



UNIVERSIDADE  
FERNANDO  
PESSOA

# A INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL AO SERVIÇO DA ENDODONTIA: UMA REVOLUÇÃO? – REVISÃO NARRATIVA

[Artificial intelligence at the service of endodontics: a revolution? – narrative review]

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Medicina Dentária

Louis Jean Paul Emmanuel ROUX

Orientadores:

Mestre Natália VASCONCELOS

Mestre Ricardo ESTEVES

Setembro 2024







**A INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL AO SERVIÇO DA ENDODONTIA:  
UMA REVOLUÇÃO ? – REVISÃO NARRATIVA**

[Artificial intelligence at the service of endodontics: a revolution? – narrative review]

Dissertação de Mestrado

Mestrado integrado em Medicina Dentaria

Louis Jean Paul Emmanuel ROUX

Orientadores:

Mestre Natália VASCONCELOS

Mestre Ricardo ESTEVES

Setembro 2024



- A ma mère, Karine, dont l'amour inconditionnel et le soutien sans faille m'ont toujours porté dans la quête de mes plus grands rêves. Elle qui m'a appris, m'apprend, et m'apprendra plus de choses que ce que je n'aurai jamais pu imaginer. Merci pour tout, car c'est grâce à Papa et toi que j'en suis là aujourd'hui. Je t'aime.
  
- A mon père, Emmanuel, que j'admire pour tout ce qu'il incarne. Sa tendresse, sa sagesse et son altruisme me motivent chaque jour à lui ressembler pour être quelqu'un de meilleur, dans la vie comme dans le soin d'autrui. Merci Papa pour l'éducation et les valeurs que tu m'as inculquées. Je t'aime.
  
- A ma sœur, Mathilde, qui du haut de ses 23 ans est un pilier sur lequel je peux toujours compter. Merci de ton éternel amour et soutien, merci d'exister. Je t'aime.
  
- A mes grands-parents, Jean-Paul, Michèle, Monique, et mon regretté Papy Jean. Merci de votre présence si bienveillante au quotidien, vous êtes la lumière du soleil qui éclaire mes jours. Je vous aime.
  
- Au reste de ma famille, merci à tous d'avoir participé, de loin ou de près, à cette aventure que furent mes études jusqu'à ce dernier jour. L'avenir s'annonce d'autant plus radieux à vos côtés. Je vous aime.



- À minha mãe, Karine, cujo amor incondicional e apoio infalível sempre me sustentaram na busca dos meus maiores sonhos. Ela que me ensinou, me ensina, e me ensinará mais coisas do que nunca poderia imaginar. Obrigado por tudo, pois é graças a ti e ao Papa que estou aqui hoje. Amo-te.
  
- Ao meu pai, Emmanuel, que admiro por tudo o que ele representa. Sua ternura, sua sabedoria e seu altruísmo me motivam todos os dias a querer ser alguém melhor, na vida e no cuidado dos outros. Obrigado pai pela educação e pelos valores que me inculciste. Amo-te.
  
- À minha irmã, Mathilde, que com os seus 23 anos é um pilar em que sempre posso confiar, tanto nos bons como nos maus momentos. Obrigado pelo teu amor e apoio eternos, obrigado por existires. Amo-te.
  
- Aos meus avós, Jean-Paul, Michèle, Monique, e ao meu saudoso Papy Jean. Obrigado pela vossa presença tão carinhosa no dia-a-dia, vocês são a luz do sol que ilumina os meus dias. Amo-vos.
  
- Ao resto da minha família, obrigado a todos por terem participado, de longe ou de perto, nesta aventura que foram os meus estudos até este último dia. O futuro parece radiante ao vosso lado. Amo-vos.



## AGRADECIMENTOS

A minha orientadora, Exma Professora Doutora Natália Vasconcelos, pela sua ajuda, disponibilidade e a excelência dos seus conselhos durante todo este trabalho.

Ao meu co-orientador, Exmo Professor Doutor Ricardo Esteves, pela sua pedagogia, disponibilidade e interesse no ensino da endodontia, e além disso, por me ajudar desde o início deste trabalho.

Aos meus amigos e parceiros de clínica Adrien e Hugo, que me ajudaram tanto durante os meus estudos, que foram reais pilares na minha vida de estudante, e que continuarão a ser na minha vida futura. Esta história começou aqui no Porto, mas continuara para sempre.

Aos meus amigos Thomas, François e Rémi que além de ser parceiros de treino valiosos, são reais amigos em quem poderei sempre contar.

A minha Professora de português Niagara, que além de ser uma valiosa professora, tornou-se ao longo do tempo numa cara amiga. Obrigado para me ensinar tantas coisas, serei sempre grato.

A vocês, Patrick e Patricia, Florent e Sabine que foram para mim os meus pais de substituição durante estes anos. Obrigado para tudo.

Aos meus Amigos Romane e Gaspard, sem quem toda esta aventura nunca teria sido possível.

À Marie, JR, Enzo, Alix, Manu, Juliette, e aos meus outros amigos da UFP.

À comissão organizadora das XXI Jornadas de Medicina Dentária, que me incluiu neste grupo de trabalho maravilhoso, e que me permitiu de fazer parte desta experiência enriquecedora a todos os níveis.

À Turma 2, para todos estes momentos juntos, sejam dentro ou fora da clínica. Um abraço a cada um de vocês, que contribui a tornar esta experiência na UFP tão agradável.

Aos meus amigos de infância que sempre me apoiaram no meu percurso de vida.



## RESUMO

A inteligência artificial tem tido um crescimento exponencial nestes últimos anos e começa a ser usada em várias áreas da medicina dentária, nomeadamente na endodontia. Na área da endodontia tem tido uma grande evolução no sentido de permitir auxiliar o diagnóstico das infeções pulpares, baseando-se em análises radiográficas ou em scanners dentários. Os programas de inteligência artificial, de reconhecimento radiográfico, usam volumosos conjuntos de dados para estabelecer os seus diagnósticos e permitir previsões de evolução das doenças periapicais. As bases de dados usadas pelos softwares de inteligência artificial são continuamente melhoradas e expandidas à medida que estes são usados, tornando-se cada vez mais precisos. Outro aspeto relevante é a possibilidade de, através da inteligência artificial, termos a possibilidade de otimização dos tratamentos graças a sistemas capazes de criar planos de tratamentos personalizados e adaptados a cada paciente em função das suas próprias características anatómicas. A inteligência artificial ainda está no início da sua era, mas já permite detetar lesões periapicais, fragmentos de limas intracanalares, perda óssea, malformações dentárias, tratamentos já realizados, lesões cariosas, estruturas anatómicas, etc. Alguns softwares já podem prever a evolução de doenças dentárias e as eventuais necessidades de tratamentos. O objetivo desta revisão narrativa é avaliar a pertinência e o impacto do potencial uso da inteligência artificial na endodontia identificando os objetivos, as várias perspetivas e os limites da sua utilização permitindo a realização de um correto diagnóstico e plano de tratamento e, assim, uma prática da endodontia mais eficaz. A pesquisa bibliográfica foi realizada através de motores de busca como a Pubmed, Science direct/Springer Link, B-on, e resumos de atas de conferências e congressos. Durante a pesquisa, foram usados vários termos MeSH (*Medical Subject Headings*) que correspondam às seguintes palavras chaves: *Artificial intelligence/ IA/AI, endodontics, machine learning, Convolutional Neural Network/ CNN, apical lesion, root canal treatment, IA-guided endodontics, pulpectomy*, em inglês; combinadas entre si com os operadores booleanos “OR” e “AND”. Os critérios de inclusão foram: artigos publicados nos últimos cinco anos (2019-2024), artigos que abordassem as diferentes perspetivas da utilização da inteligência artificial na endodontia, artigos que analisassem a relação entre IA e endodontia, artigos publicados após o início do uso da IA em endodontia. Foram excluídos os artigos que não cumprissem com os critérios de inclusão definidos. Os critérios de exclusão foram: artigos duplicados, artigos que necessitavam de custos adicionais para acesso sem texto integral disponível, e estudos não claros e explicitados. Pretendeu-se com esta revisão de literatura sintetizar as descobertas feitas em relação à inteligência artificial na prática endodôntica nestes últimos 5 anos, criando assim uma fonte de informação preciosa para os profissionais de saúde que procuram aplicações e perspetivas da inteligência artificial na endodontia.

**Palavras-chave:** “Inteligência artificial”, “endodontia”, “CNN”, “ML”, “tratamento endodôntico”.



## ABSTRACT

Artificial intelligence has experienced exponential growth in recent years and is beginning to be used in various areas of dentistry, particularly in endodontics. In the field of endodontics, it has significantly evolved to assist in the diagnosis of pulp infections, based on radiographic analyses or dental scanners. Radiographic recognition AI programs use large datasets to establish their diagnoses and predict the progression of periapical diseases. The databases used by AI software are continuously improved and expanded as they are used, becoming increasingly precise. Another relevant aspect is the possibility, through artificial intelligence, of optimizing treatments thanks to systems capable of creating personalized treatment plans adapted to each patient based on their own anatomical characteristics. Artificial intelligence is still in its early stages but already enables the detection of periapical lesions, intracanal file fragments, bone loss, dental malformations, previously performed treatments, carious lesions, anatomical structures, etc. Some software can already predict the progression of dental diseases and the potential need for treatments. The objective of this narrative review is to evaluate the relevance and impact of the potential use of artificial intelligence in endodontics by identifying the objectives, various perspectives, and limits of its use, enabling accurate diagnosis and treatment planning and, thus, more effective endodontic practice. The bibliographic research will be conducted using search engines such as PubMed, Science Direct/Springer Link, B-on, and conference and congress abstract summaries. During the research, various MeSH (Medical Subject Headings) terms corresponding to the following keywords were used: Artificial intelligence/IA/AI, endodontics, machine learning, Convolutional Neural Network/CNN, apical lesion, root canal treatment, IA-guided endodontics, pulpectomy, in English; combined with each other using the Boolean operators “OR” and “AND”. The inclusion criteria are: articles published in the last five years (2019-2024), articles that address the different perspectives of the use of artificial intelligence in endodontics, articles that analyze the relationship between AI and endodontics, articles published after the start of the use of AI in endodontics. Articles that do not meet the defined inclusion criteria will be excluded. The exclusion criteria are: duplicate articles, articles requiring additional costs for access without full-text availability, and studies that are unclear and unexplained. This literature review aims to synthesize the findings related to artificial intelligence in endodontic practice over the past five years, thus creating a valuable source of information for healthcare professionals seeking applications and perspectives of artificial intelligence in endodontics.

**Keywords:** “Artificial intelligence”, “endodontics”, “CNN”, “ML”, “endodontic treatment”.



# ÍNDICE GERAL

RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xix
ÍNDICE DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	xxi
I. INTRODUÇÃO.....	1
II. DESENVOLVIMENTO .....	5
1. MATERIAIS E MÉTODOS.....	5
A. <i>Estratégia de pesquisa de artigos</i> .....	5
B. <i>Crítérios de elegibilidade</i> .....	5
C. <i>Seleção dos artigos</i> .....	5
2. TECNOLOGIAS E ALGORITMOS USADOS .....	7
A. <i>Machine Learning (ML)</i> .....	7
A.a. <i>Deep Learning (DL)</i> .....	8
A.a.1) <i>Convolutional Neural Network (CNN)</i> .....	10
□ <i>Funcionamento Básico das CNNs</i> .....	10
□ <i>Estrutura e Componentes de uma CNN</i> .....	11
B. <i>Sistemas Inteligentes Híbridos</i> .....	12
B.a. <i>Sistemas de apoio a decisão clínica (CDSS)</i> .....	13
3. APLICAÇÕES DA IA PARA ENDODONTIA.....	13
A. <i>Deteção da anatomia radicular</i> .....	14
B. <i>Diagnóstico de lesões periapicais</i> .....	16
C. <i>Deteção de fraturas e fissuras radiculares</i> .....	17
D. <i>Avaliação da qualidade de tratamentos endodônticos</i> .....	18
E. <i>Determinação do comprimento de trabalho e localização do ápice radicular</i> .....	19
F. <i>Deteção de instrumentos fraturados</i> .....	19
G. <i>Prever sucesso terapêutico e retratamentos</i> .....	20
H. <i>Apoiar a formação de novos especialistas</i> .....	21
III. DISCUSSÃO.....	23
IV. CONCLUSÃO.....	29



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – <i>Diagrama de fluxo PRISMA</i> .....	6
---	---



## **ÍNDICE DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

**CBCT** – Cone beam computed tomography

**CDSS** - Sistemas de apoio à decisão clínica

**CNN** - Convolutional Neural Network

**CT** - Comprimento de Trabalho

**DL** – Deep Learning

**IA** – Inteligência Artificial

**LSTM** - Long Short Term Memory

**ML** – Machine Learning

**RNN** - Redes neuronais recorrentes

**TENC** - Tratamento endodôntico não cirúrgico

**VRFs** - fraturas radiculares verticais



## I. INTRODUÇÃO

A polpa dentária é o tecido mole localizado no interior do dente, contendo nervos, vasos sanguíneos e tecido conjuntivo. Este tecido é essencial para o desenvolvimento do dente, a propriocepção, a sensibilidade e a proteção do dente, mas pode ser comprometido por cáries profundas, traumatismos ou outras patologias (Watson, 2021).

A endodontia é a especialidade da Medicina Dentária que se dedica ao estudo, diagnóstico, prevenção e tratamento das doenças e lesões que afetam a polpa dentária e o sistema de canais radiculares assim como os tecidos periradiculares. (Khanagar et al., 2023).

Esta área da Medicina Dentária desempenha um papel crucial na manutenção da saúde oral e na prevenção de complicações mais graves que podem resultar da infeção dentária não tratada. A infeção ou inflamação da polpa dentária pode causar dor intensa, abscessos e, em casos mais severos, pode levar à perda do dente e a problemas sistémicos devido à disseminação de bactérias para a corrente sanguínea (Barhum, 2024).

O tratamento endodôntico consiste na remoção da polpa dentária inflamada ou necrosada da cavidade pulpar, mantendo a estrutura dentária intacta. Após a realização de uma adequada instrumentação, limpeza e desinfeção dos canais radiculares. Estes são obturados com um material obturador biocompatível (American Association of Endodontists, 2024).

A “Precisão” é uma palavra-chave a ter em mente para cada etapa de um Tratamento Endodôntico Não Cirúrgico (TENC). A precisão no diagnóstico e tratamento endodôntico é crucial para prevenir complicações como infeções persistentes e a necessidade de tratamentos adicionais (Karojari et al., 2023).

Cada processo do tratamento tem um papel determinante com grande influência no sucesso do tratamento na sua globalidade. Para um bom tratamento endodôntico, serão necessárias várias etapas num mesmo protocolo a realizar. Especificamente a base de cada TENC inicia-se com a realização da cavidade de acesso e localização dos canais radiculares e a determinação exata do Comprimento de Trabalho (CT). Estes aspetos particulares, correto diagnóstico e determinação correta do comprimento de trabalho são um dos principais desafios em endodontia (Khanagar et al., 2023).

Diagnósticos inadequados podem conduzir a dores imprevistas, o que pode ter um impacto negativo no plano de tratamento e eventualmente resultar em experiências desagradáveis para os pacientes. Uma avaliação pré-operatória minuciosa da situação clínica e anatomia dentária é essencial para determinar o sucesso do tratamento endodôntico. A precisão na identificação das condições dentárias antes do início do tratamento é vital para evitar complicações e garantir a satisfação do paciente ao longo do processo terapêutico assim como a do médico especialista (Khanagar et al., 2023).

Existem várias ferramentas para ajudar o médico dentista a realizar tratamentos endodônticos precisos. Hoje em dia, uma das possíveis ferramentas a começar a ser explorada, com um grande potencial nesta área da medicina dentaria é a Inteligência Artificial (IA). De acordo com Hung et al. (2022), a inteligência artificial (IA) refere-se à capacidade de máquinas conseguirem realizar tarefas que normalmente requerem inteligência humana, como reconhecimento de padrões aprendidos e tomada de decisão.

Como foi mencionado por Khanagar et al., 2023, nos últimos anos foi observado um grande desenvolvimento na área da IA e, na área da Medicina Dentária nomeadamente na endodontia. Na área da endodontia, tem tido uma grande evolução no sentido de permitir auxiliar o diagnóstico das infeções de origem endodôntica, baseando-se em análises radiográficas ou em scanners dentários.

Os programas de inteligência artificial, de reconhecimento radiográfico, usam volumosos conjuntos de dados para estabelecer os seus diagnósticos e permitir previsões de evolução das doenças periapicais. As bases de dados usadas pelos softwares de inteligência artificial são continuamente melhoradas e expandidas à medida que estes são usados, tornando-se cada vez mais precisos. Outro aspeto relevante é a possibilidade de, através da inteligência artificial, termos a capacidade de otimização dos tratamentos graças a sistemas capazes de criar planos de tratamentos personalizados e adaptados a cada paciente em função das suas próprias características anatómicas (Zhu et al., 2023).

De acordo com Asiri & Altuwalah (2022), estudar a aplicação da IA na endodontia é fundamental para entender como este tipo de tecnologia pode melhorar a precisão diagnóstica e otimizar os resultados dos tratamentos.

A inteligência artificial ainda está no início da sua era, mas já permite detetar e avaliar lesões periapicais, fragmentos de limas intracanales, perda óssea, malformações dentarias, tratamentos já realizados, lesões cariosas, estruturas anatómicas, etc. Alguns

softwares já podem prever a evolução de doenças dentárias e as eventuais necessidades e opções de tratamentos.

Modelos de IA foram desenvolvidos para determinar comprimentos de trabalho, identificar fraturas radiculares verticais, tratamentos endodônticos incompletos, morfologia radicular, e planejar força e torque para preparação canal; detetar doenças pulpares; detetar e diagnosticar lesões periapicais; antecipar dor pós-operatória, efeito curativo após tratamento, e avaliar a dificuldade do caso, assim como fazer segmentação das cavidades pulpares (Khanagar et al., 2023, p.1).

Estas competências da inteligência artificial podem ajudar médicos dentistas a elevar-se a um novo nível de precisão nos diagnósticos e planos de tratamentos, melhorando a experiência do paciente assim como os sucessos dos tratamentos. Karobari et al. (2023) enunciaram que os benefícios das aplicações digitais vão complementar as capacidades e talentos humanos para oferecer as melhores opções de tratamento possíveis para os pacientes, com a melhor relação custo-benefício. Este tema muito atual pode ser uma verdadeira inovação no futuro da endodontia e da medicina dentária em geral.

O objetivo desta revisão narrativa é avaliar a pertinência e o impacto do potencial uso da inteligência artificial na endodontia, identificando os objetivos, as várias perspetivas e os limites da sua utilização permitindo a realização de um correto diagnóstico e plano de tratamento e, assim, uma prática da endodontia mais eficaz. Para isso, pretende-se abordar as tecnologias de IA utilizadas na endodontia, as suas aplicações clínicas e os desafios e perspetivas futuras desta integração na prática clínica da endodontia.



## II. DESENVOLVIMENTO

### 1. Materiais e métodos

#### A. Estratégia de pesquisa de artigos

Para a elaboração deste trabalho de revisão, foi feita uma pesquisa bibliográfica de artigos científicos nas bases de dados *Pubmed*, *Science Direct/Elsevier*, *B-on*, englobando artigos de revisões narrativas e sistemáticas.

Durante a pesquisa, foram usados vários termos MeSH (*Medical Subject Headings*) que correspondam às seguintes palavras chaves: *Artificial intelligence/ IA/AI*, *endodontics*, *machine learning*, *Convolutional Neural Network/ CNN*, *apical lesion*, *root canal treatment*, *IA-guided endodontics*, *pulpectomy*. Estas palavras foram usadas em inglês e combinadas entre si de diversas formas com os operadores booleanos “OR” e “AND”.

#### B. Critérios de elegibilidade

Foram estabelecidos vários critérios de inclusão e exclusão para selecionar artigos científicos para esta revisão narrativa.

Os critérios de inclusão de artigos para este trabalho foram:

- Artigos publicados nos últimos cinco anos (2019-2024)
- Artigos que abordam diferentes perspectivas da utilização da inteligência artificial na endodontia
- Artigos que analisam a relação entre IA e endodontia
- Artigos publicados após o início do uso da IA em endodontia.

Os critérios de exclusão foram os seguintes:

- Artigos duplicados
- Artigos que não cumprem os critérios de inclusão definidos
- Artigos que necessitavam custos adicionais para acesso, sem texto integral disponível
- Estudos não claros e explicitados.

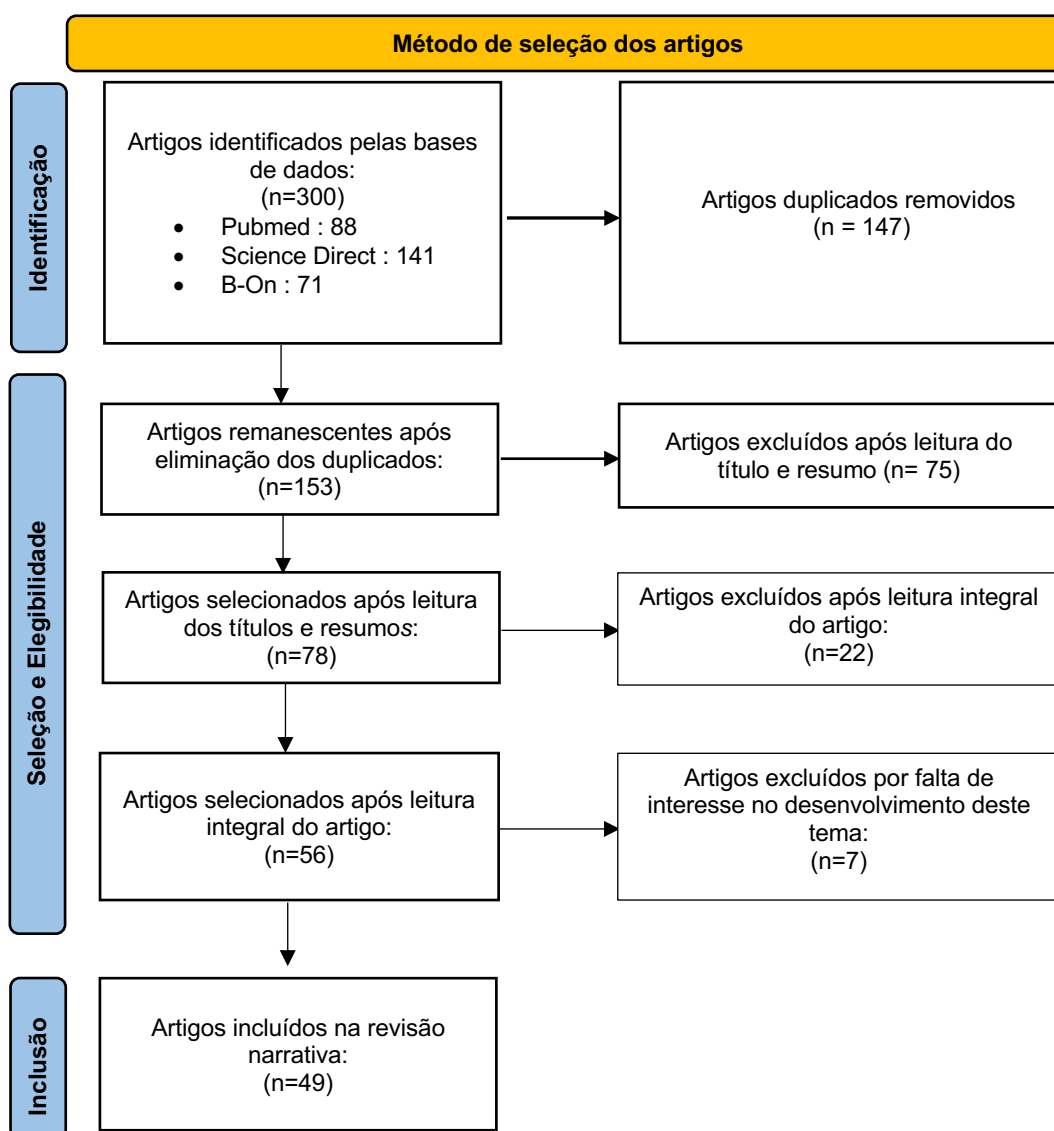
#### C. Seleção dos artigos

De acordo com os critérios de inclusão e exclusão estabelecidos, foram selecionados 88 artigos na *Pubmed*, 141 em *Science Direct/Elsevier*, e 71 em *B-on*. Assim, no total a pesquisa inicial resultou em 300 artigos. Uma triagem dos artigos duplicados foi realizada

e 147 artigos foram retirados ficando 153 artigos selecionados. Posteriormente foi feita uma leitura dos títulos dos artigos selecionados, sendo eliminados 46 artigos. A etapa seguinte foi a leitura dos *abstract* dos 107 artigos resultantes, na qual permitiu selecionar 78 artigos que pareciam pertinentes para este estudo.

56 artigos foram indicados para leitura completa de acordo com os critérios de elegibilidade e destes, foram selecionados 49 para elaboração do presente trabalho de revisão narrativa.

Figura 1 Diagrama de fluxo PRISMA



Legenda: n= Número

## *A inteligência artificial ao serviço da endodontia: uma revolução?*

### **2. Tecnologias e algoritmos usados**

Existem vários tipos de tecnologias de inteligência artificial. Cada um tem especificidades, vantagens e inconvenientes. As tecnologias de IA mais pertinentes para este estudo são:

- Machine Learning (ML)
- ⇒ Deep Learning (DL)
- Convolutional Neural Network (CNN)
- Sistemas Inteligentes Híbridos

#### **A. Machine Learning (ML)**

Dentro do vasto campo da IA, a Machine Learning (ML) é um subcampo que se concentra no desenvolvimento de algoritmos que permitem aos computadores aprender e fazer previsões ou tomar decisões perante novos dados, com base em dados já previamente implementadas à IA. Ao invés de serem programados explicitamente para realizar uma tarefa, os sistemas de ML são treinados em grandes volumes de dados para identificar padrões e melhorar o seu desempenho ao longo do tempo, como foi explicitado por Qu et al. (2023).

O procedimento do Machine Learning é o seguinte (Yifat, 2024):

- *Recolha de Dados:* O processo de Machine Learning começa com a recolha de dados relevantes. No contexto da endodontia, isso pode incluir imagens radiográficas, históricos clínicos de pacientes, resultados de tratamentos e outras informações pertinentes.
- *Preparação dos Dados:* Os dados brutos coletados precisam de ser limpos e transformados num formato adequado para análise. Isso pode envolver a remoção de informações irrelevantes, a correção de erros e a normalização dos dados.
- *Treino do Modelo:* Um algoritmo de Machine Learning é escolhido e treinado utilizando o conjunto de dados preparado. Durante o treino, o algoritmo ajusta os seus parâmetros internos para minimizar erros e melhorar a precisão das suas previsões.

- *Avaliação e Validação:* Após o treino, o modelo é avaliado com um conjunto de dados separado (dados de validação) para testar a sua precisão e generalização. Ajustes adicionais podem ser feitos para melhorar o desempenho.
- *Implementação e Monitorização:* Um modelo bem-sucedido pode então ser implementado num ambiente clínico, onde as suas previsões são usadas para apoiar a tomada de decisões. O desempenho do modelo deve ser monitorizado continuamente para garantir que ele permaneça preciso e eficaz.

“Estes algoritmos são usados para aprender estatísticas intrínsecas sobre esquemas e estruturas nos dados, e são depois aplicados para tomar decisões quando aplicados a dados invisíveis.” (Khanagar et al. 2023, p.2)

Dentro das Machine Learning, existem várias aprendizagens possíveis para estas inteligências artificiais, cada uma com especificidades e objetivos diferentes (Salian, 2019):

- *Aprendizagem Supervisionada:* Neste tipo, o modelo é treinado com um conjunto de dados rotulados, onde o resultado desejado é conhecido. Como por exemplo, a classificação de radiografias como sem patologia ou com lesões endodônticas.
- *Aprendizagem Não Supervisionada:* Utilizado quando os dados de treino não são rotulados. O modelo tenta identificar padrões ou agrupamentos dentro dos dados. Assim será possível agrupar pacientes com base em características clínicas similares.
- *Aprendizagem por Reforço:* O modelo aprende através de tentativas e erros, recebendo recompensas ou penalidades da parte de um humano com base nas suas ações. Neste caso, pode, entre outros, otimizar planos de tratamento endodônticos para maximizar a eficácia e minimizar complicações.

Estes três modos de aprendizagem da inteligência artificial podem ser pertinentes no uso médico (Aminoshariae et al., 2024).

### **A.a. Deep Learning (DL)**

Deep Learning, ou Aprendizagem Profunda, é um subcampo do Machine Learning que utiliza redes neuronais artificiais para imitar a forma como o cérebro humano processa informações (Khanagar et al. 2023).

O termo "profundo" (Deep) refere-se à utilização de várias camadas de processamento, chamadas de camadas neuronais, que permitem a modelagem e a compreensão de dados complexos e não lineares. Este método tem revolucionado diversas áreas, incluindo reconhecimento de voz, visão computacional, processamento de linguagem natural e, mais recentemente, a área médica, incluindo a endodontia (Chen et al., 2022).

Para entender o Deep Learning é essencial compreender os seguintes conceitos (Antoniadis, 2024):

- O que são Redes Neuronais Artificiais? Inspiradas pelo funcionamento dos neurónios no cérebro humano, as redes neuronais artificiais consistem em unidades de processamento (neurónios) organizadas em camadas. Cada neurónio recebe entradas, realiza cálculos e passa o resultado para os neurónios da próxima camada (saídas).
- Quais são as camadas de uma Rede Neuronal? Existem três tipos principais de camadas numa rede neuronal:
  1. *Camada de Entrada*: Recebe os dados brutos que serão processados.
  2. *Camadas Ocultas*: Realizam a maior parte do processamento. O número de camadas ocultas e o número de neurónios em cada camada podem variar, definindo a profundidade e complexidade do modelo e, assim, o seu desempenho.
  3. *Camada de Saída*: Fornece o resultado final do processamento.

Para o Deep Learning funcionar corretamente, os seguintes passos são geralmente seguidos (Maetschke et al., 2019):

- *Recolha de Dados*: A qualidade e quantidade dos dados são cruciais. Em endodontia, isso pode incluir imagens de raios-X, tomografias computadorizadas, registos de tratamentos anteriores e outras informações relevantes.
- *Pré-processamento dos Dados*: Dados brutos são frequentemente ruidosos e inconsistentes. O pré-processamento pode incluir normalização, aumento de dados (data augmentation), remoção de *outliers* e preenchimento de valores ausentes.
- *Construção do Modelo*: O próximo passo é definir a arquitetura da rede neuronal, incluindo o número de camadas, o tipo de camadas (convolucionais, recorrentes, totalmente conectadas, etc.), e as funções de ativação.

- *Treino:* O modelo é treinado usando um conjunto de dados de treino. Durante o treino, o modelo ajusta os pesos das conexões para minimizar o erro entre as previsões e os valores reais. Técnicas como validação cruzada são usadas para garantir que o modelo generalize bem para novos dados.
- *Avaliação e Ajuste:* Após o treino, o modelo é avaliado com um conjunto de dados de teste. Métricas como precisão, recall, F1- score e a matriz de confusão são usadas para avaliar o desempenho. Baseado nos resultados, ajustes podem ser feitos na arquitetura ou nos hiperparâmetros do modelo.
- *Implantação:* O modelo final é implantado num ambiente clínico ou de produção, onde pode ser usado para fazer previsões ou diagnósticos em tempo real.

#### **A.a.1) Convolutional Neural Network (CNN)**

As Redes Neurais Convolucionais (CNNs) são um tipo de rede neural artificial que foram inspiradas pela estrutura e funcionamento do córtex visual dos humanos e animais. Estas redes neuronais são organizadas por "camadas" correspondentes a diferentes regiões do campo visual que se sobrepõem para obter um empilhamento em multicamadas. Esta organização permite obter uma visão global da imagem analisada (Mallishery et al., 2019).

Cada camada processa uma pequena quantidade de informações dentro de uma determinada imagem, e, no final, todas as informações recolhidas por todas as camadas são combinadas para identificar as estruturas presentes na imagem. As CNNs são amplamente utilizadas em tarefas de processamento de imagem e reconhecimento de padrões devido à sua capacidade de capturar e aprender características espaciais e hierárquicas dos dados de entrada. Estas redes têm mostrado um desempenho notável em diversas aplicações, desde a identificação de objetos em fotografias até ao diagnóstico de doenças em imagens médicas (Karobari et al., 2023).

- **Funcionamento Básico das CNNs**

O Funcionamento das CNNs pode ser basicamente resumido da seguinte maneira, em três etapas (Antoniadis, 2024):

- *Receção de Imagem:* A CNN recebe uma imagem de entrada que é, essencialmente, uma matriz de valores de pixel. Cada pixel na imagem tem um valor que

representa a sua intensidade de cor. Considerando esses valores, a CNN passa para a etapa seguinte.

○ *Extração de Características:* Através de uma série de operações matemáticas complexas, nomeadamente com o produto de convolução, a rede começa a detetar características simples como bordas, texturas e formas. Estas características são gradualmente combinadas e refinadas ao longo de várias camadas para formar representações mais complexas da imagem. Cada camada está ligada à camada anterior por redes neuronais numéricas, o que permite às CNNs aprenderem ao longo do processo de reconhecimento de estruturas, formas, etc.

○ *Classificação:* No final do processo, a rede utiliza as características extraídas para fazer previsões sobre o conteúdo da imagem. Por exemplo, num sistema de reconhecimento de objetos, a CNN pode prever se uma imagem contém um ou vários dentes, rebordo ósseo, um ou vários canais radiculares, entre outros.

- Estrutura e Componentes de uma CNN

Evitando os detalhes técnicos sobre as camadas específicas, é importante entender alguns conceitos básicos que compõem uma CNN:

CNN é uma arquitetura multicamadas onde cada camada é composta por múltiplos neurónios (módulos que processam dados informáticos), e cada neurónio numa determinada camada está conectado a todos os neurónios da camada seguinte. São capazes de modelizar funções altamente complicadas (Mallishery et al., 2019, p.1911).

Segundo Li et al. (2022), existem as seguintes camadas:

*Camadas Convolucionais:* Estas são as principais camadas de uma CNN, onde são aplicados filtros para extrair características específicas da imagem. Os filtros, são aplicados em pequenos blocos da imagem de entrada para criar mapas de características que destacam diferentes aspetos da imagem.

*Camadas de Pooling:* Estas camadas reduzem a dimensionalidade dos mapas de características, simplificando a quantidade de informações processadas pela rede e tornando o sistema mais eficiente. O pooling pode ser realizado de várias maneiras, o mais usado é o max pooling, onde apenas o valor máximo de cada bloco é retido.

*Camadas de Ativação:* Estas camadas introduzem a não-linearidade na rede, permitindo que a CNN aprenda e modele relações complexas entre as características da imagem.

*Camadas Completamente Conectadas:* No final da rede, estas camadas servem para consolidar todas as características extraídas e realizar a classificação final. Cada neurónio nesta camada está ligado a todos os neurónios da camada anterior

### **B. Sistemas Inteligentes Híbridos**

Os sistemas de inteligência artificial híbridos são uma combinação de diferentes técnicas de IA para aproveitar os pontos fortes de cada uma e superar as suas limitações individuais. Em geral, esses sistemas combinam métodos de aprendizagem de máquina (Machine Learning), aprendizagem profunda (Deep Learning) e outras abordagens de IA, como redes neuronais artificiais, algoritmos baseados em regras e modelos estatísticos. A ideia central é criar um sistema mais robusto e eficiente, capaz de lidar com uma ampla variedade de tarefas e dados complexos. Por exemplo, um sistema híbrido pode usar Machine learning para pré-processamento de dados, seguido de aprendizagem profunda para análise detalhada e tomada de decisões (Takyar, 2023).

A aplicação de sistemas híbridos é particularmente vantajosa em áreas como o diagnóstico médico, onde a precisão e a capacidade de interpretar grandes volumes de dados são cruciais. Por exemplo, na endodontia, um sistema híbrido pode utilizar algoritmos de machine learning para filtrar e normalizar imagens radiográficas, enquanto redes neurais convolucionais (CNNs) mais específicas são empregues para detetar e segmentar lesões periapicais. Além disso, modelos baseados em regras podem ser integrados para fornecer interpretações clínicas e recomendações de tratamento baseadas em padrões previamente identificados. Este método integrativo permite uma análise mais compreensiva e detalhada, reduzindo a margem de erro e melhorando a eficácia dos diagnósticos e tratamentos. Além de sua capacidade de melhorar a precisão e eficiência, os sistemas de IA híbridos também oferecem maior flexibilidade e adaptabilidade. Eles podem ser ajustados para diferentes contextos e tarefas ao combinar várias técnicas de acordo com a necessidade específica do problema. Isso é particularmente útil em ambientes clínicos dinâmicos, onde os dados podem variar significativamente de um paciente para outro. A integração de diferentes abordagens permite que o sistema se adapte rapidamente a novos dados e padrões, oferecendo uma ferramenta poderosa para suportar decisões clínicas em tempo real. Em resumo, os sistemas híbridos de IA representam um avanço significativo na capacidade de processamento e análise de dados, oferecendo soluções mais precisas, eficientes e adaptáveis em comparação com outros métodos tradicionais de IA (Usmani et al., 2024).

### **B.a. Sistemas de apoio a decisão clínica (CDSS)**

Podem ser integradas nesta revisão, os sistemas de apoio à decisão clínica (CDSS). Como demonstrado por Berge et al. (2023), estes sistemas utilizam modelos de IA para analisar dados de imagem, histórico do paciente e outras informações clínicas para gerar recomendações personalizadas de tratamento.

Estas tecnologias funcionam da seguinte maneira (Berge et al., 2023):

- Aquisição de dados: para funcionar, as CDSS devem coletar dados sobre o paciente tipo a história médica, as radiografias, as análises sanguíneas caso haja necessidade, etc.
- Integração e normalização de dados: estes dados são depois normalizados para garantir coerência e utilidade (remoção de duplicados, gestão de formatos, etc.)
- Análise dos dados por Inteligência Artificial
- Criação de recomendações específicas, que podem incluir propostas de diagnósticos baseados em sintomas e resultados de testes e análises, opções de tratamentos em função das características do paciente, alertas e recomendações sobre interações medicamentosas, reforços de seguimentos dos tratamentos.

Por exemplo, um CDSS pode utilizar modelos de Deep Learning para analisar radiografias e sugerir a melhor abordagem de tratamento com base nas características das lesões periapicais e na resposta do paciente a tratamentos anteriores.

Os CDSS são previstos para receber feedback por parte dos profissionais, o que permite melhorar as performances, ajustando os algoritmos e regras a seguir.

Estes sistemas podem ser integrados com os registos eletrónicos de saúde para fornecer uma visão holística do estado de saúde do paciente, melhorando a coordenação do cuidado e a tomada de decisões clínicas (Berge et al., 2023).

### **3. Aplicações da IA para Endodontia**

A endodontia é a especialidade da Medicina Dentária que lida com a morfologia, fisiologia e patologia da polpa dentária humana e dos tecidos periapicais. Um dos maiores desafios em endodontia é o diagnóstico preciso de patologias como infeções endodônticas, lesões periapicais, e a avaliação da complexidade anatómica dos canais radiculares. A IA pode ser usada na endodontia para detetar a anatomia radicular dos dentes, diagnosticar lesões periapicais, detetar fraturas dentarias, calcular com grande

precisão o comprimento de trabalho e prever as necessidades de retratamentos endodônticos (Karobari et al., 2023). Outros estudos demonstraram também que a IA pode ser pertinente na deteção de instrumentos fraturados dentro de canais radiculares, através do uso de radiografias (Buyuk, Alpay, Er, 2023) e também, na formação e aprendizagem de novos médicos dentistas (Aminoshariae et al., 2024).

#### **A. Deteção da anatomia radicular**

A determinação precisa da anatomia dos canais radiculares é um desafio significativo na prática clínica endodôntica, crucial para o sucesso dos tratamentos de canais. As radiografias dentárias, incluindo as radiografias periapicais, panorâmicas e imagens de tomografia computadorizada de feixe cónico (CBCT), são amplamente utilizadas para visualizar a estrutura interna dos dentes. No entanto, a interpretação dessas imagens pode ser complexa e sujeita a variabilidade entre os diferentes profissionais. As inteligências artificiais (IA), especialmente através de técnicas de Machine Learning, Deep Learning, Convolutional Neural Networks (CNNs) ou sistemas híbridos, têm mostrado grande potencial para melhorar a precisão e a eficiência na identificação da anatomia dos canais radiculares. Como já foi mencionado anteriormente nesta revisão narrativa, os modelos de inteligência artificial aplicados à endodontia utilizam algoritmos que aprendem a partir de dados radiográficos etiquetados para prever a morfologia dos canais radiculares. Esses modelos podem analisar um grande número de imagens e identificar padrões de diferentes tipos de canais radiculares. Por exemplo, técnicas como Machine Learning, Deep Learning ou CNNs, têm sido usadas para classificar a anatomia dos canais com base em características extraídas das imagens. Estes modelos são treinados com conjuntos de dados previamente definidos por especialistas, permitindo-lhes aprender a distinguir as diferentes formas e ramificações dos canais radiculares (Fan et al., 2023).

Os modelos de IA também são utilizados para prever a morfologia dos canais radiculares em casos complexos onde a anatomia é altamente variável. Os modelos de aprendizagem supervisionada, que incluem técnicas de regressão e classificação feitas pelos médicos dentistas, são treinados com dados de imagem previamente anotados para prever a presença de canais adicionais, curvaturas e outras variabilidades anatómicas. Por exemplo, um modelo pode ser treinado para prever a probabilidade de um dente ter um canal curvo em forma de "C" com base nas características observadas noutras radiografias (Ramezanzade et al., 2022). Estes modelos podem fornecer uma segunda opinião valiosa

para os endodontistas, aumentando a confiança e segurança no diagnóstico e no planeamento do tratamento.

A aplicação de Deep Learning, em particular através de redes neuronais convolucionais (CNNs), tem revolucionado a análise de imagens médicas, incluindo as radiografias dentárias. Os métodos baseados em Convolutional Neural Networks têm sido eficazes na segmentação automática dos canais radiculares em imagens radiográficas. As técnicas de segmentação de imagens desempenham um papel crucial na determinação da anatomia dos canais radiculares. A segmentação precisa permite a visualização clara das diferentes partes do canal, facilitando o planeamento do tratamento. Estes modelos de CNNs são treinados para delimitar os contornos dos canais, identificando regiões de interesse com alta precisão. A segmentação automatizada não só melhora a precisão diagnóstica, mas também reduz o tempo necessário para a análise manual das imagens, permitindo uma resposta mais rápida no ambiente clínico. As CNNs são especialmente adequadas para o processamento de dados de imagem devido à sua capacidade de extrair automaticamente características relevantes sobre a anatomia dentária sem necessidade de intervenção manual. Em estudos recentes, CNNs foram treinadas para segmentar e classificar a morfologia dos canais radiculares com alta precisão sobre 433 CBCT de maneira mais rápida do que especialistas qualificados e com precisão similar (Lahoud et al., 2021).

Alguns modelos têm sido usados para identificar a presença de canais adicionais, bifurcações e outras características anatómicas difíceis de detetar, com uma precisão que muitas vezes supera a dos médicos dentistas (Umer & Habib, 2022). Estes modelos podem analisar radiografias panorâmicas e CBCT, fornecendo segmentações precisas e detalhadas dos canais.

Além das CNNs, as redes neuronais recorrentes (RNNs) e as suas variantes, como Long Short-Term Memory (LSTM), também têm sido exploradas para a análise sequencial de imagens radiográficas. Estas redes são capazes de considerar a sequência e a continuidade das imagens, o que é particularmente útil na análise de séries de imagens CBCT, onde a estrutura tridimensional do canal radicular pode ser melhor compreendida através da análise de múltiplas fatias de imagem. De facto, as CNNs conseguem muito bem realizar ligações entre cada área segmentada de uma mesma imagem, e identificar objetos nesta; ou seja, identificar estruturas num mesmo plano bidimensional, mas não em três dimensões. Enquanto as RNNs podem perceber e seguir o deslocamento de imagens sobre

uma mesma estrutura em três dimensões. As RNNs são assim muito mais eficazes na análise de dados videográficos em comparação com as CNNs. A integração de RNNs com CNNs resulta em modelos híbridos que podem oferecer uma análise mais robusta e precisa da morfologia dos canais radiculares sobre suportes radiográficos mais variados, incluindo scanners CBCT (Fan et al., 2023).

### **B. Diagnóstico de lesões periapicais**

A deteção de lesões periapicais é uma parte fundamental do diagnóstico endodôntico, crucial para o planeamento e sucesso do tratamento endodôntico. As lesões periapicais, que podem ser classificadas em 90% dos casos como granulomas, quistos e abscessos segundo (Khanagar et al. 2023); são normalmente diagnosticadas através de radiografias dentárias, como radiografias periapicais, panorâmicas e imagens de tomografia computadorizada de feixe cónico (CBCT). A interpretação dessas imagens pode ser complexa para especialistas e sujeita a erros humanos (Aminoshariae, Kulild, Nagendrababu, 2021).

As tecnologias de inteligência artificial (IA), incluindo Machine Learning, Deep Learning e Convolutional Neural Networks (CNNs), têm demonstrado um potencial significativo para melhorar a precisão e a eficiência na deteção de lesões periapicais. A Inteligência Artificial é uma ferramenta útil para os médicos dentistas, pois foi demonstrado que o uso da IA pode ajudar os médicos dentistas a detetar lesões periapicais com maior precisão e eficácia (Hamdan et al., 2022).

As CNNs são particularmente eficazes na deteção de lesões periapicais em radiografias dentárias, pois podem processar informações visuais complexas e identificar padrões subtis que podem ser difíceis de detetar por observadores humanos. Num estudo, um modelo CNN/RNN treinado com imagens CBCT conseguiu detetar lesões periapicais com uma precisão que superou a dos radiologistas experientes. Modelos como Deep Learning e CNNs têm sido usados para segmentar automaticamente as lesões periapicais em imagens radiográficas, proporcionando diagnósticos mais rápidos e precisos do que especialistas (Aminoshariae, Kulild, Nagendrababu, 2021).

Noutra tentativa de avaliar um método de CNN para detetar patologias apicais com CBCT, foram incluídas 153 lesões periapicais obtidas de 109 pacientes, e o sistema de IA foi capaz de detetar 92,8% (142/153) das lesões periapicais (Hamdan et al., 2022).

A literatura tem mostrado algum potencial para que os algoritmos de IA se aprofundem mais nos dados para introduzir escalas para detetar o tamanho da radiolucidez periapical, em vez de apenas relatar a presença ou ausência de radiolucidez (Ramezanzade et al., 2023).

### **C. Detecção de fraturas e fissuras radiculares**

As fraturas radiculares, quer ocorram antes ou depois de um tratamento endodôntico, apresentam riscos significativos para a saúde dentária. Embora pouco comuns, as fraturas radiculares verticais (VRFs) são uma ocorrência mais comum em dentes tratados endodonticamente. Estudos indicam que as VRFs são encontradas em 3,7%–30,8% dos dentes que receberam terapia endodôntica e podem causar insucesso do tratamento endodôntico não cirúrgico (TENC) (Gehlot et al., 2023).

Quando uma fratura radicular ocorre num dente que já foi tratado endodonticamente, há um alto risco de insucesso do tratamento. As fraturas criam vias de infiltração bacteriana, o que pode levar a infeções recorrentes ou persistentes. Isso compromete a eficácia da obturação do canal radicular e pode necessitar de intervenções adicionais, como um retratamento endodôntico. Fraturas dentárias causam perda de estabilidade dentária, pois, uma fratura radicular enfraquece a estrutura do dente, reduzindo a sua capacidade de suportar as forças que ocorrem durante as funções do sistema estomatognático. Isso pode complicar o prognóstico do dente e nos casos mais graves, pode ser necessária realizar extração da peça dentária (Khanagar et al., 2023).

Alem disso, complicações periapicais e periodontais podem ocorrer. As fraturas radiculares podem estender-se além da raiz e afetar os tecidos periapicais e periodontais. Isso pode causar lesões ósseas, abscessos periapicais e perda óssea ao redor do dente fraturado. Os tecidos gengivais e periodontais também podem ser envolvidos, resultando em bolsas periodontais profundas e infeções persistentes, tornando o tratamento endodôntico mais complexo, e às vezes impossível (Bonfanti-Gris et al., 2022).

As fraturas radiculares são frequentemente difíceis de diagnosticar, especialmente em radiografias convencionais. Isso pode comprometer o diagnóstico e o tratamento apropriado, exacerbando as complicações associadas. É essencial identificar e atuar rapidamente para minimizar os riscos e preservar a saúde dentária a longo prazo. Tecnologias avançadas, como a tomografia computadorizada de feixe cónico (CBCT), são frequentemente necessárias para visualizar corretamente as fraturas, mas a sua leitura

parece às vezes complicada. Determinar VRFs em radiografias é difícil e pode necessitar do uso de tecnologias mais avançadas (Gehlot et al., 2023).

Estas fraturas muitas vezes passam despercebidas pelos clínicos e, na maioria dos casos, só são consideradas quando ocorrem mudanças periapicais significativas, resultando, em última análise, num atraso no diagnóstico e tratamento. Para aumentar a eficiência diagnóstica dos clínicos, modelos de IA têm sido aplicados para auxiliar no diagnóstico precoce de fissuras e fraturas dentárias. (Khanagar et al., 2023, p.13)

#### **D. Avaliação da qualidade de tratamentos endodônticos**

Os sistemas de inteligência artificial (IA) podem avaliar a qualidade de um tratamento endodôntico analisando vários parâmetros clínicos e radiográficos. Utilizando algoritmos de machine learning e, da mesma maneira que para identificar a anatomia canal ou lesões periapicais, a IA pode examinar radiografias pós-operatórias para avaliar a densidade e a homogeneidade do preenchimento do canal radicular. Uma obturação densa e homogênea é essencial para prevenir a reinfeção e assegurar o sucesso ao longo prazo do tratamento. Os algoritmos podem detetar áreas de sub obturação ou sobre obturação, assim como a presença de vazios ou microfissuras, de bolhas de ar no canal, fornecendo assim uma avaliação objetiva e valiosa da qualidade do tratamento. Além disso, os sistemas de IA podem integrar dados sobre os fatores de risco que podem comprometer a qualidade do tratamento endodôntico. Esses fatores incluem variáveis como a anatomia complexa dos canais radiculares, a presença de fissuras ou fraturas radiculares, a idade do paciente e a sua história médica. Ao combinar esses dados com as características clínicas e radiográficas, os modelos de predição baseados em IA podem estimar o risco de complicações futuras, como reinfeções ou insucessos no tratamento, baseando-se sobre casos clínicos passados similares. Esta abordagem permite aos clínicos identificar os pacientes de alto risco e tomar medidas preventivas para melhorar os resultados do tratamento (Aminoshariae, Kulild, Nagendrababu, 2021)

IA também pode prever a duração de um tratamento endodôntico com base nos materiais utilizados e nas técnicas realizadas. Por exemplo, os modelos de IA podem avaliar a eficácia de diferentes materiais de obturação do canal, como a guta-percha, os cimentos endodônticos e as resinas, com base nas suas propriedades físicas e químicas. Ao analisar os dados de tratamentos anteriores, a IA pode identificar as combinações de materiais e técnicas que demonstraram o melhor desempenho a longo prazo. Além disso, a IA pode

monitorizar a evolução dos tratamentos ao longo do tempo, detetando sinais precoces de degradação ou complicações, permitindo uma intervenção rápida para aumentar a taxa de sucesso dos tratamentos endodônticos (Asiri & Altuwalah, 2022).

#### **E. Determinação do comprimento de trabalho e localização do ápice radicular**

O comprimento de trabalho é, por definição, a distância desde uma referência coronal estável até ao ponto em que a instrumentação e a obturação do canal devem terminar, a constrição apical. A localização precisa da constrição apical é essencial para evitar lesões nos tecidos periapicais e garantir a obturação completa do canal. A IA auxilia nesta tarefa através da análise de imagens digitais de alta resolução. Para determinar esta medida com precisão, a IA utiliza algoritmos avançados de análise de imagem que processam radiografias ou tomografias computadorizadas de feixe cónico (CBCT). Estes algoritmos são treinados com milhares de imagens para reconhecer estruturas anatómicas e identificar pontos de referência críticos. Com base nesses pontos de referência, a IA pode calcular com precisão o comprimento de trabalho, minimizando o risco de erros humanos que poderiam resultar em subobturação, sobreobturação ou perfuração radicular (Khanagar et al., 2023).

Utilizando redes neuronais convolucionais (CNNs), a IA pode identificar a constrição apical com grande precisão, mesmo em casos onde a anatomia é complexa ou o ápice não é claramente visível. Estas redes neuronais são capazes de distinguir entre diferentes densidades de tecido e identificar a junção cimento-dentina, que é crucial para determinar o correto comprimento de trabalho. Segundo Ramezanzade et al., (2023) o modelo de IA demonstrou uma precisão de 96% contra 76% em comparação com endodontistas experientes.

#### **F. Detecção de instrumentos fraturados**

O artigo de Buyuk, Alpay, Er, (2023) intitulado "Detection of the separated root canal instrument on panoramic radiograph: a comparison of LSTM and CNN deep learning methods" explora a eficácia de dois métodos de aprendizagem profunda na deteção de instrumentos de canal radicular fraturados e visualizados através de radiografias panorâmicas. Este estudo é significativo, pois a separação de instrumentos durante procedimentos endodônticos é uma complicação comum que pode comprometer o tratamento. A capacidade de detetar rapidamente e com precisão esses fragmentos é

crucial para a tomada de decisões clínicas subsequentes. O estudo revela que as CNNs demonstraram uma alta precisão na detecção de instrumentos fraturados, utilizando uma grande base de dados de imagens para treinar o modelo. Segundo os autores, as CNNs mostraram uma precisão de detecção significativamente maior em comparação com outros métodos tradicionais de análise de imagem.

Por um outro lado, os modelos LSTM (Long Short Term Memory), que são geralmente usados para dados sequenciais, também foram testados. Embora as LSTM sejam menos comuns na análise de imagens, elas foram incluídas para avaliar a sua capacidade de capturar padrões temporais ou sequenciais que poderiam ser relevantes na interpretação de uma série de imagens de radiografias panorâmicas. No entanto, como destacado no estudo, os modelos LSTM não superaram as CNNs em termos de precisão e robustez na detecção de instrumentos separados (Buyuk, Alpay, Er, 2023).

A aplicação de métodos de aprendizagem profunda na detecção de complicações endodônticas ligadas a instrumentos fraturados tem implicações significativas para a prática clínica. A precisão aperfeiçoada na detecção de instrumentos fraturados pode levar a uma intervenção mais rápida e eficaz, melhorando os resultados do tratamento para os pacientes. Como afirmam os autores, a adoção de técnicas de IA pode reduzir significativamente o tempo necessário para fazer o diagnóstico e aumentar a precisão, proporcionando um cuidado melhor e mais rápido aos pacientes (Buyuk, Alpay, Er, 2023).

O estudo também sugere direções futuras para a pesquisa, incluindo a integração de múltiplas modalidades de imagem e a expansão da base de dados de treino para incluir uma maior diversidade de casos clínicos. Explorar a combinação de diferentes técnicas de aprendizagem profunda pode potencialmente melhorar ainda mais a precisão e a robustez dos sistemas de detecção (Buyuk, Alpay, Er, 2023). Portanto, a continuação desta linha de investigação é essencial para a evolução das ferramentas de diagnóstico assistidas por IA na endodontia.

### **G. Prever sucesso terapêutico e retratamentos**

Em termos de eficácia geral dos tratamentos endodônticos, como mencionado por Karobari et al. (2023), o tratamento endodôntico é bem-sucedido 90% das vezes, com uma taxa de insucesso de 10%. Portanto, a habilidade de usar métodos de IA para analisar e detetar casos que pertencem a esses 10% de falhas é extremamente valiosa para os

médicos dentistas. Esses métodos ajudam a decidir se a extração dentária ou o retratamento endodôntico é a melhor opção, baseando-se em dados detalhados e análises preditivas (Karobari et al., 2023).

A aplicação da IA envolve a análise de um conjunto abrangente de variáveis clínicas e de risco estabelecidos, tais como a complexidade anatômica do sistema de canais radiculares, o histórico de tratamentos anteriores, a presença de infecções persistentes, a condição geral da saúde do paciente, entre outros, como já foram discutidos anteriormente nesta revisão. Estudos mostraram que "ao ordenar as variáveis estabelecidas e de alto risco, foi possível prever que em 84,4% dos casos, o retratamento deveria ser realizado porque a probabilidade de sucesso parecia alta" (Ramezanzade et al., 2023). Isso indica que a IA pode avaliar de maneira bastante eficaz os casos nos quais o retratamento endodôntico é a opção mais viável, potencialmente economizando tempo e recursos, além de melhorar a taxa de sucesso dos procedimentos endodônticos.

Contudo, é essencial reconhecer que a literatura atual sobre esta aplicação da IA é inconclusiva. Isso significa que, embora os resultados iniciais sejam promissores, ainda há a necessidade de mais pesquisas e validações clínicas para melhorar a confiança nesses sistemas. A integração da IA na prática endodôntica deve ser feita de maneira criteriosa, com monitoramento contínuo e ajustes baseados em novas evidências e estudos. Somente assim será possível alargar as bases de dados com informações e dados cada vez mais específicas e pertinentes, e então garantir que as decisões apoiadas por IA sejam cada vez mais robustas, confiáveis e realmente benéficas para os pacientes e especialistas a longo prazo (Ramezanzade et al., 2023).

#### **H. Apoiar a formação de novos especialistas**

A inteligência artificial (IA) tem o potencial de transformar significativamente a formação de novos especialistas em endodontia, proporcionando ferramentas avançadas que facilitam o ensino e a prática clínica. A integração da IA no processo educacional pode melhorar a compreensão anatômica dos canais radiculares e aperfeiçoar as competências técnicas dos estudantes, resultando em profissionais mais bem preparados para enfrentar os desafios clínicos. A aplicação da IA na determinação da anatomia dos canais radiculares também tem um impacto significativo na educação e formação de novos profissionais (Aminoshariae et al., 2024).

As plataformas de formação baseadas em IA podem simular uma vasta gama de casos clínicos, oferecendo aos estudantes a oportunidade de praticar e aperfeiçoar as suas competências técnicas num ambiente controlado. Os modelos de IA podem fornecer feedback imediato e detalhado sobre a precisão das suas interpretações de imagens e decisões de tratamento, ajudando a acelerar a aprendizagem e a melhorar a competência clínica dos futuros médicos dentistas (Agrawal & Nikhade, 2022).

Além disso, a IA pode ser usada para criar bancos de dados extensivos de casos clínicos, que incluem uma variedade de condições e complicações endodônticas. Estes bancos de dados podem ser utilizados para treinar modelos de IA a fim de reconhecer padrões e prever resultados de tratamentos. Quando integrados nas plataformas de ensino, estes modelos podem ajudar os estudantes a compreender melhor as nuances dos diagnósticos e as opções de tratamento, baseando-se em dados reais e experiências clínicas. Outro benefício significativo da IA na formação endodôntica é a sua capacidade de personalizar o ensino. A IA pode analisar o desempenho de cada estudante, identificar áreas de fraqueza e sugerir recursos específicos ou exercícios para abordar essas deficiências. Esta abordagem personalizada garante que cada estudante receba o apoio necessário para atingir a competência clínica, independentemente do seu ritmo de aprendizagem (Agrawal & Nikhade, 2022).

A utilização de IA também facilita a realização de avaliações mais objetivas e detalhadas. Tradicionalmente, a avaliação das competências clínicas pode ser subjetiva e variada entre os avaliadores. Com a IA, é possível padronizar o processo de avaliação, utilizando métricas claras e consistentes para medir o desempenho dos estudantes. Isto não só aumenta a transparência do processo avaliativo, mas também assegura que todos os estudantes sejam avaliados de forma justa e precisa. Esta revolução tecnológica na educação não só beneficia os estudantes, mas também eleva o padrão geral da prática endodôntica (Aminoshariae et al., 2024).

### III. DISCUSSÃO

A aplicação da inteligência artificial (IA) na endodontia representa uma revolução notável, transformando a prática clínica ao oferecer diagnósticos mais precisos, tratamentos personalizados e uma gestão aprimorada dos cuidados aos pacientes. Diversos estudos demonstram os benefícios significativos da IA na endodontia, destacando-se pela capacidade de melhorar a precisão diagnóstica e otimizar os resultados dos tratamentos.

Em primeiro lugar, a IA tem mostrado uma precisão excepcional na análise de imagens radiográficas para detetar e diagnosticar lesões periapicais. Segundo Khanagar et al. (2023), os modelos de IA, incluindo redes neurais convolucionais (CNNs), têm demonstrado uma capacidade superior na identificação de lesões periapicais, frequentemente superando a precisão de especialistas humanos. Estas tecnologias utilizam grandes volumes de dados para treinar os algoritmos, melhorando continuamente a sua capacidade de deteção e diagnóstico.

Além disso, a IA tem sido aplicada com sucesso na determinação da anatomia dos canais radiculares. Modelos de aprendizagem profunda são capazes de segmentar e classificar a morfologia dos canais radiculares com alta precisão, como mencionado por Fan et al. (2023). Esta capacidade de análise detalhada permite uma melhor visualização e compreensão das estruturas internas dos dentes, facilitando o planeamento e a execução dos tratamentos endodônticos.

A deteção de fraturas dentárias, particularmente as fraturas radiculares verticais (VRFs), é um desafio significativo na endodontia, com implicações importantes para a saúde dentária. Gehlot et al. (2023) destacam que a identificação precoce dessas fraturas é essencial para prevenir complicações graves e garantir o sucesso do tratamento. Tecnologias avançadas como a tomografia computadorizada de feixe cónico (CBCT) são frequentemente necessárias para visualizar corretamente as fraturas, mas a leitura dessas imagens pode ser complexa. Bonfanti-Gris et al. (2022) acrescentam que a inteligência artificial tem demonstrado um grande potencial na deteção automática de fraturas dentárias, proporcionando uma análise mais precisa e eficiente das imagens radiográficas. Os modelos de IA podem identificar fraturas radiculares com uma precisão superior, permitindo intervenções clínicas mais rápidas e eficazes, melhorando assim os resultados dos tratamentos endodônticos.

A determinação precisa do comprimento de trabalho é essencial na endodontia para evitar lesões nos tecidos periapicais e garantir uma obturação completa e eficaz do canal radicular. A inteligência artificial tem demonstrado ser uma ferramenta valiosa nesse processo, utilizando algoritmos avançados de análise de imagem para determinar com precisão essa medida crucial. Modelos de IA, incluindo redes neuronais convolucionais (CNNs), são treinados com milhares de imagens para reconhecer estruturas anatómicas e identificar pontos de referência críticos, como a constrição apical. Segundo Ramezanzade et al. (2023), a IA pode identificar a constrição apical e o ápice do dente com uma precisão de 96%, contra 76% para os endodontistas, destacando a eficácia dos modelos de IA em comparação com métodos tradicionais. Esta capacidade de precisão e consistência na determinação do comprimento de trabalho não só melhora a qualidade dos tratamentos endodônticos, mas também minimiza os riscos de erros humanos, promovendo resultados mais previsíveis e confiáveis nos procedimentos clínicos (Ramezanzade et al., 2023).

Outro aspeto notável é a utilização da IA para prever o sucesso terapêutico e a necessidade de retratamentos endodônticos. Karobari et al. (2023) destacam que a análise preditiva baseada em IA pode identificar fatores de risco e prever os resultados dos tratamentos, permitindo intervenções mais informadas e personalizadas. Isso não apenas melhora a taxa de sucesso dos tratamentos, mas também ajuda a evitar complicações futuras.

Adicionalmente, a IA tem o potencial de automatizar a deteção de instrumentos fraturados em radiografias panorâmicas, uma complicação comum em procedimentos endodônticos. Buyuk et al. (2023) demonstraram que os modelos de CNN são altamente eficazes na identificação de fragmentos de instrumentos, proporcionando diagnósticos rápidos e precisos, e facilitando a intervenção clínica imediata.

A IA também desempenha um papel crucial na formação de novos especialistas em endodontia. Plataformas de ensino baseadas em IA oferecem simulações de casos clínicos variados, proporcionando aos estudantes uma oportunidade de praticar e aperfeiçoar suas habilidades em um ambiente controlado. Além disso, como destacado por Aminoshariae et al. (2024), a IA fornece feedback detalhado e personalizado, acelerando o processo de aprendizagem e melhorando a competência clínica dos futuros profissionais.

A aplicação da inteligência artificial (IA) na endodontia tem mostrado um potencial significativo para transformar a prática clínica, oferecendo diagnósticos mais precisos, tratamentos personalizados e uma melhor gestão dos cuidados dos pacientes.

No entanto, apesar das vantagens promissoras discutidos acima, é fundamental discutir as várias limitações e desafios associados à sua implementação na prática clínica da endodontia.

A fiabilidade e a performance dos softwares de IA são fundamentais para a sua aceitação e uso generalizado na endodontia. Os algoritmos devem ser capazes de fornecer resultados precisos e consistentes numa variedade de situações clínicas. No entanto, a performance dos modelos de IA pode ser afetada por vários fatores, incluindo a qualidade dos dados de treino entradas no software por humanos, a variabilidade dos dados clínicos e as atualizações dos algoritmos, como discutido por Khanagar et al. (2023).

Segundo Umer & Habib (2022), as capacidades de precisão dos softwares de IA superam a precisão dos médicos especialistas, será necessário um monitoramento contínuo e ajustes regulares para manter a eficácia e a precisão dos sistemas de IA. Além disso, a transparência dos criadores de softwares nos processos de desenvolvimento e validação dos algoritmos é crucial para construir a confiança nestes. No entanto, para balancear o risco de viés com a implementação humana de dados de referência nos softwares, pode ser preferencial o uso de ferramentas de IA tipo self-supervised learning, active learning, ou tecnologias similares, que não precisam da intervenção humana nas bases de dados (Aminoshariae et al., 2024).

A utilização de IA na endodontia envolve a coleta e análise de grandes volumes de dados pessoais dos pacientes, incluindo imagens radiográficas e históricos clínicos. A confidencialidade e a segurança desses dados são preocupações primordiais. Como foi mencionado por Aminoshariae et al. (2024), os sistemas de IA precisam garantir que os dados dos pacientes estejam protegidos contra acessos não autorizados e violações de privacidade. Implementar medidas robustas de segurança cibernética é essencial para proteger as informações sensíveis dos pacientes e manter a confiança pública nos sistemas de saúde digital, aos níveis nacional, europeu e mundial (Gribble, 2022).

A integração da IA na endodontia pode ser bastante dispendiosa. Os custos incluem a aquisição de hardware e software avançados, manutenção, atualizações contínuas e a formação necessária para os profissionais de saúde. Pequenas clínicas dentárias podem achar difícil justificar o investimento inicial sem um retorno claro e imediato sobre o investimento. Além disso, a manutenção e atualização contínua dos sistemas de IA para garantir a sua eficácia também podem ser financeiramente desafiadoras. É importante que

os desenvolvedores de tecnologia e as autoridades de saúde trabalhem juntos para encontrar maneiras de tornar essas tecnologias mais acessíveis e economicamente viáveis para todos os endodontistas (Gehlot et al., 2023).

A implementação eficaz da IA na endodontia exige que os profissionais de saúde estejam devidamente formados para usar essas novas ferramentas. Isso inclui não apenas a compreensão técnica de como operar os sistemas de IA, mas também a capacidade de interpretar corretamente os dados gerados e integrá-los na prática clínica diária. A falta de formação adequada pode levar a um uso indevido ou ineficaz da tecnologia, potencialmente comprometendo os cuidados aos pacientes. Programas de formação contínua e currículos atualizados nas escolas de medicina dentária são essenciais para preparar os novos profissionais para esta realidade tecnológica (Aminoshariae et al., 2024).

Os algoritmos de IA são tão bons quanto os dados nos quais são treinados. Estudos que utilizam amostras não representativas podem introduzir vieses nos resultados, resultando em diagnósticos e tratamentos menos precisos para certas populações. É crucial que os estudos de desenvolvimento sobre a relação entre a IA e a endodontia incluam dados de uma ampla variedade de populações para garantir que os resultados demonstrados sejam representadores das populações gerais, e assim que os modelos sejam aplicáveis e eficazes em contextos diversos (Ahmed et al., 2021).

Embora a IA possa fornecer suporte valioso aos profissionais de saúde, há um risco de que os clínicos se tornem excessivamente dependentes dessas tecnologias. Confiar cegamente nos resultados gerados pela IA sem uma avaliação crítica pode levar a erros e decisões clínicas inadequadas. É essencial que os médicos dentistas mantenham e desenvolvam as suas capacidades clínicas e julgamento profissional, usando a IA como uma ferramenta complementar em vez de um substituto para a sua experiência. A formação deve enfatizar a importância de integrar a análise crítica e o discernimento humano com as capacidades avançadas da IA (Chen et al., 2022).

A IA nunca poderá substituir a relação entre o médico dentista e o seu paciente. A relação de confiança que existe entre estes dois seres humanos é única e uma IA não poderá recriar esta relação. De facto, a IA não poderá ter empatia nem qualquer emoção, e assim a sua maneira de criar os planos de tratamentos será unicamente baseados em dados (Fatima et al., 2022).

Em suma, a aplicação da inteligência artificial na endodontia oferece inúmeras oportunidades para melhorar a prática clínica dos profissionais de saúde, mas também apresenta vários desafios e limitações que devem ser abordados em estudos futuros. A confidencialidade e segurança dos dados, os custos financeiros, a necessidade de formação especializada e adaptada ao uso da IA, a representatividade dos estudos, o risco de dependência e a fiabilidade dos softwares são todos fatores críticos que influenciam a eficácia e a adoção destas tecnologias. Abordar essas questões de maneira proativa e colaborativa entre os envolvidos no desenvolvimento da tecnologia, profissionais de saúde e legisladores é essencial para maximizar os benefícios da IA na endodontia e garantir que todos os pacientes possam usufruir de cuidados de saúde de alta qualidade (Aminoshariae et al., 2024).



#### **IV. CONCLUSÃO**

A implementação da inteligência artificial ao serviço da endodontia é efetivamente uma verdadeira revolução. Mesmo que o potencial de evolução desta tecnologia ainda esteja no início do seu crescimento, a inteligência artificial já oferece um grande painel de possibilidades no auxílio dos profissionais da endodontia.

Neste momento espera-se que a Inteligência Artificial possa ser o mais brevemente possível usada como ferramenta indispensável na prática clínica da endodontia, embora conscientes de todas as limitações que este tipo de inovação tecnológica ainda acarreta.

Será interessante tentar resolver todas as problemáticas maiores ligadas ao uso da inteligência artificial em endodontia no futuro, e os trabalhos científicos seguintes deverão analisar os limites desta área tecnológica para tentar resolver as restrições ligadas à problemática da adaptação da Inteligência Artificial no ambiente clínico.

No entanto, é importante sublinhar que a inteligência artificial nunca substituirá um especialista em endodontia. O seu papel principal será sempre o de fornecer uma ajuda adicional no diagnóstico e na planificação dos tratamentos, complementando a expertise e o julgamento clínico dos profissionais de saúde. Desta forma, a combinação das capacidades humanas com a precisão tecnológica poderá proporcionar resultados otimizados para os pacientes.



## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Agrawal, P., & Nikhade, P. (2022). Artificial Intelligence in Dentistry : Past, Present, and Future. *Curēus*. <https://doi.org/10.7759/cureus.27405>
- Ahmed, N., Abbasi, M. S., Zuberi, F., Qamar, W., Halim, M. S. B., Maqsood, A., & Alam, M. K. (2021). Artificial Intelligence Techniques : Analysis, Application, and Outcome in Dentistry—A Systematic Review. *BioMed Research International*, 2021, 1-15. <https://doi.org/10.1155/2021/9751564>
- Ahmed, W. M., Azhari, A. A., Fawaz, K. A., Ahmed, H. M., Alsadah, Z. M., Majumdar, A., & Carvalho, R. M. (2023). Artificial intelligence in the detection and classification of dental caries. *The Journal Of Prosthetic Dentistry/The Journal Of Prosthetic Dentistry*. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2023.07.013>
- American Association of Endodontists. (2024). *What is a Root Canal ? - American Association of Endodontists*. American Association Of Endodontists. <https://www.aae.org/patients/root-canal-treatment/what-is-a-root-canal/>
- Aminoshariae, A., Kulild, J., & Nagendrababu, V. (2021). Artificial Intelligence in Endodontics : Current Applications and Future Directions. *Journal Of Endodontics*, 47(9), 1352-1357. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2021.06.003>
- Aminoshariae, A., Nosrat, A., Nagendrababu, V., Dianat, O., Mohammad-Rahimi, H., O'Keefe, A. W., & Setzer, F. C. (2024). Artificial Intelligence in Endodontic Education. *Journal Of Endodontics*. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2024.02.011>
- Antoniadis, P. (2024). *Hidden Layers in a Neural Network | Baeldung on Computer Science*. Baeldung On Computer Science. <https://www.baeldung.com/cs/hidden-layers-neural-network>
- Asiri, A. F., & Altuwalah, A. S. (2022). The role of neural artificial intelligence for diagnosis and treatment planning in endodontics : A qualitative review. *The Saudi Dental Journal*, 34(4), 270-281. <https://doi.org/10.1016/j.sdentj.2022.04.004>
- Barhum, L. (2024). *Tooth Abscess : Everything You Need to Know*. Verywell Health. <https://www.verywellhealth.com/tooth-abscess-8661242>
- Berge, G. T., Granmo, O. C., Tveit, T. O., Munkvold, B. E., Ruthjersen, A. L., & Sharma, J. (2023). Machine learning-driven clinical decision support system for concept-based searching : a field trial in a Norwegian hospital. *BMC Medical Informatics And Decision Making*, 23(1). <https://doi.org/10.1186/s12911-023-02101-x>
- Bonfanti-Gris, M., Garcia-Cañas, A., Alonso-Calvo, R., Rodriguez-Manzaneque, M. P. S., & Ramiro, G. P. (2022). Evaluation of an Artificial Intelligence web-based software to detect and classify dental structures and treatments in panoramic radiographs. *Journal Of Dentistry*, 126, Artigo 104301. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2022.104301>
- Buyuk, C., Alpay, B. A., & Er, F. (2023). Detection of the separated root canal instrument on panoramic radiograph : a comparison of LSTM and CNN deep learning methods. *Dento-maxillo-facial Radiology/Dentomaxillofacial Radiology*, 52(3). <https://doi.org/10.1259/dmfr.20220209>

- Chang, W., Huang, H., Lee, T., Sung, T., Yang, C., & Kuo, Y. (2024). Predicting root fracture after root canal treatment and crown installation using deep learning. *Journal Of Dental Sciences*, 19(1), 587-593. <https://doi.org/10.1016/j.jds.2023.10.019>
- Chen, X., Guo, J., Ye, J., Zhang, M., & Liang, Y. (2022). Detection of Proximal Caries Lesions on Bitewing Radiographs Using Deep Learning Method. *Caries Research*, 56(5-6), 455-463. <https://doi.org/10.1159/000527418>
- Chen, X., Wang, X., Zhang, K., Fung, K., Thai, T. C., Moore, K., Mannel, R. S., Liu, H., Zheng, B., & Qiu, Y. (2022). Recent advances and clinical applications of deep learning in medical image analysis. *Medical Image Analysis*, 79, 102444. <https://doi.org/10.1016/j.media.2022.102444>
- Ekert, T., Krois, J., Meinhold, L., Elhennawy, K., Emara, R., Golla, T., & Schwendicke, F. (2019). Deep Learning for the Radiographic Detection of Apical Lesions. *Journal Of Endodontics*, 45(7), pp. 917-922. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2019.03.016>
- Fan, W., Zhang, J., Wang, N., Li, J., & Hu, L. (2023). The Application of Deep Learning on CBCT in Dentistry. *Diagnostics*, 13(12), p. 2056. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13122056>
- Fatima, A., Shafi, I., Afzal, H., De la Torre Díez, I., Lourdes, D. R. M., Breñosa, J., Espinosa, J. C. M., & Ashraf, I. (2022). Advancements in Dentistry with Artificial Intelligence : Current Clinical Applications and Future Perspectives. *Healthcare*, 10(11), Artigo 2188. <https://doi.org/10.3390/healthcare10112188>
- Gehlot, P., Sudeep, P., Murali, B., & Mariswamy, A. (2023). Artificial intelligence in endodontics : A narrative review. *Journal Of International Oral Health*, 15(2), 134. [https://doi.org/10.4103/jioh.jioh\\_257\\_22](https://doi.org/10.4103/jioh.jioh_257_22)
- Gribble, L. (2022). Dental Tribune International. Ethical guidelines missing in field of dentistry and AI. *Dental Tribune International*. <https://www.dental-tribune.com/news/ethical-guidelines-missing-in-field-of-dentistry-and-ai-researchers-say/>
- Hamdan, M. H., Tuzova, L., Mol, A., Tawil, P. Z., Tuzoff, D., & Tyndall, D. A. (2022). The effect of a deep-learning tool on dentists' performances in detecting apical radiolucencies on periapical radiographs. *Dento-maxillo-facial Radiology/Dentomaxillofacial Radiology*, 51(7). <https://doi.org/10.1259/dmfr.20220122>
- Hiraiwa, T., Arijji, Y., Fukuda, M., Kise, Y., Nakata, K., Katsumata, A., Fujita, H., & Arijji, E. (2019). A deep-learning artificial intelligence system for assessment of root morphology of the mandibular first molar on panoramic radiography. *Dento-maxillo-facial Radiology/Dentomaxillofacial Radiology*, 48(3), Artigo 20180218. <https://doi.org/10.1259/dmfr.20180218>
- Hung, K. F., Ai, Q. Y. H., Leung, Y. Y., & Yeung, A. W. K. (2022). Potential and impact of artificial intelligence algorithms in dento-maxillofacial radiology. *Clinical Oral Investigations*, 26(9), 5535-5555. <https://doi.org/10.1007/s00784-022-04477-y>

- Issa, J., Jaber, M., Rifai, I., Mozdziak, P., Kempisty, B., & Dyszkiewicz-Konwińska, M. (2023). Diagnostic Test Accuracy of Artificial Intelligence in Detecting Periapical Periodontitis on Two-Dimensional Radiographs : A Retrospective Study and Literature Review. *Medicina*, 59(4), Artigo 768. <https://doi.org/10.3390/medicina59040768>
- Karobari, M. I., Adil, A. H., Basheer, S. N., Murugesan, S., Savadamoorthi, K. S., Mustafa, M., Abdulwahed, A., & Almokhatieb, A. A. (2023). Evaluation of the Diagnostic and Prognostic Accuracy of Artificial Intelligence in Endodontic Dentistry : A Comprehensive Review of Literature. *Computational And Mathematical Methods In Medicine*, 2023, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2023/7049360>
- Keldenich, T. (2023, 8 décembre). Couche de Convolution : Tout savoir sur les CNN - Meilleur Guide. *Inside Machine Learning*. <https://inside-machinelearning.com/cnn-couche-de-convolution/>
- Khanagar, S. B., Al-Ehaideb, A., Maganur, P. C., Vishwanathaiah, S., Patil, S., Baeshen, H. A., Sarode, S. C., & Bhandi, S. (2021). Developments, application, and performance of artificial intelligence in dentistry – A systematic review. *Journal Of Dental Sciences*, 16(1), 508-522. <https://doi.org/10.1016/j.jds.2020.06.019>
- Khanagar, S. B., Alfadley, A., Alfouzan, K., Awawdeh, M., Alaqla, A., & Jamleh, A. (2023). Developments and Performance of Artificial Intelligence Models Designed for Application in Endodontics : A Systematic Review. *Diagnostics*, 13(3), Artigo 414. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13030414>
- Lahoud, P., EzEldeen, M., Beznik, T., Willems, H., Leite, A., Van Gerven, A., & Jacobs, R. (2021). Artificial Intelligence for Fast and Accurate 3-Dimensional Tooth Segmentation on Cone-beam Computed Tomography. *Journal Of Endodontics*, 47(5), 827-835. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2020.12.020>
- Lai, G., Dunlap, C., Gluskin, A., Nehme, W. B., & Azim, A. A. (2023). Artificial Intelligence in Endodontics. *Journal Of The California Dental Association*, 51(1). <https://doi.org/10.1080/19424396.2023.2199933>
- Lee, J., Seo, H., Choi, Y. J., Lee, C., Kim, S., Lee, Y. S., Lee, S., & Kim, E. (2023). An Endodontic Forecasting Model Based on the Analysis of Preoperative Dental Radiographs : A Pilot Study on an Endodontic Predictive Deep Neural Network. *Journal Of Endodontics*, 49(6), 710-719. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2023.03.015>
- Li, S., Liu, J., Zhou, Z., Zhou, Z., Wu, X., Li, Y., Wang, S., Liao, W., Ying, S., & Zhao, Z. (2022). Artificial intelligence for caries and periapical periodontitis detection. *Journal Of Dentistry*, 122, Artigo 104107. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2022.104107>
- Maetschke, S., Tennakoon, R., Vecchiola, C., & Garnavi, R. (2019). *nuts-flow/ml : data pre-processing for deep learning*. <https://arxiv.org/abs/1708.06046>
- Mahdi, S. S., Battineni, G., Khawaja, M., Allana, R., Siddiqui, M. K., & Agha, D. (2023). How does artificial intelligence impact digital healthcare initiatives ? A review of AI applications in dental healthcare. *International Journal Of Information Management Data Insights*, 3(1), Artigo 100144. <https://doi.org/10.1016/j.jjime.2022.100144>

- Mallishery, S., Chhatpar, P., Banga, K. S., Shah, T., & Gupta, P. (2019). The precision of case difficulty and referral decisions : an innovative automated approach. *Clinical Oral Investigations*, 24(6), 1909-1915. <https://doi.org/10.1007/s00784-019-03050-4>
- Moidu, N. P., Sharma, S., Chawla, A., Kumar, V., & Logani, A. (2021). Deep learning for categorization of endodontic lesion based on radiographic periapical index scoring system. *Clinical Oral Investigations*, 26(1), 651-658. <https://doi.org/10.1007/s00784-021-04043-y>
- Qu, Y., Wen, Y., Chen, M., Guo, K., Huang, X., & Gu, L. (2023). Predicting case difficulty in endodontic microsurgery using machine learning algorithms. *Journal Of Dentistry*, 133, Article 104522. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2023.104522>
- Ramezanzade, S., Laurentiu, T., Bakhshandah, A., Ibragimov, B., Kvist, T., & Bjørndal, L. (2023). The efficiency of artificial intelligence methods for finding radiographic features in different endodontic treatments - a systematic review. *PubMed*, 81(6), 422-435. <https://doi.org/10.1080/00016357.2022.2158929>
- Ravindranath, K., Kumar, P., Srilatha, V., Alobaoid, M., Kulkarni, M., Mathew, T., & Tiwari, H. (2022). Analysis of advances in research trends in robotic and digital dentistry : An original research. *Journal Of Pharmacy And Bioallied Sciences*, 14(5), Article 185. [https://doi.org/10.4103/jpbs.jpbs\\_59\\_22](https://doi.org/10.4103/jpbs.jpbs_59_22)
- Rodrigues, J. A., Krois, J., & Schwendicke, F. (2021). Demystifying artificial intelligence and deep learning in dentistry. *Brazilian Oral Research*, 35. <https://doi.org/10.1590/1807-3107bor-2021.vol35.0094>
- Sadr, S., Mohammad-Rahimi, H., Motamedian, S. R., Zahedrozegar, S., Motie, P., Vinayahalingam, S., Dianat, O., & Nosrat, A. (2023). Deep Learning for Detection of Periapical Radiolucent Lesions : A Systematic Review and Meta-analysis of Diagnostic Test Accuracy. *Journal Of Endodontics*, 49(3), 248-261. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2022.12.007>
- Salian, I. (2019, août 20). *Difference between supervised, unsupervised, & reinforcement learning* | NVIDIA blog. NVIDIA Blog. <https://blogs.nvidia.com/blog/supervised-unsupervised-learning/>
- Singh, N., Pandey, A., Tikku, A. P., Verma, P., & Singh, B. P. (2023). Attitude, perception and barriers of dental professionals towards artificial intelligence. *Journal Of Oral Biology And Craniofacial Research*, 13(5), 584-588. <https://doi.org/10.1016/j.jobcr.2023.06.006>
- Takyar, A. (2023). Hybrid AI : A comprehensive overview. *LeewayHertz - AI Development Company*. <https://www.leewayhertz.com/hybrid-ai/>
- Usmani, U. A., Happonen, A., & Watada, J. (2024). Enhancing Medical Diagnosis Through Deep Learning and Machine Learning Approaches in Image Analysis. Dans *Lecture notes in networks and systems* (p. 449-468). [https://doi.org/10.1007/978-3-031-47718-8\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-031-47718-8_30)
- Umer, F., & Habib, S. (2022). Critical Analysis of Artificial Intelligence in Endodontics : A Scoping Review. *Journal Of Endodontics*, 48(2), 152-160. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2021.11.007>
- Watson, S. (2021). *Tooth Pulp Function and Inflammation*. Verywell Health. <https://www.verywellhealth.com/tooth-pulp-dental-terms-1059180>

- Yifat, R. (2024). *Data Preparation for Machine Learning : The Ultimate Guide to Doing It Right*. Pecan AI. <https://www.pecan.ai/blog/data-preparation-for-machine-learning/>
- Zhu, J., Chen, Z., Zhao, J., Yu, Y., Li, X., Shi, K., Zhang, F., Yu, F., Shi, K., Sun, Z., Lin, N., & Zheng, Y. (2023). Artificial intelligence in the diagnosis of dental diseases on panoramic radiographs : a preliminary study. *BMC Oral Health*, 23(1). <https://doi.org/10.1186/s12903-023-03027-6>