a qualidade dos dispositivos produzidos, o que pode representar um desafio em termos de tempo e custo para algumas clínicas (Alageel, 2022; Liu et al., 2024).

2.4.2 Imagiologia Digital

2.4.2.1 Radiologia digital

A radiologia digital transformou profundamente a prática da medicina dentária contemporânea ao proporcionar benefícios significativos em termos de qualidade de imagem, redução da exposição à radiação e eficiência diagnóstica. Ao substituir os filmes radiográficos tradicionais por sensores digitais, como os sensores CCD (Dispositivo de Carga Acoplada) e CMOS (Semicondutor de Óxido Metálico Complementar), tornou-se possível capturar instantaneamente imagens de alta resolução, facilitando a detecção precoce de patologias dentárias, como cáries iniciais (Chan et al., 2023).

Esses sistemas eliminam não apenas a necessidade de múltiplas películas radiográficas, mas também reduzem a exposição dos pacientes à radiação, o que é particularmente vantajoso para grupos vulneráveis, como crianças e mulheres grávidas. De acordo com Xu (2023), a diminuição da dose de radiação associada à radiologia digital representa uma vantagem substancial para a saúde dos pacientes, minimizando os riscos relacionados à exposição cumulativa a radiações ionizantes.

As imagens digitais oferecem uma resolução superior e maior contraste, o que facilita a detecção precisa de patologias dentárias, como cáries e fraturas. A capacidade de ajustar e processar as imagens após a sua aquisição permite otimizar ainda mais a qualidade do diagnóstico, uma flexibilidade que não está presente nos filmes radiográficos tradicionais

(Chan et al., 2023). Esta possibilidade de manipulação das imagens contribui para uma melhor planificação dos tratamentos e uma tomada de decisão clínica mais informada.

Além disso, a radiologia digital melhora a eficiência dos cuidados de saúde, uma vez que as imagens ficam imediatamente disponíveis após a sua captura. Estas podem ser facilmente armazenadas, partilhadas e consultadas por outros profissionais de saúde através de sistemas informáticos, promovendo assim uma colaboração interdisciplinar mais eficaz (Xu, 2023). Esta instantaneidade e acessibilidade dos dados radiográficos otimizam o fluxo de trabalho clínico e reforçam a coordenação dos cuidados.

Contudo, apesar destes benefícios, a adoção da radiologia digital enfrenta alguns desafios. O investimento inicial necessário para a aquisição de equipamentos, *software* e formação do pessoal pode ser elevado, constituindo um obstáculo para certas clínicas dentárias (Xu, 2023). Além disso, a dependência da tecnologia expõe os profissionais a potenciais problemas técnicos, como falhas de sensores ou mau funcionamento de *software*, o que pode exigir reparações dispendiosas ou manutenção especializada.

Assim, embora a implementação da radiologia digital exija um investimento inicial significativo, esta tecnologia melhora substancialmente a qualidade dos cuidados, reduzindo a exposição à radiação, aumentando a precisão diagnóstica e facilitando uma gestão mais eficiente dos dados e das imagens (Chan et al., 2023; Xu, 2023).

2.4.2.2 A tomografia computadorizada de feixe cónico (CBCT)

A tomografia computadorizada de feixe cónico (CBCT) é um método avançado de radiografia utilizado para obter imagens tridimensionais (3D) das estruturas dentárias e maxilofaciais. Ao contrário das radiografias 2D tradicionais, a CBCT permite uma visualização volumétrica das estruturas ósseas, facilitando o planeamento cirúrgico e o diagnóstico de anomalias. Esta tecnologia tornou-se indispensável na medicina dentária, especialmente nos casos de implantes dentários. Ao longo do tempo, a CBCT evoluiu, oferecendo melhor resolução de imagem, redução de artefactos e diminuição da exposição à radiação, garantindo assim resultados mais seguros para os pacientes (Jacobs et al., 2018; Misăiloaie et al., 2024).

Uma das principais vantagens da CBCT é a sua capacidade de proporcionar imagens 3D detalhadas, fundamentais para o planeamento de implantes e a gestão de casos complexos.

A tecnologia aumenta a precisão do diagnóstico, ao permitir uma visualização clara das relações anatómicas entre as estruturas dentárias e os tecidos circundantes, o que é essencial para evitar complicações cirúrgicas (Misailoiaie et al., 2024). Além disso, embora a CBCT exponha os pacientes a radiações, a dose de exposição é inferior à das tomografias convencionais, mantendo uma qualidade de imagem adequada para diagnósticos dentários (Jacobs et al., 2018).

No entanto, esta tecnologia apresenta também alguns desafios. O custo elevado dos equipamentos de CBCT, assim como a manutenção necessária, pode ser um obstáculo para pequenas clínicas dentárias. Além disso, a quantidade de dados gerada por estes exames exige uma infraestrutura informática robusta para o armazenamento e análise das imagens. É igualmente crucial que os profissionais de saúde recebam formação adequada no uso da CBCT, de modo a maximizar os benefícios e evitar erros de interpretação (Jacobs et al., 2018; Misailoiaie et al., 2024).

2.4.2.3 Sistemas de Imagem Intraoral

Esta evolução possibilitou o desenvolvimento de aplicações avançadas, especialmente na deteção de cáries e anomalias dentárias, oferecendo uma precisão elevada. As imagens digitais capturadas facilitam não só o diagnóstico precoce, mas também o planeamento dos tratamentos e a avaliação das restaurações dentárias (Lin et al., 2023). Estes dispositivos permitem igualmente um acompanhamento mais eficaz das doenças periodontais, melhorando a gestão dos tratamentos ao longo do tempo.

Um dos principais benefícios destes sistemas reside na sua capacidade de fornecer imagens claras e precisas, permitindo uma melhor visualização das estruturas dentárias e dos tecidos circundantes. Esta melhoria na qualidade das imagens tem um impacto direto no planeamento dos tratamentos e no diagnóstico. Além disso, os sistemas de imagiologia intraoral reduzem significativamente a exposição às radiações quando comparados com os métodos tradicionais, o que representa uma vantagem importante, especialmente para pacientes que requerem exposições frequentes, como os pacientes mais jovens (Angelone et al., 2023).

As imagens capturadas estão disponíveis de imediato, o que permite uma interação em tempo real com os pacientes e uma aceleração no processo de diagnóstico. Além disso, a

capacidade de armazenar e partilhar esses dados com outros profissionais de saúde melhora a eficácia do tratamento e a comunicação entre as equipas médicas (Lin et al., 2023).

Contudo, estes sistemas apresentam também algumas desvantagens. O investimento inicial necessário para a aquisição desta tecnologia é elevado, o que pode constituir um obstáculo para clínicas de menor dimensão. Além disso, a sua utilização exige formação especializada para evitar erros de diagnóstico decorrentes de uma má utilização do equipamento. Certos sensores podem ainda ser desconfortáveis para os pacientes durante utilizações prolongadas, sendo necessário um cuidado regular para manter a qualidade das imagens (Angelone et al., 2023).

2.4.3 Ortodontia Digital

A ortodontia digital representa uma revolução significativa no campo da medicina dentária, transformando os métodos de diagnóstico e tratamento através da integração de tecnologias digitais, como a imagiologia 3D, impressoras 3D e a inteligência artificial (IA). Estas inovações permitem uma maior personalização dos dispositivos ortodônticos, aumentando assim a eficácia dos tratamentos e reduzindo o tempo de tratamento clínico.

A digitalização das impressões dentárias, utilizando *scanners* intraorais e software de desenho assistido por computador (CAD), facilita a criação de modelos virtuais precisos, que servem para fabricar aparelhos feitos à medida, como alinhadores transparentes, *brackets* e contenções. Panayi et al. (2024) destacam que esta transformação digital não só otimiza a produção de aparelhos, mas também melhora o planeamento dos tratamentos e reduz o tempo passado em consulta. De facto, a ortodontia digital permite criar um "paciente virtual", integrando dados de *scanners* de superfície e de tomografias (CBCT), o que torna o diagnóstico e o planeamento mais precisos e completos.

Ramadan (2023) salienta o papel crucial das fotografias e dos modelos digitais na ortodontia moderna. Estes recursos permitem aos profissionais partilhar facilmente os dados com outros especialistas, facilitando uma abordagem interdisciplinar e proporcionando aos pacientes uma melhor compreensão dos tratamentos. Além disso, a imagiologia 3D alterou profundamente a forma como as análises cefalométricas são realizadas, com a introdução da IA para automatizar a identificação dos pontos de referência.

O processo inicia-se com a aquisição precisa das informações do paciente, utilizando *scanners* intraorais, radiografias volumétricas CBCT e fotografias faciais. Esses dados são convertidos em modelos tridimensionais que representam fielmente as estruturas dentárias e faciais. Como salientam Ronsivalle et al. (2023), esta etapa é crucial para garantir a fiabilidade das análises subsequentes.

Após a aquisição, os *softwares* baseiam-se em algoritmos avançados, para analisar os modelos 3D e identificar os ajustes ortodônticos necessários. Dipalma et al. (2023) explicam que esses sistemas conseguem detectar relações complexas entre os dentes, os ossos e os tecidos moles, simulando ainda as etapas do tratamento. O plano terapêutico é dividido em sequências progressivas, cada uma correspondendo a um alinhador que aplica forças precisas em áreas específicas (Fig. 8). Segundo Castroflorio et al. (2023), esta estratégia assegura uma progressão controlada e minimiza os ajustes imprevistos.



Figura 8 - Diferentes goteiras ortodônticas de um tratamento. Imagem cedida pelo Laboratório Ezaligner.

Uma vez validado o plano, os dados são processados por sistemas CAD-CAM para produzir os dispositivos. Esses ficheiros digitais servem para criar moldes precisos através da impressão 3D (Fig. 9), que são posteriormente termo formados (Fig. 10) para fabricar os

alinhadores. Ronsivalle et al. (2023) indicam que esta técnica permite obter dispositivos perfeitamente adaptados à dentição do paciente, aumentando o conforto e a eficácia.



Figura 9 - Máquina de impressão 3D Anycubic. Imagem cedida pelo Laboratório Ezaligner.



Figura 10 - Máquina de termoformagem. Imagem cedida pelo Laboratório Ezaligner.

O acompanhamento do tratamento é otimizado por sistemas de monitorização remota baseados em IA. Como relatado por Strunga et al. (2023), os pacientes podem enviar regularmente digitalizações da sua dentição através de aplicações móveis. Estas imagens são analisadas automaticamente para avaliar os progressos realizados e identificar eventuais desvios em relação ao plano inicial. Isso permite ao profissional intervir rapidamente sempre que necessário.

Estas ferramentas oferecem uma personalização em larga escala, maior precisão nos tratamentos e redução de consultas desnecessárias. Ao combinar tecnologias como IA, modelos 3D e monitorização digital, possibilitam otimizar os tratamentos e atender às necessidades específicas de cada paciente.

Assim, embora essas tecnologias sejam altamente eficientes, elas complementam a experiência do profissional. Esta colaboração entre ferramentas digitais e conhecimento clínico abre caminho para uma ortodontia mais moderna, precisa e personalizada (Thawri et al. 2023).

A ortodontia digital consolida-se como uma área em rápido crescimento, proporcionando soluções inovadoras que melhoram a precisão, a eficácia e a experiência dos pacientes, ao mesmo tempo que mantém o papel fundamental do ortodontista na gestão e otimização dos tratamentos (Panayi et al., 2024; Ramadan, 2023; Thawri et al., 2023).

2.4.4 Tecnologias robóticas

As tecnologias robóticas estão a transformar a prática da medicina dentária, proporcionando maior precisão, eficiência e personalização nos cuidados de saúde oral. Combinando sistemas mecânicos avançados, *softwares* de navegação e inteligência artificial (IA), estas ferramentas estão a redefinir os padrões da medicina dentária moderna. Desde a implantologia até à ortodontia e cirurgia oral, as aplicações dos robôs dentários estão a expandir-se rapidamente, abrindo caminho para uma prática mais sofisticada e acessível. Esta subsecção analisa os avanços tecnológicos, o funcionamento, os benefícios, os desafios e as perspetivas futuras dessas inovações (Ahmad et al., 2021).

Os robôs dentários têm uma ampla variedade de aplicações, com impacto significativo na precisão e eficiência dos procedimentos clínicos.

O sistema YOMI ® (Fig 11), desenvolvido nos Estados Unidos e aprovado pela *Food and Drug Administration* (FDA), é um exemplo notável da aplicação de robôs em medicina dentária. Este robô combina navegação assistida por computador e *feedback* háptico para guiar os dentistas na colocação de implantes dentários. Utilizando dados de tomografias computadorizadas de feixe cônico (CBCT), o YOMI ® planeia trajetórias precisas para o procedimento, evitando estruturas críticas como os seios maxilares e os nervos. Além disso, permite ajustes em tempo real durante a cirurgia, oferecendo uma flexibilidade impossível de alcançar com guias cirúrgicos tradicionais (Van Riet et al., 2021). Este tipo de robô reduz complicações, melhora os resultados clínicos e promove procedimentos menos invasivos, diminuindo a dor pós-operatória e acelerando a recuperação.

Robôs como o YOMI ® utilizam dados 3D gerados por tomografias CBCT para mapear com precisão a anatomia bucal do paciente. Estes modelos permitem planejar procedimentos cirúrgicos ou ortodônticos com um elevado grau de exatidão (Van Riet et al., 2021).

O braço robótico orienta os movimentos do dentista, fornecendo resistência tátil quando o profissional se desvia da trajetória ideal. Esta funcionalidade mantém a precisão sem comprometer o controle manual do praticante (Nassani et al., 2024).



Figura 11 - Sistema robótico Yomi preparado para procedimento cirúrgico, incluindo o sistema operacional do computador, o braço robótico e o braço de rastreamento. (Adaptado de Isufi et al. 2024.)

Na ortodontia, robôs como os integrados ao sistema SureSmile ® automatizam a modelagem de fios ortodônticos. Através de *scanners* intraorais, é gerado um modelo 3D da cavidade oral do paciente, permitindo que os robôs criem dispositivos ajustados às especificidades anatômicas. Este processo garante uma precisão milimétrica, reduz a duração do tratamento e aumenta a eficácia clínica (Ahmad et al., 2021). Além disso, os dispositivos personalizados melhoram o conforto e a experiência dos pacientes.

Os robôs também desempenham um papel essencial em cirurgias complexas, como reconstruções mandibulares e osteotomias. Graças à navegação em tempo real, conseguem realizar cortes precisos e controlados, reduzindo o risco de erros e otimizando o tempo cirúrgico. Estes avanços são cruciais para intervenções altamente exigentes em termos de precisão (Liu et al., 2023).

Para além das aplicações clínicas, simuladores robóticos, como o Hanako[®], são amplamente utilizados na formação de estudantes de medicina dentária. Estes sistemas recriam ambientes clínicos realistas, permitindo que os estudantes pratiquem procedimentos complexos, como extrações e tratamentos de canal. A tecnologia háptica simula a resistência dos tecidos dentários, oferecendo *feedback* imediato e ajudando os futuros dentistas a desenvolver competências práticas sem comprometer a segurança dos pacientes (Liu et al., 2023).

As tecnologias robóticas em medicina dentária combinam componentes mecânicos, sensores avançados e algoritmos de *software* para otimizar os procedimentos clínicos (Fig 12).

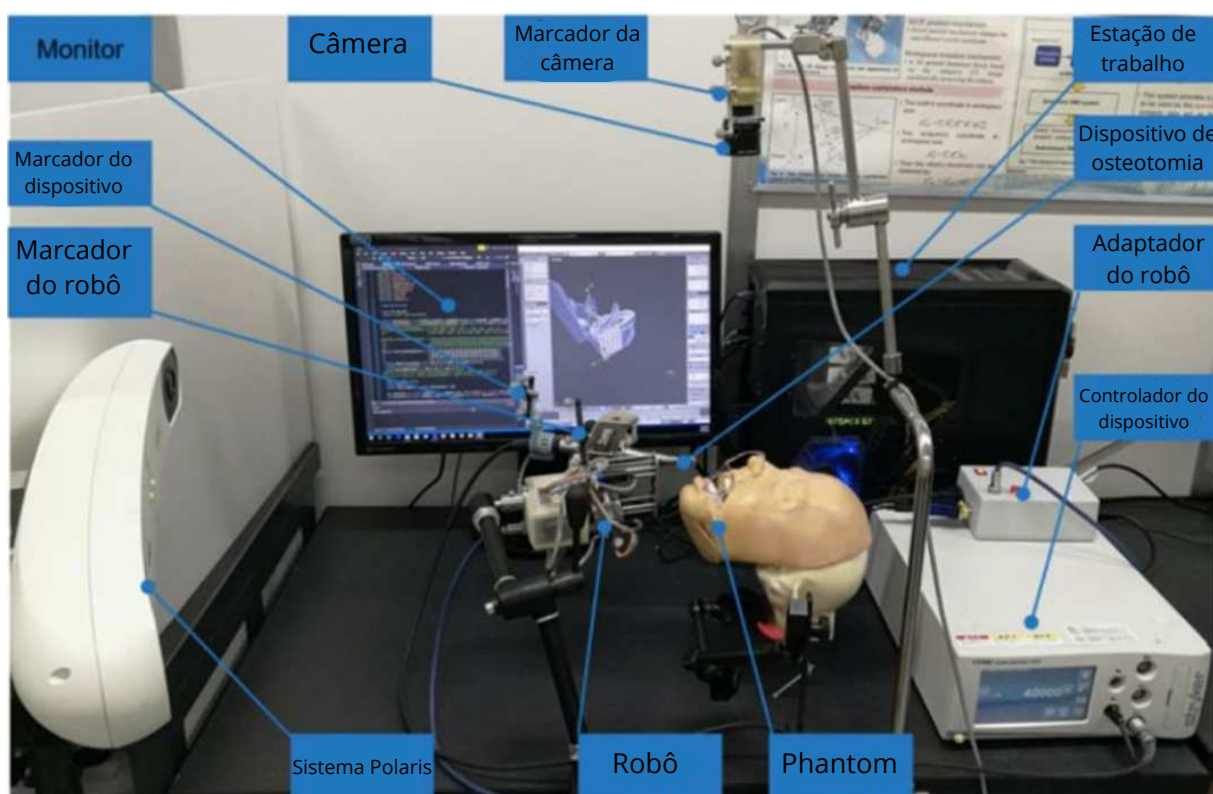


Figura 12 - Visão geral do sistema cirúrgico autónomo para cirurgia oral e maxilofacial. (Adaptado de Liu et al., 2023.)

Diferentemente dos dispositivos estáticos, os robôs dentários permitem ajustes em tempo real durante os procedimentos, adaptando-se a alterações anatómicas ou a movimentos inesperados dos pacientes (Ahmad et al., 2021).

As tecnologias robóticas oferecem benefícios consideráveis tanto para os profissionais como para os pacientes:

Maior precisão: Os sistemas robóticos eliminam erros relacionados ao tremor manual e garantem resultados consistentes (Ahmad et al., 2021).

Intervenções menos invasivas: Ao minimizar a quantidade de tecido removido, os robôs reduzem a dor pós-operatória e os tempos de recuperação (Van Riet et al., 2021).

Eficiência: Procedimentos assistidos por robôs são mais rápidos, permitindo que os dentistas tratem mais pacientes sem comprometer a qualidade dos cuidados (Liu et al., 2023).

Personalização: Os modelos digitais e a capacidade de ajustes em tempo real garantem que os tratamentos sejam adaptados às necessidades específicas de cada paciente (Ahmad et al., 2021).

Apesar dos avanços, os robôs dentários enfrentam desafios importantes:

O investimento inicial para adquirir sistemas como o YOMI ® é significativo, dificultando a adoção por clínicas menores (Nassani et al., 2024).

A utilização eficaz destas tecnologias exige formação técnica avançada, o que pode constituir uma barreira para muitos profissionais (Ahmad et al., 2021).

Estudos mostram que os pacientes têm receio de receber tratamentos realizados exclusivamente por robôs, principalmente para procedimentos invasivos. No entanto, tecnologias menos invasivas, como a análise de radiografias, são geralmente bem aceitas (Al-Dabbagh et al., 2024).

As perspectivas para as tecnologias robóticas em medicina dentária são promissoras. Avanços em bio-robótica e inteligência artificial prometem robôs mais autônomos e acessíveis. Microrrobôs, por exemplo, estão a ser desenvolvidos para navegar em canais radiculares e eliminar biofilmes, possibilitando tratamentos endodônticos mais eficientes e menos invasivos (Ahmad et al., 2021; Nassani et al., 2024).

Além disso, a combinação de robótica com realidade aumentada e telemedicina tem o potencial de transformar ainda mais a prática dentária, permitindo monitorização remota e tratamentos guiados (Nassani et al., 2024).

As tecnologias robóticas estão a redefinir os cuidados dentários, proporcionando avanços significativos na precisão, eficiência e personalização dos tratamentos. Apesar dos desafios técnicos, financeiros e éticos, o futuro da medicina dentária parece centrado na adoção destas ferramentas, oferecendo aos profissionais e pacientes uma nova era de excelência clínica (Nassani et al., 2024).

2.5 Desenvolvimento das Novas Tecnologias na Medicina Dentária

2.5.1 Pesquisa e Desenvolvimento em Tecnologias Dentárias

Nos últimos anos, a pesquisa e o desenvolvimento em tecnologias da medicina dentária têm avançado de forma expressiva, impactando a prática clínica por meio de inovações tecnológicas que abrangem inteligência artificial (IA), impressão 3D e laserterapia. A IA, por exemplo, tem sido amplamente adotada na medicina dentária para diagnóstico de doenças bucais e periodontais, assim como no planeamento de tratamentos personalizados. Ferramentas de IA permitem a análise precisa de imagens radiográficas, melhorando a detecção precoce de patologias e reduzindo a margem de erro durante o diagnóstico (Chakravorty et al., 2023; Xie et al., 2024). Esta tecnologia também tem facilitado o planeamento de tratamentos, com simulações que apoiam os dentistas em decisões complexas, permitindo intervenções mais seguras e personalizadas (Dhopte & Bagde, 2023).

Outro destaque no campo de prótese dentária é a impressão 3D, que está transformando a concepção de próteses e implantes dentários. Esta tecnologia possibilita a criação de modelos personalizados que atendem às especificidades de cada paciente, aumentando a eficiência e a precisão dos tratamentos restauradores e estéticos (Pedrinho et al., 2020). Além disso, a bioimpressão tem despontado como uma área emergente com o potencial de revolucionar a regeneração de tecidos, proporcionando uma abordagem personalizada e menos invasiva para a reconstrução bucal (Saar et al., 2023).

A laserterapia, por sua vez, tem sido amplamente utilizada em tratamentos dentários para acelerar a cicatrização e minimizar dores pós-operatórias, especialmente em casos de hipersensibilidade dentinária e lesões na mucosa oral. Sua aplicação tem contribuído para a recuperação mais rápida dos pacientes, tornando os tratamentos mais confortáveis (Pedrinho et al., 2020).

2.5.2 Parcerias e Colaborações Tecnológicas

As parcerias entre universidades, indústrias e centros de pesquisa têm desempenhado um papel fundamental no avanço das tecnologias dentárias. Essas colaborações promovem o intercâmbio de conhecimento e a aplicação prática de inovações tecnológicas em clínicas e consultórios. Um exemplo relevante é a parceria entre universidades e empresas de software, que permite a integração de inteligência artificial em diagnósticos e planejamentos de tratamentos, melhorando a precisão e a eficiência clínica (Saar et al., 2023).

Além disso, iniciativas globais de pesquisa, como bibliometrias que analisam o impacto de publicações científicas, têm sido essenciais para identificar as áreas de maior crescimento e inovação na medicina dentária (Saar et al., 2023).

Xie et al. (2024) realizaram uma análise abrangente que destacou o papel crescente da IA e a importância de sua integração com novas tecnologias para o aprimoramento do tratamento dentário.

Parcerias público-privadas também são essenciais para garantir o financiamento contínuo e o sucesso da implementação dessas novas tecnologias, acelerando sua adoção nas clínicas e aumentando o impacto positivo nas práticas dentárias diárias (Pedrinho et al., 2020).

2.5.3 Perspetivas Futuras

As perspectivas futuras para as tecnologias da medicina dentária revelam-se extremamente promissoras, com o potencial de transformar profundamente os tratamentos e a forma como os cuidados são prestados. Uma das áreas mais revolucionárias é a bioimpressão e a regeneração de tecidos, que estão a emergir como soluções inovadoras na medicina dentária regenerativa. Estas tecnologias permitem a reconstrução de estruturas bucais com uma precisão e personalização sem precedentes, oferecendo novas abordagens terapêuticas para problemas complexos (Saar et al., 2023).

Paralelamente, a impressão 3D e o uso de robótica representam avanços significativos, com promessas de otimização dos tratamentos, tornando-os menos invasivos e mais eficazes. Estas inovações possibilitam uma maior previsibilidade nos resultados clínicos e uma adaptação precisa às necessidades individuais dos pacientes, aumentando substancialmente a qualidade dos tratamentos oferecidos (Pedrinho et al., 2020).

Por outro lado, a telemedicina e o tele monitorização continuarão a expandir-se, permitindo um acesso mais amplo a cuidados dentários, especialmente em áreas remotas. Estas ferramentas digitais, potenciadas pela inteligência artificial, permitirão que os profissionais acompanhem o progresso dos seus pacientes de forma mais eficaz à distância, melhorando tanto a precisão dos diagnósticos como a personalização dos tratamentos, mesmo em contextos onde o acesso à medicina dentária é limitado (Chakravorty et al., 2023).

Dado o ritmo acelerado destas inovações, é imperativo que os profissionais de saúde se mantenham atualizados sobre os mais recentes avanços tecnológicos. A utilização eficaz dessas ferramentas é crucial para oferecer um atendimento mais eficiente, preciso e centrado nas necessidades do paciente. Além disso, a colaboração contínua entre as instituições académicas e a indústria será determinante para garantir que essas novas tecnologias sejam integradas de forma segura e eficaz na prática clínica diária, promovendo uma evolução constante no campo da medicina dentária (Pedrinho et al., 2020).

III. CONCLUSÃO

Os avanços tecnológicos na medicina dentária têm revolucionado os métodos de diagnóstico, planejamento e tratamento, com ferramentas como os sistemas CAD/CAM, a impressão 3D e a inteligência artificial proporcionando melhorias sem precedentes em precisão, personalização e eficiência. Contudo, o verdadeiro impacto destas inovações estende-se muito além do presente. O futuro da medicina dentária promete avanços ainda mais disruptivos, como a regeneração de tecidos através da bioimpressão, o uso de robótica avançada em procedimentos complexos e a integração de big data e inteligência artificial para prever e prevenir problemas orais antes mesmo de se manifestarem.

Neste cenário de transformação contínua, o papel do dentista não será diminuído, mas sim reinventado. O profissional passará a assumir um papel central como coordenador entre as capacidades das máquinas e as necessidades dos pacientes, garantindo que a tecnologia seja aplicada de forma ética e eficaz. A empatia e o raciocínio clínico continuarão a ser indispensáveis para compreender o contexto individual de cada paciente e oferecer cuidados que vão além da mera técnica.

Com o progresso incessante da tecnologia, o dentista será um mediador entre a inovação e a humanidade. As ferramentas digitais poderão automatizar procedimentos, mas não substituirão a capacidade humana de criar vínculos, interpretar nuances e adaptar-se às necessidades únicas de cada paciente. Esta relação simbiótica entre tecnologia e dentista irá garantir que os cuidados de saúde oral continuem a evoluir, sem perder o foco no bem-estar e na experiência do paciente.

Por isso, o futuro da medicina dentária será construído não apenas com base em avanços tecnológicos, mas também na capacidade dos profissionais de se reinventarem, adotando um papel mais estratégico e humano. Cabe-nos liderar esta evolução, adaptando-nos e garantindo que as inovações sirvam o propósito mais importante: oferecer cuidados orais de excelência, cada vez mais personalizados e centrados no paciente, enquanto mantemos os valores éticos e a empatia que definem a nossa profissão.

IV. BIBLIOGRAFIA

- Ahmad, P., Alam, M. K., Aldajani, A., Alahmari, A., Alanazi, A., Stoddart, M., & Sghaireen, M. G. (2021). Dental Robotics : a disruptive technology. *Sensors*, 21(10), 3308. <https://doi.org/10.3390/s21103308>
- Alageel, O. (2022). Three-dimensional printing technologies for dental prosthesis : a review. *Rapid Prototyping Journal*, 28(9), 1764-1778. <https://doi.org/10.1108/rpj-07-2021-0164>
- Alanazi, K. K., Alzaid, A. A., Elkaffas, A. A., Bukhari, S. A., Althubaitiy, R. O., Alfaifi, K. A., Alfahdi, I. M., & Alqahtani, H. A. (2024). Mechanical Assessment of CAD/CAM Fabricated Hybrid Ceramics : An In Vitro Study. *Applied Sciences*, 14(17), 7939. <https://doi.org/10.3390/app14177939>
- Alaoffey, A. S., Asiri, M. A., Alhazmi, T. A. A., Alshetaiwi, A. A., Almobarak, A. M., Alqasir, Y. H., Algazlan, S. A., Alouf, H. S., Zakri, H. H. M., Al-Amri, F. G., Alshammari, A. H., Mutairi, M. S. A., Alharbi, I. A. L., Aldawsari, J. F., & Alharbi, F. N. (2024). Digital Dentistry : Transforming Diagnosis and Treatment Planning through CAD/CAM and 3D Printing. *Egyptian Journal Of Chemistry*, 67(13), 1177-1190. <https://doi.org/10.21608/ejchem.2024.332979.10717>
- AlMoharib, H. S., AlAskar, M. H., Abuthera, E. A., Alshalhoub, K. A., BinRokan, F. K., AlQahtani, N. S., & Almadhoon, H. W. (2024). Efficacy of Three Interdental Cleaning Methods for Peri-Implant Health Maintenance of Single Implant-Supported Crowns : A Randomised Clinical Trial. *PubMed*, 22(1), 51-56. <https://doi.org/10.3290/j.ohpd.b4854607>

- Alqahtani, S. M., Chaturvedi, S., Alahmari, M. A., Alaleyani, A. M., Alqahtani, A. A., Sahal, A. A., & Salem, M. (2024). Digital impression (*intraoral scanners*) and factors affecting its accuracy – an insight into knowledge and awareness amongst graduates, and clinical practitioners. *BMC Oral Health*, 24(1). <https://doi.org/10.1186/s12903-024-05075-y>
- Al-Dabbagh, N., Alnowailaty, Y., Abed, H., Sharka, R., Alhilou, A., & Almarghlani, A. (2024). Patients' Perception of using Robotics and Artificial Intelligence in Dentistry : A Cross-sectional Study. *The Open Dentistry Journal*, 18(1). <https://doi.org/10.2174/0118742106339605240918065914>
- Al-Jawoosh, S., Ireland, A., & Su, B. (2018). Fabrication and characterisation of a novel biomimetic anisotropic ceramic/polymer-infiltrated composite material. *Dental Materials*, 34(7), 994-1002. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2018.03.008>
- Amornvit, P., Rokaya, D., & Sanohkan, S. (2021b). Comparison of Accuracy of Current Ten Intraoral Scanners. *BioMed Research International*, 2021, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2021/2673040>
- Angelone, F., Ponsiglione, A. M., Ricciardi, C., Cesarelli, G., Sansone, M., & Amato, F. (2023). Diagnostic Applications of Intraoral Scanners : A Systematic Review. *Journal Of Imaging*, 9(7), 134. <https://doi.org/10.3390/jimaging9070134>
- Bae, E., Jeong, I., Kim, W., & Kim, J. (2017). A comparative study of additive and subtractive manufacturing for dental restorations. *Journal Of Prosthetic Dentistry*, 118(2), 187-193. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2016.11.004>
- Banerjee, M., Meetika, Sharma, R., Gahlot, D., Grover, R. K., & Sihani, K. (2024). The Prospect of Artificial Intelligence in Dentistry. Dans *The prospect of Artificial intelligence in dentistry* (p. 136-146). <https://doi.org/10.9734/bpi/mria/v6/762>

- Barenghi, L., Barenghi, A., Cadeo, C., & Di Blasio, A. (2019). Innovation by Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing Technology : A Look at Infection Prevention in Dental Settings. *BioMed Research International*, 2019, 1-15. <https://doi.org/10.1155/2019/6092018>
- Bonny, T., Nassan, W. A., Obaideen, K., Mallahi, M. N. A., Mohammad, Y., & El-Damanhoury, H. M. (2023). Contemporary Role and Applications of Artificial Intelligence in Dentistry. *F1000Research*, 12, 1179. <https://doi.org/10.12688/f1000research.140204.1>
- Castroflorio, T., Sedran, A., Parrini, S., Garino, F., Reverdito, M., Capuozzo, R., Mutinelli, S., Grybauskas, S., Vaitiekūnas, M., & Deregibus, A. (2023). Predictability of orthodontic tooth movement with aligners : effect of treatment design. *Progress In Orthodontics*, 24(1). <https://doi.org/10.1186/s40510-022-00453-0>
- Chakravorty, S., Aulakh, B. K., Shil, M., Nepale, M., Puthenkandathil, R., & Syed, W. (2023). Role of Artificial Intelligence (AI) in Dentistry : A Literature Review. *Journal Of Pharmacy And Bioallied Sciences*, 16(Suppl 1), S14-S16. https://doi.org/10.4103/jpbs.jpbs_466_23
- Chamola, V., Hassija, V., Sulthana, A. R., Ghosh, D., Dhingra, D., & Sikdar, B. (2023). A Review of Trustworthy and Explainable Artificial Intelligence (XAI). *IEEE Access*, 11, 78994-79015. <https://doi.org/10.1109/access.2023.3294569>
- Chan, E. K., Wah, Y. Y., Lam, W. Y., Chu, C., & Yu, O. Y. (2023). Use of Digital Diagnostic Aids for Initial Caries Detection : A Review. *Dentistry Journal*, 11(10), 232. <https://doi.org/10.3390/dj11100232>
- De Abreu, E. C. R., Ferreira, V. C., Olivieri, K. A. N., & Brandt, W. C. (2024). Marginal gap of zirconia and lithium disilicate frameworks produced by the CAD-CAM technique

- through a comparator microscope in vitro analysis. *Brazilian Dental Science*, 27(1), e4154. <https://doi.org/10.4322/bds.2024.e4154>
- Dhopte, A., & Bagde, H. (2023). Smart Smile : Revolutionizing dentistry with artificial intelligence. *Cureus*. <https://doi.org/10.7759/cureus.41227>
- Dipalma, G., Inchingolo, A. D., Inchingolo, A. M., Piras, F., Carpentiere, V., Garofoli, G., Azzollini, D., Campanelli, M., Paduanelli, G., Palermo, A., & Inchingolo, F. (2023). Artificial Intelligence and Its Clinical Applications in Orthodontics : A Systematic Review. *Diagnostics*, 13(24), 3677. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13243677>
- Duffaut, A. E. C. (2018). Odontología Activa Revista Científica. *Odontología Activa Revista Científica*, 1(1), 19. <https://doi.org/10.26871/oactiva.v1i1.182>
- Earar, K., Iliescu, A. A., Popa, G., Iliescu, A., Rudnic, I., Feier, R., & Voinea-Georgescu, R. N. (2020). Additive vs. Subtractive CAD/CAM Procedures in Manufacturing of the PMMA Interim Dental Crowns. A Comparative in vitro Study of Internal Fit. *Revista de Chimie*, 71(1), 405-410. <https://doi.org/10.37358/rc.20.1.7866>
- Fieldhouse, S. (2021). CAD/CAM in dentistry. Materials and methods : an overview for the dental team. *Dental Update*, 48(8), 671-678. <https://doi.org/10.12968/denu.2021.48.8.671>
- Goulão, B., MacLennan, G. S., & Ramsay, C. R. (2021). Have you had bleeding from your gums ? Self-report to identify giNGival inflammation (The SING diagnostic accuracy and diagnostic model development study). *Journal Of Clinical Periodontology*, 48(7), 919-928. <https://doi.org/10.1111/jcpe.13455>
- Haidar, Z. S. (2023). Digital Dentistry : Past, Present, and Future. *Digital Medicine And Healthcare Technology*, 2. <https://doi.org/10.5772/dmht.17>
- Hulsen, T. (2023). Explainable Artificial Intelligence (XAI) : Concepts and Challenges in Healthcare. *AI*, 4(3), 652-666. <https://doi.org/10.3390/ai4030034>

- Isufi, A., Hsu, T., & Chogle, S. (2024). Robot-Assisted and Haptic-Guided Endodontic Surgery : A Case Report. *Journal Of Endodontics*, 50(4), 533-539.e1.
<https://doi.org/10.1016/j.joen.2024.01.012>
- Jacobs, R., Salmon, B., Codari, M., Hassan, B., & Bornstein, M. M. (2018). Cone beam computed tomography in implant dentistry : recommendations for clinical use. *BMC Oral Health*, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s12903-018-0523-5>
- Javaid, M., & Haleem, A. (2019). Current status and applications of additive manufacturing in dentistry : A literature-based review. *Journal Of Oral Biology And Craniofacial Research*, 9(3), 179-185. <https://doi.org/10.1016/j.jobcr.2019.04.004>
- Jeong, M., Radomski, K., Lopez, D., Liu, J. T., Lee, J. D., & Lee, S. J. (2023b). Materials and Applications of 3D Printing Technology in Dentistry : An Overview. *Dentistry Journal*, 12(1), 1. <https://doi.org/10.3390/dj12010001>
- Kezian, S. A. (2020). The History of the Dental Profession - From Ancient Origins to Modern Day. *Pacific Journal Of Health*, 3(1). <https://doi.org/10.56031/2576-215x.1006>
- Kong, L., Li, Y., & Liu, Z. (2022). Digital versus conventional full-arch impressions in linear and 3D accuracy : a systematic review and meta-analysis of in vivo studies. *Clinical Oral Investigations*, 26(9), 5625-5642. <https://doi.org/10.1007/s00784-022-04607-6>
- L, A. M., Nagarajappa, R., Kumar, A., M, V. K., & Rajeev, A. (2024). ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN DENTISTRY. Dans *ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN DENTISTRY* (p. 140-149). <https://doi.org/10.58532/v3bgms21p2ch5>
- Lin, W., Alfaraj, A., Lippert, F., & Yang, C. (2023). Performance of the caries diagnosis feature of intraoral scanners and near-infrared imaging technology—A narrative review. *Journal Of Prosthodontics*, 32(S2), 114-124.
<https://doi.org/10.1111/jopr.13770>

- Lione, R., De Razza, F. C., Gazzani, F., Lugli, L., Cozza, P., & Pavoni, C. (2024). Accuracy, Time, and Comfort of Different Intraoral Scanners : An In Vivo Comparison Study. *Applied Sciences*, 14(17), 7731. <https://doi.org/10.3390/app14177731>
- Liu, L., Watanabe, M., & Ichikawa, T. (2023). Robotics in Dentistry : A Narrative Review. *Dentistry Journal*, 11(3), 62. <https://doi.org/10.3390/dj11030062>
- Maiti, N., Mahapatra, N., Patel, D., Chanchad, J., Shah, A. S., Rahaman, S. K. M., & Surana, P. (2024). Application of CAD-CAM in Dentistry. *Bioinformation*, 20(5), 547-550. <https://doi.org/10.6026/973206300200547>
- Martins, G. K. P., Lira, G. B. D. S., Gonçalves, J. M., Da Silva Martins, D., Sales, T. A. M., Gauch, L. M. R., Joaquim, A. M. C., De Andrade, C. L., De Magalhães, A. C. C., De Almeida, G. M., Nascimento, L. S. D., & Dias, H. B. (2024). Artificial intelligence and dental clinical practice. Dans *Seven Editora eBooks*. <https://doi.org/10.56238/sevened2024.012-039>
- Misăiloaie, A., Tărăboanță, I., Budacu, C. C., & Sava, A. (2024). Preoperative Cone Beam Computed Topography Assessment of Maxillary Sinus Variations in Dental Implant Patients. *Diagnostics*, 14(17), 1929. <https://doi.org/10.3390/diagnostics14171929>
- Nassani, L. M., Javed, K., Amer, R. S., Pun, M. H. J., Abdelkarim, A. Z., & Fernandes, G. V. O. (2024). Technology Readiness Level of Robotic Technology and Artificial Intelligence in Dentistry : A Comprehensive Review. *Surgeries*, 5(2), 273-287. <https://doi.org/10.3390/surgeries5020025>
- Negi, S., Mathur, A., Tripathy, S., Mehta, V., Snigdha, N. T., Adil, A. H., & Karobari, M. I. (2024). Artificial Intelligence in Dental Caries Diagnosis and Detection : An Umbrella Review. *Clinical And Experimental Dental Research*, 10(4). <https://doi.org/10.1002/cre2.70004>

- Panayi, N. C., Efstathiou, S., Christopoulou, I., Kotantoula, G., & Tsolakis, I. A. (2023). Digital orthodontics : Present and future. *AJO-DO Clinical Companion*, 4(1), 14-25.
<https://doi.org/10.1016/j.xaor.2023.12.001>
- Ramdan, K. (2023). Digital Orthodontics : An overview. *MSA Dental Journal*, 2(1), 26-30.
<https://doi.org/10.21608/msadj.2023.211756.1020>
- Rastogi, I., Siddiqui, S. R., & Khan, F. R. (2024a). Artificial intelligence up fronting dentistry. *Journal Of Orofacial & Health Sciences*, 11(2), 47-49.
<https://doi.org/10.18231/j.johs.2024.012>
- Ronsivalle, V., Ruiz, F., Lo Giudice, A., Carli, E., Venezia, P., Isola, G., Leonardi, R., & Mummolo, S. (2023). From Reverse Engineering Software to CAD-CAM Systems : How Digital Environment Has Influenced the Clinical Applications in Modern Dentistry and Orthodontics. *Applied Sciences*, 13(8), 4986.
<https://doi.org/10.3390/app13084986>
- Roberto, R. C., Lopes, F. C., Porto, T. S., Teich, S., Rizzante, F. A. P., Gutmacher, Z., & De Sousa-Neto, M. D. (2018). CAD/CAM diamond tool wear. *Quintessence International*, 49(10), 781-786. <https://doi.org/10.3290/j.qi.a41182>
- Schweiger, J., Beuer, F., Stimmelmayer, M., Edelhoff, D., Magne, P., & Güth, J. F. (2016). Histo-anatomic 3D printing of dental structures. *BDJ*, 221(9), 555-560.
<https://doi.org/10.1038/sj.bdj.2016.815>
- 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>
- Scribante, A., Gallo, S., Pascadopoli, M., Canzi, P., Marconi, S., Montasser, M. A., Bressani, D., Gandini, P., & Sfondrini, M. F. (2022). Properties of CAD/CAM 3D Printing

- Dental Materials and Their Clinical Applications in Orthodontics : Where Are We Now ? *Applied Sciences*, 12(2), 551. <https://doi.org/10.3390/app12020551>
- Semerci, Z. M., & Yardımcı, S. (2024). Empowering Modern Dentistry : The Impact of Artificial Intelligence on Patient Care and Clinical Decision Making. *Diagnostics*, 14(12), 1260. <https://doi.org/10.3390/diagnostics14121260>
- Serrano-Velasco, D., Martín-Vacas, A., Giovannini, G., Paz-Cortés, M. M., & Aragonese, J. M. (2024). Accuracy Analysis of Digital Models from Intraoral Scanners and 3D-Printed Casts in Children and Teenagers. *Children*, 11(9), 1082. <https://doi.org/10.3390/children11091082>
- Shujaat, S., Bornstein, M. M., Price, J. B., & Jacobs, R. (2021a). Integration of imaging modalities in digital dental workflows - possibilities, limitations, and potential future developments. *Dentomaxillofacial Radiology*, 50(7), 20210268. <https://doi.org/10.1259/dmfr.20210268>
- Siddharth, L., Blessing, L., & Luo, J. (2022). Natural language processing in-and-for design research. *Design Science*, 8. <https://doi.org/10.1017/dsj.2022.16>
- Siqueira, R., Galli, M., Chen, Z., Mendonça, G., Meirelles, L., Wang, H., & Chan, H. (2021). Intraoral scanning reduces procedure time and improves patient comfort in fixed prosthodontics and implant dentistry : a systematic review. *Clinical Oral Investigations*, 25(12), 6517-6531. <https://doi.org/10.1007/s00784-021-04157-3>
- Steinmassl, O., Dumfahrt, H., Grunert, I., & Steinmassl, P. (2018). CAD/CAM produces dentures with improved fit. *Clinical Oral Investigations*, 22(8), 2829-2835. <https://doi.org/10.1007/s00784-018-2369-2>
- Strunga, M., Urban, R., Surovková, J., & Thurzo, A. (2023). Artificial Intelligence Systems Assisting in the Assessment of the Course and Retention of Orthodontic Treatment. *Healthcare*, 11(5), 683. <https://doi.org/10.3390/healthcare11050683>

- Suganna, M., Kausher, H., Ahmed, S. T., Alharbi, H. S., Alsubaie, B. F., Ds, A., Haleem, S., & Ali, A. B. M. R. (2022). Contemporary Evidence of CAD-CAM in Dentistry : A Systematic Review. *Cureus*. <https://doi.org/10.7759/cureus.31687>
- Thawri, S. R., Paul, P., Reche, A., & Rath, H. P. (2023). 3D Technology Used for Precision in Orthodontics. *Cureus*. <https://doi.org/10.7759/cureus.47170>
- Thurzo, A., Urbanová, W., Novák, B., Czako, L., Siebert, T., Stano, P., Mareková, S., Fountoulaki, G., Kosnáčová, H., & Varga, I. (2022). Where Is the Artificial Intelligence Applied in Dentistry ? Systematic Review and Literature Analysis. *Healthcare*, 10(7), 1269. <https://doi.org/10.3390/healthcare10071269>
- Hamzah, N. A., Razak, N. A. A., Karim, M. S. A., & Gholizadeh, H. (2021). A review of history of CAD/CAM system application in the production of transtibial prosthetic socket in developing countries (from 1980 to 2019). *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers Part H Journal Of Engineering In Medicine*, 235(12), 1359-1374. <https://doi.org/10.1177/09544119211035200>
- Van Riet, T. C., Sem, K. T. C. J., Ho, J. T., Spijker, R., Kober, J., & De Lange, J. (2021). Robot technology in dentistry, part two of a systematic review : an overview of initiatives. *Dental Materials*, 37(8), 1227-1236. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2021.06.002>
- Vodanović, M., Subašić, M., Milošević, D., & Pavičin, I. S. (2023). Artificial Intelligence in Medicine and Dentistry. *Acta Stomatologica Croatica*, 57(1), 70-84. <https://doi.org/10.15644/asc57/1/8>
- Wendler, M., Belli, R., Petschelt, A., Mevec, D., Harrer, W., Lube, T., Danzer, R., & Lohbauer, U. (2016). Chairside CAD/CAM materials. Part 2 : Flexural strength testing. *Dental Materials*, 33(1), 99-109. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2016.10.00>

- Xia, Z., Ahmad, F., Deng, H., Jiang, L., Qin, W., Zhao, Q., & Xiong, J. (2024). Robotics Application in Dentistry : A Review. *IEEE Transactions On Medical Robotics And Bionics*, 6(3), 851-867. <https://doi.org/10.1109/tmr.2024.3408321>
- Xie, B., Xu, D., Zou, X., Lu, M., Peng, X., & Wen, X. (2023). Artificial intelligence in dentistry; A bibliometric analysis from 2000 to 2023. *Journal Of Dental Sciences*, 19(3), 1722-1733. <https://doi.org/10.1016/j.jds.2023.10.025>
- Yeslam, H. E., Von Maltzahn, N. F., & Nassar, H. M. (2024a). Revolutionizing CAD/CAM-based restorative dental processes and materials with artificial intelligence : a concise narrative review. *PeerJ*, 12, e17793. <https://doi.org/10.7717/peerj.17793>
- Zimmermann, R., & Seitz, S. (2023). The Impact of Technological Innovation on Dentistry. *Advances In Experimental Medicine And Biology*, 79-102. https://doi.org/10.1007/978-3-031-26462-7_5