

MARIANA GADES PENEIRAS

Análise e comparação do funcionamento dos tonômetros atuais e estudo de melhoria

Mariana Gades Peneiras

Análise e comparação do funcionamento dos tonômetros atuais e estudo de melhoria

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Samuel E. de Lucena

P398a	Peneiras, Mariana Gades Análise e comparação do funcionamento dos tonômetros atuais e estudo de melhoria / Mariana Gades Peneiras – Guaratinguetá, 2017. 37 f : il. Bibliografia: f. 36-37 Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017. Orientador: Prof. Dr. Samuel Euzédice de Lucena 1. Tonometria ocular. 2. Glaucoma. 3. Pressão intra-ocular. I. Título CDU 621.3
-------	--

**ANÁLISE E COMPARAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DOS TONÔMETROS
ATUAIS E ESTUDO DE MELHORIA**

MARIANA GADES PENEIRAS

**ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DO
REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE GRADUADO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA.**

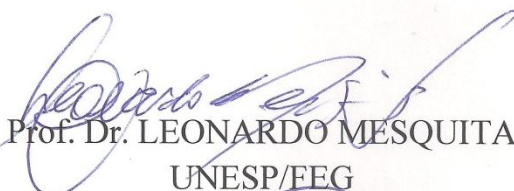
**APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA.**

Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. SAMUEL E. DE LUCENA
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA
UNESP/FEG



Prof. Dr. FERNANDO RIBEIRO FILADELFO
UNESP/FEG

Julho de 2017

RESUMO

A medição da pressão intraocular (PIO) é um fator muito importante para determinar a presença de problemas no sistema ocular, uma PIO elevada pode indicar a presença de um glaucoma, doença grave que se não for tratada da maneira correta pode levar uma pessoa a cegueira. O equipamento utilizado para medir a PIO chama-se tonômetro e possui uma grande variedade de tecnologias disponíveis no mercado, porém o alto custo acaba inviabilizando o acesso do diagnóstico para grande parte da população. Esse trabalho tem como objetivo analisar e comparar os tonômetros existentes atualmente no mercado assim como a tecnologia utilizada, seu funcionamento e suas principais características tomando como base os seguintes critérios: manutenção, mobilidade, posicionamento do paciente, necessidade de anestesia e colírio, interferência na medição da pressão. Para tal análise se faz necessário o estudo de fontes já existentes como livros, artigos, trabalhos de graduação e pós-graduação relacionados às áreas de engenharia e oftalmologia e manuais de funcionamento dos equipamentos, além da utilização dos conhecimentos adquiridos durante a graduação. Como o resultado dessas análises e comparações é possível então apresentar um projeto de tonômetro utilizando como referência o funcionamento e estrutura dos demais já existentes e propor melhorias para obter um equipamento que possua boas características funcionais aliadas a uma boa precisão e maior acessibilidade para os pacientes.

PALAVRAS-CHAVE: Funcionamento dos Tonômetros. Glaucoma. Pressão intraocular.

ABSTRACT

The Measurement of intraocular pressure (IOP) is a very important factor to define the presence of problems in the ocular system, an elevated IOP may indicate the presence of a glaucoma, a serious disease if not treated correctly can lead a person to blindness . The equipment used to measure the IOP is called a tonometer and has a wide variety of technologies available in the market, but the high cost ends up making it unfeasible to have diagnostic access for a large part of the population. This work aims to analyze and compare the tonometers currently in the market as well as the technology used, its operation and its main characteristics based on the following criteria: maintenance, mobility, patient positioning, need of anesthesia and eye drops, interference with the measurement of pressure. For this analysis, it is necessary to study existing sources such as books, articles, undergraduate and graduate studies related to engineering and ophthalmology areas and the operational manuals of the equipment, as well as the use of the knowledge acquired during graduation. As a result of these analyzes and comparisons it is possible to present a tonometer design using as reference the functioning and structure of the existing ones and propose improvements to obtain an equipment that has good functional characteristics combined with good precision and greater accessibility for patients.

KEYWORDS: Operation of Tonometers. Glaucoma. Intraocular pressure.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. O OLHO HUMANO	8
2.1. Túnica externa	8
2.2. Túnica média	9
2.3. Túnica interna	9
2.4. Outras estruturas	9
3. GLAUCOMA.....	11
3.1. Glaucoma de ângulo aberto.....	11
3.2. Glaucoma de ângulo fechado	12
3.3. Glaucoma congênito	12
3.4. Diagnóstico	12
3.5. Tratamento	13
4. TONÔMETROS.....	14
4.1. Tonômetro de aplanção	14
4.1.1. Tonômetro de Goldmann.....	15
4.1.2. Tonômetro de Perkins.....	16
4.1.3. Tonômetro de sopro	17
4.1.4. Ocular Response Analyzer	18
4.1.5. Tono-pen	20
4.2. Tonômetro de indentação de Schiötz.....	21
4.3. Tonômetro de contorno dinâmico de Pascal.....	23
4.4. Tonômetro de rebote.....	25
5. COMPARAÇÃO TONÔMETROS	26
5.1. Manutenção	26
5.2. Mobilidade	27
5.3. Posicionamento do paciente.....	28
5.4. Necessidade de anestesia e colírio fluorescente.....	28
5.5. Interferência na medição da pressão.....	29
6. BANCADA EXPERIMENTAL	30
7. ESTUDO DE MELHORIA TONÔMETRO	31
7.1. Funcionamento	31
7.1.1. Sensor piezoelétrico.....	32

7.2. Estrutura.....	33
8. CONCLUSÃO	35
9. REFERÊNCIAS	36

1. INTRODUÇÃO

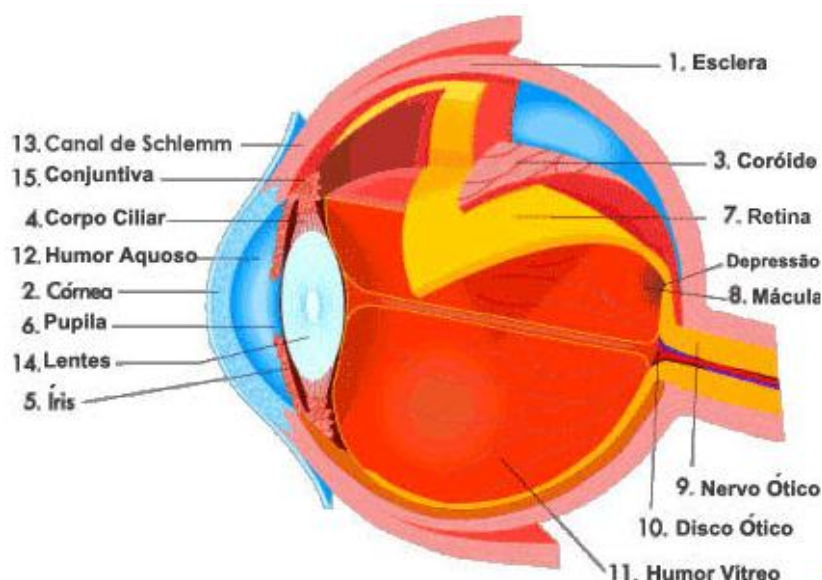
O glaucoma é uma doença que pode levar a cegueira, mas que também é facilmente controlado se o paciente obtiver o diagnóstico correto o mais rápido possível. Para tal diagnóstico é necessário o acompanhamento da pressão intraocular, que se mostra alterada em pessoas que possuem a doença. Para uma melhor compreensão é feita uma breve explicação sobre a estrutura do olho humano e do glaucoma e em seguida do equipamento utilizado para medir a pressão intraocular chamado tonômetro, que será o objeto de estudo desse trabalho no qual pretende-se analisar e comparar as tecnologias disponíveis atualmente no mercado através de livros, artigos, trabalhos e manuais. Após a análise dessas tecnologias será feita uma comparação levando em consideração a manutenção, mobilidade, posicionamento do paciente, necessidade de anestesia e colírio, e interferência na medição da pressão. E para finalizar apresenta-se uma bancada experimental e um estudo de melhoria de tonômetro levando em consideração as tecnologias estudadas.

2. O OLHO HUMANO

O globo ocular humano possui aproximadamente 24 mm de diâmetro. A proteção do globo é feita pela órbita, cavidade óssea do crânio, pálpebras, conjuntiva e aparelho lacrimal.

Possui seis músculos para controlar seus movimentos e é composto basicamente por três camadas chamadas de túnicas: externa, média e interna, representadas na Figura 1 a seguir:

Figura 1: Anatomia do olho humano



Fonte: <http://drerickabrazilmassa.site.med.br/index.asp?PageName=anatomia-e-fisiologia-do-olho>

2.1. Túnica externa

Conjuntiva: Membrana fina e transparente que cobre o olho, menos na parte da córnea, separada da esclera por um tecido fibroso.

Esclera: tecido branco e opaco responsável por proteger e manter a forma do olho.

Córnea: tecido transparente, fino e curvo posicionado na área frontal do olho com capacidade de refração que ajuda na nitidez das imagens formadas na retina.

2.2. Túnica média

Coroide: maior parte da túnica média composta por tecido conjuntivo com muitos vasos sanguíneos, rica em melanócitos e responsável pela nutrição do olho e da retina. Posicionada entre a retina e a esclera.

Corpo ciliar: tecido composto pelo músculo ciliar que tem as funções de segregação e produção do humor aquoso.

Íris: parte colorida do olho que tem sua cor determinada pela quantidade de melanina produzida pelos melanócitos.

Pupila: pequena abertura na íris que regula o seu diâmetro e dessa forma a luz que atravessa da córnea até o cristalino.

2.3. Túnica interna

Retina: camada mais interna que possui receptores sensíveis à luz que transformam a luz em impulsos nervosos, camada onde se encontra o nervo óptico.

2.4. Outras estruturas

Nervo óptico: Responsável por enviar os impulsos nervosos gerados na retina até o cérebro.

Cristalino: composto por duas superfícies convexas é responsável por focar a luz que é refratada pela córnea e direcioná-los a retina. Posicionada atrás da pupila.

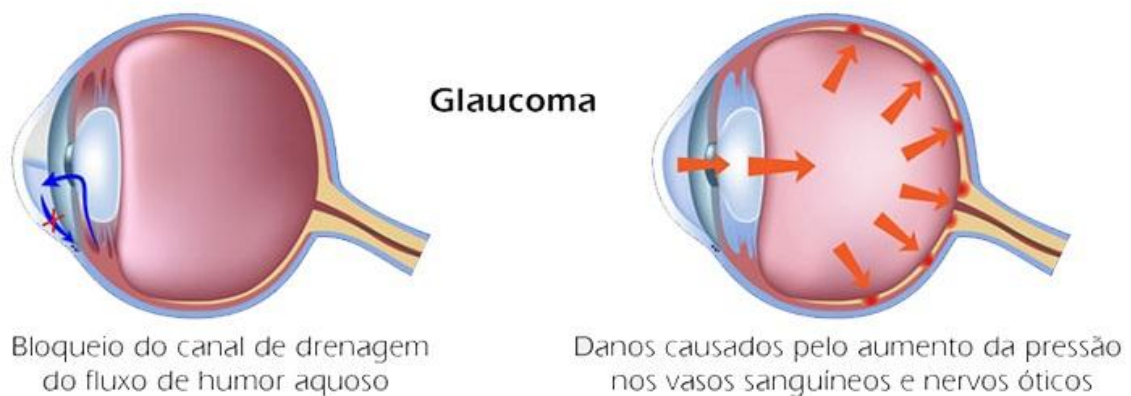
Humor aquoso: Líquido que preenche a cavidade do olho entre a córnea e o cristalino é composto por 98% de água e 2% de sais. O humor aquoso é responsável por controlar a pressão interna do olho e manter a nutrição da região. É renovado constantemente sendo gerado no processo ciliar e drenado pelo canal de Schlemm para que a pressão seja mantida constante.

Humor vítreo: Líquido transparente e viscoso que preenche todo o resto do globo entre o cristalino e retina.

3. GLAUCOMA

Glaucoma se refere a um grupo de doenças que causam danos ao nervo ótico, geralmente por aumento da pressão intraocular e que se não forem detectadas e tratadas adequadamente podem levar a cegueira.

Figura 2 : Glaucoma



Fonte: <http://www.oticasmatsumoto.com.br/saude-visual/entenda-como-o-glaucoma-provoca-danos-a-saude-dos-olhos/>

3.1. Glaucoma de ângulo aberto

A forma mais comum de glaucoma correspondente a 90 % dos casos registrados.

Causada por um aumento da pressão intraocular em decorrência de um acúmulo de humor aquoso no olho, sendo pelo aumento da produção do mesmo no corpo ciliar ou diminuição do fluxo no canal de Schlemm, responsável pela drenagem do humor aquoso. Nesse caso a pressão aumenta lentamente e o principal sintoma é a perda gradativa da visão, muitas vezes nem percebida pelo paciente.

3.2. Glaucoma de ângulo fechado

Esse tipo acontece quando o fluxo do humor aquoso é interrompido subitamente gerando um aumento rápido da pressão intraocular.

O glaucoma de ângulo fechado é uma emergência médica tendo como sintomas dor nos olhos, náuseas e distúrbios na visão.

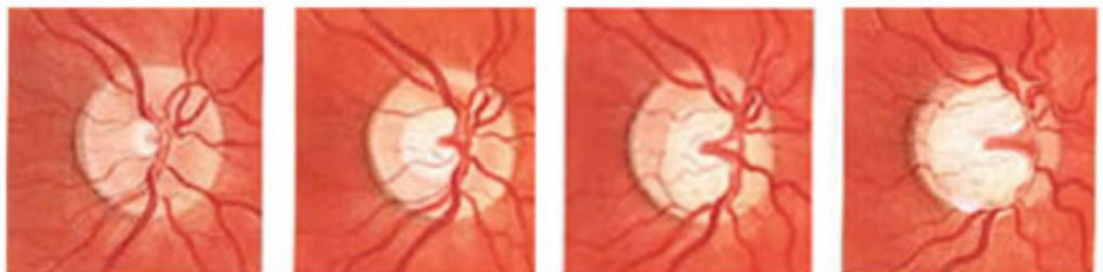
3.3. Glaucoma congênito

Ocorre quando a pessoa já nasce com a doença, que é herdada da mãe, é um tipo raro da doença.

3.4. Diagnóstico

O glaucoma pode ser diagnosticado mesmo antes do aparecimento de sintomas consideráveis através de um equipamento chamado tonômetro, capaz de medir a pressão intraocular do paciente, percebendo essa variação podemos partir para exames como a campimetria, capaz de medir se o campo de visão foi afetado pelo glaucoma e a oftalmoscopia, que permite a visualização do nervo ótico e assim detectar se sofreu algum dano. Na Figura 3 tem-se ilustrado um exemplo da evolução do dano detectada pela oftalmoscopia.

Figura 3: Evolução do dano ao nervo ótico em uma oftalmoscopia.



Fonte: <http://www.iorj.med.br/glaucoma-2/>

3.5. Tratamento

O tratamento deve ser contínuo, pois o glaucoma não tem cura, apenas é possível controlar a pressão intraocular através de colírios especializados, comprimidos e até cirurgia.

A rápida detecção é muito importante e se tratado a tempo e corretamente, na maioria dos casos, mantém uma qualidade de visão satisfatória ao paciente.

4. TONÔMETROS

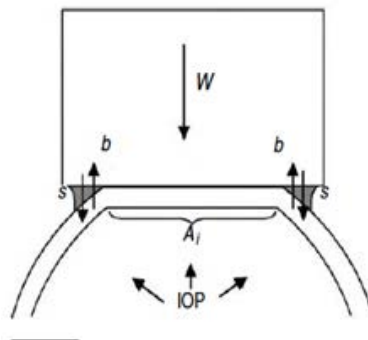
Após o entendimento maior sobre o glaucoma será feita uma análise dos tonômetros existentes atualmente e suas tecnologias.

4.1. Tonômetro de aplanção

Os tonômetros de aplanção utilizaram como base para sua concepção o princípio de Imbert-Fick, que diz que a pressão em uma esfera cheia de líquido e coberta por uma membrana extremamente fina é determinada pela contrapressão da esfera que ocasiona o achatamento da membrana. O princípio só é verdadeiro desconsiderando a rigidez e a espessura da membrana. Sendo W = força para aplanar a córnea, s = a força de atração do filme lacrimal, IOP = a pressão intraocular, A_i = a área de aplanção e b = força de repulsão pela elasticidade da córnea.

$$W + s = IOP \times A_i + b \quad (1)$$

Figura 4: Princípio de Imbert-Fick aplicado à córnea.



Fonte: <https://www.studyblue.com/notes/note/n/chapter-6/deck/6472655>.

O primeiro protótipo de tonômetro de aplanção foi desenvolvido por Alexei Maklakoff no final do século 19 e é chamado também de tonômetro de força fixa.

O tonômetro de Maklakoff era composto por um cilindro de metal com peso conhecido, o qual tocava a córnea, tingida por um corante, que manchava o cilindro na área correspondente a superfície de aplanção da córnea. A pressão era determinada através de tabelas e o método não foi muito utilizado por ser difícil de reproduzir.

4.1.1. Tonômetro de Goldmann

Em 1955 foi idealizado o tonômetro de Goldmann, considerado ainda por várias fontes como padrão-ouro para medição da PIO.

O tonômetro de Goldmann também utiliza o princípio de Imbert-Fick, mas em vez de um tonômetro de força fixa, como o anteriormente apresentado, trata-se de um tonômetro de área fixa, pois utiliza uma ponta que possui 3,06 mm de diâmetro, que foi determinada como a medida na qual a interferência de outras variáveis é a menor possível.

A ponta do tonômetro é feita de acrílico e possui um prisma de duplicação que forma uma imagem dividida em duas, a ponta é aberta na parte traseira e é ligada ao corpo do tonômetro por uma haste de metal e pode ser visto na Figura 5.

Para fazer a medição com esse equipamento ele precisa estar ligado a um biomicroscópio de lâmpada de fenda, que aumenta em até 10 vezes a imagem para que seja possível a visualização do menisco lacrimal.

Ao iniciar o processo de preparação do paciente é necessária a aplicação de um colírio anestésico e fluoresceína no olho do paciente, um líquido fluorescente próprio para utilização nos olhos.

A determinação do ponto exato para se medir a pressão intraocular é feita de forma manual, girando-se o botão escalonado na lateral do equipamento, que modifica a força aplicada sobre a córnea, até que o formato visualizado do menisco lacrimal seja de dois semicírculos idênticos se tocando apenas por suas extremidades, como apresentado na figura 6.B, nesse ponto estamos com uma aplanção correta para medição da PIO.

Na figura 6.A a córnea ainda está pouco aplanada, enquanto na figura 6.C já passou do ponto de aplanção.

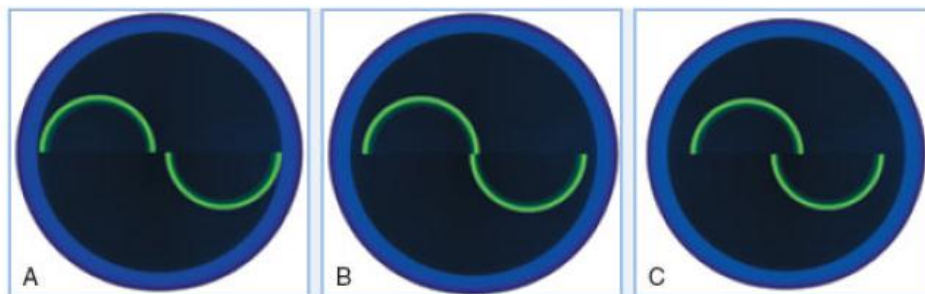
Os tonômetros de Goldmann mais modernos já possuem um display de LCD onde ele informa o valor da PIO.

Figura 5: Medição da PIO através da tonometria de Goldmann.



Fonte: <http://www.inof.es/inof/instrumentos.html>.

Figura 6: Imagem visualizada do menisco lacrimal.



Fonte: CORDEIRO, 2006.

4.1.2. Tonômetro de Perkins

O tonômetro de Perkins apresenta o mesmo princípio de funcionamento do tonômetro de Goldman, porém foi projetado para ser um tonômetro portátil e para isso foram feitas modificações na sua estrutura.

Com esse novo modelo não há necessidade de utilização de biomicroscópio de lâmpada de fenda já que o mesmo possui lentes atrás para aumentar a imagem e dois

LEDs azuis cobalto na parte da frente para iluminar a córnea, dessa maneira é possível através do prisma de duplicação enxergar o mesmo tipo de imagem visto com o tonômetro de Goldmann.

Esse equipamento possui um apoio frontal que se apoia na testa do paciente para ter maior firmeza para realizar a medição uma vez que não estará mais apoiado em outro lugar. Além da praticidade de ser um tonômetro portátil, ele aceita que façam medições tanto com paciente sentado, em pé e deitado.

Não possui porém um display que informa o valor da PIO e para determinar o valor da mesma é necessário observar a escala do botão que se gira para alterar a força aplicada a córnea. Após a leitura na escala multiplica-se esse valor por dez e encontra-se a PIO e mmHg.

Figura 7: Tonômetro de Perkins



Fonte: http://www.vetweb.com.br/ver_artigo.php?id=32.

4.1.3. Tonômetro de sopro

O tonômetro de sopro ou não contato também é um tonômetro de aplanção e por isso também baseado no princípio de Imbert-Fick, porém ao invés de aplanar a córnea utilizando um cilindro metálico ele utiliza um jato de ar, esse equipamento não possui tanta interferência manual sendo que em alguns modelos é necessário apenas ajustar a

posição correta do equipamento em relação à córnea e outros mais modernos, conhecidos como auto tonômetros, possuem uma câmera e fazem isso sozinhos mostrando inclusive a imagem do olho em uma tela *touch*.

Uma vez que o olho está posicionado de maneira correta em relação ao equipamento ele aciona um jato de ar cuja pressão aumenta linearmente até o momento da aplanação onde o mesmo é desligado, o momento exato da aplanação é determinado utilizando um sensor óptico reflexivo no qual a intensidade de luz que chega ao receptor é maior quando a córnea está plana.

Essa medição dura apenas algumas frações de segundo e é feita no instante em que o receptor do sensor detecta a luz sendo refletida na córnea, em que se determina qual a força necessária para que o jato aplanasse a córnea, o valor medido é mostrado em um display de LCD ou na tela *touch*, dependendo do modelo.

Figura 8: Auto Tonômetro de sopro



Fonte: <http://www.medicalvision.com.br/autotonometro.html>.

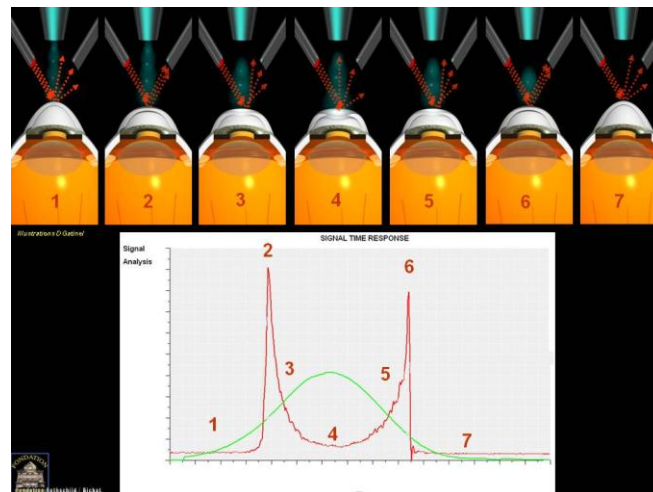
4.1.4. Ocular Response Analyzer

Esse equipamento é extremamente parecido com o anterior, mas utiliza um novo conceito fazendo duas medições da pressão intraocular ao em vez de apenas uma.

Ele funciona da mesma maneira acionando um jato de ar que aplanar a córnea, mas em vez de parar o jato de ar assim que a córnea é aplanada ele continua com o jato e diminui gradativamente o mesmo, dessa forma o equipamento é capaz de tirar duas medidas de pressão uma quando o olho é aplanado pela pressão do jato e outra quando, após ser empurrada para dentro a córnea volta à condição de aplanação antes de voltar ao estado normal. A primeira medida de pressão $P1$ é sempre maior do que a $P2$ o que acontece devido à propriedade visco elástica da córnea.

Na Figura 9 a seguir podemos visualizar melhor as aplanações e o gráfico gerado pelo ORA, sendo a linha vermelha o sinal detectado pelo sensor de luz e a linha verde a intensidade do sopro. É possível verificar então, que os pontos 2 e 6, onde temos um pico na detecção de luz, são os momentos em que ocorrem as duas aplanações e se fizermos uma linha vertical do ponto 2 e 6 até o gráfico verde determinamos então as pressões e após tirar uma média entre elas determinamos a PIO.

Figura 9 : Fases do processo do ORA e gráficos gerados.



Fonte: <https://www.gatinel.com/recherche-formation/biomecanique-corneenne/>

Esse aparelho calcula não só apenas a pressão intraocular como os anteriores, mas calcula também mais dois parâmetros: a histerese (CH) e o fator de resistência da córnea (CRF). Sendo a histerese corneana relacionada a capacidade da córnea em dissipar energia e calculada pela diferença entre $P1$ e $P2$, já o fator de resistência corneana representa os efeitos da resistência elástica e viscosa da córnea.

$$CH = P1 - P2 \quad (2)$$

$$CRF = P1 - 0,7P2 \quad (3)$$

Figura 10: Ocular Response Analyzer



Fonte: <http://www.projetosopticos.com.br/single-post/2015/05/15/ORA-Ocular-Response-Analyzer>.

4.1.5. Tono-pen

Tonômetro de aplanção portátil é baseado no protótipo de Mackay-Marg, no qual é feito um gráfico das pressões conforme um pistão avança em direção a córnea aplanando a córnea várias vezes, o equipamento conta com um extensômetro em sua ponta e causa cerca de 10 aplanções em 15 segundos para gerar o gráfico.

A tono-pen utiliza um microprocessador que coordena a movimentação do pistão e calcula o valor da PIO através dos dados coletados.

A superfície de contato com a córnea possui uma capa de látex descartável e a medição pode ser feita até mesmo com o paciente deitado.

Figura 11: Tono-pen

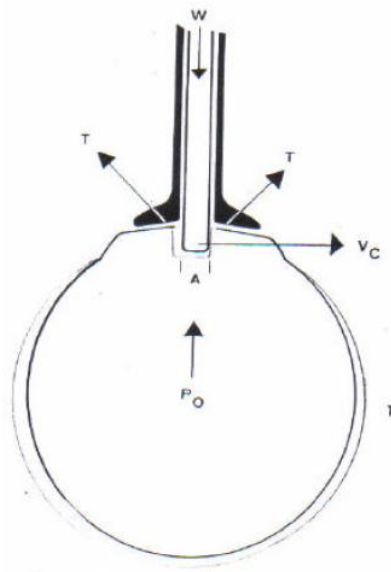


Fonte: http://www.reichert.com/product_details.cfm?skuId=2980&skuTk=1037022486

4.2. Tonômetro de indentação de Schiötz

A tonometria de indentação não possui o fenômeno de Imbert-Fick como base assim como os equipamentos vistos anteriormente, pois não apenas aplaina uma parte da córnea como também infere uma depressão na parte central da área aplanada como mostra a Figura 12.

Figura 12: Indentação da córnea.



Fonte: CORDEIRO, 2006.

Sendo W: força exercida pelo pistão, A: área da depressão, Vc: Volume da depressão da córnea, E: rigidez parietal pode-se calcular a PIO de acordo com as duas fórmulas a seguir:

$$\log (PIO) = \log \left(\frac{W}{A} \right) - E.Vc \quad (4)$$

$$E = \frac{\log(PIO_2) - \log(PIO_1)}{Vc_2 - Vc_1} \quad (5)$$

A partir dessas fórmulas foram criados gráficos para facilitar a determinação do valor da PIO.

Figura 13: Escala de Schiötz



Fonte: <https://www.elcoleccionistaeclectico.com/technical-antiques/antique-tonometer-schiotz-rwurach-silver-metal-case-germany>.

O tonômetro de indentação de Schiötz é um equipamento portátil que possui um conjunto de pesos de 5.5, 7.5, 10 e 15 gramas e um gráfico com eixo x em gramas e o y em milímetros de mercúrio, conforme imagem.

Para medir a pressão intraocular o paciente fica deitado e se escolhe um dos pesos, dessa forma ao pressionar as hastes laterais do equipamento um pistão desce e indenta a córnea e ao mesmo tempo o ponteiro se move na escala, essa indentação gera um aumento da PIO no momento da medição e pode vir a danificar o olho do paciente se não utilizado com cuidado. Finalmente para determinar a pressão intraocular é necessário utilizar o valor aferido pelo tonômetro no gráfico fornecido. É necessário que se tome uma segunda medida com um peso diferente para confirmar a medição e medir a rigidez parietal para corrigir os erros de leitura causados por córneas mais ou menos rígidas do que o comum.

Figura 14: Tonômetro de Schiötz

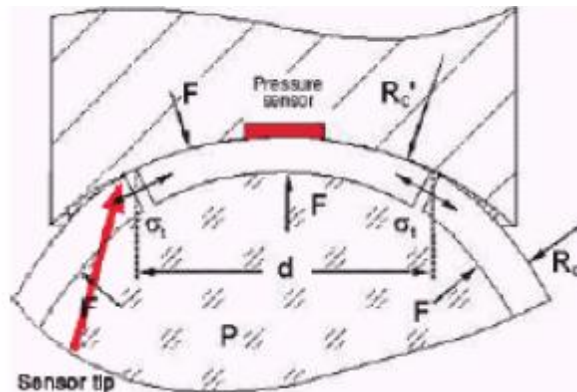


Fonte: http://www.historiadelamedicina.org/Instrumentos/instrumento_57.html.

4.3. Tonômetro de contorno dinâmico de Pascal

O tonômetro de Pascal, diferentemente dos outros, é um tonômetro de contorno dinâmico que tem como fundamento a lei da pressão hidrostática de Blaise Pascal, que diz que a variação da pressão em um determinado ponto de um fluido em equilíbrio é mesma que em todos os pontos desse fluido e da parede que o contém.

Figura 15: Princípio de funcionamento tonômetro de Pascal.



Fonte: CORDEIRO, 2006.

O tonômetro de Pascal utiliza um sensor piezoelétrico com área de $0,25 \text{ mm}^2$ em sua extremidade em formato côncavo com raio de $10,5 \text{ mm}$ que entra em contato com a córnea de maneira a não deslocar a mesma de forma significativa, sendo assim um método muito menos invasivo que os anteriores, não alterando as características da córnea conforme ilustrado na imagem a seguir.

Utiliza uma proteção transparente de silicone descartável para evitar qualquer tipo de contaminação do olho do paciente.

Figura 16: Tonômetro de Pascal



Fonte :<http://glaucoma-answers.org/en/node/15>.

4.4. Tonômetro de rebote

O Tonômetro de rebote iCARE é um tonômetro portátil não invasivo que faz a medição da pressão intraocular com o paciente sentado.

Ele possui um projétil de ponta esférica de aço revestido de plástico que é impulsionado em direção à córnea por uma mola e mantido flutuando no eixo correto por um campo magnético, um microprocessador calcula a pressão intraocular de acordo com o tempo de desaceleração do projétil ao tocar a córnea.

Figura 17: Tonômetro de rebote



Fonte: <https://portuguese.alibaba.com/p-detail/sw-500-rebound-tonometer-portable-tonometer-with-wireless-printer-60364446166.html>

5. COMPARAÇÃO TONÔMETROS

Após entendermos o funcionamento dos tonômetros e suas diferentes tecnologias faremos uma comparação de aspectos importantes para a viabilização de um projeto, utilizaremos os parâmetros: manutenção, mobilidade, posicionamento do paciente, necessidade da utilização de colírios e interferências na medição da pressão.

Nessa comparação desconsideraremos o tonômetro de Schiötz por se tratar de uma tecnologia ultrapassada que pode inclusive danificar o olho do paciente.

5.1. Manutenção

A manutenção mais cara e trabalhosa sem dúvida é do tonômetro de Goldmann, que além de precisar da utilização de um equipamento extra, o microscópio de lâmpada de fenda, ainda inclui o custo da troca da lâmpada especial, troca do seu prisma quando gasto, troca da pilha e, dependendo do modelo, troca do prisma a cada uso, para o outro modelo onde a troca do prisma não é feita a cada uso é necessária uma limpeza cuidadosa do mesmo a cada uso, além de calibrações frequentes.

O tonômetro de Perkins apenas exclui a utilização da lâmpada de fenda, mas também necessidade dos outros cuidados e custos do tonômetro de Goldmann.

Os tonômetros de Sopro e ORA por não terem contato direto com o olho do paciente precisam apenas de uma limpeza simples semanal para evitar o entupimento do canal do jato de ar. Não necessitam de troca de bateria, pois funcionam ligados a tomada. No quesito manutenção são os mais econômicos e simples.

A tono-pen exige também apenas uma limpeza semanal, pois utiliza capas de silicone descartáveis a cada utilização e também a troca da bateria.

O tonômetro de Pascal, assim como o de Goldmann, utiliza a lâmpada de fenda, o que encarece sua manutenção e sua aquisição. Também precisa realizar a troca do sensor quando desgastado, a troca da capa de silicone a cada uso e a troca da bateria.

O iCARE faz necessária a troca do projétil a cada utilização, a troca semanal da base do projétil e a troca da bateria.

Tabela 1: Comparação manutenção tonômetros

	Limpeza	Troca de peças
Goldmann	Limpeza a cada uso ou Limpeza semanal + troca do prisma a cada uso	Lâmpada de fenda Prisma Pilha
Perkins	Limpeza a cada uso ou Limpeza semanal + troca do prisma a cada uso	Prisma Bateria
Sopro	Limpeza semanal	-
ORA	Limpeza semanal	-
Tono-pen	Limpeza semanal	Capa a cada uso Bateria
Pascal	Limpeza semanal	Lâmpada de fenda Sensor Capa a cada uso Bateria
iCARE	Limpeza semanal	Projétil a cada uso Bateria Semanal base do projétil

Fonte: Produção do próprio autor

5.2. Mobilidade

Conforme tabela abaixo os tonômetros portáteis dessa comparação são: Perkins, Tono-pen e iCARE.

Tabela 2: Mobilidade dos tonômetros

	Portátil
Goldmann	Não
Perkins	Sim
Sopro	Não
ORA	Não

Tono-pen	Sim
Pascal	Não
iCARE	Sim

Fonte: Produção do próprio autor

5.3. Posicionamento do paciente

Os tonômetros que permitem que o paciente esteja deitado além da posição normal sentado são: Perkins e Tono-pen. Isso facilita a utilização em crianças pequenas e pacientes acamados.

Tabela 3: Posicionamento do paciente

	Deitado	Sentado
Goldmann	Não	Sim
Perkins	Sim	Sim
Sopro	Não	Sim
ORA	Não	Sim
Tono-pen	Sim	Sim
Pascal	Não	Sim
iCARE	Não	Sim

Fonte: Produção do próprio autor

5.4. Necessidade de anestesia e colírio fluorescente

Quanto à anestesia, os únicos tonômetros que não necessitam desse procedimento são Sopro, ORA e iCARE. Já em relação ao colírio fluorescente, apenas o Goldmann demanda sua utilização.

Tabela 4: Anestesia e colírio Fluorescente

	Anestesia	Fluorescência
Goldmann	Sim	Sim
Perkins	Sim	Não

Sopro	Não	Não
ORA	Não	Não
Tono-pen	Sim	Não
Pascal	Sim	Não
iCARE	Não	Não

Fonte: Produção do próprio autor

5.5. Interferência na medição da pressão

Goldmann: O tonômetro de Goldmann é afetado pela espessura central da córnea, curvatura corneana e Astigmatismo e em córneas com elasticidade alterada.

Perkins possui os mesmos problemas de Goldmann, pois utiliza o mesmo sistema para medição da IOP.

Sopro: O tonômetro de Sopro é afetado pela espessura central da córnea e por irregularidades na córnea, tem maior precisão em pressões próximas ao normal tendo problemas com pressões mais altas.

ORA: Possui os mesmos problemas de medição que o de sopro, porém são atenuados pela medida da histerese e fator de resistência da córnea.

Tono-pen: Hiperestima pressões baixas e hipoestima pressões altas.

Pascal: Praticamente sem interferência, pois não altera o formato da córnea durante a medição.

iCARE: mais influenciado por espessura central da córnea do que os de aplanção.

6. BANCADA EXPERIMENTAL

Para efetuar os testes com o protótipo será necessária à criação de uma bancada experimental, retirado do trabalho de Cordeiro (2006).

Poderíamos construir a bancada a seguir inicialmente utilizando uma bexiga e posteriormente o olho de um gato, por ser o mais próximo do olho humano, tanto biológica quanto fisiologicamente.

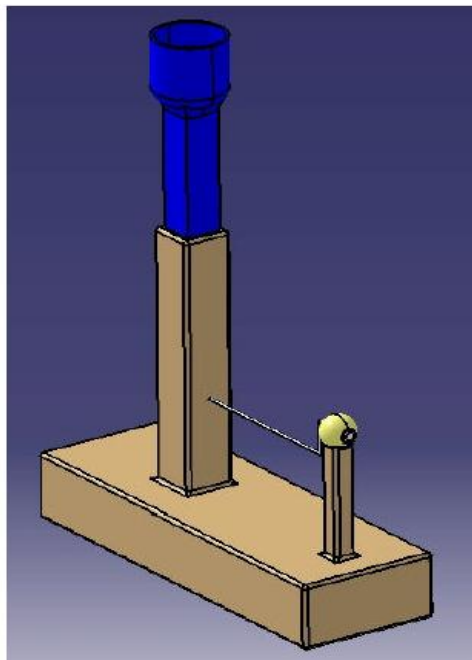
A bancada é constituída por um reservatório cuja pressão pode ser controlada movendo o pistão azul e a bexiga/olho será ligada ao reservatório por um tubo medindo 5 mm de diâmetro, como pode-se ver na Figura 18.

Para a determinação da pressão no olho será utilizada a altura do reservatório que é variável e a equação de Bernoulli:

$$PIO = \rho \left(\frac{p_{atm}}{\rho} + g \cdot h \right) \quad (6)$$

Sendo ρ a densidade da solução de água (98%) e cloreto de sódio (2%); p_{atm} a pressão atmosférica; h a diferença de altura entre a superfície do líquido e o tubo de 5 mm; g a gravidade.

Figura18: Bancada experimental para teste de tonômetro.



7. ESTUDO DE MELHORIA TONÔMETRO

Após a análise dos tonômetros, tendo em vista uma maior mobilidade e menor manutenção e preço, vamos propor uma adaptação de um tonômetro já existente, levando em conta a modificação que foi feita do tonômetro de Goldmann para o Perkins.

A ideia seria criar, através do tonômetro de Pascal, um tonômetro de contorno dinâmico portátil, aliando a modernidade dessa técnica com um equipamento mais acessível por não necessitar de uma lâmpada de fenda.

A seguir uma descrição mais detalhada do funcionamento e estrutura.

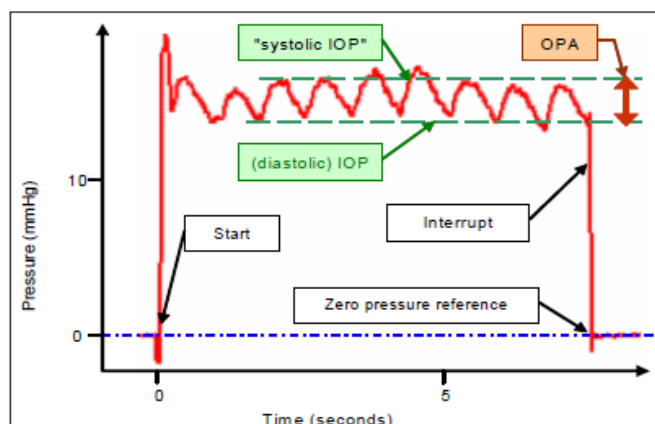
7.1. Funcionamento

O equipamento aqui proposto teria como entrada um transdutor piezoelétrico, cujo sinal passaria por um amplificador de sinal devido à onda gerada pelo mesmo ter uma amplitude bem reduzida.

O transdutor piezoelétrico é tão sensível que consegue medir a PIO sistólica e diastólica, que são as pressões máximas e mínimas de acordo com os batimentos cardíacos.

Para gerar um gráfico como esse é necessário obter um sinal entre 8 e 10 batimentos cardíacos, o que pode ser contado pelo operador se utilizado um buzzer para produzir o som referente à forma de onda gerada.

Figura 19: Gráfico gerado pelo tonômetro de Pascal.



Após a obtenção desse sinal ele será processado e analisado por um microprocessador que deverá calcular:

- IOP (pressão intraocular) calculada através do valor médio da forma de onda.
- OPA (amplitude de pulso ocular) calculando a amplitude do sinal, ou seja, a diferença entre a pressão sistólica e diastólica.
- Q (fator de qualidade) fator de qualidade baseado no formato da onda, para sabermos que o sensor estava posicionado corretamente em contato com a córnea durante todo o processo variando de 1 a 5, sendo o melhor valor 1 e o pior 5. (Se $Q = 4$ ou 5 a medição deve ser refeita).

7.1.1. Sensor piezoelétrico

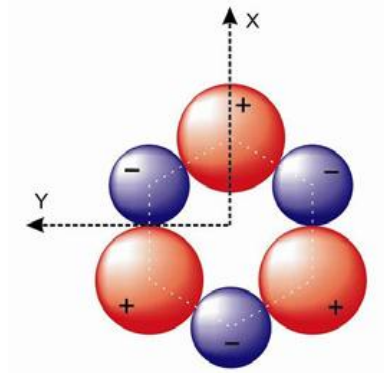
A piezeletricidade foi descoberta por Pierre e Jaques Curie e foi primeiramente apresentado em 1880. A piezeletricidade é a capacidade que alguns materiais possuem em gerar corrente elétrica quando uma deformação ocorre através de pressão mecânica exercida sobre os mesmos. É um fenômeno que ocorre comumente em cristais, cerâmicas e polímeros e ocorre também na sua forma reversa, ou seja, uma corrente elétrica gera deformação no material.

Pode-se entender melhor como esse efeito ocorre visualizando a estrutura de um material piezoelétrico, o quartzo, contida na Figura 20.

Sua estrutura natural é simétrica em relação às cargas positivas e negativas, porém percebemos que ao sofrer deformação por tração ou compressão a estrutura não é mais simétrica o que gera um dipolo elétrico, como pode-se verificar na Figura 21.

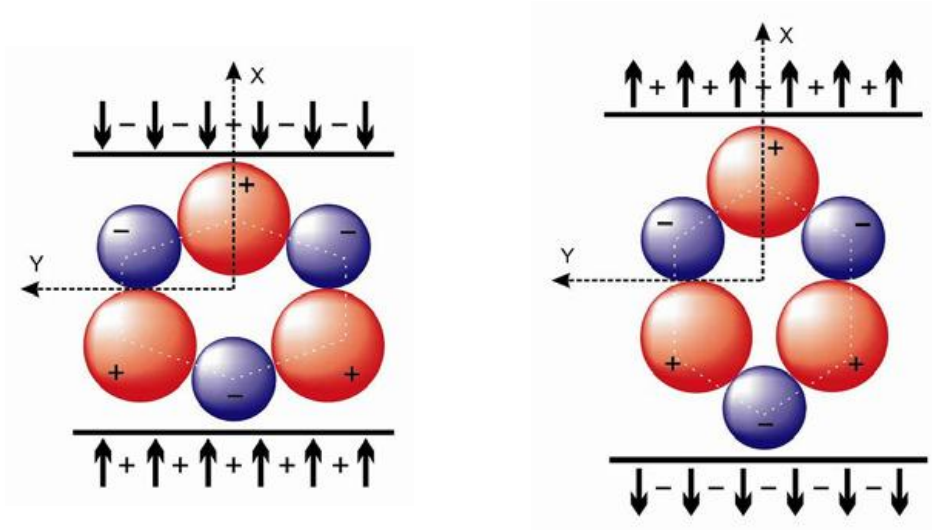
Através desses materiais piezoelétricos pode-se fabricar sensores piezoelétricos que se utilizam das características desses materiais para tornar possível a medição da tensão elétrica gerada por uma determinada tensão mecânica aplicada ao sensor.

Figura 20: Estrutura do quartzo.



Fonte: ABEL (2012).

Figura 21: Força de compressão e de tração aplicadas ao quartzo.



Fonte: ABEL (2010).

7.2. Estrutura

A estrutura proposta para esse equipamento seria muito parecida com o tonômetro de Perkins, utilizando uma lente na parte de trás e dois LEDs azuis de alta intensidade na frente para visualização do posicionamento correto do sensor em relação à córnea, tornando assim desnecessário o uso de um microscópio de lâmpada de fenda deixando o projeto mais barato e tornando-o portátil.

A ponta seria modificada para o formato do tonômetro de Pascal sendo transparente e contendo o sensor e a capa protetora de silicone e se tratando de um tonômetro portátil faríamos uso de uma bateria recarregável e um display LCD para indicar os valores medidos.

Figura 22: Estrutura do tonômetro proposto.



Fonte: <http://www.ofthalmicabonet.com/tonometro-de-perkins/25-tonometro-de-perkins.html>

8. CONCLUSÃO

Após todo estudo e análises pudemos perceber que ainda há muito para se avançar quando o assunto é a tecnologia aplicada à saúde de forma eficiente, e que trabalhos como esse são de extrema importância para o avanço nesse campo, principalmente em um país onde a tecnologia não recebe o devido incentivo e onde os equipamentos médicos importados acabam sendo muito caros e chegam até o paciente defasados tecnologicamente.

Ainda hoje utilizamos equipamentos para medição da pressão intraocular que muitas vezes não indicam o valor correto em decorrência de mudanças nas características oculares como astigmatismo ou uma espessura de córnea considerada fora do “padrão”, precisamos avançar muito nesse assunto, mas com a tecnologia a nosso favor para tornar acessível a todos um diagnóstico preciso e um tratamento correto.

9. REFERÊNCIAS

ABEL, Ana Maria da Silva; LUIZ, Sandro Galisteu. **Sensores e Atuadores Piezoelétricos**. 2010. 11 f. Curso de Eletrônica e Instrumentação, Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2010.

ALBERTO, Mónica Raquel Pedrosa. **Fluorometria Ocular Clínica**. 2008. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Biomédica, Faculdade de Ciência e Tecnologia Departamento de Física, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2008.

CORDEIRO, Rodrigo Andreos. **Determinação de incertezas de medição e projeto de uma bancada experimental para os aparelhos medidores de pressão intra-ocular utilizados no diagnóstico de glaucoma**. 2006. 66 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

FOSSEY, Marcelo André. **Tonômetro eletrônico para a medida da pressão intraocular**. 1985. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia de Campinas, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1985.

GRADVOHL, Hissa Tavares de Lima. **Amplitude de pulso ocular em pacientes com glaucoma e hipertensão arterial sistêmica**. 2012. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Médicas, Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2012.

KITICE, Priscila Yumi et al. Espessura central da córnea e a medida da pressão intra-ocular com diferentes tonômetros: Could the central cornea thickness change the intraocular pressure results obtained by different tonometers. **Revista Brasileira de Oftalmologia**, [s.l.], v. 66, n. 6, p.389-393, dez. 2007. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0034-72802007000600005>.

LUCE, David A.. Determining in vivo biomechanical properties of the cornea with an ocular response analyzer. **Journal Of Cataract & Refractive Surgery**, [s.l.], v. 31, n. 1, p.156-162, jan. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcrs.2004.10.044>.

MEIRA-FREITAS, D; MELO JR, LA. **Tonometria, Paquimetria, Curva Tensional Diária e Testes Provocativos**. In: Mello PAA; Almeida GV; Almeida HG. Glaucoma Primário de Ângulo Aberto. Tema Oficial do Congresso Brasileiro de Oftalmologia. Rio de Janeiro: Cultura Médica, 2011.

MENDES, Marcio Henrique. **Comparação dos valores da pressão intraocular obtidos com diferentes tonômetros e suas correlações com dados biométricos oculares no glaucoma congênito.** 2013. 96 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências, Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

RAMALHO, Mário et al. **Medição da Pressão Intra-Ocular.** Lisboa: Hospital Prof. Dr. Fernando Fonseca, E.p.e., 2012. 27 slides, color.

YAMANE, Iris de Souza. **Avaliação de parâmetros tomográficos de córnea e segmento anterior e de variáveis desencadeadas pela resposta ocular à tonometria de não contato.** 2012. 149 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Programa de Oftalmologia, Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.