

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ITAMAR SOLDÁ JUNIOR

**CONSTRUÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE LOCALIZADOR ELETRÔNICO DE
FORAME APICAL**

TOLEDO

2024

ITAMAR SOLDÁ JUNIOR

**CONSTRUÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE LOCALIZADOR ELETRÔNICO DE
FORAME APICAL**

Construction of an Electronic Apical Foramen Locator prototype

Proposta de Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação do Curso de Bacharelado em Engenharia de Computação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Luis Carlos Mathias

TOLEDO

2024



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

ITAMAR SOLDÁ JUNIOR

**CONSTRUÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE LOCALIZADOR ELETRÔNICO DE
FORAME APICAL**

Proposta de Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação do Curso de Bacharelado em Engenharia de Computação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Data de aprovação:

Nome completo e por extenso do Membro 1
Título (especialização, mestrado, doutorado)
Nome completo e por extenso da instituição a qual possui vínculo

Nome completo e por extenso do Membro 2
Título (especialização, mestrado, doutorado)
Nome completo e por extenso da instituição a qual possui vínculo

Nome completo e por extenso do Membro 3
Título (especialização, mestrado, doutorado)
Nome completo e por extenso da instituição a qual possui vínculo

TOLEDO
2024

Dedico este trabalho à minha família e amigos,
pelos momentos de ausência.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Luis Carlos Mathias, por todo apoio, sabedoria e paciência com que me guiou nesta trajetória, sem seus conhecimentos e dicas jamais teria chegado até aqui.

E também agradeço a minha mãe Maria Regina Vergutz, minha irmã Thamara Soldá, e a todos os meus amigos. Sem o apoio de vocês essa trajetória teria sido muito maior, e talvez eu não tivesse chegado até aqui.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Radiografia de raízes retas e raízes curvas	12
Figura 2 – Lima Endodôntica - TDK	12
Figura 3 – Exemplo de localizador apical comercial	13
Figura 4 – Gancho labial	14
Figura 5 – Medição do comprimento de canal	14
Figura 6 – Sono-Explorer II (localizador do tipo resistência)	15
Figura 7 – Endocater (localizador do tipo impedância)	17
Figura 8 – APIT (localizador do tipo frequência)	18
Figura 9 – Fluxo de corrente entre a lima para as posições (a) 2 mm antes e (b) 2 mm através do forame apical	19
Figura 10 – Valor absoluto da impedância e o ângulo de fase calculado entre a lima e o eletrodo externo	20
Figura 11 – Relação de impedância dos resultados da Figura 10	21
Figura 12 – Impedância de um canal radicular	21
Figura 13 – Impedância de um canal radicular	22
Figura 14 – Diagrama de blocos da construção de um LEF	22
Figura 15 – Circuito oscilador	23
Figura 16 – Circuito amplificador não inversor	23
Figura 17 – Circuito divisor de tensão	24
Figura 18 – Proposta apresentada por Rambo <i>et al.</i> (2007)	25
Figura 19 – Circuito eletrônico e placa do conversor DAC do tipo R2R	28

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Cronograma de Atividades	31
--	-----------

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Siglas

ADC	Conversor Analógico Digital, do inglês <i>Analog to digital Converter</i>
CI	Circuito Integrado
CT	Comprimento de Trabalho
DAC	Conversor Digital Analógico, do inglês <i>Digital to Analog Converter</i>
DIP	Encapsulamento com Duas Linhas de Pinos, do inglês <i>Dual In-line Package</i>
DSP	Processamento de Sinal Digital, do inglês <i>Digital Signal Processing</i>
FFT	Transformada rápida de Fourier, do inglês <i>Fast Fourier Transform</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
LCD	<i>Display</i> de Cristal Líquido, do inglês <i>Liquid Crystal Display</i>
LEF	Localizadores Eletrônicos de Forame
O-LED	Diodo Emissor de Luz Orgânico, do inglês <i>Organic Light Emitting Diode</i>
SMD	<i>Surface Mounted Device</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	Objetivos	9
1.1.1	Objetivo geral	9
1.1.2	Objetivos específicos	9
1.2	Justificativa	10
1.3	Estrutura do Trabalho	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1	Tratamento Endodôntico	11
2.2	Localizadores Apicais	13
2.2.1	Funcionamento	13
2.2.2	Localizadores tipo resistência	15
2.2.3	Localizadores tipo impedância	16
2.2.4	Localizadores do tipo frequência	17
2.2.5	Modelo numérico da impedância de um dente para tratamento de canal . . .	18
2.2.6	Construção de um LEF	22
3	METODOLOGIA	26
3.1	Materiais	26
3.1.1	Microcontrolador	26
3.1.2	Amplificador operacional	26
3.1.3	Display gráfico O-LED	27
3.2	Métodos	27
3.2.1	Construção do protótipo	27
3.2.2	Filtro de Goertzel	28
3.2.3	Validação do protótipo	29
4	RESULTADOS ESPERADOS	30
5	CRONOGRAMA	31
	REFERÊNCIAS	32

1 INTRODUÇÃO

Sob a camada rígida do dente conhecida como dentina, encontra-se uma área mais macia e sensível chamada de polpa dentária. Essa região contém nervos e vasos sanguíneos, que são essenciais para o desenvolvimento e a nutrição do dente durante sua fase de desenvolvimento. Quando a polpa está infectada ou apresenta anormalidades por vários motivos, ela deve ser tratada para manter o dente em função (BOONYAGUL; EADSONGRAM; KEAWGUN, 2016). Nesta situação, deve-se submeter o dente a uma remoção dessa região com intuito de amenizar dores e sobretudo salvar o dente. Este tratamento é comumente conhecido como tratamento de canal.

Neste sentido, o tratamento de canal, denominado também como terapia endodôntica, é um procedimento para tratamento de infecções na região interna do dente. Tal tratamento se faz necessário em casos de inflamação ou infecção nas raízes do dente. O procedimento consiste em remover cuidadosamente toda a polpa do dente até a região do forame apical, que é uma pequena fissura na região mais baixa da raiz do dente por onde entram nervos e vasos sanguíneos. Segundo Testa (2003) este é um processo complexo, pois o preparo do dente, desde a sua abertura até a obturação definitiva do canal, possui fatores importantes que, corretamente executados, traduzem em inevitável sucesso. O profissional deve tomar cuidado para que não haja uma perfuração e uma limpeza excessiva do canal, que acabe atingindo regiões mais delicadas do dente, pois com isso mais complicações e inflamações ocorrerão. Após essa remoção deve-se preencher e selar o dente de forma correta para evitar outras possíveis infiltrações que venham a ocasionar mais infecções.

A determinação do Comprimento de Trabalho (CT) é um fator chave para o sucesso da terapia endodôntica ou do tratamento endodôntico. Quase todos os procedimentos terapêuticos dependem desta medida e a determinação errada do CT pode produzir consequências graves, como dor pós-terapêutica e necessidade de novo tratamento endodôntico (RAMBO *et al.*, 2007). Durante o tratamento endodôntico, a determinação do CT deve ser realizado porque o clínico precisa saber a que profundidade o canal radicular deve ser instrumentado (BOONYAGUL; EADSONGRAM; KEAWGUN, 2016).

Os Localizadores Eletrônicos de Forame (LEF)s vêm substituindo as imagens radiográficas tradicionais por serem mais rápidos, fáceis de usar e apresentarem maior taxa de sucesso na mensuração do CT (RAMBO *et al.*, 2007). Alguns estudos abordam maneiras de identificar corretamente o comprimento do canal radicular do dente, afim de localizar o forame apical como, por exemplo, o método proposto por Krizaj, Jan e Valencic (2002) em que se faz uso de métodos de cálculo numérico para descobrir a impedância entre a lima e o dente do paciente para assim determinar o comprimento do canal radicular. Outro método é abordado por Rambo *et al.* (2007) em que são submetidos diferentes sinais de frequências através do dente para assim determinar a distância do forame apical, analisando a impedância de saída de cada sinal.

Atualmente não se tem registro de uma empresa brasileira que produz este tipo do equipamento, somente que importam para revenda. Um exemplo é o Localizador Apical Finepex da Schuster, mostrado na Figura 3, que custa em torno de R\$ 2000,00. A criação de LEFs nacionais aumentaria a concorrência no mercado nacional e possivelmente traria preços mais competitivos, aperfeiçoamentos nestes dispositivos, além de mais opções disponíveis, sem que seja necessária a compra de aparelhos importados. A nacionalização dos equipamentos facilita e diminui os custos na manutenção dos mesmos, além disso, treinamentos podem ser oferecidos também sobre como utilizar, calibrar, etc.

A tecnologia de processamento digital de sinais está muito desenvolvida atualmente, tanto como a produção de processadores, o que acaba barateando cada vez mais este tipo de projeto, principalmente se feitos no país, o que ajuda no desenvolvimento de projetos mais econômicos para estes produtos que possuem um razoável valor agregado. O desenvolvimento deste projeto pode abrir novas possibilidades exploratórias na área de engenharia biomédica, como medidores de bioimpedância etc.

1.1 Objetivos

Diante do exposto, podem ser estabelecidos os objetivos gerais e específicos do presente trabalho a serem alcançados ao decorrer do mesmo.

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver um protótipo de um Localizador Eletrônico de Forame (LEF) que seja capaz de identificar corretamente a região do forame apical de um dente para tratamento endodôntico utilizando medições *in-vitro*.

1.1.2 Objetivos específicos

- Levantamento das técnicas eletrônicas para a determinação do forame;
- Seleção da melhor técnica implementável;
- Construção de um protótipo/arranjo medidor
- Realizar medições *in-vitro*¹;
- Avaliar a precisão e acurácia do medidor.

¹ As medições e testes não serão realizadas em um ser humano vivo, mas em dentes já extraídos e descartados imersos em solução fisiológica.

1.2 Justificativa

O uso de um localizador apical para tratamentos endodônticos se tornou indispensável ao decorrer dos anos e da evolução tecnológica de aparelhos para esse meio, diminuindo possíveis erros e evitando complicações mais severas.

Assim, esse estudo se justifica tendo em vista que seria de grande importância o desenvolvimento de um LEF em âmbito nacional **seria de grande importância** para o desenvolvimento de tratamentos endodônticos no país, pois diminuiria a necessidade de importação destes equipamentos. Outro fator importante é a diminuição de chapas de raio-X necessárias para este tratamento, visto que uma técnica ainda utilizada é o método radiográfico. Além de diminuir o custo do tratamento, a técnica por LEF é mais saudável, pois o paciente não seria tão exposto a radiação bem como são evitadas as tóxicas chapas de raio-X, que em sua composição, apresentam metais pesados.

A nacionalização do projeto pode diminuir o custo do equipamento, consequentemente diminuindo o custo do tratamento final para o paciente. Também facilitando em possíveis manutenções nestes aparelhos evitando ter que enviá-los para fora do país por exemplo. A calibração de aparelhos já comercializados pode ser um problema que venha a ser sanado com uma extensão deste projeto, pois o desenvolvimento de um protótipo de "dente eletrônico padrão" poderia ser desenvolvido com intuito de ser usado para aferição e calibração dos dispositivos LEFs .

A engenharia biomédica traz inúmeros benefícios para a saúde humana e pode trazer ainda mais, se bem organizada e desenvolvida com tecnologias mais recentes, assim trazendo um avanço muito significativo para os tratamentos da área da saúde.

1.3 Estrutura do Trabalho

O presente texto está separado no seguinte formato: este Capítulo 1 apresentou a introdução, objetivos gerais e objetivos específicos e a justificativa do trabalho; o Capítulo 2 aborda o referencial teórico acerca do tratamento endodôntico, localizadores apicais, seus principais tipos e sua construção; no Capítulo 3 são discutidos os materiais e métodos utilizados para a construção do protótipo enquanto o Capítulo 4 apresenta o cronograma de desenvolvimento do trabalho e por fim, são apresentadas as referências utilizadas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo tem como objetivo apresentar as principais informações e pesquisas necessárias para o projeto ser desenvolvido. Primeiramente será discutido sobre o tratamento endodôntico, o que é, quais as causas, problemas envolvidos, etc. Em seguida serão tratados os localizadores apicais, ou LEF, o que são, para que servem, como funcionam, e serão citados os modelos de localizadores existentes, os do tipo resistência, do tipo impedância e do tipo frequência. Cada um terá seu funcionamento explicado e será comentado sobre as limitações de cada um. Por fim será discutido sobre o projeto de construção de um LEF.

2.1 Tratamento Endodôntico

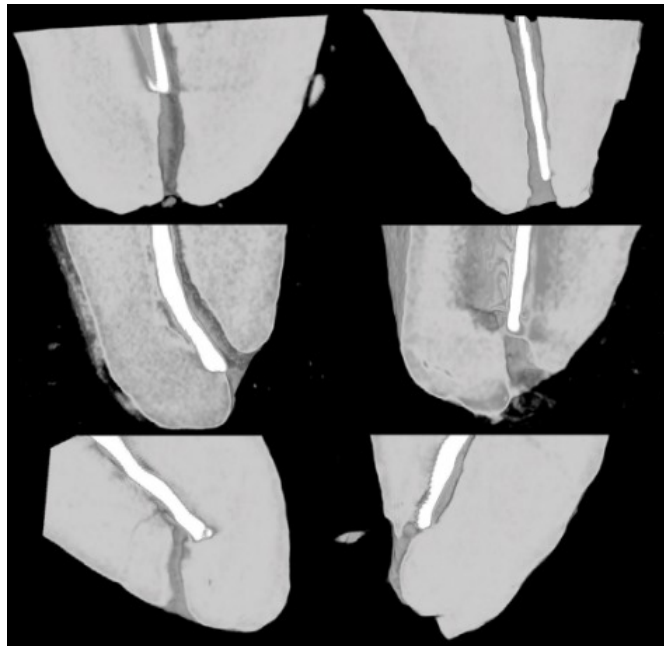
Segundo Testa (2003), a endodontia se resume em um tratamento complexo em que o preparo do dente, desde a sua abertura até a obturação definitiva do canal, se constitui em fatores extremamente importantes que, se corretamente executado, traduzem em inevitável sucesso. Inicialmente, os canais radiculares foram manipulados principalmente para permitir a colocação de medicamentos intracanaís, com poucas tentativas de remover completamente o conteúdo orgânico do sistema de canais radiculares (SCHILDER, 1974), procedimento o qual é empregado nos tratamentos de canais de agora.

O uso de técnicas e materiais adequados se fazem extremamente necessários para tal sucesso do procedimento, visto que durante o tratamento podem ocorrer certas anormalidades como por exemplo, o dente pode conter raízes curvas. A presença de raízes curvas anatomicamente é uma constante nos grupos dentais. O preparo destes canais associados à resistência metálica dos instrumentos, mesmo pré-curvados, nem sempre acompanham o grau de curvatura do canal, podendo levar a algumas irregularidades em seu preparo (TESTA, 2003), o que pode dificultar a limpeza do canal.

A Figura 1 mostra exemplos de raízes retas e com curvaturas de dentes. Como podemos observar, em alguns dos casos mostrados na imagem, as raízes são retas, o que facilita muito o tratamento, principalmente na hora de preparar o canal e fazer a identificação do forame apical. Já em outros casos, como mostrado na imagem, as raízes apresentam curvaturas, o que dificulta tanto a limpeza quanto a identificação do forame, visto que o canal em alguns casos faz outras curvas menores além da curvatura maior da raiz do dente.

À vista disso, observou-se que seria necessário o uso de materiais diferentes, que fossem mais resistentes e flexíveis, para se adaptarem melhor as curvaturas dos canais radiculares, e assim, se obterem resultados mais satisfatórios. Assim, neste procedimento, é utilizado uma lima para fazer a limpeza e a modelagem do canal radicular. Tais limas foram fabricadas com materiais como por exemplo aço inoxidável e aço carbono, mas recentemente descobriu-se que o níquel-titânio apresentava melhor flexibilidade. Material que por sua vez acabou se tornando um padrão para fabricação dessas limas, principalmente para serem usadas em dentes

Figura 1 – Radiografia de raízes retas e raízes curvas



Fonte: Cury *et al.* (2021).

com grandes curvaturas em suas raízes. A Figura 2 mostra um exemplo de como são essas limas.

Figura 2 – Lima Endodôntica - TDK



Fonte: DENTAL ADVANCE (2024).

2.2 Localizadores Apicais

O LEF se tornou uma ferramenta comum e indispensável por ser um aparelho eletrônico que auxilia o profissional endodontista a localizar o forame apical do dente para que o canal possa ser raspado e a polpa removida até a região do forame, para que o problema seja sanado. A Figura 3 mostra um modelo de LEF, sendo este um aparelho que tem facilitado muito o trabalho dos profissionais endodontistas na hora do tratamento de canal, pois substituem o método radiográfico que acaba sendo menos precisos do que estes aparelhos, além de que a utilização dos localizadores é muito prática e rápida, facilitando ainda mais o procedimento.

Figura 3 – Exemplo de localizador apical comercial



Fonte: Schuster Equipamentos Médicos Odontológicos (2024).

2.2.1 Funcionamento

Existem algumas propostas de técnicas que fazem uso de instrumentos eletrônicos para se localizar o forame apical de um dente.

Um LEF em sua grande maioria possui duas pontas, uma delas é composta por um gancho e uma outra envolto em material isolante, que fica preso ao corpo de uma lima que será introduzida no canal radicular com a intenção de alcançar o forame apical. Uma borracha está presente no corpo da lima com intuito de limitar até onde ela pode ser introduzida no dente. Este detalhe é importante, pois conforme apresentado na seção introdutória, complicações e

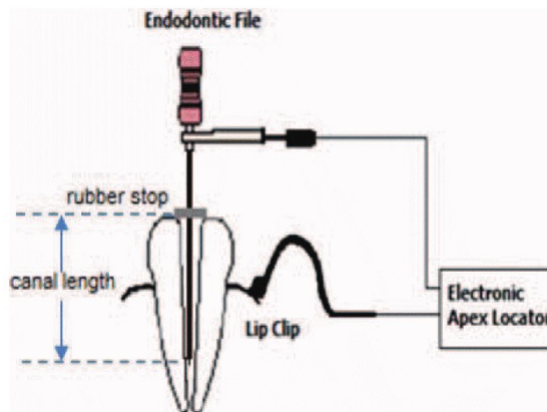
inflamações podem ocorrer caso a remoção da polpa ultrapasse o limite da raiz atingindo a região da gengiva. Já a outra ponta é composta por um gancho labial, como o mostrado na Figura 4, que por sua vez é encaixada no lábio do paciente, assim fechando o circuito que medirá a distância do forame apical. A Figura 5 mostra uma ilustração deste processo.

Figura 4 – Gancho labial



Fonte: Thabata C Martins Rocha (2024).

Figura 5 – Medição do comprimento de canal



Fonte: Boonyagul, Eadsongkram e Keawgun (2016).

Assim, os LEFs baseiam-se na medição da impedância entre um eletrodo inserido no canal radicular e outro posicionado na membrana da mucosa oral, como citado anteriormente. O conteúdo do canal radicular é majoritariamente resistivo, enquanto a dentina se comporta como um material isolante (dielétrico). Esta resistência é uma função da distância entre a ponta da lima e o forame apical, da área da seção transversal do canal radicular e da resistividade do conteúdo do canal (RAMBO *et al.*, 2007).

2.2.2 Localizadores tipo resistência

Também conhecidos como localizadores de 1ª geração, em sua maioria são consideravelmente simples. São compostos por duas ponteiras, uma inserida no interior do dente e outra presa a mucosa bucal. Segundo Orosco (2010), uma corrente contínua de baixa amperagem é determinada entre as duas ponteiras, esta corrente é medida através de um resistômetro presente no aparelho.

Os localizadores do tipo resistência possuem limitações que em alguns casos acabam os deixando não tão precisos quanto o necessário. Uma limitação presente nesses aparelhos é o fato de trabalharem com corrente contínua, o que acaba induzindo o surgimento de polarização. Essa polarização pode ocasionar dor e também necrose de células durante a medição devido a passagem de corrente elétrica pelos dois polos do dispositivo.

Uma das maiores desvantagens do método de resistência é a baixa precisão da medição quando o canal radicular apresenta umidade. Orosco (2010) afirma que quando o interior do canal apresenta umidade, o circuito acaba sendo fechado precocemente, antes de atingir o forame apical, ocasionando então os problemas de precisão presentes nesses modelos. Isso se torna uma complicação pois a dificuldade em secar o interior do canal é muito grande. A Figura 6 mostra um localizador do tipo resistência, o Sono-Explorer II.

Figura 6 – Sono-Explorer II (localizador do tipo resistência)



Fonte: Ebrahim, Wadachi e Suda (2007).

O fator que acaba tornando os modelos de resistência não recomendados é abordado por Ramos *et al.* (2005). O autor afirma, por meio das pesquisas desenvolvidas sobre a análise de aparelhos do tipo resistência, **que a maioria dos resultados positivos obtidos foram determinados**, que a maioria dos resultados positivos obtidos foram determinados quando a metodologia de aferição utilizada era a radiográfica da posição da ponta da lima, em relação ao ápice radiográfico. Conforme previamente apresentado neste trabalho, o método radiográfico apresenta várias imprecisões, principalmente em canais de anatomia muito curvada ou irregular onde a lima pode não alcançar o CT. Também é constatado que os aparelhos do tipo resistência demonstraram sua incapacidade de medição em canais contendo qualquer tipo de material condutor de corrente elétrica no interior do canal radicular (RAMOS *et al.*, 2005).

2.2.3 Localizadores tipo impedância

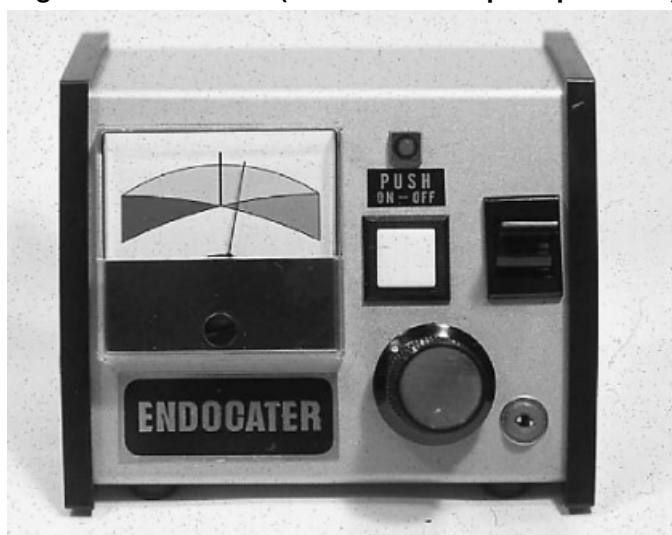
Conhecidos como localizadores de 2ª geração, os localizadores tipo impedância foram desenvolvidos com intuito de sanar os problemas presentes nos modelos do tipo resistência. Ao contrário dos aparelhos do tipo resistência, que funcionam através de corrente contínua, os do tipo impedância medem a resistência através de corrente alternada, visando obter maior precisão nos resultados ao tentar localizar o forame apical, e também podendo atuar em canais com presença de umidade. A resistência elétrica, mensurada a partir da utilização de uma corrente alternada, é denominada impedância, sendo medida em ohms (RAMOS *et al.*, 2005). Como esses aparelhos funcionam com correntes menores, devido a utilização de corrente alternada, eles não apresentam polarização, o que acaba diminuindo a dor ao paciente ao fazer a aferição.

Segundo Ramos *et al.* (2005), o eletrodo que fica preso a lima inserida no interior do dente, é responsável por transmitir uma corrente alternada que é gerada internamente pelo aparelho. Os polos positivo e negativo correspondentes a corrente contínua se alternam em um mesmo eletrodo, e assim é possível determinar a frequência aplicada, pois conforme a quantidade de vezes que a polaridade oscilar no eletrodo, corresponderá a frequência aplicada a corrente. O eletrodo que fica preso à mucosa bucal é o responsável por fazer a captação da variação do sinal. Ao captar esse sinal ele envia a resposta ao aparelho que por sua vez possui um circuito interno destinado a fazer a análise da resposta, e assim apresenta ao endodontista para saber a posição se está próximo ou não da região apical. Esta resposta apresentada ao endodontista, em aparelhos do tipo analógico, é representada em um visor com desenho de agulha, oscilando conforme se aproxima do forame apical.

Nos dispositivos do tipo impedância, a utilização de frequências mais elevadas para medições reduz a influência de materiais condutores no interior do canal. Estes aparelhos requerem uma amperagem mais baixa na corrente utilizada, proporcionando mais conforto e menos dor ao paciente, como dito anteriormente. Além disso, a utilização de corrente alternada reduz a carga de corrente elétrica.

Conforme estudos analisados por Ramos *et al.* (2005), os aparelhos do tipo impedância, apesar de apresentarem resultados mais satisfatórios quando comparados aos do tipo resistência, também não apresentavam resultados satisfatórios o suficiente para serem considerados aparelhos de confiabilidade. A utilização de valores elevados de frequência (400 kHz) dificultava a leitura, pois o eletrodo inserido na lima necessita de uma camada de isolamento. Então se houver algum tipo de interferência de fuga nesse eletrodo, a leitura é feita de maneira errada. Isso acaba dificultando a utilização destes aparelhos. O autor também diz que foi constatado que a presença de umidade em alguns casos acaba atrapalhando na leitura do sinal, o que torna nula a vantagem que esse aparelho dizia ter sobre os do tipo resistência no quesito de operar em canais com presença de umidade. A Figura 7 mostra um exemplo de localizador do tipo impedância, o Endocater.

Figura 7 – Endocater (localizador do tipo impedância)



Fonte: Ebrahim, Wadachi e Suda (2007).

2.2.4 Localizadores do tipo frequência

Devido ao problema de localizar a região apical em canais radiculares com presença de umidade, vistos nos modelos anteriores, surgiu-se a necessidade de desenvolver um aparelho que fosse capaz de tal feito. Os localizadores do tipo frequência foram desenvolvidos de modo que consigam aferir a impedância em canais úmidos.

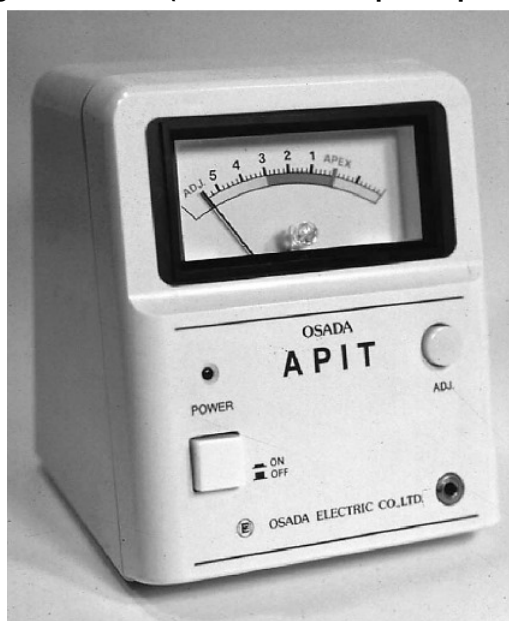
Esses aparelhos funcionam com um método que consiste em determinar valores de impedância elétrica em função de duas frequências de corrente alternada (leitura de impedância frequência dependente). A impedância é uma medida que descreve a oposição que um circuito elétrico apresenta ao fluxo de corrente quando é aplicada uma tensão. Segundo Orosco (2010), as paredes do canal radicular têm baixa capacidade de conduzir eletricidade. No entanto, conforme se aproxima do terço apical, a habilidade do canal de isolar eletricamente diminui, pois a espessura do tecido dentinário se reduz. Os aparelhos do tipo frequência possuem uma cali-

bragem que permite a indicação da variação de valores relativos de impedância (quociente ou diferença) da região apical (OISHI *et al.*, 2002)

Os dispositivos que operam com frequências funcionam detectando a diferença entre dois valores de impedância, calculados a partir de duas frequências distintas aplicadas ao dente, uma de 1 kHz e outra de 5 kHz. À medida que a ponta da lima se aproxima da região apical, ocorre uma variação nos valores de impedância medidos, sendo a variação maior para a frequência mais baixa (1 kHz) e menor para a frequência mais alta (5 kHz). Após o aparelho fazer a detecção da diferença entre as impedâncias e analisá-las, ele é capaz de informar o usuário através de um visor e de sinais sonoros se está próximo do forame apical.

Localizadores do tipo frequência apresentam uma confiabilidade superior aos demais tipos, principalmente quando utilizados em canais com presença de umidade. Segundo Ramos *et al.* (2005), as leituras são mais precisas e as limitações do método são muito menores, o que ocasiona índices de confiabilidade muito superiores aos demais métodos. A Figura 8 mostra um exemplo de localizador do tipo frequência, o APIT.

Figura 8 – APIT (localizador do tipo frequência)



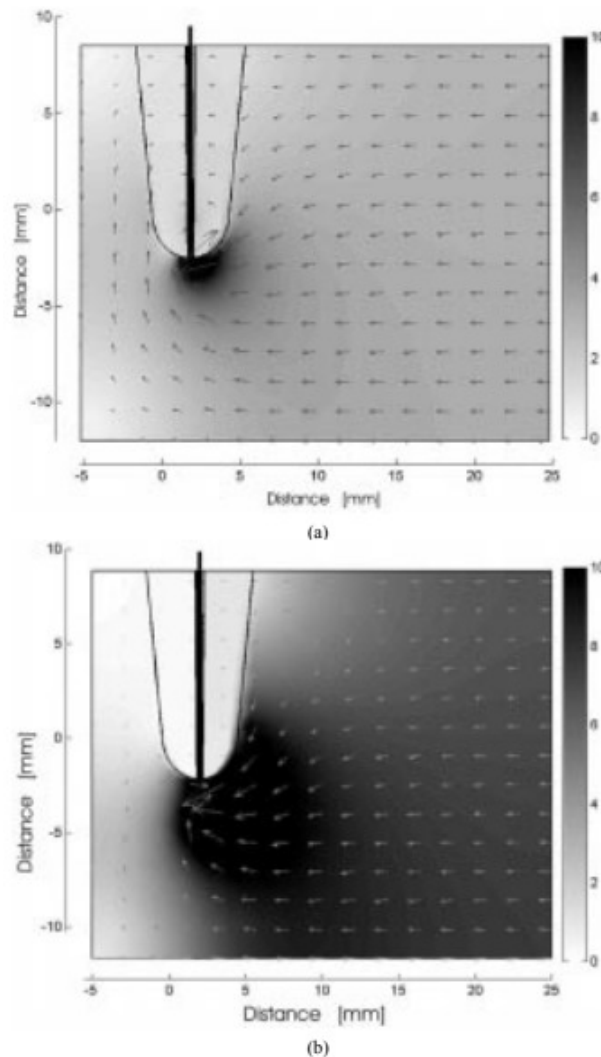
Fonte: Ebrahim, Wadachi e Suda (2007).

2.2.5 Modelo numérico da impedância de um dente para tratamento de canal

Krizaj, Jan e Valencic (2002) cria um modelo de dente a partir de conceitos de eletromagnetismo e análise por elementos finitos. Em seu estudo o autor discute resultados sobre experimentos feitos sobre como a corrente elétrica se comporta dentro do dente, no canal radicular, durante o processo do tratamento endodôntico, com ênfase em como a impedância muda conforme a lima é introduzida no canal.

A simulação feita pelo autor teve como parâmetros uma tensão de 1 V entre os eletrodos uma frequência de 1 kHz. A lima era instrumentada em diferentes posições do canal do dente para assim observar o comportamento da corrente elétrica. Na Figura 9(a) as medições foram feitas com a lima a 2 mm antes de atingir o forame apical, já na Figura 9(b) as medições foram feitas com a lima a 2 mm através do forame apical.

Figura 9 – Fluxo de corrente entre a lima para as posições (a) 2 mm antes e (b) 2 mm através do forame apical



Fonte: Krizaj, Jan e Valencic (2002).

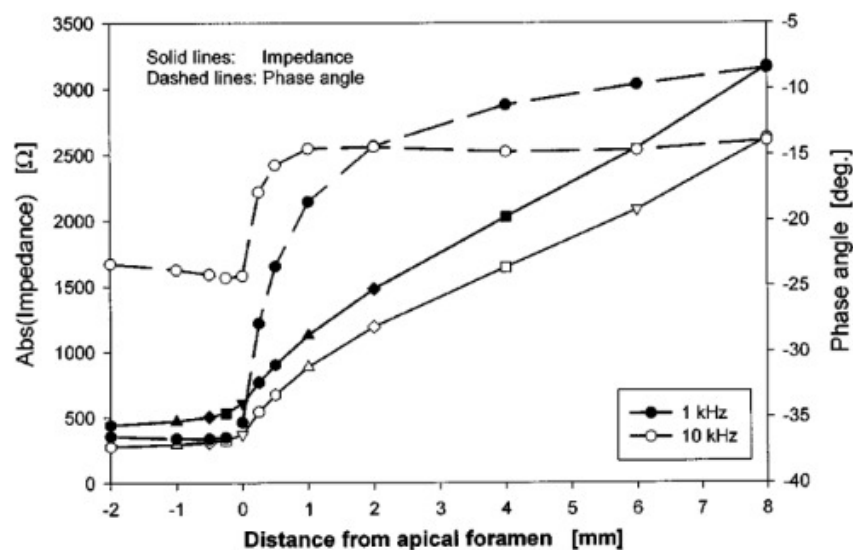
Observando a Figura 9, podemos verificar que quando a lima é posicionada antes de atingir o forame apical (a), devido à elevada resistividade da dentina, a corrente flui através do canal, com pouca corrente a passar pelas paredes da dentina. Quando a lima passa através do forame apical (b), a densidade da corrente aumenta devido a baixa resistividade do material condutor (como líquidos utilizados no tratamento ou até mesmo polpa dentária), e porque a ponta da lima não se encontra mais dentro do canal.

Krizaj, Jan e Valencic (2002) explica sobre como o ângulo de fase pode influenciar ao tentar localizar o forame apical. Segundo ele o ângulo de fase varia entre 5° e 15° quando a lima

está dentro do canal radicular. Porém, quando a lima passa através do forame apical, o ângulo de fase varia entre 20° e 35° , fenômeno referente a diminuição drástica da resistência conforme a lima sai do canal passando pelo forame apical.

Em tese, a condutividade tende a aumentar com a frequência aplicada, enquanto a permissividade relativa tende a diminuir. Com isso a impedância em 10 kHz é menor quando comparada com a impedância em 1 kHz. A Figura 10 mostra um gráfico com medições feitas entre o valor absoluto da impedância e o ângulo de fase, em que geram variações muito pequenas, o que torna difícil a determinação do forame apical.

Figura 10 – Valor absoluto da impedância e o ângulo de fase calculado entre a lima e o eletrodo externo

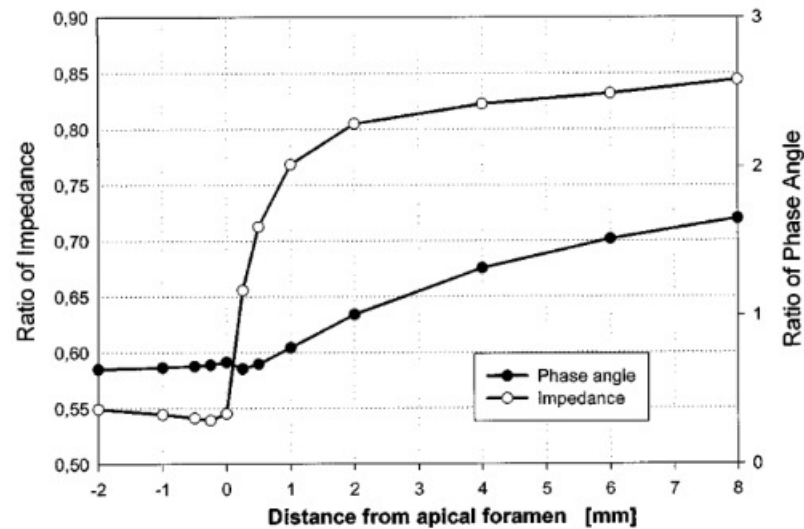


Fonte: Krizaj, Jan e Valencic (2002).

Para obter uma melhor análise e precisão os dados da Figura 10, Krizaj, Jan e Valencic (2002) fez um novo gráfico, afim de mostrar a razão entre impedância e ângulo de fase para ambas as referências, o resultado é mostrado na Figura 11. Com isso a análise se torna muito mais fácil e precisa para se identificar o forame. Ao analisar a Figura 11, pode-se concluir que o forame apical pode ser encontrado com uma grande precisão quando a razão entre as impedâncias cai abaixo de 0,6.

Um modelo de dente apresentado por Rambo *et al.* (2007), mostrado na Figura 12, mostra como é a impedância elétrica de um dente em seu canal radicular. Nele podemos ver que o conteúdo do canal radicular é predominantemente resistivo, oferecendo resistência R_C à passagem de corrente elétrica. A dentina, que é um material pouco condutor, se comporta como um capacitor C_D . Z_P é a impedância dos tecidos periodontais para a membrana da mucosa, ou seja, é a impedância que a corrente encontra ao passar através dos tecidos periodontais e da membrana da mucosa. Então Z_P representa a impedância entre a ponta do LEF que fica presa a mucosa oral e a lima posicionada no canal radicular. A resistência R_C funciona como uma

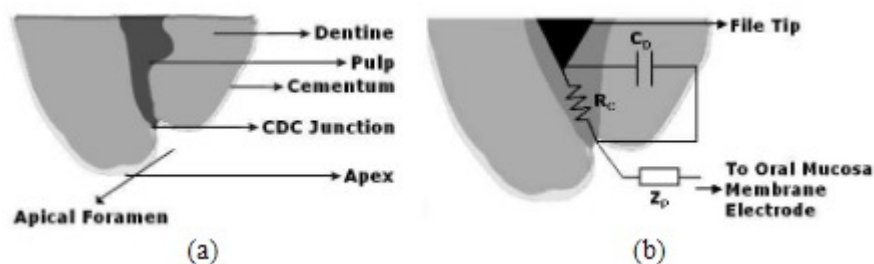
Figura 11 – Relação de impedância dos resultados da Figura 10



Fonte: Krizaj, Jan e Valencic (2002).

função da distância entre a lima e o forame apical, quanto mais a lima se aproxima do forame apical, menor será a resistência.

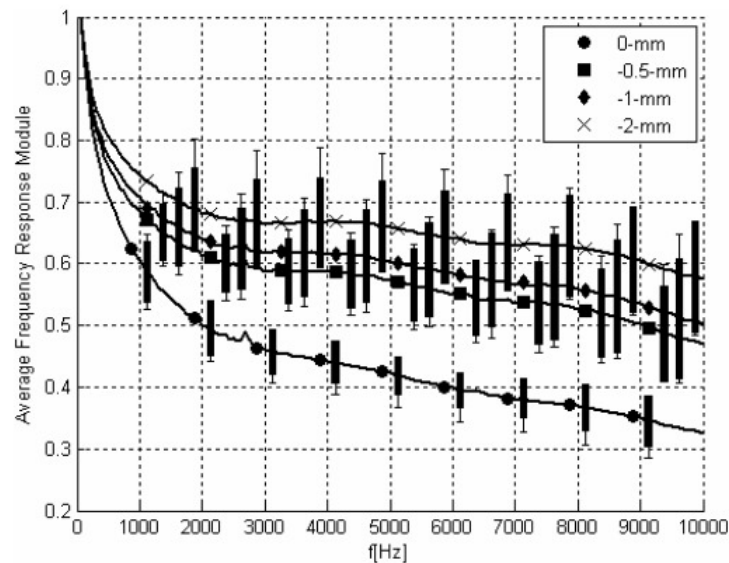
Figura 12 – Impedância de um canal radicular



Fonte: Rambo *et al.* (2007).

Rambo *et al.* (2007) apresenta na Figura 13 um gráfico mostrando resultados de sua pesquisa. Analisando a imagem, as linhas mais acima mostram resultados da lima quando sua ponta ainda está dentro do canal radicular. Já a linha mais abaixo, preenchida com pequenas bolinhas pretas, que representam a posição 0 mm, corresponde ao forame apical, ou seja, significa que a lima atingiu o forame. Nela podemos perceber que na faixa de 1 kHz por exemplo, o módulo da resposta em frequência da impedância fica abaixo de 0,6, conforme dito também por Krizaj, Jan e Valencic (2002) e citado anteriormente; e vai decaindo conforme a frequência aplicada é maior. Com isso pode-se dizer que em frequências menores, até 2 kHz, temos uma condutividade maior, por que em frequências menores do que 10 kHz a permissividade relativa, que é a capacidade do material de armazenar energia elétrica, é maior tendo assim uma corrente elétrica fluindo melhor.

Figura 13 – Impedância de um canal radicular

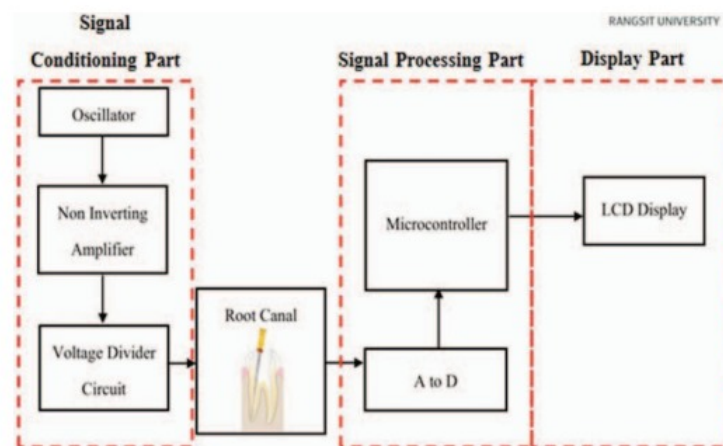


Fonte: Rambo *et al.* (2007).

2.2.6 Construção de um LEF

Em seu estudo, Boonyagul, Eadsongkram e Keawgun (2016) propõem a construção de um LEF. O seu dispositivo se baseia na geração de um sinal alternado através do canal radicular e na medição da impedância de saída. A Figura 14 mostra um esquema de blocos mostrando como o LEF foi construído. Ele está separado em 3 partes, condicionamento de sinal, processamento de sinal e *display*.

Figura 14 – Diagrama de blocos da construção de um LEF



Fonte: Boonyagul, Eadsongkram e Keawgun (2016).

A parte de condicionamento de sinal está dividida em três partes também sendo elas circuito oscilador, circuito amplificador não inversor e circuito divisor de tensão. O circuito oscilador foi construído utilizando um Circuito Integrado (CI) L8038 para gerar um sinal senoidal de 50 kHz para a saída. A Figura 15 mostra o circuito oscilador.

O circuito amplificador não inversor foi construído visando amplificar o sinal de saída para alcançar a tensão esperada de 4 V. Foi utilizado um CI LM358 como amplificador operacional neste projeto para se alcançar o resultado esperado na saída. A Figura 16 mostra o circuito amplificador.

O circuito divisor de tensão foi feito para uma avaliação indireta. Na Figura 17 podemos ver que foi utilizado o resistor R_9 de 10 k Ω , pois a impedância dentro do canal radicular é de 6,5 k Ω aproximadamente (BOONYAGUL; EADSONGRAM; KEAWGUN, 2016).

Figura 15 – Circuito oscilador

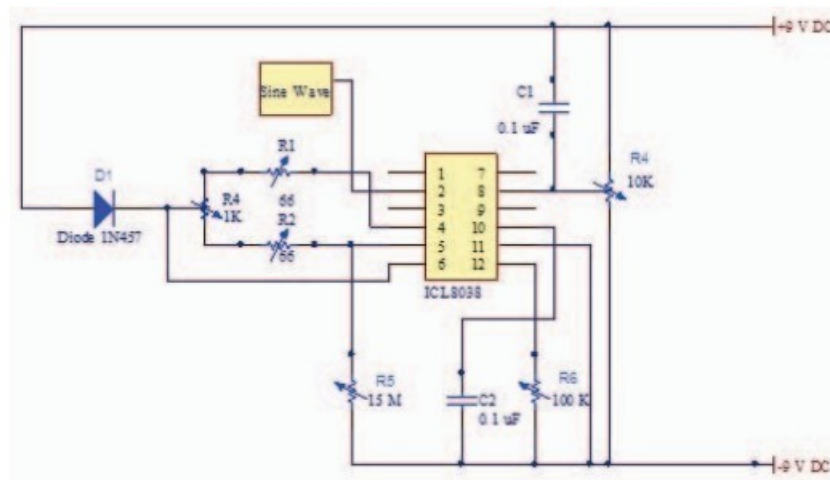
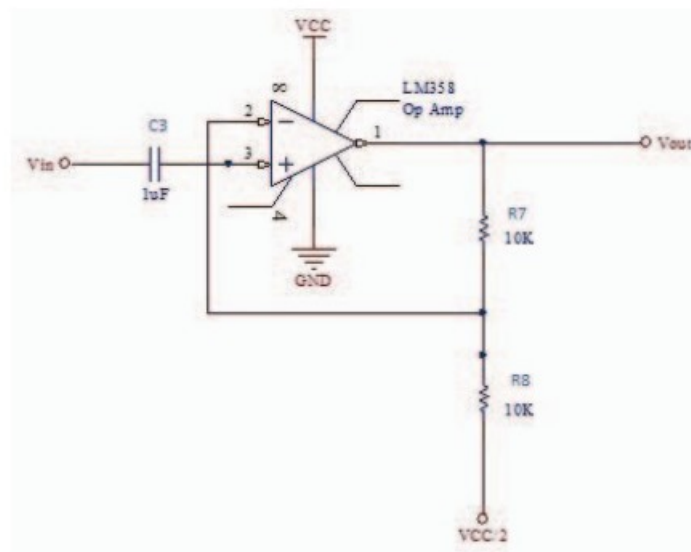


Fig. 2. Circuito do oscilador

Fonte: Boonyagul, Eadsongkram e Keawgun (2016).

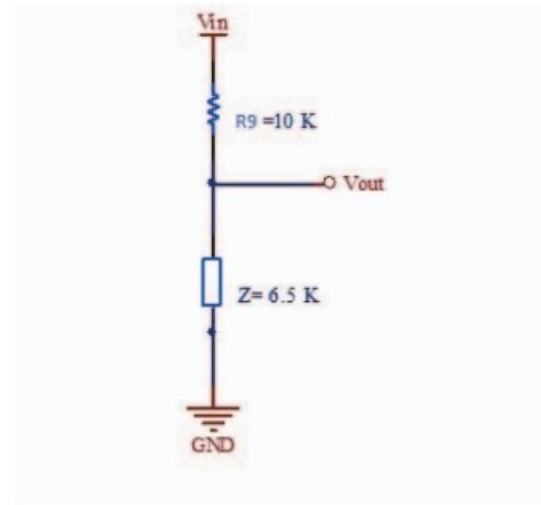
Figura 16 – Circuito amplificador não inversor



Fonte: Boonyagul, Eadsongkram e Keawgun (2016).

Passando para a parte do processamento de sinal, temos duas subpartes A a D que representam a conversão analógica para digital, e microcontrolador. O sinal que entra é pro-

Figura 17 – Circuito divisor de tensão



Fonte: Boonyagul, Eadsongkram e Keawgun (2016).

cessado a partir do conversor A/D, e então pelo microcontrolador. Neste projeto foi utilizado um Arduino Uno R3 que é responsável por fazer o controle do sinal de entrada e saída, mostrando no display se a lima está perto ou se atingiu o forame apical, e também mostra o nível de bateria.

A parte do mostrador consiste basicamente em um *Display* de Cristal Líquido, do inglês *Liquid Crystal Display* (LCD), do modelo código TSM256128C que possui uma dimensão de 256x128 pixels, que tem como função mostrar a posição da lima no interior do canal radicular. A escala da tela foi configurada para ser mostrada em milímetros. Quando a lima se aproximava do ápice dental, além de ser mostrado no *display*, *bips* são emitidos pelo dispositivo, os *bips* aumentam de frequência conforme a lima chega mais perto do forame apical e emitem um *bip* contínuo ao ultrapassá-lo.

Outro modelo de LEF projetado, mas este com testes feitos *in-vivo*, é o proposto por Rambo *et al.* (2007). O sistema projetado pelo autor, visa evitar riscos elétricos aos voluntários. Para isto, ele utiliza um notebook alimentado por bateria para gerar e adquirir um sinal de espectro espalhado, que será utilizado na análise da resposta.

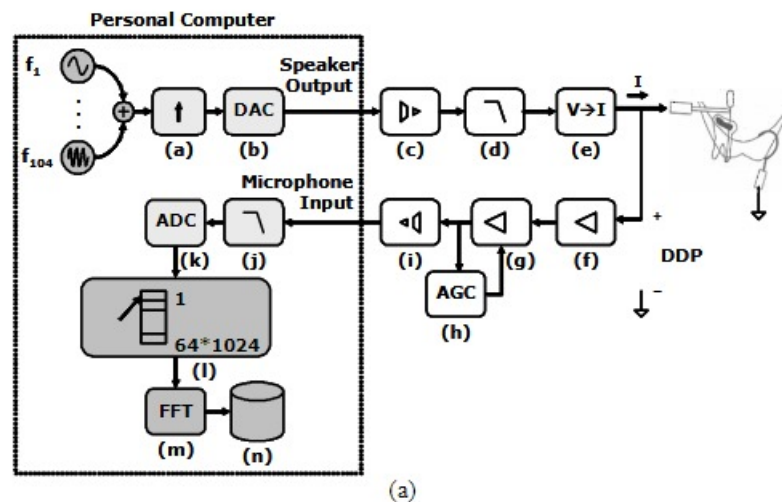
Para explicação será utilizada a Figura 18, que representa o projeto proposto por ele. Na imagem, no quadro do lado esquerdo, uma soma de senoides é feita com deslocamento de fase e é convertida em sinal analógico nos blocos (a) *up-sample* e (b) Conversor Digital Analógico, do inglês *Digital to Analog Converter* (DAC), que converte o sinal digital em um sinal analógico. Para isto, o sistema utiliza uma frequência de amostragem de 32 kHz. O sinal que o notebook gera é isolado por um (c) amplificador de isolamento de precisão, o CI ISO122, para segurança. Após, o sinal passa por um (d) filtro passa-baixa que remove os picos indesejados. O sinal após ser filtrado, é convertido em uma corrente com um valor RMS constante de $10 \mu A_{RMS}$ por um (e) conversor de tensão para corrente.

O ruído é removido pelo (f) amplificador diferencial, após isto o sinal é amplificado por um (g) amplificador com um (h) controle automático de ganho, que tem como função ajustar a

amplitude do sinal para assim otimizar o uso da faixa dinâmica de entrada do notebook. Após a amplificação, o sinal passa por outro (i) amplificador de isolamento de precisão, antes de ser conectado ao notebook na entrada de microfone. Então passa por uma filtragem e é amostrado a 32 kHz por (j) e (k).

O notebook gera o sinal continuamente, quando o usuário aciona, o software utilizado captura 64 conjuntos sequenciais de 1024 amostras em (l). Então o software calcula a Transformada rápida de Fourier, do inglês *Fast Fourier Transform* (FFT), de cada conjunto de amostras e também a média da FFT em (m), e armazenando em (n) o módulo da resposta de frequência de cada posição da lima.

Figura 18 – Proposta apresentada por Rambo *et al.* (2007)



Fonte: Rambo *et al.* (2007).

3 METODOLOGIA

Após estudos sobre tratamento de canal e sobre localizadores de forame apical (ou LEFs), será desenvolvido um protótipo prático de localizador de forame apical, sendo explicado com detalhes nas seções de materiais e métodos.

3.1 Materiais

Os principais materiais utilizados para o desenvolvimento deste projeto serão um microcontrolador (placa Blue pill), amplificador operacional (LMH6643), display do tipo Diodo Emissor de Luz Orgânico, do inglês *Organic Light Emitting Diode* (O-LED), com (128x64 pixels), assim como materiais básicos de laboratório para construção de protótipos, como matriz de contatos, jumpers, osciloscópio, fonte, dentre outros. Os principais materiais serão explicados com mais detalhes nas seções a seguir.

3.1.1 Microcontrolador

Como microcontrolador responsável por fazer o processamento do sistema, utilizaremos a placa *bluepill* (com o CI STM32F103C8T6). A placa possui um núcleo ARM Cortex-M3, pode ser alimentada via USB, 5 V externos ou 3,3 V diretos, e funciona a uma frequência máxima de clock de 72 MHz. Possui 64 kB de memória *Flash* e 20 kB de memória SRAM. A placa possui botão de RESET, seletor de BOOT, e possui 37 pinos GPIO e 10 pinos para entrada lógica.

A Blue Pill é uma ótima placa para projetos variados devido a sua grande abrangência, desempenho e fácil aquisição o que a possibilita ser usada em uma vasta gama de tipo de projetos, desde os mais simples aos mais avançados.

3.1.2 Amplificador operacional

Como amplificador operacional, um bom candidato para ser utilizado no projeto é o CI LMH6643. Ele funciona em 5 V e é *rail-to-rail*, o que significa que ele aproveita toda a alimentação em sua saída, tendo como perda somente alguns mV. Este amplificador oferece uma velocidade alta em torno de 130 MHz, uma baixa distorção na casa de -62 dB e uma corrente de saída alta em torno de 75 mA.

Este modelo em específico é um *Surface Mounted Device* (SMD), então para o projeto utilizaremos um adaptador SMD para Encapsulamento com Duas Linhas de Pinos, do inglês *Dual In-line Package* (DIP), para ele poder ser manuseado em testes de bancada em protoboard.

3.1.3 Display gráfico O-LED

Para fazer a comunicação do aparelho com o usuário de forma visual, será utilizado um display O-LED. Com ele poderemos por exemplo apresentar um desenho de um dente e utilizar uma barra ou alguma outra forma de indicar a distancia do forame apical.

O display utilizado será um de 7 pinos com uma resolução de 128 x 64 pixels e comunicação *Serial Peripheral Interface* (SPI), ou *Inter-Integrated Circuit* (I2C). Este opera em uma tensão de 3 à 5 V e possui um baixo consumo de energia. Este display utiliza um microcontrolador CI SSD1306, o que permite a comunicação com outros microcontroladores via interface SPI ou I2C. A SPI é a comunicação padrão, enquanto para utilizar a I2C é necessário configuração.

3.2 Métodos

Esta seção aborda os métodos necessários para construção e validação do protótipo. Está dividida em construção do protótipo que aborda sobre como será construído o protótipo proposto, será comentado sobre o filtro de Goertzel que será utilizado para análise das frequências utilizadas, e também será abordado sobre como será feita a validação do protótipo para medir a precisão.

3.2.1 Construção do protótipo

O projeto do LEF será baseado no modelo do tipo frequência, ou impedância frequência dependente. Como foi explicado na Subseção 2.2.4, este tipo de localizador consiste em determinar a impedância em função de duas frequências. As frequências utilizadas serão de 1 kHz e 5 kHz, assim como citado no capítulo anterior.

Primeiramente o circuito será desenvolvido em software e posteriormente construído utilizando protoboard e os materiais citados anteriormente. Após isto, o protótipo será submetido a testes para validação.

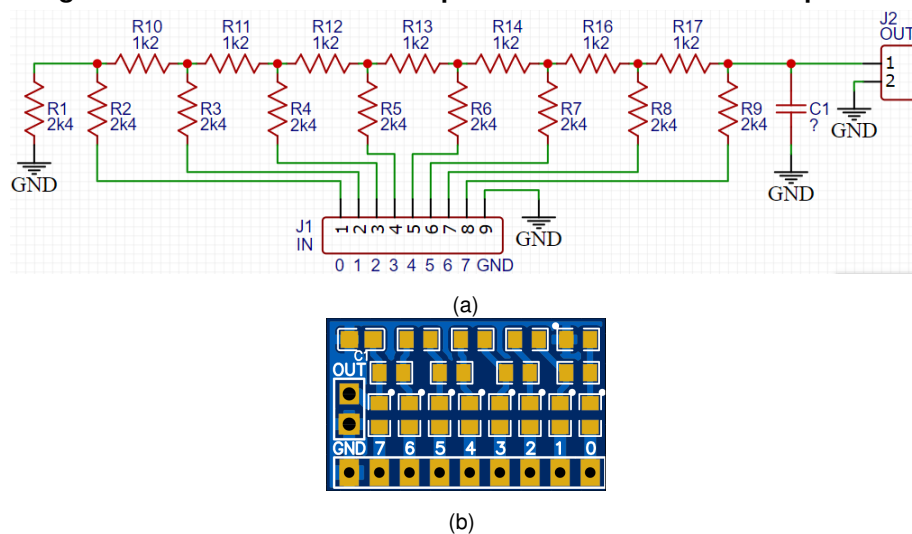
A placa *bluepill* não possui DAC, então será utilizado uma placa de DAC R2R pois será necessário gerar duas senoides somadas com frequências de 1 kHz e 5 kHz. Estas frequências são sinais analógicos e para isto será necessário gerar um vetor em código e depois sintetizá-los no sistema físico real mediante este DAC. Como a *bluepill* não possui DAC, possui somente Conversor Analógico Digital, do inglês *Analog to digital Converter* (ADC), assim será necessário utilizar o DAC R2R para gerar estas ondas.

O circuito R2R possui um funcionamento baseado em divisores de tensão. Este recebe um conjunto de bits em binário em sua entrada (sinal digital), que são convertidos em uma tensão de saída que é uma representação analógica do sinal digital inicial.

Dentre as vantagens em se utilizar este DAC R2R, é bom citar que ele possui uma estrutura simples, pois utiliza resistores de apenas 2 valores, sendo eles resistores com valor R e resistores com o dobro do valor, $2R$. Outra vantagem é que ele possui uma impedância de saída sempre igual a R . É fácil aumentar ou diminuir a resolução em bits pois basta adicionar ou remover alguns resistores, para suprir a quantidade de bits da entrada. A Figura 19 mostra um exemplo do como é o modelo de um DAC R2R.

Por fim, como resultado da construção se espera obter um dispositivo que seja capaz de não só localizar o forame apical mas mostrar no display O-LED se a lima está próxima ou não da região do forame.

Figura 19 – Circuito eletrônico e placa do conversor DAC do tipo R2R



Fonte: Autoria própria (2025).

3.2.2 Filtro de Goertzel

Neste projeto, será utilizado um filtro baseado no algoritmo de Goertzel para fazer a análise das frequências que serão capturadas pelo LEF no canal radicular.

Segundo Bhavanam (2014), o algoritmo de Goertzel é considerado uma técnica de Processamento de Sinal Digital, do inglês *Digital Signal Processing* (DSP), que identifica componentes de frequência de um sinal. O algoritmo nada mais é que uma forma de filtro digital, que processa uma sequência de dados e fornece a magnitude e a fase de um componente específico da frequência. Ele é considerado eficiente quando se faz necessário analisar apenas uma ou algumas frequências, por isso será utilizado nesse projeto, já que serão utilizadas as frequências de 1 kHz e 5 kHz apenas. O algoritmo calcula a soma ponderada de uma amostra de sinal, e após processar as amostras calcula a magnitude da componente de frequência desejada.

Uma das vantagens deste algoritmo é sua eficiência computacional quando comparado com um algoritmo de FFT por exemplo. É de fácil implementação pois possui uma estrutura simples. Uma desvantagem seria em relação ao seu foco ser limitado, não sendo eficiente

analisando várias frequências, o que não afetará negativamente este projeto, pois conforme informado, utilizaremos apenas duas frequências, o que se enquadra no foco no algoritmo.

3.2.3 Validação do protótipo

Após a construção do protótipo, ele será submetido a testes afim de testar sua confiabilidade e precisão do equipamento, e se possível, comparado com outros equipamentos comerciais similares oriundos de uma eventual disponibilização por parte de um profissional odontologista. Os testes serão feitos *in-vitro*, ou seja, isso significa que não serão feitos testes em pacientes ou cobaias. Os testes serão feitos com próteses ou dentes já extraídos e imersos em solução fisiológica como cloreto de sódio.

Os testes serão feitos para simular um tratamento endodôntico. Primeiramente o dentista faz a abertura do dente com uma broca, começando pelo topo do dente e removendo toda a polpa. Após toda a limpeza do dente até a região do terço médio apical e a descontaminação¹, é que é feito a utilização do LEF, onde uma das pontas é presa em uma lima que será inserida no interior do canal radicular do dente, e a outra ponta será posta de forma que simule a ponta que fica presa a mucosa bucal, ou lábio do paciente, para que possa fazer contato com a outra ponta assim que atinja o forame apical, para que o circuito seja fechado e indique no display que o forame apical foi alcançado ou não.

¹ Os dentes extraídos a serem utilizados já passaram até este processo.

4 RESULTADOS ESPERADOS

Com base em todo o estudo feito nos Capítulos 2 e 3 deste trabalho, espera-se construir com êxito um protótipo de LEF que seja capaz de medir com precisão e baixa porcentagem de erro a distância do forame apical de um dente, afim de poder ser comparado e ser compatível, nos quesitos de precisão e acurácia, com aparelhos vendidos comercialmente.

Ao atingir uma boa precisão e acurácia fazendo os testes *in-vitro*. Após validada esta etapa, este projeto poderá futuramente ser submetido a testes *in-vivo*, em que o aparelho é testado em pacientes, podendo assim em um futuro, se tornar um concorrente para outros aparelhos vendidos no mercado, com diferencial de ser um projeto nacional. O projeto também pode ser um caminho para outros estudos na área, contribuindo com o desenvolvimento da área da saúde atrelada a dispositivos eletrônicos.

Em resumo, se espera que o protótipo tenha sucesso e apresente precisão em localizar o forame apical fazendo testes *in-vitro*.

5 CRONOGRAMA

O cronograma é resumido no Quadro 1, onde são especificados os períodos de tempo em que cada tópico a seguir será desenvolvido:

1. Revisão de literatura sobre localizadores de forame apical e tratamento endodôntico;
2. Análise do melhor método a ser abordado para o projeto prático a ser desenvolvido;
3. Escrita do texto do Trabalho de Conclusão de Curso 1;
4. Construção do protótipo de LEF;
5. Validação do protótipo mediante testes de confiabilidade e precisão;
6. Escrita do texto do Trabalho de Conclusão de Curso 2;
7. Correções finais do texto.

Quadro 1 – Cronograma de Atividades

Atividade	2024						2025	
	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								

Fonte: Autoria própria (2024).

REFERÊNCIAS

- BHAVANAM, D. Goertzel algorithm based dtmf detection. **American International Journal of Research in Science, Technology, Engineering & Mathematics**, v. 1, p. 6–12, 05 2014.
- BOONYAGUL, S.; EADSONGKRAM, T.; KEAWGUN, T. A study on the design and construction of electronic apex locator. *In*: **2016 International Conference on Biomedical Engineering (BME-HUST)**. Hanói, Vietnã: IEEE, 2016. p. 75–78.
- CURY, M. T. S. *et al.* Accuracy of root ZXII, E-PEX and FIND apex locators in teeth with vital pulp: an in vivo study. **Brazilian Oral Research**, SciELO Brasil, v. 35, p. e080, 2021.
- DENTAL ADVANCE. **Lima Endodôntica - TDK**. 2024. Disponível em: <https://www.dentaladvance.com.br/lima-tdk>. Acesso em: 07 de agosto 2024.
- EBRAHIM, A. K.; WADACHI, R.; SUDA, H. Electronic apex locators—a review. **Journal of Medical and Dental Sciences**, Tokyo Medical and Dental University (TMDU), v. 54, n. 3, p. 125–136, 2007.
- KRIZAJ, D.; JAN, J.; VALENCIC, V. Numerical computation of impedances of a human tooth for estimation of the root canal length. **IEEE Transactions on Biomedical Engineering**, v. 49, n. 7, p. 746–748, 2002.
- OISHI, A. *et al.* Electronic detection of root canal constrictions. **Journal of endodontics**, Elsevier, v. 28, n. 5, p. 361–364, 2002.
- OROSCO, F. A. **Influência da espessura de dentina, da constrição apical e do diâmetro do forame apical na precisão de leitura com localizadores foraminais eletrônicos**. 2010. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2010.
- RAMBO, M. *et al.* In vivo determination of the frequency response of the tooth root canal impedance versus distance from the apical foramen. **Conference proceedings : ... Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Conference**, v. 2007, p. 570–3, 02 2007.
- RAMOS, C. *et al.* **Odontometria: fundamentos e técnicas**. Santos, 2005. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=mNf4GwAACAAJ>.
- SCHILDER, H. Cleaning and shaping the root canal. **Dental clinics of north America**, Elsevier, v. 18, n. 2, p. 269–296, 1974.
- Schuster Equipamentos Médicos Odontológicos. **Localizador Apical Finepex**. 2024. Disponível em: <https://www.schuster.ind.br/produtos/finepex/>. Acesso em: 12 de agosto 2024.
- TESTA, F. M. **Influência das técnicas de instrumentação no desvio apical dos canais radiculares**. 2003. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2003.
- Thabata C Martins Rocha. **Gancho Labial**. 2024. Disponível em: <https://www.dentalapice.com.br/gancho-labial-odous-de-deus>. Acesso em: 10 de agosto 2024.