



**CONTROLE EM MALHA FECHADA PARA GUIAGEM DE AGULHAS  
FLEXÍVEIS A PARTIR DE IMAGENS DE CÂMERA**

**ALLAN GOMES CORRÊA**

**LUCAS FUJITA DOS REIS**

**TRABALHO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**



**ENGENHARIA  
MECATRÔNICA**  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CONTROLE EM MALHA FECHADA PARA GUIAGEM DE AGULHAS  
FLEXÍVEIS A PARTIR DE IMAGENS DE CÂMERA**

**ALLAN GOMES CORRÊA  
LUCAS FUJITA DOS REIS**

**TRABALHO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO  
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGE-  
NHEIRO MECATRÔNICO.**

**APROVADA POR:**

---

**Antônio Padilha Lanari Bó, ENE/UnB  
(Orientador)**

---

**Mariana Costa Bernardes Matias, FGA/UnB  
Co-Orientador**

---

**João Luiz Azevedo de Carvalho, ENE/UnB  
Examinador Interno**

---

**Geovany Araújo Borges, ENE/UnB  
Examinador Interno**

**BRASÍLIA, 06 DE DEZEMBRO DE 2016.**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

**CORRÊA, ALLAN GOMES E REIS, LUCAS FUJITA DOS**

Controle em malha fechada para guiagem de agulhas flexíveis a partir de imagens de câmera [Distrito Federal] 2016.

xi, 61p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Engenheiro, Engenharia Elétrica, 2016).

TRABALHO DE GRADUAÇÃO – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

1. Guiagem de agulhas flexíveis

2. Malha fechada

3. Passos Discretos

4. Ciclo de trabalho

I. ENE/FT/UnB

II. Controle em malha fechada para guiagem de agulhas  
flexíveis a partir de imagens de câmera

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

CORRÊA, A.G. E REIS, L.F. (2016). Controle em malha fechada para guiagem de agulhas flexíveis a partir de imagens de câmera, TRABALHO DE GRADUAÇÃO em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.TD-21/2016, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 61p.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

AUTOR: Allan Gomes Corrêa e Lucas Fujita dos Reis

TÍTULO: Controle em malha fechada para guiagem de agulhas flexíveis a partir de imagens de câmera.

GRAU: Engenheiro                    ANO: 2016

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta trabalho de graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa trabalho de graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Allan Gomes Corrêa

Departamento de Eng. Elétrica (ENE) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

---

Lucas Fujita dos Reis

## **Dedicatórias**

*Dedico este trabalho aos meus pais e amigos  
próximos*

*Allan Gomes Corrêa*

*Dedico este trabalho à minha família.*

*Lucas Fujita dos Reis*

## AGRADECIMENTOS

*Agradeço as oportunidades que tive na vida e assim pude chegar até esse momento. Agradeço aos meus pais, pelo apoio e incentivo em terminar a faculdade. À minha dupla TG, que contribuiu para que esse trabalho se realizasse. À professora Mariana Bernardes, por ter dado a oportunidade de participar desse projeto e ao André Geraldes por ter dado suporte no pouco tempo que lhe coube. Aos meus amigos próximos que participaram dessa etapa em minha vida. Aos membros do LARA, por terem ajudado em alguns momentos dessa caminhada. Enfim, agradeço a todas as pessoas que indiretamente fizeram parte da minha formação.*

*Allan Gomes Corrêa*

*Agradeço, antes de tudo, à minha família que sempre me apoiou nas minhas escolhas e me incentivou no caminho da engenharia. Minha mãe Cecília, minha irmã Bianca, meus irmãos Gabriel e Guilherme, ao meu pai Rui e minha madrasta Rubia. Agradeço especialmente ao meu companheiro de TG, sem o qual não seria possível a finalização deste trabalho. Agradeço à professora Mariana Bernardes por ter aberto as portas para esse mundo e por ter auxiliado sempre que a dúvida vinha à tona e ao André Geraldes por ter iniciado este projeto e, mesmo distante ter ajudado em muitas dificuldades. Agradeço aos membros do LARA por todo o auxílio durante o ano, em especial ao Luis Figueiredo que durante várias vezes parou o seu trabalho para auxiliar no projeto. Agradeço aos meus colegas de curso Vitor Rezende e Gabriel Cataldi que ajudaram com os projetos mecânicos, Rafael Lima e Marcos Pereira pelo suporte em várias ocasiões e Cristiana Miranda por todo o auxílio em conteúdos que eu não possuía proficiência. Por fim, agradeço a todas as pessoas que me deram forças quando não me restava mais nenhuma, que me incentivaram a levantar em todos os tropeços, que me fizeram rir e sorrir sempre que o dia não estava bom e que tiveram paciência quando a mim me faltava.*

*Lucas Fujita dos Reis*

---

## RESUMO

Este trabalho é continuação de um projeto já realizado de inserções de agulhas flexíveis em procedimentos cirúrgicos minimamente invasivos por GERALDES, A.A. (2015), Dispositivo robótico para guiagem de agulhas flexíveis em procedimentos minimamente invasivos. O objetivo principal do trabalho é realizar a realimentação de um dispositivo de inserção de agulhas flexíveis a partir do uso de imagens por câmera. Visto que o dispositivo utilizado já havia sido montado, deliberou-se, como objetivo secundário, realizar melhorias mecânicas no dispositivo original, a fim de corrigir os problemas encontrados e que já eram previstos desde o início. O desenvolvimento do projeto compreendeu a correção de falhas de código; a verificação de erros e falhas mecânicas; e a implementação de uma realimentação de modo a corrigir a trajetória da agulha utilizando dois métodos de guiagem distintos. Apesar de muitas dificuldades terem sido encontradas durante o trabalho - principalmente devido à falta de um sensor magnético que nos auxiliasse a obter resultados mais confiáveis -, os resultados observados permitiram concluir que o fechamento da malha trouxe melhorias em sua trajetória, permitindo o alcance de um alvo com um erro pequeno. Acredita-se também ser possível alcançar um menor erro e diminuir as aleatoriedades dos resultados com a correção dos problemas mecânicos.

---

## ABSTRACT

This work is continuation and extension of a previous project on the insertion of flexible needles for minimally invasive surgery procedures. The main goal of this project was to add a feedback loop on a device for needle insertion by using images obtained from a camera. Seeing that the insertion device was already mounted, it was introduced, as a secondary goal, the idea of making updates on its mechanical structure, therefore aiming to correct already predicted problems. The development of this project incorporated code corrections, error and mechanical failure detection and the implementation of a feedback loop that used two different methods for the course correction of the needle. Although many difficulties have been found throughout the project – mainly due to the lack of a magnetic sensor that would ensure more reliance on the obtained results – what was observed allowed the conclusion that a closed loop system indeed brings improvements to the path of the needle, allowing it to reach its target with a small error. It is also believed that its possible to obtain even lower error and randomness by correcting the mechanic problems.

## CONTEÚDO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA .....	2
1.3	PROPOSTA DO TRABALHO .....	3
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>4</b>
2.1	MODELAGEM DO MOVIMENTO DA AGULHA .....	4
2.1.1	MODELO CINEMÁTICO DA PONTA DA AGULHA.....	4
2.1.2	MODELO DE TORÇÃO DA AGULHA.....	4
2.2	PLANEJAMENTO DE TRAJETÓRIA .....	5
2.3	MÉTODOS DE INSERÇÃO .....	6
2.3.1	MÉTODOS <i>stop-and-turn</i> E DE INSERÇÃO HELICOIDAL .....	6
2.3.2	AJUSTE DA CURVATURA POR CICLO DE TRABALHO .....	7
2.3.2.1	MÉTODO DE ROTAÇÃO CHAVEADA DA AGULHA .....	7
2.3.2.2	MÉTODO DE INVERSÃO CHAVEADA DA PONTA .....	8
2.3.3	MÉTODO DE INSERÇÃO POR PASSOS DISCRETOS .....	8
2.4	TIPOS DE AGULHA .....	9
2.4.1	AGULHAS PASSIVAS .....	9
2.4.2	AGULHAS ATIVAS .....	10
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>11</b>
3.1	FAMILIARIZAÇÃO COM O DISPOSITIVO E CORREÇÃO DE FALHAS .....	11
3.1.1	PROCEDIMENTOS DE PRÉ-INSERÇÃO .....	12
3.1.2	TESTES EM MODO ANTENA TELESCÓPICA.....	13
3.1.3	CORREÇÃO DO CÓDIGO EM MODO PASSOS DISCRETOS .....	14
3.1.4	AJUSTES PARA REDUÇÃO DO ERRO.....	15
3.2	SETUP DO AMBIENTE EXPERIMENTAL.....	16
3.2.1	SUPORTE DA GELATINA BALÍSTICA.....	17
3.2.2	AJUSTES NO DISPOSITIVO DE INSERÇÃO .....	18
3.2.3	CALIBRAÇÃO DA CÂMERA .....	18
3.2.4	CALIBRAÇÃO EM PASSOS DISCRETOS .....	20
3.3	MÉTODO DE RASTREAMENTO DA PONTA DA AGULHA .....	21
3.4	MÉTODO DE CORREÇÃO EM MALHA FECHADA .....	22
3.4.1	PROCEDIMENTOS DO EXPERIMENTO DE ALCANCE DE ALVO .....	23
3.4.2	PROCEDIMENTOS DO EXPERIMENTO DE CORREÇÃO PARA SEGMENTO DE TRAJETÓRIA .....	27
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DE DADOS .....</b>	<b>30</b>
4.1	RESULTADOS EM MODO ANTENA TELESCÓPICA .....	30
4.2	RESULTADO DOS EXPERIMENTOS EM MALHA FECHADA .....	30

4.2.1 RESULTADOS DAS CORREÇÕES PARA SEGMENTO DE TRAJETÓRIA .....	32
4.2.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO MÉTODO DE ALCANCE DE ALVO .....	33
4.2.3 ANÁLISE DOS ERROS DO MÉTODO DE ALCANCE DE ALVO.....	38
4.3 RESULTADOS DAS INSERÇÕES EM MALHA ABERTA.....	41
<b>5 DISCUSSÕES.....</b>	<b>44</b>
5.1 CONCLUSÕES .....	44
5.2 TRABALHOS FUTUROS .....	45
5.2.1 MELHORIAS MECÂNICAS .....	45
5.2.2 OUTRAS MELHORIAS .....	46
<b>A TABELA: RESULTADOS DE TODAS AS INSERÇÕES .....</b>	<b>49</b>
<b>BIBLIOGRAPHY .....</b>	<b>49</b>

## Lista de Figuras

1.1	Procedimentos cirúrgicos que utilizam agulhas. ....	2
1.2	Possíveis configurações para dispositivos de inserção de agulhas flexíveis. Na figura (a) a atuação é realizada na base da agulha, enquanto na figura (b) esta atuação é realizada pela prensa localizada mais próxima ao ponto de incisão.....	3
2.1	Exemplo gráfico dos ângulos utilizados para encontrar o raio entre os pontos $P_A$ e $P_B$ . ....	5
2.2	Modelo do movimento helicoidal realizado pela agulha. ....	7
2.3	Processo de um passo de inserção discreto. Da posição inicial, a agulha é presa para uma pequena inserção. Em seguida ela é liberada e o processo volta para o início. Fonte [9] .....	9
2.4	Tipos de agulhas <sup>1</sup> .....	10
2.5	Exemplo de uma agulha com junção flexível que utiliza três arames de nitinol de 0,125mm de diâmetro para conectar a ccabeça do corpo. Fonte: [18] .....	10
3.1	Modelo 3D do dispositivo, com descrição das peças. ....	11
3.2	Fluxograma das rotinas criadas no Matlab para igual execução dos procedimentos .....	12
3.3	Trajetória planejada para a rotina <i>experimentOpenLoopTrajectory</i> . Fonte: [9] .....	14
3.4	Fotos da castanha evidenciando o sulco formado pela agulha.....	16
3.5	Adaptação realizada no dispositivo para restringir a movimentação do suporte frontal..	17
3.6	Posicionamento da câmera em relação à gelatina balística.....	17
3.7	Suporte da gelatina balística. ....	18
3.8	Calibração do tabuleiro de xadrez. Tela de funcionamento do aplicativo <i>cameraCalibrator</i> com fotos em diferentes sentidos. ....	19
3.9	Comparação entre o tabuleiro de xadrez pela imagem antes e depois da correção de perspectiva.....	20
3.10	Imagens mostrando o antes e depois do tratamento.....	20
3.11	Linearização da relação de ciclos de trabalho obtidos e comandados. ....	22
3.12	Diagrama de blocos referente aos passos de Alcance de Alvo. ....	23
3.13	Diagrama de blocos representando a função <i>CorrecaoBin_inicial</i> . ....	24
3.14	Ponta da agulha no início da inserção. ....	24
3.15	Diagrama de blocos referente à função <i>CurvaturaNova</i> . ....	24
3.16	Imagen referente a função <i>CurvaturaNova</i> . ....	25
3.17	Processo de binarização e cálculo do ângulo de saída da agulha.....	26
3.18	Diagrama de blocos da função <i>Correcao</i> . ....	27
3.19	Imagen da saída da função <i>Correcao</i> mostrando a trajetória a ser realizada para o passo seguinte. ....	28
3.20	Diagrama de blocos referente aos passos de correção para Segmento de Trajetória. ....	28

4.1	Ângulo de saída da agulha no momento logo antes da inserção. ....	30
4.2	Curva realizada pela base da agulha no momento em que as castanhas a seguram.....	31
4.3	Resultado ao final de uma inserção em que a agulha ultrapassa o ponto final desejado..	31
4.4	Exposição da diferença do resultado da binarização da agulha.....	32
4.5	Resultado ao final de uma inserção utilizando o método de correção para Segmento de Trajetória.....	33
4.6	Resultado obtido na inserção de um ciclo de trabalho de 0%.....	34
4.7	Inserção para um ciclo de trabalho de 25% em que a distância ficou bem próximo ao raio de erro permitido.....	35
4.8	Resultados das inserções de ciclo de trabalho de 10% .....	36
4.9	Resultado da inserção de um ciclo de trabalho de 40% em que a distância entre o ponto final da agulha e o ponto final desejado foi de 1,5103mm.....	37
4.10	Posições relativas ao ponto final desejado da ponta da agulha no final da inserção para todos os ciclos de trabalho executados. ....	38
4.11	Histograma das distâncias euclidianas dos resultados obtidos ao final das inserções, excluindo as inserções de ciclo de trabalho de 0%. ....	39
4.12	Histograma normalizado em relação à distribuição normal das distâncias no eixo y. Distribuição normal para os mesmos dados construída sobre o gráfico do histograma...	39
4.13	Histograma normalizado em relação à distribuição normal das distâncias no eixo x. Distribuição normal para os mesmos dados construída sobre o gráfico do histograma...	40
4.14	Posição final da ponta da agulha para todos os experimentos executados com ciclo de trabalho acima de 0%.....	41
4.15	Resultado de uma inserção em malha aberta para um ciclo de trabalho de 0% em que, nesse caso, a curvatura obtida foi muito maior do que a esperada.....	41
4.16	Inserções em malha aberta para diversos valores de ciclo de trabalho. Nas subfiguras as linhas azuis representam o trajeto realizado pela agulha e as linhas brancas o trajeto esperado. Em todas as inserções os erros obtidos foram maiores que 2mm.....	42
4.17	Comparação das inserções em malha aberta e malha fechada para um ciclo de trabalho de 50%. .....	43
5.1	Suporte projetado para trabalhos futuros.....	46
5.2	Projeto para nova castanha a ser utilizada. ....	46

## **Listas de Tabelas**

3.1	Relação de DC's comandados e obtidos em modo antena telescópica para realizar a trajetória prevista na Figura 3.3. Sendo o DC comandado, o ciclo de trabalho a ser executado pelos atuadores e o DC obtido, o ciclo de trabalho realizado pelo dispositivo.	14
3.2	Relação de DC's comandados e obtidos em modo passos discretos. ....	21
4.1	Tabela com os resultados dos experimentos do primeiro lote.....	34
4.2	Tabela com os resultados dos experimentos do segundo lote. ....	35
4.3	Tabela com os resultados dos experimentos do terceiro lote. ....	36
4.4	Tabela com os resultados dos experimentos do quarto lote.....	37
4.5	Tabela de erros médios e desvio padrão para casos envolvendo diferentes ciclos de trabalho.....	38

# **1 INTRODUÇÃO**

## **1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO**

Procedimentos cirúrgicos minimamente invasivos têm tido um crescimento substancial, ao longo dos últimos anos, em razão das diversas vantagens que trazem, principalmente à recuperação e saúde do paciente. Como esses procedimentos não realizam grandes incisões no corpo do paciente, os riscos de infecção são muito menores e, por esse mesmo motivo, a recuperação do paciente tende a ser muito mais rápida e melhor, além do fato de deixar uma menor cicatriz. Esses procedimentos utilizam pequenas incisões ou orifícios do corpo para realizar a cirurgia necessária. Muitos desses procedimentos utilizam finos objetos tubulares (como agulhas, catéteres, etc).

Agulhas são utilizadas em muitos procedimentos minimamente invasivos hoje em dia, como, por exemplo, em biópsias de câncer de próstata e mama - por punção aspirativa -, da tireóide, etc. como pode ser visto na Figura 1.1a; tratamentos de câncer de próstata por braquiterapia, que consiste na inserção de sementes radioativas por uma agulha, como mostrado na Figura 1.1b; tratamentos de câncer de fígado por ablação por etanol, procedimento que é realizado injetando álcool concentrado no tumor com o intuito de destruir as células cancerígenas, como mostrado na Figura 1.1c; cirurgias de hemorragia intracraniana, em que é feito um buraco significativamente maior que o necessário para passar a agulha de modo que o cirurgião possa retirá-la e realizar uma nova inserção caso a primeira não saia perfeita.

Uma grande dificuldade encontrada nesses procedimentos é a falta de visibilidade e retorno para o cirurgião responsável. Por esse motivo, esses procedimentos demandam uma grande habilidade do médico. Apesar do auxílio de imagens médicas obtidas por outras modalidades de exames, a falta de familiaridade do médico com o procedimento, ou até mesmo as dificuldades inerentes ao próprio procedimento, podem levar a resultados duvidosos e algumas vezes podem até resultar em danos ao paciente. A falta de exatidão pode levar, por exemplo, a um diagnóstico errado de uma biópsia - caso tenha sido coletado um tecido diferente do que deveria -, ou até mesmo a danos às celulas boas de um paciente, no caso de uma ablação ou de uma braquiterapia, caso a inserção da agulha não alcance a região do tumor.

Para resolver esses problemas de falta de exatidão, uma alternativa às clássicas agulhas rígidas é utilizar agulhas feitas de materiais flexíveis, de maneira que sua trajetória possa ser corrigida durante a inserção. Para isso, utilizam-se agulhas com pontas chanfradas, de modo que, quando inseridas, as forças na ponta da agulha não serão iguais, causando uma flexão desta dentro do tecido, dando assim o controle da trajetória e permitindo que se façam desvios de obstáculos e correções de inserção. A alternativa em questão foi proposta por R.J. Webster III et al. [11] e desde então diversos pesquisadores trabalham em melhorar o controle e a precisão do procedimento.

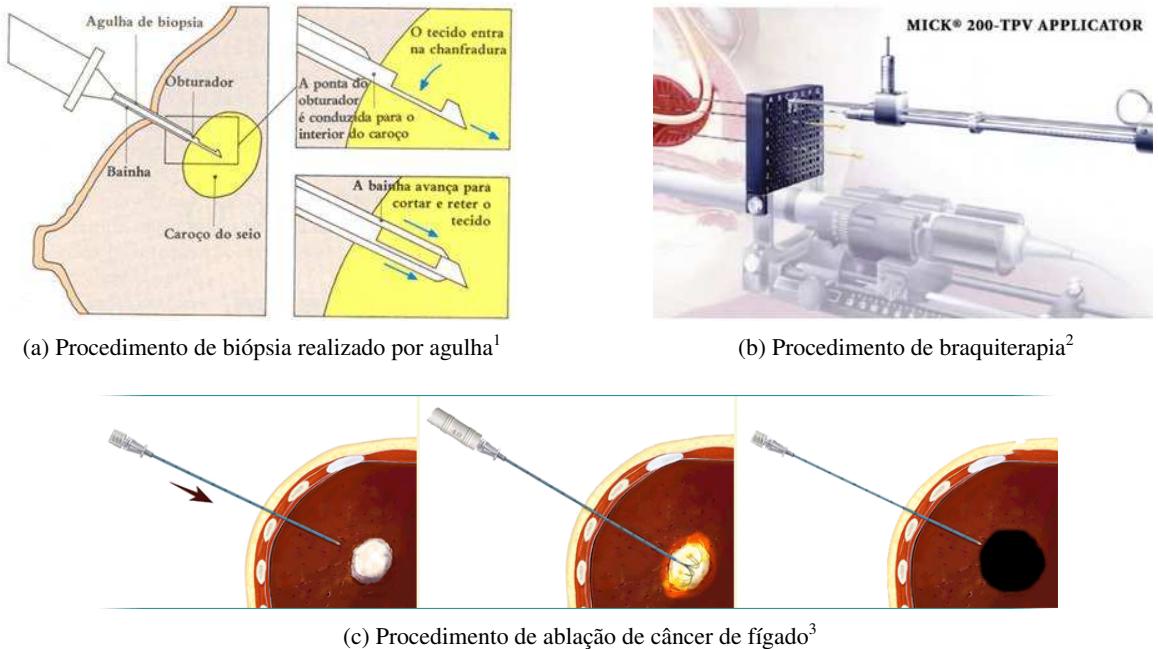


Figura 1.1: Procedimentos cirúrgicos que utilizam agulhas.

## 1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O controle da trajetória da agulha pode ser realizado graças à sua ponta não simétrica e ao material flexível utilizado para a sua fabricação. Quando a agulha é inserida em tecido mole, as forças de interação não são iguais em todos os lados, sendo maiores do lado do chanfro e, por isso, fazendo a agulha curvar na direção do seu chanfro. É possível também aplicar uma rotação à agulha; ela permanece no seu lugar, e dessa maneira apenas a sua ponta sofre alteração, fazendo com que o chanfro mude de direção podendo gerar uma alteração na trajetória da agulha. Sabendo que essa rotação pode ser de 360°, o chanfro da agulha pode variar a sua direção em todos os sentidos e, ao se realizar a inserção, é possível gerar qualquer trajetória para a agulha em um espaço 3D. Logo, controlando-se dois graus de liberdade - as velocidades de inserção e rotação - é possível guiar a agulha dentro de um tecido mole.

Como o controle desses dois graus de liberdade necessitam ser precisos para se alcançar um alvo desejado, é utilizado um sistema robótico. Dois tipos de dispositivos são utilizados para realizar a inserção da agulha. Um deles - eleito pela maioria dos trabalhos já desenvolvidos até agora - baseia-se em Dispositivos de Antena Telescópica [21], mostrado na Figura 1.2a, em que a atuação sobre a agulha é feita a partir da sua base e uma antena telescópica utilizada ao redor da agulha é acoplada para evitar sua flambagem durante a inserção. Outro método é a atuação da agulha mais próximo ao ponto de incisão, como um cirurgião faz ao realizar uma inserção, pois dessa maneira alguns problemas vistos ao se utilizar um Dispositivo de Antena Telescópica seriam解决ados [19, 9].

O trabalho realizado por Geraldes [9] aplicou um método de inserção em passos discretos, já utili-

<sup>1</sup>Imagem reproduzida de: <http://cancrodamama.com/biopsia-com-agulha>

<sup>2</sup>Imagem reproduzida de: [http://www.uniter.com.ar/img/gal\\_equipos/eq2.jpg](http://www.uniter.com.ar/img/gal_equipos/eq2.jpg)

<sup>3</sup>Imagem reproduzida de: <http://centrodeoncologiodor.com.br/ablaao/>



(a) Modelo em configuração antena telescópica.

Fonte: [10, 9]

(b) Modelo em configuração passos discretos.

Fonte: [9]

Figura 1.2: Possíveis configurações para dispositivos de inserção de agulhas flexíveis. Na figura (a) a atuação é realizada na base da agulha, enquanto na figura (b) esta atuação é realizada pela prensa localizada mais próxima ao ponto de incisão.

zado na inserção de agulhas rígidas [13], em que, com duas prensas ativas, é realizada a inserção mais próximo ao ponto de incisão, como visto na Figura 1.2b, solucionando problemas de escorregamento da agulha no dispositivo [11]. Esse trabalho, porém, foi feito todo em malha aberta, sem um *feedback*, e, portanto, não foi possível fazer a correção de erros vistos durante a inserção. Além disso, alguns problemas mecânicos encontrados podem ter influenciado no resultado.

### 1.3 PROPOSTA DO TRABALHO

O principal objetivo deste trabalho é realizar a realimentação do sistema composto pelo dispositivo construído por Geraldes [9], para que se possa corrigir erros observados durante a inserção, utilizando imagens obtidas por câmera para se obter a posição da ponta da agulha. A estratégia adotada para isso se baseia em um método de planejamento de trajetória, já utilizado por Bernardes [1], de maneira a encontrar o raio relacionado ao ciclo de trabalho a ser executado para se alcançar um ponto desejado. Durante toda a inserção é feita uma constante análise da ponta da agulha e o ciclo de trabalho a ser realizado.

Por se utilizar câmeras para o procedimento de rastreamento, o trabalho não serve para aplicações clínicas. As técnicas de correção utilizadas e reproduzidas, contudo, poderiam ser aplicadas caso o rastreamento da agulha seja feito por imagens médicas obtidas por ultrassom ou ressonância.

Tendo em vista os problemas encontrados em [9] por Geraldes, também se tem como objetivo pontuar melhorias a serem realizadas no projeto mecânico a fim de sanar as falhas já observadas.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 MODELAGEM DO MOVIMENTO DA AGULHA

Algumas abordagens para se modelar o movimento da agulha foram realizadas com o intuito de identificar o comportamento do tecido durante a inserção. Primeiramente, um modelo foi proposto para a identificação do movimento por meio da sua deformação e pela força exercida na sua base [2, 3]. Devido à complexidade do modelo, uma outra abordagem para o modelamento foi buscada. Em 2003, DiMaio e Salcudean [5, 4] propuseram um método em que é possível calcular velocidades da ponta da agulha em função da base. Em 2004, Glozman e Shoham propuseram um modelo de tecido através de pequenas molas. Esses modelos apresentam uma complexidade menor em relação a outros modelos, porém uma grande quantidade de parâmetros deve ser determinada *a priori*.

#### 2.1.1 Modelo cinemático da ponta da agulha

Uma adaptação do modelo padrão do uniciclo no plano XY foi proposto para o movimento da ponta da agulha [11]. Nesse modelo é possível identificar dois graus de liberdade  $v_x$  e  $\omega_z$ , correspondentes à velocidade de translação e velocidade de rotação do uniciclo. A restrição não holonômica  $v_y = 0$  impede o deslocamento da roda lateralmente. Para um uniciclo, em que o ângulo da roda seja fixo, tem-se que a velocidade de rotação não pode ser controlada de forma independente. Desse modo,  $\omega_z = kv_x$  e o uniciclo se move em uma trajetória circular  $r = \frac{1}{k}$  [9].

Em um modelo tridimensional, foram adicionadas duas condições não holonômicas a fim de limitar o deslocamento ( $v_z = 0$ ) e evitar que a agulha curve ( $\omega_y = 0$ ). O modelo resultante das condições não holonômicas impostas fornece um sistema resultante com dois graus de liberdade, correspondentes à velocidade de inserção e rotação da agulha. Além disso, a curvatura natural da agulha  $k_{max}$  depende das características físicas do tecido, das propriedades mecânicas e da forma geométrica da agulha. Webster III et al. [11] demonstram que os parâmetros podem ser determinados experimentalmente e esse modelo representa com precisão o movimento da agulha.

#### 2.1.2 Modelo de torção da agulha

No modelo de torção da agulha, Webster III et al. [11] consideram que apenas a rotação da agulha é capaz de alterar a direção de curvatura. Partindo desse pressuposto, tem-se que uma rotação em torno do próprio eixo da agulha e aplicada na base é transmitida inteiramente até a ponta. No entanto, quando a agulha é rotacionada dentro de um tecido pode-se observar um atrito. Reed et al. [15] citam que, dependendo da rigidez do tecido e da agulha, existe uma diferença entre a rotação aplicada na base e a rotação transmitida na ponta. Dado que a orientação da ponta da agulha determina a direção da curvatura exercida pela agulha, uma diferença angular entre a base e a ponta pode influenciar no controle da inserção da agulha [9]. Uma forma de compensar essa distorção é proposta por Reed et al. e consiste em parar a inserção em intervalos de tempo, realizando recuos na agulha. Swensen et al.

[19, 20] observaram que o problema de torção está relacionado com o ponto de rotação e incisão da agulha. Nos estudos realizados, observou-se que, para um melhor controle da agulha, deve-se atuar diretamente sobre o ponto de incisão. O trabalho realizado por Geraldes [9] utiliza-se de prensas ativas para atuar mais próximo do ponto de incisão, a fim de diminuir o problema de torção.

## 2.2 PLANEJAMENTO DE TRAJETÓRIA

O conhecimento da trajetória realizada pela agulha - o ponto inicial do arco, o ângulo da agulha nesse ponto, o raio descrito por ela e o ponto final da trajetória - é elemento importante para que seja possível fechar uma malha e se possa guiar e corrigir a inserção.

Tendo em vista a restrição suposta para o deslocamento da agulha no plano z, é possível planejar a trajetória dela como um movimento em duas dimensões e, a partir de relações trigonométricas encontrar os elementos necessários para o fechamento da malha do sistema.

O trabalho realizado por Bernardes [1] descreve o uso dessas relações, de modo que, a partir das coordenadas da ponta da agulha em um certo instante, do ângulo em que ela se encontra e das coordenadas do ponto final desejado, é possível encontrar o raio da curva realizada pela agulha.

Para o presente trabalho, foi aplicada a mesma lógica para encontrar o raio a ser utilizado na correção da trajetória da agulha, porém, uma vez que as referências de coordenadas utilizadas foram diferentes das vistas no trabalho [1], foi necessário recalcular as relações trigonométricas.

Com o intuito de encontrar as mesmas relações, buscou-se verificar a semelhança com os resultados por Bernardes [1] a partir da Figura 2.1.

Tendo em vista que  $P_A$  representa as coordenadas do ponto inicial da agulha e  $P_B$  as coordenadas do ponto final da agulha, é possível representar as distâncias - nas direções x e y - como  $\Delta x = x_B - x_A$  e  $\Delta y = y_B - y_A$ . Dessa maneira, sabe-se que

$$\varphi = \theta_A - \arctan\left(\frac{\Delta_y}{\Delta_x}\right). \quad (2.1)$$

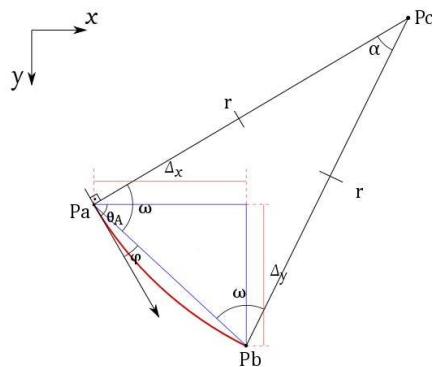


Figura 2.1: Exemplo gráfico dos ângulos utilizados para encontrar o raio entre os pontos  $P_A$  e  $P_B$

Observando também que a reta que representa o ângulo da agulha é tangente ao arco da trajetória, é possível afirmar que  $\varphi + \omega = 90^\circ$  e, sabendo que o triângulo representado pelos vértices  $P_A$ ,  $P_B$  e  $P_C$  se trata de um triângulo isósceles, pelo fato de possuir dois lados iguais a  $r$ , tem-se que  $\alpha + 2\omega = 180^\circ$  e, portanto,  $\alpha = 2\varphi$ .

Tendo em vista que o lado oposto ao ângulo  $\alpha$  se trata da hipotenusa do triângulo retângulo representado pelos vértices  $P_A$  e  $P_B$ , e utilizando a lei dos senos, em que

$$\frac{\sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2}}{\sin \alpha} = \frac{r}{\sin \omega}$$

é possível determinar a curvatura como

$$k = \frac{1}{r} = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2}}. \quad (2.2)$$

Para que fosse possível encontrar as coordenadas  $(x_c, y_c)$  do centro do círculo de raio  $r$  foram utilizadas relações de seno e cosseno, obtendo os seguintes pontos:

$$\begin{cases} x_C = r \cos(90 - \theta_A) & +y_A \\ y_C = r \sin(90 - \theta_A) & +y_A \end{cases}. \quad (2.3)$$

Como questão de comparação e simulação foi calculado também o comprimento do arco que representa a trajetória a partir de

$$Li = \frac{\pi r \alpha}{180}. \quad (2.4)$$

## 2.3 MÉTODOS DE INSERÇÃO

### 2.3.1 Métodos *stop-and-turn* e de inserção helicoidal

O método *stop-and-turn* consiste em controlar a rotação  $\omega$  e a velocidade  $v$  de inserção da agulha alternadamente [11]. O modelo proposto por Webster demonstra que, ao se inserir uma agulha sem rotação, o arco descreve uma curvatura  $k_{max}$ . Porém, ao se rotacionar a agulha sem inserção, a curvatura muda de direção sem que a agulha altere sua posição. Sendo assim, com a alternância entre a inserção e a rotação da agulha, é possível realizar trajetórias formadas com arcos de curvatura  $k_{max}$ . Em caso de rotações de  $180^\circ$ , levando em consideração a posição inicial do chanfro da agulha, é possível inverter a direção da curvatura da agulha. Considerando que o chanfro está ortogonalmente posicionado em relação à base do tecido, é possível realizar uma trajetória planar sem sair do plano. Essas rotações são capazes de desviar de obstáculos através de uma inserção retilínea [9].

O método helicoidal consiste em inserções e rotações executadas conjuntamente em um espaço 3D, como pode ser visto na Figura 2.2. Diferentemente do método anterior, o raio da hélice depende

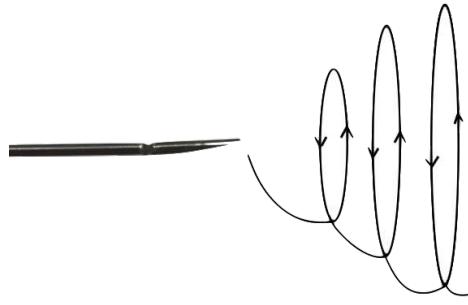


Figura 2.2: Modelo do movimento helicoidal realizado pela agulha.

de  $\omega$ ,  $v$  e  $k_{max}$ , pois existe uma simultaneidade das ações. Por conta desse fator, uma gama maior de trajetórias podem ser realizadas, deixando o problema mais complexo, devido à necessidade de identificar os parâmetros  $\omega$  e  $v$ .

### 2.3.2 Ajuste da curvatura por ciclo de trabalho

O método *stop-and-turn* possui a desvantagem de os arcos realizados na inserção possuírem a mesma curvatura. Um dos objetivos de se trabalhar com agulhas flexíveis consiste na possibilidade de desviar de obstáculos durante a trajetória. Para obtenção de outras trajetórias é interessante realizar arcos de diferentes curvaturas, o que pode ser obtido através do controle da velocidade de inserção  $v$  e rotação  $\omega$  da agulha. Com esse objetivo foram desenvolvidos dois métodos utilizando o princípio do ciclo de trabalho.

#### 2.3.2.1 Método de rotação chaveada da agulha

A utilização do método de rotação chaveada consiste na relação de  $\frac{\omega}{v}$ , para determinação do raio da hélice. Quanto maior for essa relação, menor será o raio. Em uma trajetória retilínea, onde o raio da hélice tende a um valor próximo de zero,  $\omega \gg v$  caracterizando uma curvatura nula. Para realizar arcos de diferentes curvaturas, o método executa chaveamentos entre períodos de inserção  $T_{ins}$  e períodos  $T_{rot}$  com inserção e rotação conjuntamente [6]. O arco de curvatura  $k$  pode ser calculado utilizando o chaveamento entre esses dois estados. A curvatura é dada por:

$$k = k_{max}(1 - DC), \quad (2.5)$$

em que o ciclo de trabalho  $DC$  é calculado seguindo a expressão:

$$DC = \frac{T_{rot}}{T_{rot} + T_{ins}}. \quad (2.6)$$

Portanto, é possível atuar com diferentes ciclos de trabalho para obtenção de raios de curvatura entre  $k_{max}$  e 0.

### 2.3.2.2 Método de inversão chaveada da ponta

O método em questão busca realizar inserções da agulha através do sentido da curvatura  $T_{flipped}$  e inserções no sentido contrário  $T_{unflipped}$ , relembrando as características do modo *stop-and-turn* planar [12]. A frequência de inversões em 180° neste método é muito maior que o método *stop-and-turn*. Devido a essas inversões, a trajetória final da agulha alcança um valor de arco de circunferência com curvatura inferior ao  $k_{max}$  [9]. As inversões neste método são realizadas com a agulha parada, o que torna a velocidade de inserção não contínua. A curvatura pode ser calculada seguindo a equação 2.5. O ciclo de trabalho é definido como:

$$DC = 1 - \frac{T_{flipped} - T_{unflipped}}{T_{flipped} + T_{unflipped}}. \quad (2.7)$$

Na realização dos experimentos por Geraldes [9], diante dos métodos existentes, o método de inversão chaveada da ponta foi utilizado devido a construção do dispositivo, tendo em vista que a utilização do método de rotação chaveada da agulha utiliza altas velocidades para rotacionar a agulha ( $\omega \gg v$ ). A escolha desse método acarreta uma maior dificuldade em controlar a velocidade de inserção, devido à necessidade de parar a inserção frequentemente para inversão de 180°.

### 2.3.3 Método de inserção por passos discretos

Os métodos até agora citados apresentam um ponto em comum: a agulha deve estar fixa no dispositivo robótico de inserção. Na maioria dos dispositivos, a base da agulha está fixa e assim pode-se inserir toda a agulha no tecido [9]. Deve-se ressaltar que a distância entre o ponto de atuação e o ponto de incisão da agulha influí no controle da agulha. Como já citado anteriormente, uma maneira de melhorar esse controle seria utilizar um método ou dispositivo que permitisse diminuir a distância entre o ponto de atuação e incisão da agulha.

O método de inserção por passos discretos atua segurando a agulha em pontos arbitrários ao longo de sua extensão e divide a inserção completa em passos de menor comprimento [13]. A execução de cada passo pode ser dividida em dois processos. O primeiro deles consiste em segurar a agulha próximo do ponto de incisão e então realizar uma pequena inserção. O segundo processo libera a agulha para recuar o dispositivo de inserção à posição de origem.

Portanto, este método aproxima a distância entre a atuação e a incisão da agulha no tecido. Reduzindo o tamanho do passo, é possível atuar mais próximo da incisão e, consequentemente, diminuir os problemas já citados anteriormente.

A Figura 2.3 ilustra o procedimento sendo executado de maneira manual. Porém o dispositivo de inserção possui duas prensas ativas, que prendem e liberam a agulha de acordo com o processo de inserção.

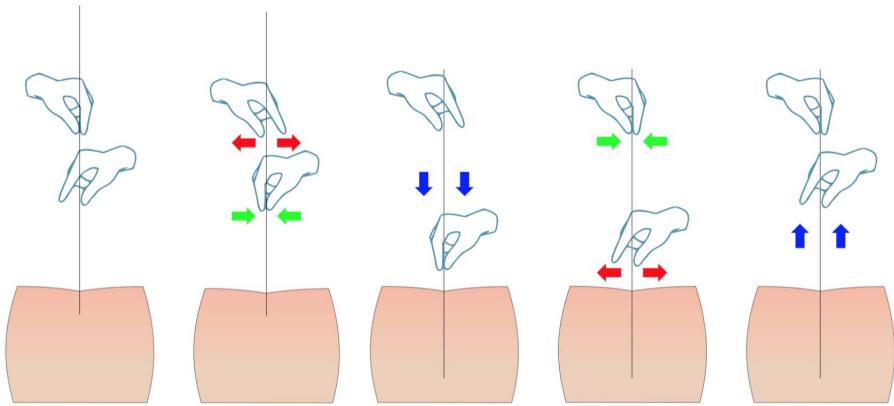


Figura 2.3: Processo de um passo de inserção discreto. Da posição inicial, a agulha é presa para uma pequena inserção. Em seguida ela é liberada e o processo volta para o início.

Fonte [9]

## 2.4 TIPOS DE AGULHA

Os diferentes tipos de agulhas existentes têm a finalidade de abranger uma gama de procedimentos cirúrgicos. No intuito de atingir um determinado ponto através de uma trajetória, é necessário ter uma maior atenção à escolha da agulha para guiagem, a fim de ter uma máxima acurácia. A escolha do tipo de agulha guia deve levar em consideração sua curvatura natural, além de fatores como danos ao tecido e integração com sensores [9]. A geometria e as propriedades mecânicas da agulha influenciam diretamente sua curvatura natural. Com o intuito de alcançar o ponto desejado com máxima acurácia, deve-se escolher uma agulha que possua boa capacidade para realizar curvas. Com a utilização de métodos de inserção por ciclo de trabalho, é possível variar a curvatura dessa agulha e alcançar uma grande variedade de trajetórias. Desse modo, um cirurgião poderia definir a trajetória com uma agulha guia alcançando o ponto desejado e, posteriormente, introduzir medicamentos pelo caminho já traçado.

### 2.4.1 Agulhas passivas

Quando trabalhamos com agulhas flexíveis, devemos levar em consideração o comportamento da agulha no tecido inserido. Para obtermos um maior  $k_{max}$ , devemos escolher uma agulha mais flexível. A maior flexibilidade da agulha deve-se à composição do material, que em muitas das vezes são feitas de Nitinol. Esse material apresenta uma boa resistência, além de ser muito flexível [9]. Deve-se considerar que o diâmetro influencia na rigidez da agulha, sendo assim é interessante trabalhar com agulhas de menor diâmetro, compatíveis com o tecido a ser inserido. Um fator que influencia diretamente na curvatura da agulha é o seu chanfro. Trabalhos feitos anteriormente mostram que, para obter uma maior curvatura da agulha, um chanfro com ângulo menor deve ser feito nela [21]. Em teoria, chanfros de 90° não geram uma curva e chanfros de 0° possuem a maior curvatura. Webster III et al. atingiram uma boa curvatura com o valor de 5°, o que demonstra a importância de se ter um chanfro com pequena angulação.

Outra maneira de se obter agulhas mais flexíveis é utilizando agulhas com pontas diferentes como



Figura 2.4: Tipos de agulhas<sup>1</sup>

mostra a Figura 2.4. Agulhas com a ponta dobrada apresentam uma melhor curvatura em relação a agulhas chanfradas. Porém, deve-se ressaltar que em movimentos de rotação, esse tipo de agulha danifica muito mais o tecido [22]. De maneira diversa, ao se dobrar a ponta, procura-se trabalhar com uma agulha cuja ponta é constituída de um material diferente. Esta ponta sofreria um maior esforço, mantendo a elasticidade da agulha, e resultando em uma curvatura maior.

A utilização de uma junção flexível na ponta da agulha, como exemplificado na Figura 2.5 ajuda a aumentar o  $k_{max}$ , pois a flexibilidade dessa junção ajuda a agulha a dobrar na direção do chanfro. Com o movimento de rotação, a tendência da ponta é de alinhar-se novamente com o corpo da agulha. Esse movimento causa um dano muito menor ao tecido e garante boas curvaturas [18].

#### 2.4.2 Agulhas ativas

As agulhas ativas têm como característica a presença de atuadores, os quais permitem o controle de alguns graus de liberdade. A agulha de chanfro programável utiliza-se de atuadores lineares capazes de modificar a geometria do chanfro da agulha [16]. Com isso, é possível alterar a direção e magnitude da curvatura. O projeto desse tipo de agulha se encontra em desenvolvimento e realiza curvas menores do que as das agulhas passivas.

As agulhas ativas, em geral, conseguem realizar uma gama maior de trajetórias, devido à trajetória poder ser alterada ativamente. Porém, na maioria das vezes, o formato da ponta dessas agulhas é complexo, o que as torna difíceis de serem fabricadas.

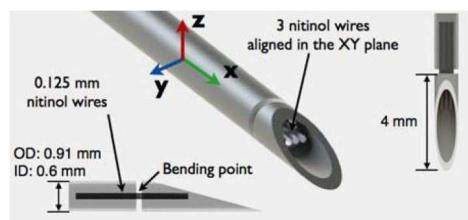


Figura 2.5: Exemplo de uma agulha com junção flexível que utiliza três arames de nitinol de 0,125mm de diâmetro para conectar a cabeça do corpo.

Fonte: [18]

<sup>1</sup>Imagem reproduzida de <http://cadenceinc.com/catalog/product-group/custom-fabricated-hypodermic-needles/>

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo é dedicado ao desenvolvimento do trabalho, seus passos e etapas, sendo explicado como os procedimentos foram realizados. Também serão especificados os materiais utilizados, assim como os *softwares* e códigos, e o porquê de suas escolhas, bem como os métodos de preparo dos materiais para a realização dos experimentos.

#### 3.1 FAMILIARIZAÇÃO COM O DISPOSITIVO E CORREÇÃO DE FALHAS

Como o trabalho em questão se trata da continuação de um projeto já realizado por Geraldes [9], tudo o que havia sido produzido foi utilizado, desde o projeto mecânico até o projeto eletrônico e de *software*. Para poder utilizar o que já havia sido feito, foi necessário um estudo mais profundo do código escrito, assim como das funções criadas para a realização dos experimentos. Também foi estudado os componentes do dispositivo, como visto na Figura 3.1, para melhor entendimento do funcionamento, propondo melhorias mecânicas e identificando falhas.

Em 2015, Geraldes [9] produziu duas agulhas formadas por um tubo de Nitinol - liga metálica composta por 55,5% de Níquel e 44,5% de Titânio - com diâmetro externo de 1,14mm e interno de 0,96mm, uma ponta chanfrada com junção flexível feita por arames de nitinol de 0,29mm de diâmetro. Uma das agulhas, chamada de *Agulha1*, usinada, obteve um chanfro de 12°, tendo sido utilizados três arames de Nitinol para a junção da ponta com o corpo, apresentando uma lacuna de 0,15mm. Já a segunda agulha, chamada de *Agulha2*, obteve um chanfro de 8°, tendo sido utilizados dois arames de Nitinol para a junção, apresentando uma lacuna de 0,31mm entre o corpo e a ponta da agulha. Como visto por Geraldes [9], a *Agulha2* apresentou uma curvatura maior que a *Agulha1*, por essa razão, neste trabalho, foi utilizada apenas a *Agulha2*.

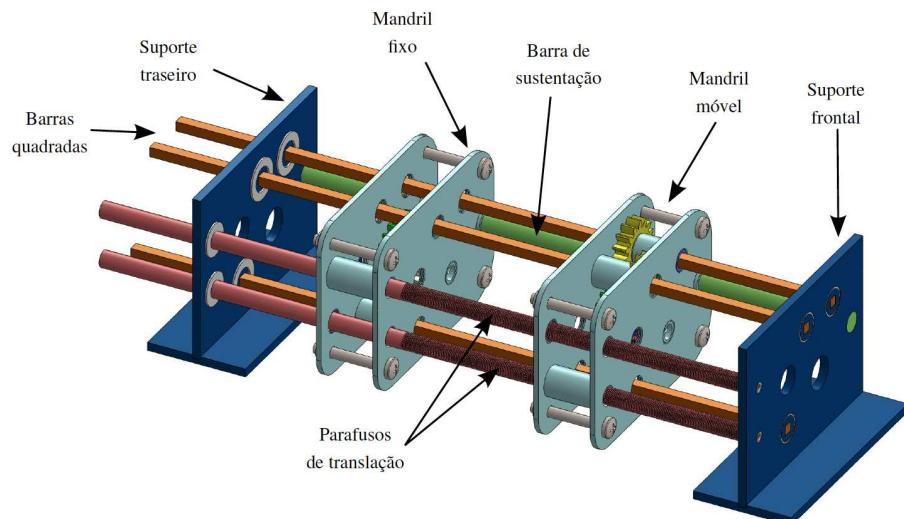


Figura 3.1: Modelo 3D do dispositivo, com descrição das peças.

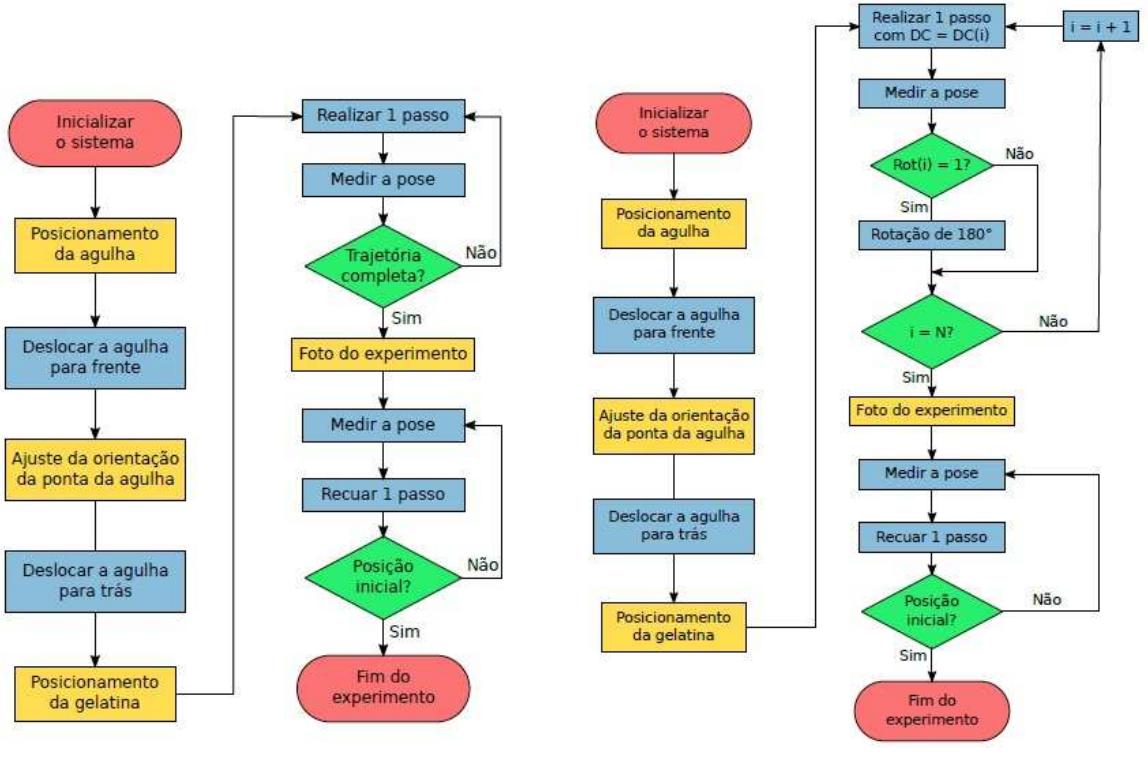


Figura 3.2: Fluxograma das rotinas criadas no Matlab para igual execução dos procedimentos

Inicialmente, tomou-se como meta encontrar os mesmos raios de curvatura obtidos por Geraldes [9]. Para isso, a gelatina balística foi preparada nas mesmas proporções da gelatina utilizada nos experimentos de inserção. A gelatina foi feita com 1.200ml de água quente, 120g de gelatina em pó sem sabor (marca Dr. Oetker) e 400ml de glicerina líquida.

### 3.1.1 Procedimentos de pré-inserção

Para garantir que todas as inserções fossem realizadas da mesma maneira, foram criadas funções no Matlab [9]. Desse modo, todas as inserções seguiriam as mesmas instruções, nos mesmos instantes e seguindo a mesma ordem. Das funções criadas, duas foram utilizadas neste trabalho. A rotina *experimentDutyCycle*, representada pelo fluxograma da Figura 3.2a, e a rotina *experimentOpenLoopTrajectory* representada pelo fluxograma da Figura 3.2b.

Durante o trabalho, houve um problema com o sensor magnético utilizado por Geraldes [9] para detectar a agulha e corrigir o ângulo inicial dela. Dessa maneira, o sistema de rastreamento magnético Aurora não foi utilizado neste trabalho, o que acarretou algumas dificuldades. No início dos experimentos de ciclo de trabalho, a agulha era empurrada para a frente pelo dispositivo até que o Aurora reconhecesse o sensor magnético dentro da agulha, porém, pela falta do sensor, o código foi alterado para que a agulha fosse empurrada alguns milímetros para frente, de maneira que ficasse mais fácil visualizar o chanfro e sua angulação. Em seguida, o código mostrava uma mensagem perguntando

se o ângulo do chanfro estava correto; caso não estivesse, era possível ajustar essa angulação digitando quantos graus o chanfro deveria ser girado, em sentido horário ou anti-horário, para que essa correção fosse feita pelo código, gerando uma menor incerteza para o ajuste do ângulo. Como essa correção era toda feita visualmente, não era possível ter certeza da exatidão dessa correção, portanto, como garantia de que o chanfro da agulha estivesse perpendicular ao plano e que a trajetória não sairia do plano, antes de todas as inserções era realizada uma inserção simples, sem ciclo de trabalho e era verificada visualmente pela lateral da gelatina se a agulha havia se deslocado ou não do plano. Esse procedimento de inserção era refeito até que fosse concluído que a trajetória da agulha havia permanecido no plano.

### 3.1.2 Testes em modo antena telescópica

Como início de projeto, foram feitos alguns procedimentos e experimentos realizados em 2015 [9]. Para isso, o dispositivo foi inicialmente montado em modo antena telescópica, tendo sido, nessa etapa, adquirido um conhecimento sobre a estrutura mecânica do dispositivo, seus defeitos e os pequenos detalhes necessários para montá-lo de modo a reduzir a possibilidade de erros. Com o dispositivo em modo antena telescópica, foram realizadas, inicialmente, algumas inserções para visualizar o funcionamento dos códigos e das funções. Foi visto que nos experimentos em modo antena telescópica os resultados apresentaram um erro sistemático [9]. Portanto, neste trabalho, foi feita uma análise um pouco mais profunda sobre as inserções nessa configuração.

Em primeiro lugar, foram realizadas diversas inserções simples, de modo que a agulha fizesse apenas uma curva, para que fosse possível visualizar o ciclo de trabalho obtido em inserções em modo antena telescópica. Para isso, foi utilizada a rotina *experimentDutyCycle* e, nesse experimento, inicialmente foi realizado o procedimento de pré-inserção já citado. Em seguida, foi escolhido o ciclo de trabalho a ser realizado e executada mais uma vez a rotina *experimentDutyCycle*, porém, dessa vez, com o ciclo de trabalho desejado. Nesse ponto, a agulha é inserida em passos sucessivos, dividida entre inserções na direção do ciclo de trabalho e inserções na direção contrária, de maneira a obter, ao final, o ciclo de trabalho desejado. Ao final da inserção é tirada uma foto para posterior análise. E, finalmente, o dispositivo realiza o recuo da agulha também em passos sucessivos. O procedimento foi repetido algumas vezes, variando-se o ciclo de trabalho desejado e o comprimento dos passos para que, dessa maneira, fosse possível criar uma relação de ciclos de trabalho.

Para tentar descobrir o motivo do erro sistemático encontrado por Geraldes [9], foram realizadas algumas inserções utilizando a rotina *experimentOpenLoopTrajectory*. Nessa rotina, é definida uma trajetória antes da inserção, formada por dois vetores  $DC(k)$  e  $Rot(k)$ , representando  $N$  passos, em que o vetor  $DC(k)$  descreve o ciclo de trabalho que deve ser realizado em cada passo e o vetor  $Rot(k)$  indica em que passo deve ser realizada uma rotação de  $180^\circ$  para mudar a direção da curva realizada pela agulha. Para este experimento a trajetória planejada foi definida por 14 passos de 8mm, realizando uma rotação de  $180^\circ$  entre o  $5^\circ$  e o  $6^\circ$  passo. A Figura 3.3 mostra a trajetória planejada para o experimento, em que cada círculo azul representa a posição da ponta da agulha ao início de cada passo e o círculo vermelho representa o ponto em que ocorre a rotação de  $180^\circ$ . Já a Tabela 3.1 mostra o ciclo de trabalho realizado em cada passo. Todo o procedimento foi gravado para ver se era possível verificar alguma anomalia no funcionamento, assim como foram tiradas fotos para comparar

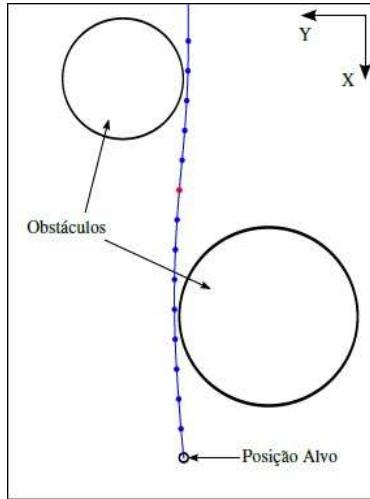


Figura 3.3: Trajetória planejada para a rotina *experimentOpenLoopTrajectory*.

Fonte: [9]

Tabela 3.1: Relação de DC's comandados e obtidos em modo antena telescópica para realizar a trajetória prevista na Figura 3.3. Sendo o DC comandado, o ciclo de trabalho a ser executado pelos atuadores e o DC obtido, o ciclo de trabalho realizado pelo dispositivo.

Passo	DC comandado	DC obtido	Passo	DC comandado	DC obtido
1	0%	32%	8	0%	32%
2	0%	32%	9	0%	32%
3	0%	32%	10	0%	32%
4	25%	52%	11	0%	32%
5	50%	72%	12	50%	72%
6	25%	52%	13	50%	72%
7	0%	32%	14	0%	32%

os resultados obtidos. Outra atitude tomada para tentar identificar o erro foi tirar fotos da saída da agulha antes de começar a inserção, para verificar se o ângulo de entrada da agulha na gelatina estava correto.

### 3.1.3 Correção do código em modo passos discretos

Após os testes realizados em modo antena telescópica, o dispositivo foi remontado em modo passos discretos para continuação do trabalho. Inicialmente foi tentado realizar simples inserções com ciclos de trabalho únicos para verificar o funcionamento do dispositivo nesse modo. Durante essas inserções, foi verificada a ocorrência de um erro indicando que a prensa frontal havia alcançado o sensor de fim de curso - pois, ao início do programa era necessário informar a distância entre o sensor de fim de curso mais próximo à prensa traseira e o mais próximo ao suporte frontal - mais próximo à prensa traseira, mesmo que, fisicamente, a prensa frontal ainda estivesse muito longe da posição indicada pelo erro. Como já foi explicado, durante a inserção utilizando o dispositivo em

modo de passos discretos, a prensa frontal prende a agulha; em seguida a prensa traseira solta a agulha; após isso a prensa frontal se desloca para frente para empurrar a agulha, nesse momento, no código de baixo nível, é subtraído o valor da inserção de uma variável que mantém a informação da posição da prensa; ao final desse passo a prensa traseira prende a agulha e logo em seguida a prensa frontal solta a agulha; em seguida a prensa frontal recua para realizar mais um passo e mais uma inserção, nesse momento, o valor do recuo - igual ao deslocamento realizado para empurrar a agulha - é somado à variável que mantém a informação da posição prensa. Dessa maneira, a prensa frontal está sempre se deslocando para frente e para trás mantendo uma amplitude fixa do seu movimento. O erro informado pelo programa indicava que a prensa estaria se recuando mais do que inserindo até que a sua posição alcançasse a prensa traseira, porém era visto que isso não ocorria.

Foi percebido que esse erro se encontrava no *software* de baixo nível Eclipse utilizado na programação do dispositivo. Para buscar o erro e tentar encontrar onde ele ocorria, foi necessário verificar a posição guardada pelo código sempre que havia uma alteração da posição da prensa. Durante esse processo, verificou-se que o sistema apresentava um erro não só na inserção, mas no recuo da agulha também. Porém, no recuo da agulha, foi visto que, quando a prensa frontal recuava, era somado o valor do recuo duas vezes, assim como quando a prensa frontal se deslocava para frente, portanto não era acusado nenhum erro, ainda que o código estivesse errado. Foi possível perceber também que, durante a inserção da agulha, o recuo realizado pela prensa frontal estava sendo somado duas vezes, enquanto a inserção realizada estava sendo somada apenas uma vez, por isso, o limite era alcançado e o erro era indicado. Foi realizada a correção de ambos os erros, verificando que as posições indicadas pelo sistema e a real posição da prensa eram sempre congruentes e, dessa maneira, o dispositivo passou a realizar as inserções normalmente sem acusar nenhum erro.

### **3.1.4 Ajustes para redução do erro**

Uma vez que todo o dispositivo mecânico foi construído há um tempo e não houve manutenção em relação a troca e substituição de peças - visto que haviam sido produzidas quantidades pequenas ou, em alguns casos, até exatas, das peças utilizadas e muitas delas apresentavam defeitos que inviabilizavam a sua utilização - foi possível perceber, durante alguns experimentos e ao longo do trabalho, erros que não estavam presentes no início e que acarretavam uma diferença significativa nos resultados. Devido ao desgaste das peças, era necessário realizar uma nova calibração em vários pontos, visando a redução e, às vezes, até mesmo a eliminação do erro.

Uma das peças que apresentou um desgaste significativo foi a castanha utilizada para segurar a agulha, como visto na Figura 3.4. Devido ao fato de o material utilizado para a sua produção - alumínio - se tratar de um metal dúctil, a pressão aplicada diversas vezes sobre a agulha acabou por deformar a castanha, criando um sulco em sua superfície. Outro motivo que pode ter influenciado na criação do sulco da castanha é o atrito gerado ao inserir a agulha, uma vez que a gelatina apresenta uma resistência é gerado um atrito estático entre a castanha e a agulha. Foi possível perceber que o aperto gerado pelas prensas ativas já não se mostrava suficiente para impedir o escorregamento da agulha, resultando em inserções mais curtas e em uma rotação significativa - chegando algumas vezes a 90° de erro - no chanfro. Por esse motivo foi necessário ajustar o aperto tanto da prensa ativa do mandril fixo como o mandril móvel. Ainda assim, ao longo de todo o trabalho, foi necessário realizar



(a) Vista superior da castanha



(b) Vista lateral da castanha

Figura 3.4: Fotos da castanha evidenciando o sulco formado pela agulha

esse ajuste constantemente, visto que em períodos relativamente curtos a agulha voltava a apresentar escorregamento durante as inserções.

Um dos problemas, já existentes e observados, foi o da defasagem do ângulo do chanfro devido a uma rotação indesejada da agulha por culpa de um possível escorregamento das correias do motor 3 [9], que foi corrigido em trabalhos anteriores simplesmente aplicando uma rotação no sentido contrário ao final de cada passo. Ao longo do trabalho realizado foi percebida uma piora nessa defasagem. Acredita-se que esse problema possa ter ocorrido por diversos motivos, como, por exemplo, a remontagem do dispositivo para calibração, e que, nessa etapa, o motor tenha sido posicionado de maneira diferente alterando o escorregamento da correia observado anteriormente. Outro motivo pode ter vindo da necessidade de aumentar a rotação do motor para o aperto da castanha, observado no parágrafo anterior, uma vez que já foi relacionado o elevado torque aplicado sobre o mandril com essa defasagem [9]. Devido à falta do sensor magnético, foi necessário fazer essa correção visualmente, sempre tentando observar se havia alteração no ângulo do chanfro durante o experimento, se essa alteração era causada por um erro sistemático, e realizando os ajustes quando necessário.

Outro problema observado foi a flexão do suporte frontal durante os movimentos de recuo do mandril móvel, tendo sido tomada como solução paleativa o uso de uma barra rosada para restringir a movimentação do suporte. A Figura 3.5 mostra como foi adaptada a barra no dispositivo.

### 3.2 SETUP DO AMBIENTE EXPERIMENTAL

Após ter sido feita toda a revisão do trabalho-base, terem sido entendidos os códigos e feitas as correções necessárias para poder executar os experimentos sem erros e falhas, foi decidido implementar um sistema de realimentação por imagens sem o auxílio do sensor magnético, uma vez que este se encontrava danificado e seu uso impossibilitado. A câmera utilizada inicialmente para realizar a realimentação foi uma webcam Leadership Mini Webcam 5 Mega com resolução de 5 mega pixels em formato 640 x 480, foco manual, conexão usb *plug-and-play* e taxa de quadros de 30fps. Algumas dificuldades foram encontradas para processar a imagem devido a qualidade dessa câmera. Por isso

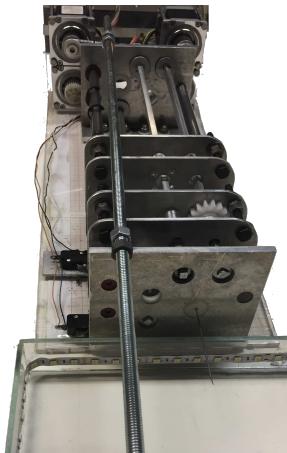


Figura 3.5: Adaptação realizada no dispositivo para restringir a movimentação do suporte frontal.

foi necessário realizar a troca dessa câmera por uma webcam Logitech c270 HD (1280 x 720 pixels), foco fixo a partir de 40cm, conexão usb *plug-and-play* e taxa de quadros de 30fps. Foi utilizado um tripé para posicionar a câmera acima da gelatina balística, como pode ser visto na Figura 3.6, e, devido à flexibilidade oferecida pela câmera, foi necessário fazer alguns ajustes para que a câmera fixasse no tripé de maneira que a imagem obtida fosse praticamente sem inclinação.

### 3.2.1 Suporte da gelatina balística

A gelatina balística deve encontrar-se apoiada em um suporte para suprir a diferença de altura necessária para a inserção da agulha. Além disso, observou-se que a iluminação no local do dispositivo possui grandes variações, pois fica próximo a uma janela. Tendo em vista que isso representaria um problema para um possível rastreamento da ponta da agulha, foi necessário projetar um pequeno suporte que atendesse a esses dois fatores. Projetou-se então um suporte de vidro com as dimensões 254 x 210 x 37mm de comprimento, largura e altura, respectivamente, e na parte interna do vidro foi colada uma fita de LED branco com um metro de comprimento, como visto na Figura 3.7. Essa fita recebe uma tensão de 12V de uma fonte. A forma com que esta fita foi colada permite que a iluminação seja constante e de baixo para cima, dando um contraste ao se inserir a agulha na gelatina balística. Isso facilitaria o rastreamento da agulha, pois um processamento de imagem conseguiria diferenciar essa agulha mais facilmente do fundo homogêneo.

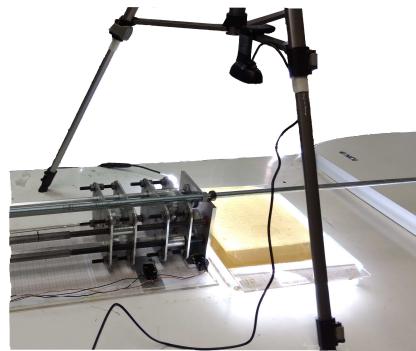


Figura 3.6: Posicionamento da câmera em relação à gelatina balística.



Figura 3.7: Suporte da gelatina balística.

### 3.2.2 Ajustes no dispositivo de inserção

Depois de executar alguns experimentos previamente, puderam-se observar desalinhamentos em alguns parafusos e a necessidade de remontar o dispositivo para alinhá-lo mecanicamente e lubrificá-lo. Portanto o dispositivo foi desmontado por inteiro. Primeiramente, os parafusos de transmissão foram lubrificados juntamente com os mandris. Após a lubrificação, iniciou-se o processo de remontagem. O suporte traseiro foi recolocado e seus parafusos reapertados. As correias dos motores foram recolocadas de maneira a ficarem alinhadas. Os parafusos de transmissão foram cuidadosamente alinhados com o suporte frontal e traseiro. Foi alinhado o suporte frontal para que não houvesse prejuízo na movimentação dos mandris. As distâncias dos mandris foram medidas para que não houvesse diferenças. Por fim, os sensores foram recolocados de maneira a evitar qualquer colisão do mandril.

Os procedimentos de ajustes permitiram a remontagem do dispositivo em modo de passos discretos, devido ao fato de que todos os experimentos de correção em malha fechada foram realizados nesta configuração, pois assim é possível atuar a agulha mais próxima ao ponto de incisão.

### 3.2.3 Calibração da câmera

Com a câmera posicionada acima da gelatina, foi necessário realizar sua calibração, de modo a eliminar possíveis efeitos de olho de peixe gerados por ela e realizar a correção de perspectiva, uma vez que a lente da câmera não se encontrava completamente paralela ao plano da gelatina. Para isso foi utilizado o *Computer Vision Toolbox* do Matlab e, utilizando o *Camera Calibrator* - função já existente nesse pacote de ferramentas de visão computacional -, foi possível realizar essa calibração.

Para iniciar a calibração, o aplicativo *Camera Calibrator* pede que sejam carregadas algumas fotos de um tabuleiro de xadrez, em várias direções, sentidos e inclinações, como mostrado na Figura 3.8. Existe a opção de obter as imagens em tempo real, porém, acredita-se que por incompatibilidade de versão não foi possível utilizar este recurso. Para isso, foi criada uma rotina *ParaCalibrar* no Matlab, a fim de que fossem capturadas e salvas 20 fotos - uma vez que o aplicativo informava que para uma melhor calibração era recomendado utilizar entre 10 e 20 imagens -, utilizando o comando *Snapshot*, de modo que, a cada foto tirada, a rotina ficava em espera para que fosse possível modificar a posição do tabuleiro tanto em direção, como sentido e inclinações, para então, ao se pressionar qualquer tecla, ser tirada uma nova foto.

Após as fotos serem salvas, foi executado o *Camera Calibrator* e carregadas as imagens. O aplicativo selecionava somente as fotos em boas condições - em que pudessem ser definidos eixos x e

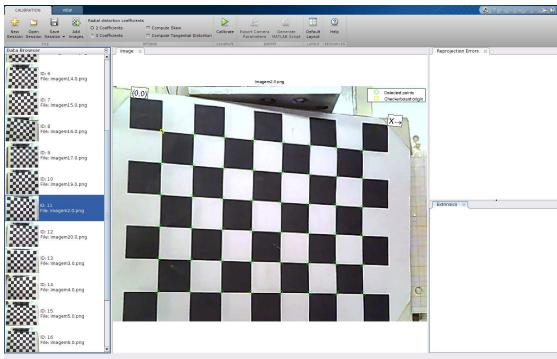


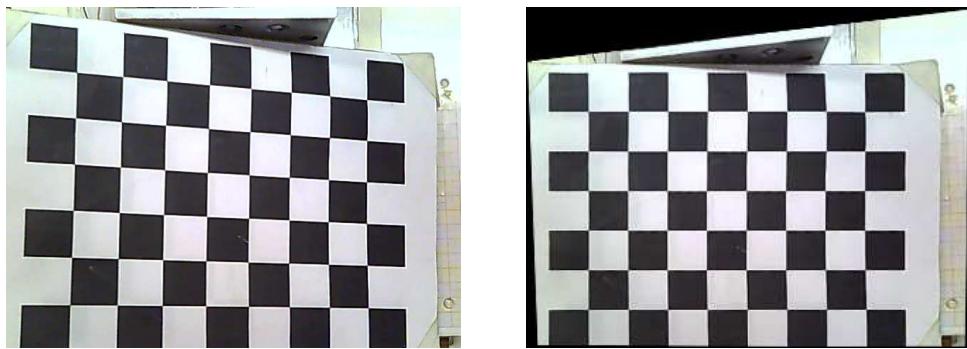
Figura 3.8: Calibração do tabuleiro de xadrez. Tela de funcionamento do aplicativo *cameraCalibrator* com fotos em diferentes sentidos.

y, assim como a origem deles -, eliminando as que não fossem propícias e indicando quais eram essas. existe uma opção para eliminar a distorção tangencial, realizando a correção de perspectiva, que era o mais importante, uma vez que o efeito olho de peixe gerado pela câmera utilizada era muito pequeno ou até inexistente, porém foi necessário atentar a esse detalhe, pois essa opção não era selecionada por *default*. Ao final da calibração o aplicativo gerava uma série de informações, dentre elas, uma matriz intrínseca para a calibração, uma matriz de rotação e um vetor de translação - parâmetros extrínsecos da calibração - para cada foto. Esses parâmetros são salvos no *workspace* com as informações obtidas para que esses valores de calibração pudessem ser utilizados posteriormente.

Com base nessas variáveis, foi possível realizar a distorção da imagem, utilizando a função *undistortImage*, e, a partir dessa imagem, fazer uma planificação, com a utilização de uma matriz de homografia e da biblioteca *Robotics, Vision & Control: Peter Corke 1992-2011*. Esta biblioteca permitia a seleção de quatro pontos na imagem e assim a homografia entre os pontos selecionados e a imagem são realizados, gerando uma imagem planificada. A Figura 3.9 mostra a comparação entre a imagem antes e depois da correção de perspectiva.

Após esses procedimentos foi necessário encontrar uma relação de pixel por milímetro para calcular as reais distâncias a partir das imagens obtidas nos experimentos. Para isso mediu-se a distância conhecida de um quadrado do tabuleiro de xadrez e em seguida encontrou-se a distância em pixels desse mesmo quadrado na imagem corrigida.

Sendo assim, uma rotina chamada de *SnapFeedback* foi implementada com a intenção de facilitar os procedimentos de preparação e tratamento inicial da imagem, sempre que uma foto fosse tirada, removendo distorções da lente e planificando a imagem. Esta função executa o carregamento do *workspace* já salvo previamente. Em seguida, uma foto é tirada e a distorção da imagem é realizada. A partir do momento em que a câmera está em uma posição fixa, os quatro pontos da imagem são selecionados de forma a serem sempre os mesmos pontos para todas as imagens. Por fim, a imagem é planificada pela matriz de homografia e o resultado gera uma imagem plana. Os mesmos pontos passados anteriormente servem de base para recortar a imagem - de modo a diminuir os custos computacionais e evitar regiões indesejáveis -, e deixá-la preparada para os próximos passos a serem executados. Esta imagem é salva em um formato .jpg. A Figura 3.10 mostra o resultado final desse tratamento na imagem.



(a) Tabuleiro de xadrez inclinado.

(b) Tabuleiro de xadrez após a correção de perspectiva.

Figura 3.9: Comparação entre o tabuleiro de xadrez pela imagem antes e depois da correção de perspectiva.

### 3.2.4 Calibração em passos discretos

Como visto no trabalho realizado por Geraldes [9], sabe-se que o dispositivo realiza curvas menores do que as esperadas, portanto foi calculada uma relação para os ciclos de trabalho comandados e os ciclos de trabalho obtidos ( $DC_{exp}$ ) [9]. Devido ao fato do dispositivo ter sido recalibrado e remontado algumas vezes, houve a necessidade de encontrar essa relação para o dispositivo, apresentando resultados distintos aos verificados por Geraldes [9].

A fim de realizar os procedimentos necessários para encontrar a relação de ciclos de trabalho comandados e obtidos, foram realizadas 20 inserções em malha aberta, sendo quatro inserções para cada um dos valores 0, 50 e 100% e 2 inserções para cada um dos valores 15, 37, 67 e 84%. Devido à falta do sensor magnético, o ciclo de trabalho final obtido foi encontrado utilizando o método visto em [1], a partir da identificação da ponta da agulha ao início e ao final do experimento e utilizando o ângulo de início da agulha - considerado 90°, uma vez que a agulha se encontra perpendicular ao suporte frontal do dispositivo - como mostrado na Tabela 3.2.



(a) Foto sem tratamento.

(b) Foto ao final do tratamento, corrigida, sem distorções da lente e planificada.

Figura 3.10: Imagens mostrando o antes e depois do tratamento.

Tabela 3.2: Relação de DC's comandados e obtidos em modo passos discretos.

Teste	DC Comandado	DC Obtido	Teste	DC Comandado	DC Obtido
0_cal1	0%	37,58%	50_cal3	50%	64,90%
0_cal2	0%	15,57%	50_cal4	50%	67,03%
0_cal3	0%	22,94%	67_cal1	67%	65,66%
0_cal4	0%	27,69%	67_cal2	67%	69,77%
15_cal1	15%	42,07%	84_cal1	84%	85,50%
15_cal2	15%	49,37%	84_cal2	84%	86,26%
37_cal1	37%	59,23%	100_cal1	100%	86,20%
37_cal2	37%	61,76%	100_cal2	100%	89,88%
50_cal1	50%	73,49%	100_cal3	100%	88,46%
50_cal2	50%	68,64%	100_cal4	100%	89,43%

Em posse dos valores de ciclos de trabalho correspondentes para cada inserção, foi realizada uma regressão linear utilizando dois métodos diferentes. Em um dos métodos, foi utilizada a função *plotregression*, já existente no Matlab. No segundo método, se utilizou a função *polyfit*, também já existente no Matlab. Os dois métodos resultaram na mesma regressão e, consequentemente, na mesma equação de reta. As linearizações podem ser vistas na Figura 3.11.

Pelos parâmetros da reta obtidos foi possível encontrar uma relação entre o ciclo de trabalho comandado e o ciclo de trabalho obtido, representado pela equação 3.1.

$$DC_{exp} = 0,3220 + 0,6038 \times DC \quad (3.1)$$

### 3.3 MÉTODO DE RASTREAMENTO DA PONTA DA AGULHA

O rastreamento da ponta da agulha é feito a partir da utilização de uma imagem previamente salva, convertendo de um canal RGB para um canal em tons de cinza. Em seguida, essa imagem já transformada é binarizada através de um *threshold* estabelecido anteriormente. Devido às condições de iluminação projetadas no suporte, foi necessário apenas um pequeno tratamento no resultado desta binarização. A função *bwareaopen*, já existente no MATLAB, foi utilizada para remover uma junção de pixels menores que 150. Este valor pode variar, pois a gelatina vai escurecendo com o tempo e consequentemente o *threshold* é alterado. Após a retirada desse resíduo, o processo para identificação da ponta da agulha é utilizado. Nas primeiras tentativas havia um problema para identificação desta ponta. Sendo assim, uma imagem era mostrada na tela para a seleção da ponta através de um cursor. Porém essa dificuldade inicial foi contornada e uma nova lógica para a identificação foi implementada. A lógica para esse processo consiste em utilizar um somatório linha a linha da imagem binarizada, guardando a posição do último pixel com valor 1 caso o somatório dessa linha seja maior que zero - o que indica que existe um pixel binarizado na linha em questão. Desse modo, é possível identificar a última linha existente com um pixel de valor 1. Utilizando a mesma lógica, porém somando-se

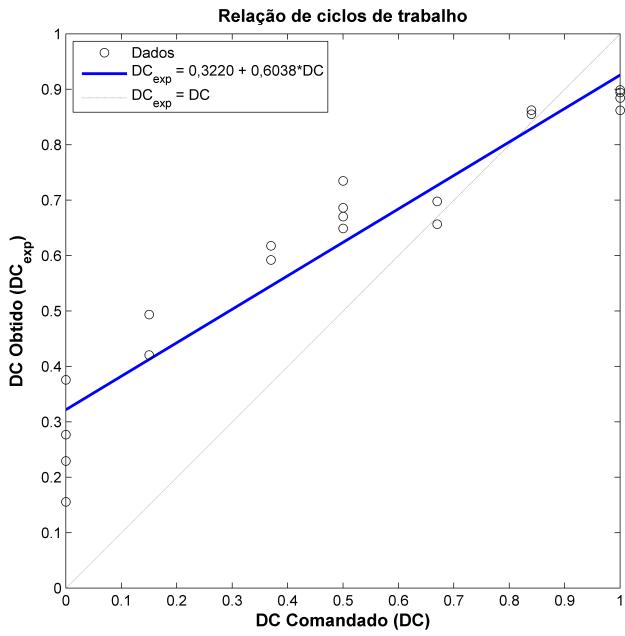


Figura 3.11: Linearização da relação de ciclos de trabalho obtidos e comandados.

as colunas na posição da linha anteriormente identificada, é possível identificar o último pixel da coluna cujo valor é igual a 1. Este processo identifica o pixel mais inferior a ponta da agulha e suas coordenadas representarão a ponta da agulha retornada pela função.

### 3.4 MÉTODO DE CORREÇÃO EM MALHA FECHADA

Como procedimento de realimentação da inserção em malha fechada, utilizando-se de uma câmera para guiagem da agulha, foram propostos dois métodos de correção da trajetória: correção para Alcance de Alvo, que tem como objetivo chegar o mais próximo possível de um ponto estipulado; e correção para Segmento de Trajetória, que visa seguir uma trajetória previamente estipulada. Os dois métodos utilizam o ciclo de trabalho como um parâmetro de entrada, para assim projetar o seu ponto final e trajetória, dado o comprimento de agulha a ser inserido.

Para o método de Alcance de Alvo a correção da inserção seria feita de maneira a corrigir a trajetória alcançando o ponto final. Para isso, um processamento de imagem é realizado para identificar a ponta da agulha a cada passo discretizado do dispositivo. Com a ponta da agulha identificada no passo, um ângulo de saída da agulha e a referência do ponto final, é possível identificar um arco de circunferência que passe pelos pontos em questão e, consequentemente, o raio relacionado a este arco [1]. Após a identificação do raio, pode-se calcular um novo ciclo de trabalho a ser feito para alcançar o ponto final. Esse novo ciclo de trabalho deve ser calculado através da equação 3.1, obtida na linearização do ciclo de trabalho. Desta maneira, a cada passo este raio é recalculado, realizando uma trajetória final que atinja o ponto desejado. Em cada passo também é calculada uma distância euclidiana do ponto final com a ponta atual da agulha, pois para um maior controle é interessante estipular um raio aceitável para a chegada da ponta da agulha.

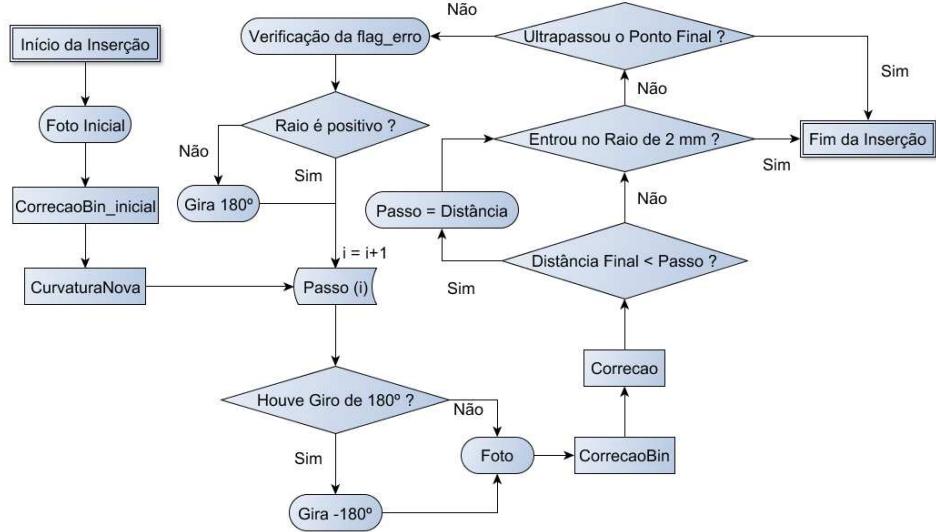


Figura 3.12: Diagrama de blocos referente aos passos de Alcance de Alvo.

Posteriormente, no método de correção para Segmento de Trajetória, a correção da inserção foi trabalhada de modo a interpolar pontos em sua trajetória inicialmente estipulada. Assim como anteriormente, o parâmetro de entrada manteve-se o mesmo, projetando o arco de circunferência desejado através do ciclo de trabalho. Porém, o raio seria calculado, em cada passo, através da ponta da agulha e o ponto de início do passo seguinte dado pela agulha. Deste modo, a agulha tende a seguir a trajetória até o final da inserção.

### 3.4.1 Procedimentos do experimento de Alcance de Alvo

Para a realização deste procedimento foram feitas algumas modificações na realização da rotina *experimentDutyCycle* com o intuito de alcançar o ponto final preestabelecido por uma trajetória inicial. Porém, as modificações feitas não alteraram os procedimentos de pré-inserção já descritos anteriormente por essa rotina. As modificações são feitas a partir da inserção propriamente dita. O diagrama de blocos da Figura 3.12 ilustra a execução deste procedimento que será detalhada a seguir.

Com um ciclo de trabalho previamente estabelecido para o experimento, a rotina inicia-se estabelecendo uma comunicação com a webcam pelo MATLAB. Essa comunicação permite que a rotina *SnapFeedback* seja utilizada para tirar uma primeira foto da gelatina balística com a ponta da agulha já inserida. Essa rotina realiza os procedimentos citados anteriormente de correção da distorção da lente, planificação da imagem e recorte da imagem. Em seguida, a função *CorrecaoBin\_inicial*, exemplificada no diagrama de blocos da Figura 3.13 é chamada para identificar a ponta da agulha no início do experimento e retornar o ângulo desta ponta. O ângulo retornado por essa função é de 90°, pois é pressuposto que a agulha é inserida perpendicular à gelatina balística. Ao final da função, uma figura é mostrada com a binarização correspondente ao início da inserção e o pixel mais inferior, o qual representa a ponta da agulha, como pode ser visto na Figura 3.14.

Posteriormente, a função *CurvaturaNova*, representada pelo diagrama de blocos da Figura 3.15 é utilizada com os parâmetros de entrada referentes a quantidade de passos a serem dados, tamanho

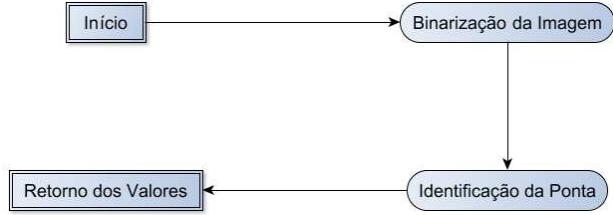


Figura 3.13: Diagrama de blocos representando a função *CorrecaoBin\_inicial*.

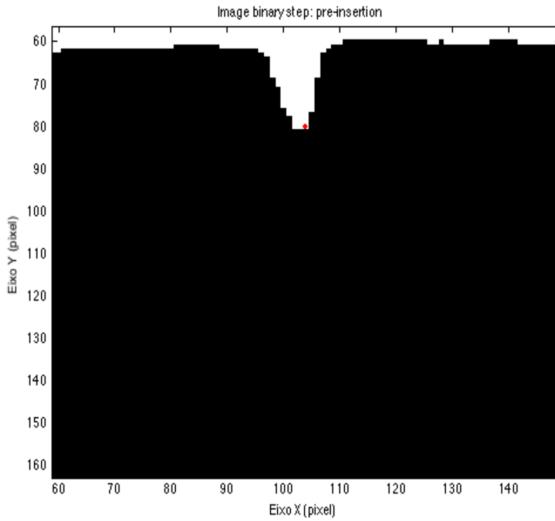


Figura 3.14: Ponta da agulha no início da inserção.

desses passos, posição relativa a ponta da agulha no início da inserção, ângulo de saída da agulha (correspondente a  $90^\circ$  no início), relação de pixels por milímetros e ciclo de trabalho a ser executado pelo dispositivo. Essa função tem por objetivo retornar a posição do ponto final dados esses parâmetros de entrada. A função utiliza as equações 3.1 e 2.5 para representar o ciclo de trabalho que será executado. Deste ciclo de trabalho é possível achar o raio que terá que ser feito pelo arco de circunferência. O centro desta circunferência é determinado a partir da equação 2.3. Para determinação do ponto final da trajetória, as equações 2.2 e 2.4 foram utilizadas. Por fim, esta função descreve na imagem o arco de circunferência correspondente ao ciclo de trabalho comandado com as marcações do ponto inicial e do ponto final da trajetória, como pode ser visto na Figura 3.16.

Os próximos comandos executados funcionam de maneira recursiva. A partir deste momento, a agulha é inserida a cada passo discretizado, e assim uma foto correspondente ao passo é tirada. Em seguida, é possível acessar a ponta da agulha do passo anterior e realizar a binarização da imagem.

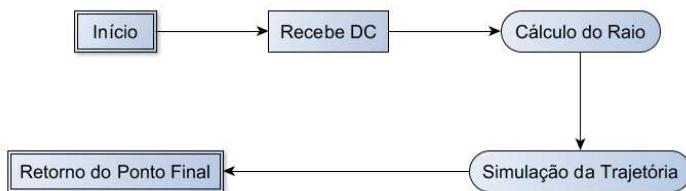


Figura 3.15: Diagrama de blocos referente à função *CurvaturaNova*.

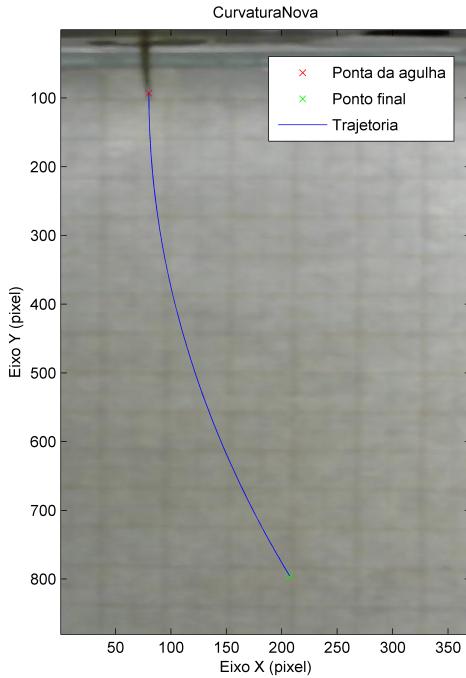


Figura 3.16: Imagem referente a função *CurvaturaNova*.

Através da binarização, é possível identificar a ponta da agulha no passo realizado. Com as informações do passo anterior e o realizado, pode-se determinar o ângulo de saída da agulha para o passo seguinte. Consequentemente, é recalculado o ciclo de trabalho a ser realizado para alcançar o ponto final desejado. As informações geradas são armazenadas para análise posterior. Desta forma, o processo se repete até o alcance do ponto desejado. Algumas funções foram criadas e alteradas para este processo.

A lógica de programação executada para cada passo de inserção foi feita com o comando *while* do Matlab, pois este comando permite uma variação nos parâmetros desta função, que podem ser alterados devido ao incremento ou decremento da quantidade de passos total, melhorando o acerto do ponto final desejado. Antes de se executar este laço, uma matriz é inicializada com o intuito de armazenar algumas informações. As informações guardadas nessa matriz, chamada de *Mat\_dados*, correspondem ao passo executado, às coordenadas da ponta da agulha no passo de referência, ao ângulo de saída desta ponta, ao ciclo de trabalho a ser realizado no próximo passo, ao ciclo de trabalho efetivamente realizado no passo de referência, ao comprimento de agulha efetivamente inserido no passo de referência e ao tamanho do passo a ser realizado no passo seguinte. Em cada passo, uma foto é tirada utilizando a mesma função *SnapFeedback* já descrita anteriormente. Após salvar esta foto, um vetor auxiliar acessa as coordenadas referentes a ponta da agulha no passo anterior. A função *CorrecaoBin* é executada em seguida, recebendo como parâmetro este vetor. De modo semelhante à função *CorrecaoBin\_inicial*, esta função realiza os mesmos procedimentos com a exceção do cálculo do ângulo de saída da ponta da agulha. Com a ponta da agulha identificada no passo de referência e a posição da ponta da agulha no passo anterior, pode-se calcular este ângulo de saída através do arco tangente. Este ângulo, juntamente com a coordenada da ponta da agulha, é retornada pela função. A Figura 3.17 ilustra a ponta da agulha e o ângulo de saída.

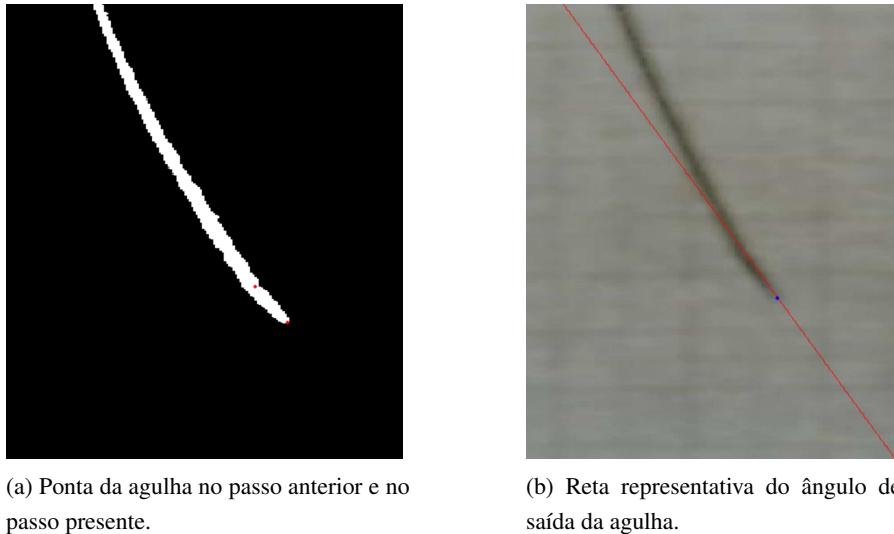


Figura 3.17: Processo de binarização e cálculo do ângulo de saída da agulha.

A próxima função executada em sequência chama-se *Correcao* e recebe como parâmetros a ponta da agulha e o ângulo - retornados pela função anterior -, o ponto final desejado, o comprimento de agulha restante não inserido, a quantidade de passos total e o passo presente. Esta função tem como objetivo retornar o ciclo de trabalho a ser realizado para alcançar o ponto final, a distância euclidiana entre o ponto final e a ponta da agulha e retorna algumas exceções que são tratadas para alertar sobre possíveis problemas. As equações 2.1 e 2.2 determinam o raio da circunferência para o cálculo do seu centro. Porém deve-se atentar, nos cálculos, para direção em que essa agulha está sendo inserida. Caso a direção seja contrária ao padrão descrito na seção 2.2, é necessário calcular o complemento do ângulo encontrado. O raio calculado determina o ciclo de trabalho a ser realizado através das equações 3.1 e 2.5. Caso o ciclo de trabalho calculado seja menor que 32,2%, é comandado um ciclo de trabalho de 0%, devido a curvatura máxima feita nos procedimentos de calibragem do dispositivo.

Dentro desta função algumas observações são realizadas. A primeira delas corresponde ao comprimento da agulha. Caso o comprimento restante da agulha a ser inserida seja menor que o comprimento a ser inserido, uma exceção é lançada indicando que a agulha pode não alcançar o ponto final. A segunda observação consiste em criar um intervalo entre  $-177,7\text{mm}$  e  $177,7\text{mm}$  e caso o raio calculado para realizar o ciclo de trabalho esteja neste intervalo, uma exceção é lançada informando que não é possível realizar um ciclo de trabalho menor que 0% e portanto o ciclo de trabalho a ser realizado será de 0%. Uma terceira observação avalia se o raio calculado é negativo. Caso ele seja negativo, ele poderá estar entre  $0\text{mm}$  e  $-177,7\text{mm}$ . Isso significa que o raio calculado está para o lado oposto e representa uma curvatura maior que o possível de  $177,7\text{mm}$  de raio. Sendo assim, o ciclo de trabalho executado para esse caso é de 0% - representando a curvatura máxima. Para  $raio < -177,7\text{mm}$ , uma simples mudança de sinal é feita para encontrar um ciclo de trabalho coerente com a mudança de referência. Para as situações descritas em que o raio calculado é negativo, uma exceção é lançada informando que a agulha deve fazer uma rotação em  $180^\circ$  para o próximo passo. Após a inserção deste passo, a verificação da existência de uma exceção representando um raio negativo é realizada e, caso exista, a agulha retorna à posição original, rotacionando em mais  $180^\circ$ .



Figura 3.18: Diagrama de blocos da função *Correcao*.

Na função *Correcao*, demonstrada pelo diagrama de blocos da Figura 3.18, um controle sobre a distância retornada é aplicado assim que a ponta da agulha entra em um raio de dois milímetros. Este raio corresponde a um erro aceitável, tendo em vista trabalhos realizados em procedimentos de inserção de agulhas em que os erros encontrados para inserções mais profundas foram maiores ou iguais a dois milímetros [17, 8, 7]. Portanto, assim que o cálculo da distância euclidiana entre a ponta da agulha e o ponto final é realizada, uma checagem observa três situações. A primeira é se a ponta da agulha se encontra dentro deste raio tolerável e, em caso verdadeiro, uma exceção é lançada interrompendo os próximos passos, caso precisem ser executados. A segunda situação considera o caso em que a agulha não está dentro deste raio e ultrapassa as coordenadas na direção vertical, lançando uma exceção e executando os mesmos procedimento descritos na primeira etapa. Por fim, a última situação avalia se o passo de referência é o último a ser feito e, caso a ponta da agulha esteja fora do raio, sem ultrapassar as coordenadas na direção vertical, uma exceção é lançada indicando a necessidade de ser executado mais um passo, adicionando-o quantidade total de passos. Com a distância retornada por esta função, pode-se fazer um controle do passo na função *experimentDutyCycle*, indicando que, caso a distância retornada seja menor que o tamanho do passo de referência, utilize-se a função *floor* para arredondar essa distância e atribuí-la ao valor do passo seguinte a ser realizado. Desta maneira, os procedimentos iniciais são executados de maneira recursiva, permitindo que o objetivo proposto seja concluído. A Figura 3.19 a seguir representa o resultado em um dos passos do experimento.

### 3.4.2 Procedimentos do experimento de Correção para Segmento de Trajetória

O procedimento de correção para Segmento de Trajetória foi desenvolvido após o experimento de alcance de alvo. Com o intuito de interpolar pontos, o objetivo da correção consiste em seguir a trajetória pré-estipulada e assim o ciclo de trabalho realizado tenderia ao valor desejado. Sendo assim, algumas modificações nas funções foram necessárias para atender ao objetivo proposto. A Figura 3.20 mostra os passos a serem executados.

Assim como no experimento anterior, os passos descritos a seguir funcionam de maneira recursiva e os procedimentos de pré-inserção foram mantidos. A primeira modificação ocorre após a execução das funções *SnapFeedback* e *CorrecaoBin\_inicial*, durante a função *CurvaturaNova*. Esta função tem como objetivo traçar um arco de circunferência através do ponto inicial já identificado e o ciclo de trabalho estabelecido. A quantidade de passos e seu comprimento é passado como referência para a função e assim um vetor auxiliar pode ser criado com tamanho definido pela quantidade desses passos. Sabendo que os passos a serem executados possuem um comprimento já estabelecido, é possível calcular o ponto final para cada passo e armazenar neste vetor. Esses pontos pertencem ao mesmo arco traçado e portanto são concêntricos.

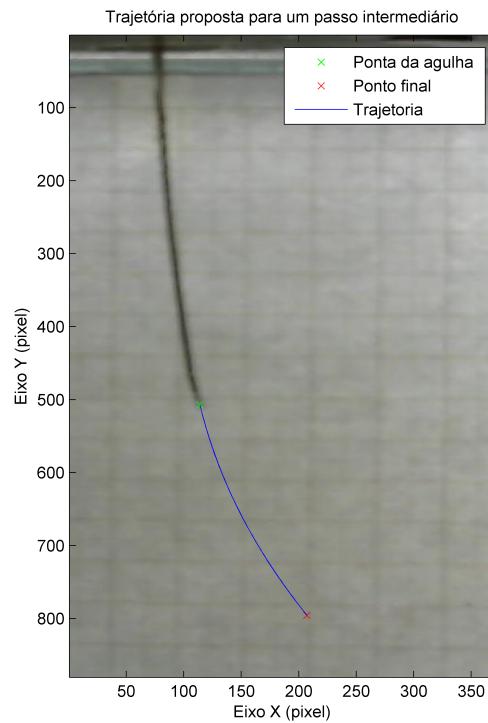


Figura 3.19: Imagem da saída da função *Correcao* mostrando a trajetória a ser realizada para o passo seguinte.

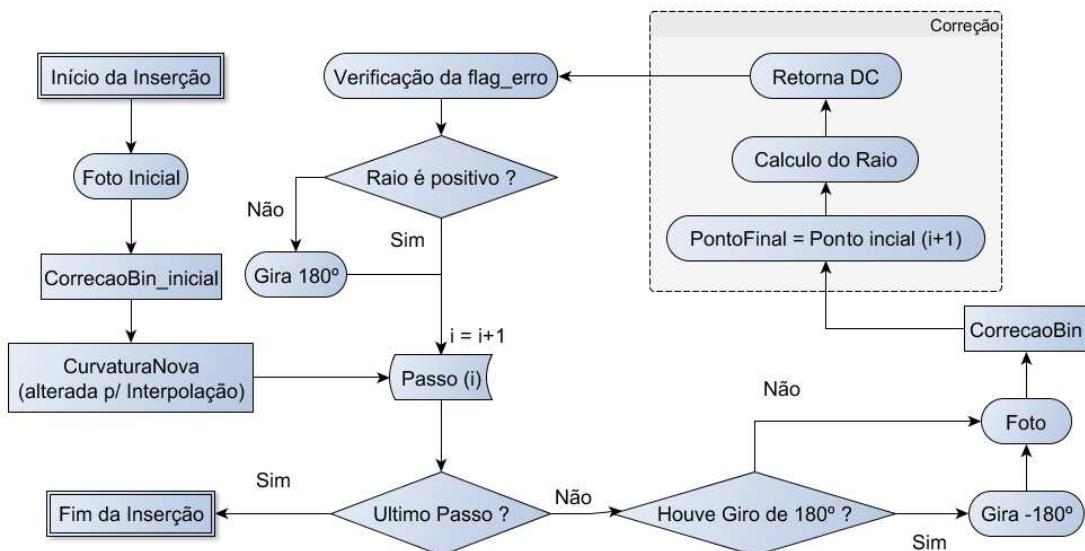


Figura 3.20: Diagrama de blocos referente aos passos de correção para Segmento de Trajetória.

A função *CorrecaoBin* permanece inalterada, realizando os procedimentos para adquirir as coordenadas da ponta da agulha e o ângulo de saída desta ponta. Porém a próxima função a ser executada, *Correcao*, é modificada. Diferentemente do cálculo feito para encontrar o ciclo de trabalho tendo um ponto final fixo de referência, esta função executa o mesmo cálculo tendo como referência o ponto final de cada passo. As equações 3.1 e 2.5 são utilizadas para o cálculo do raio e consequentemente o ciclo de trabalho a ser executado. Esta função não apresenta a distância euclidiana entre a ponta da agulha e o ponto final, pois o interesse deste procedimento é aproximar a curva realizada pela agulha da trajetória estipulada.

## 4 ANÁLISE DE DADOS

### 4.1 RESULTADOS EM MODO ANTENA TELESCÓPICA

Os experimentos realizados com o dispositivo montado em modo antena telescópica tinham como intuito descobrir o motivo do erro sistemático visto por Geraldes [9]. Portanto, como uma continuação do trabalho de Geraldes, o primeiro passo realizado foi encontrar uma relação de ciclos de trabalho do dispositivo montado nessa configuração.

Após terem sido realizados os testes citados na Seção 3.1.2, foi possível perceber que os ciclos de trabalho observados durante os experimentos neste modo não foram os mesmos que os encontrados por Geraldes, quando utilizado o dispositivo em configuração de passos discretos. Dessa maneira, é possível concluir que a trajetória simulada para o experimento realizado por Geraldes [9] não é uma boa representação do modelo real. Foram realizados testes para ciclos de trabalho de 25, 50, e 100% e foi observado que os raios de curvatura obtidos com o dispositivo nessa configuração representaram ciclos de trabalho maiores que os encontrados quando executados os mesmos testes em modo passos discretos.

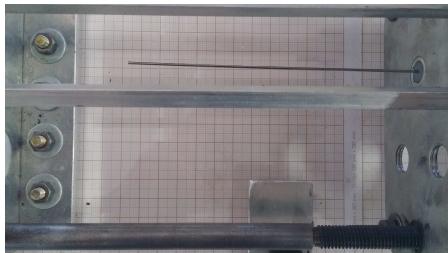
Outro procedimento realizado para tentar descobrir o motivo do erro sistemático foi, antes de cada inserção, tirar fotos do ângulo de saída, mostradas na Figura 4.1, e do final do corpo da agulha, mostradas na Figura 4.2. As fotos foram tiradas sem uma posição fixa e, em algumas delas, não foi possível fazer uma correção de perspectiva. Porém foi observado que o ângulo de entrada sofre alteração devido à flambagem causada pela castanha, e isso pode ser a causa do erro sistemático observado no trabalho de Geraldes [9].

### 4.2 RESULTADO DOS EXPERIMENTOS EM MALHA FECHADA

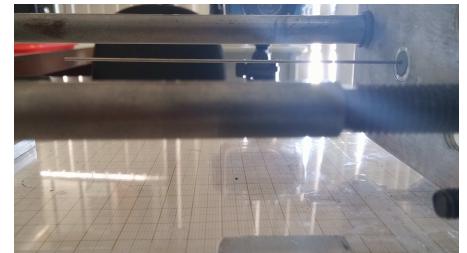
Um problema visto nas primeiras inserções foi que a agulha ultrapassava o ponto desejado, como visto na Figura 4.3. Para o entendimento desse erro, diversos procedimentos foram tomados, como a verificação real do comprimento de agulha inserido; do cálculo utilizado para encontrar o raio; a simulação da trajetória esperada e do ponto final desejado, de modo a confirmar que o comprimento



Figura 4.1: Ângulo de saída da agulha no momento logo antes da inserção.



(a) Base da agulha vista por cima.



(b) Base da agulha vista de lado.

Figura 4.2: Curva realizada pela base da agulha no momento em que as castanhas a seguram.

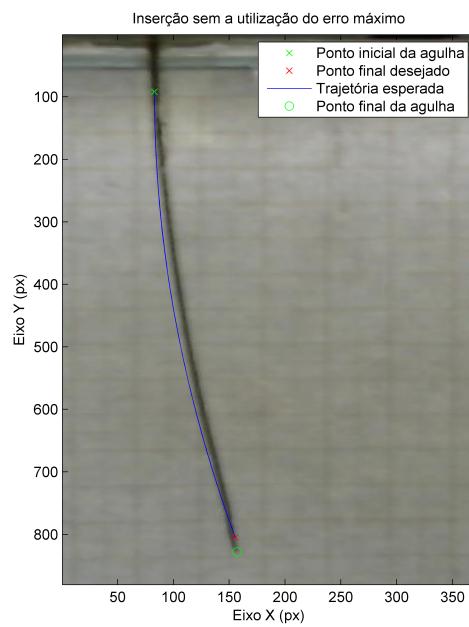
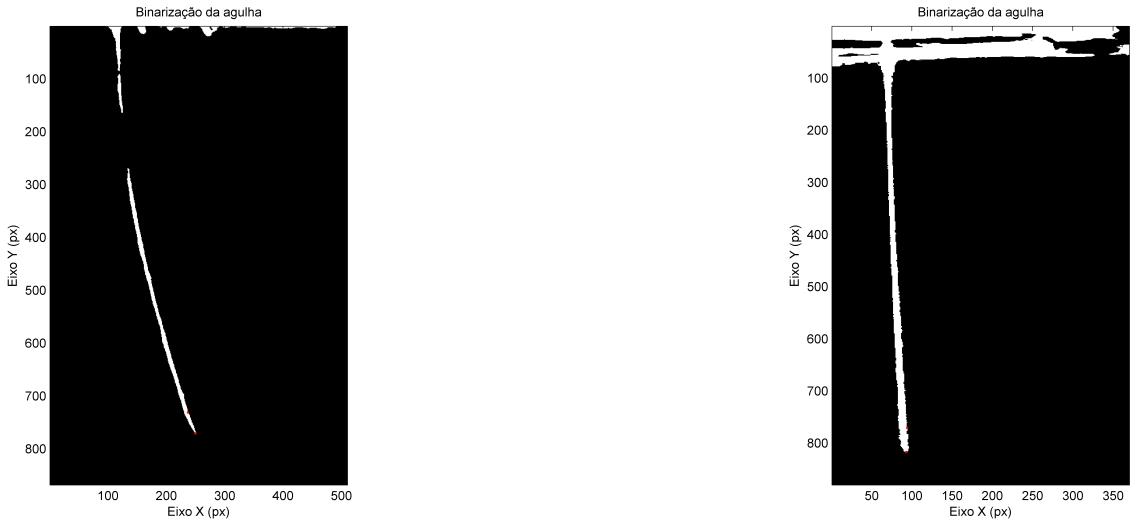


Figura 4.3: Resultado ao final de uma inserção em que a agulha ultrapassa o ponto final desejado.

simulado era igual ao que estava sendo inserido, e a verificação da relação de pixels por milímetro da imagem. Uma vez que foi confirmado que nenhum desses fatores era a causa dessa diferença, chegou-se à conclusão de que os ângulos de saída da agulha encontrados eram imprecisos, de maneira que a agulha era inserida mais reta - não realizando a curva que deveria ser feita - e, portanto, a agulha realmente iria ultrapassar o ponto final desejado.

Outro problema visto foi que o caminho efetivamente realizado pela agulha não representou muito bem a curva que deveria ter sido realizada, principalmente devido ao mesmo motivo de imprecisão da definição do ângulo de saída da agulha. Uma vez que todo o trabalho realizado utilizou apenas uma câmera posicionada sobre a gelatina, a qualidade da imagem não foi excelente e, portanto, houve uma dificuldade em definir como encontrar o ângulo de saída da agulha.

Inicialmente, tomando como base o trabalho realizado por Bernardes [1] pensou-se em definir o ângulo de saída da agulha utilizando o mesmo método. A partir da imagem binarizada e do pixel relativo à ponta da agulha, foi pensado utilizar o ponto médio da agulha alguns milímetros acima de sua ponta. Dessa maneira, utilizando a mesma ideia da detecção da ponta da agulha, se buscaria o pixel



(a) Perda de parte do corpo da agulha  
após a binarização.

(b) Engrossamento do corpo da agulha  
após a binarização.

Figura 4.4: Exposição da diferença do resultado da binarização da agulha.

médio da agulha nesse ponto e, a partir da distância entre os pixels, seria possível encontrar o ângulo de saída da agulha. Porém, diferentemente do trabalho realizado por Bernardes [1], a qualidade da imagem obtida pela câmera utilizada era inferior, portanto, a binarização não representava exatamente a agulha como ela é - perdendo partes dela algumas vezes e engrossando-a em outras - como pode ser visto na Figura 4.4. Devido às dificuldades de binarização, decidiu-se utilizar a ponta encontrada um passo antes do passo que deveria ser corrigido e, a partir das diferenças de distância, definir o ângulo de saída da agulha. Tendo em vista que em todos os experimentos os passos realizados foram de 8mm, encontrar o ângulo de saída da agulha utilizando esse método era uma alternativa viável - se os passos fossem muito grandes esse método, claramente, não representaria bem esse ângulo. Todavia, mesmo sendo suficiente para encontrar um resultado aceitável, essa distância ainda resultava em um ângulo que não representava a inclinação real da agulha - considerando que o ângulo da agulha é idealmente definido como a inclinação da reta tangente à curva realizada pela agulha no ponto referente à sua ponta - e, por isso, era sabido da existência desse erro.

Os resultados seguintes mostram como a utilização dos métodos de correção foi aplicada para solucionar este problema.

#### 4.2.1 Resultados das correções para Segmento de Trajetória

Como uma opção para o problema observado nas inserções iniciais decidiu-se utilizar o método de correção para Segmento de Trajetória, de modo a tentar reduzir o efeito da imprecisão do ângulo de saída.

Analizando os resultados, foi possível perceber que a trajetória realizada foi mais próxima à esperada, como pode ser visto na Figura 4.5, uma vez que o ponto a ser atingido se encontrava muito mais próximo e, seguindo todos os pontos, a trajetória final resultante seria o arco definido inicialmente.

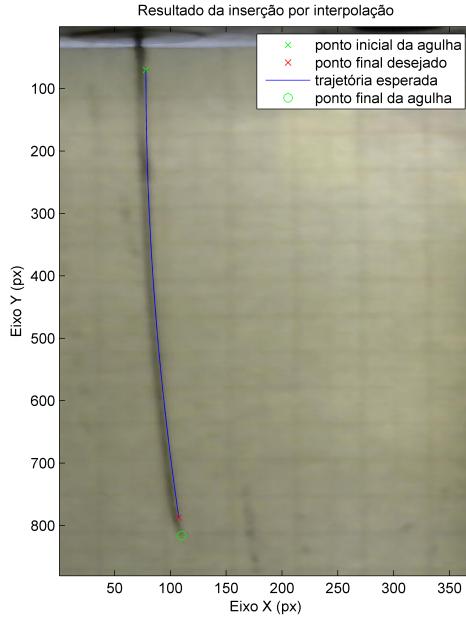


Figura 4.5: Resultado ao final de uma inserção utilizando o método de correção para Segmento de Trajetória.

Observando a Figura 4.5 também é possível perceber que o ponto final da inserção não é muito próximo ao desejado. Esse erro pode ser atribuído ao fato de que, ao final da inserção, a agulha só possui uma chance de alcançar o ponto final, já que o final da inserção não era o alvo de nenhuma das correções do primeiro passo até o penúltimo - apenas no penúltimo passo a agulha busca chegar ao verdadeiro objetivo da inserção.

#### 4.2.2 Análise dos resultados do método de Alcance de Alvo

Diferentemente do método de correção para Segmento de Trajetória, o objetivo nesse caso era alcançar o ponto final desejado não seguindo necessariamente a trajetória predefinida.

Para resolver o problema visto nas inserções iniciais decidiu-se incluir um erro máximo permitido para a distância da ponta da agulha ao ponto final, representado como um círculo no plano xy. Como já mencionado neste trabalho e como visto em trabalhos anteriores, em que os erros foram de pelo menos 2mm [17, 8, 7], é razoável considerar erro de até 2mm como bom resultado, tendo sido este o erro adotado neste trabalho. Para que esse erro não fosse maior que o aceito, foi adaptado para que o último passo realizado fosse do comprimento restante. Tendo em vista que este método foi o preferido para realizar as correções da trajetória, foram feitas diversas inserções utilizando vários ciclos de trabalho diferentes. Devido ao grande número de experimentos executados houve a necessidade de que estes fossem divididos em vários dias diferentes. Uma vez que as condições de trabalho - integridade, translucidez e temperatura da gelatina, calibração do dispositivo e condições de iluminação - mudam de um dia para o outro, deste modo, a análise dessa seção foi feita em lotes de resultados.

Para o primeiro lote de experimentos foram realizadas 10 inserções com ciclos de trabalho variando de 0 a 100% em intervalos de 25%, todas elas contempladas na Tabela 4.1. Durante os ex-

Tabela 4.1: Tabela com os resultados dos experimentos do primeiro lote.

DC comandado (%)	Distância (mm)
0	6,8783
0	7,9684
25	2,0485
25	2,4464
50	1,6776

DC comandado (%)	Distância (mm)
50	1,2325
75	1,3555
75	2,0470
100	1,3106
100	1,7943

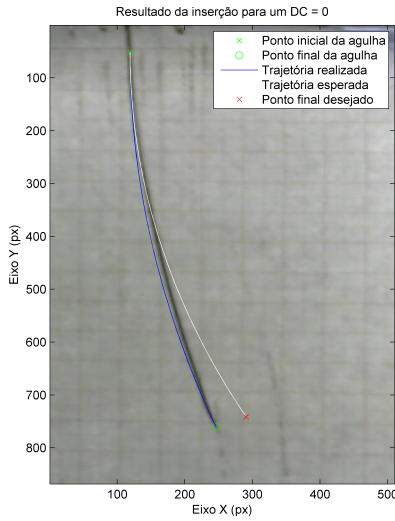


Figura 4.6: Resultado obtido na inserção de um ciclo de trabalho de 0%.

perimentos desse lote foi possível perceber que nos testes para raios muito pequenos a agulha não conseguiu alcançar o alvo. Durante as duas inserções com ciclo de trabalho de 0%, alguns passos realizados foram corrigidos para ciclos de trabalho maiores e, consequentemente, a agulha se desviou de sua trajetória, como pode ser visto na Figura 4.6, necessitando que fosse realizada uma trajetória maior que a sua curvatura natural, de forma que se satura a atuação para que seja corrigida essa trajetória. As distâncias do ponto final desejado até a ponta final da agulha para esse ciclo de trabalho foram de 6,8783 e 7,9684mm.

Para esse mesmo lote, nas inserções de ciclo de trabalho de 25 também houve imprecisão no Alcance de Alvo. Durante essas inserções foi possível visualizar o mesmo ocorrido no experimento de ciclo de trabalho de 0% - em alguns passos foram realizados ciclos de trabalho maiores que os de 25%. Como ainda se trata de um ciclo de trabalho maior que 0%, o erro obtido foi consideravelmente menor, quase entrando no limite de erro permitido, como pode ser visto na Figura 4.7, - em que as distâncias calculadas foram de 2,4464 e 2,0485mm.

Para o segundo lote de experimentos foram realizadas 10 inserções para variados ciclos de trabalho - todos eles a partir de 40%. Nesse lote os resultados obtidos se encontravam dentro do círculo de raio de erro aceitável tendo sido obtido, como menor distância, 0,5586mm e maior distância 1,8497mm, como pode ser visto na Tabela 4.2.

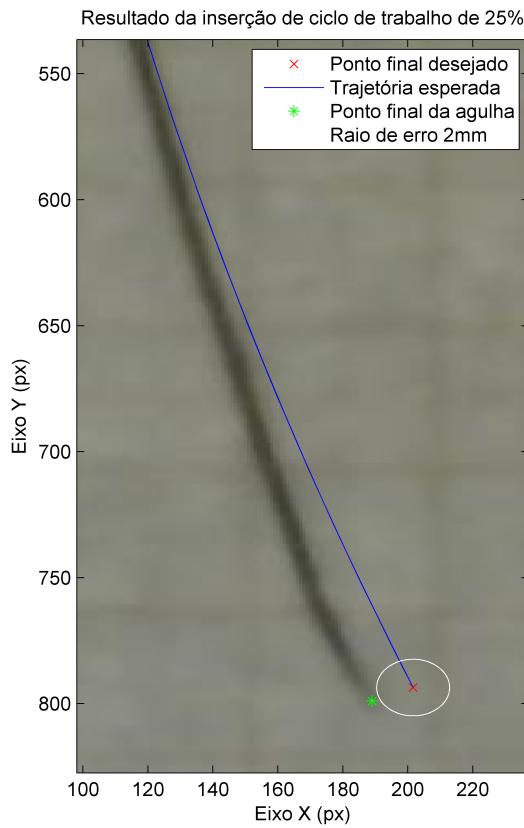
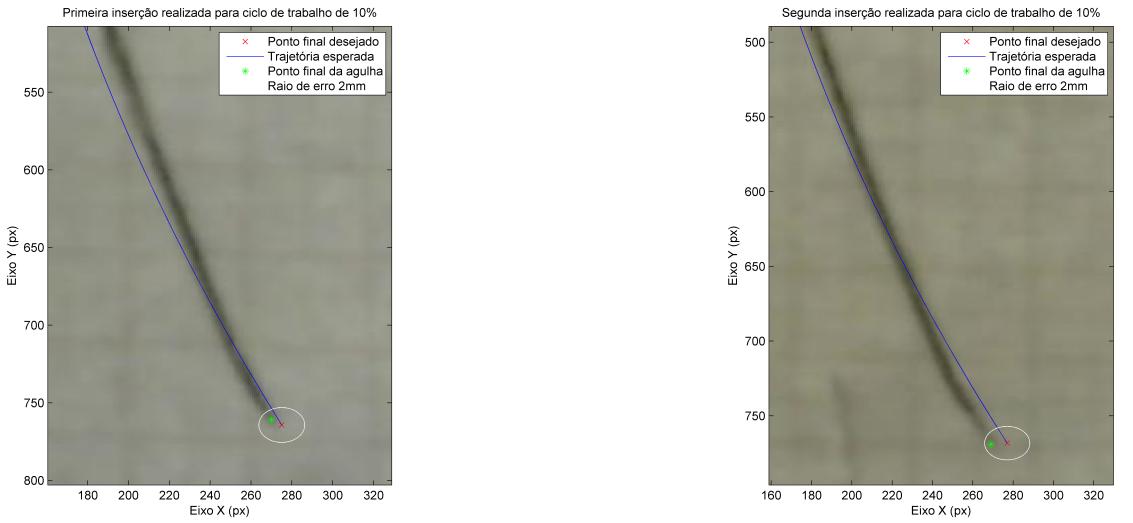


Figura 4.7: Inserção para um ciclo de trabalho de 25% em que a distância ficou bem próximo ao raio de erro permitido.

Tabela 4.2: Tabela com os resultados dos experimentos do segundo lote.

DC comandado (%)	Distância (mm)
30	1,8497
30	0,7312
40	1,5103
40	0,7774
60	0,7374

DC comandado (%)	Distância (mm)
60	1,5402
70	1,1299
70	0,6713
90	0,5586
90	0,7282



(a) Inserção referente ao erro de 1,0707mm.

(b) Inserção referente ao erro de 1,4385mm.

Figura 4.8: Resultados das inserções de ciclo de trabalho de 10%.

Tabela 4.3: Tabela com os resultados dos experimentos do terceiro lote.

DC comandado (%)	Distância (mm)
27	1,0397
27	1,6351
25	1,7318
25	1,6037
20	0,9155

DC comandado (%)	Distância (mm)
20	1,3272
15	0,8116
10	1,0707
10	1,4385

Para o terceiro lote de experimentos executou-se baixos ciclos de trabalho - todos abaixo de 30% - divididos em 9 inserções. Nesses experimentos buscou-se encontrar dificuldades em correções para esses ciclos de trabalho, porém, como já dito, pelas diferenças de condições de inserção, todos os resultados encontrados estavam a uma distância menor do que o erro aceitável. Entre as inserções realizadas foram encontrados erros menores que 2mm para duas inserções executadas com ciclo de trabalho de 10% como pode ser visto pela Figura 4.8. Todos os resultados obtidos se encontram na Tabela 4.3.

Para o quarto e último lote, os experimentos executados contemplaram duas inserções para cada um dos ciclos de trabalho, sendo eles 0, 50, 75 e 100%. Neste lote, como esperado, as inserções de 0% não alcançaram o alvo. Entretanto as inserções para 25% entraram no círculo de raio aceitável, diferentemente do que foi visto no primeiro lote. A Tabela 4.4 mostra os resultados obtidos no quarto lote.

Analizando todos os experimentos executados em todos os lotes, para os experimentos realizados utilizando ciclos de trabalho maiores que 0% os resultados obtidos foram muito promissores, tendo-se em média de distância de 1,3234mm, apresentando, em alguns casos, uma trajetória muito similar à simulada e, consequentemente, um ciclo de trabalho muito próximo ao comandado - tendo em vista a

Tabela 4.4: Tabela com os resultados dos experimentos do quarto lote.

DC comandado (%)	Distância (mm)
0	9,2753
0	8,6428
50	0,5031
50	1,5479

DC comandado (%)	Distância (mm)
75	1,8734
75	1,6254
100	0,4911
100	1,9095

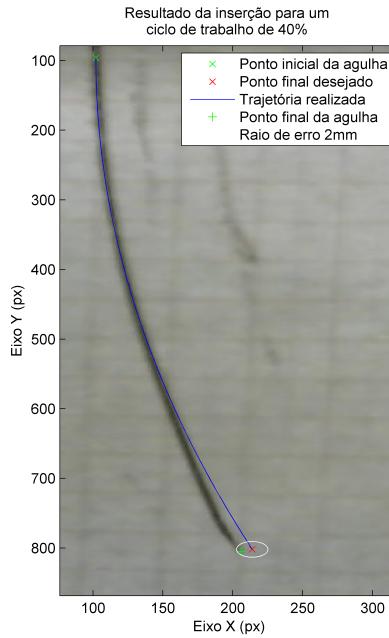


Figura 4.9: Resultado da inserção de um ciclo de trabalho de 40% em que a distância entre o ponto final da agulha e o ponto final desejado foi de 1,5103mm.

linearização realizada. A Figura 4.9 mostra o resultado de uma inserção de ciclo de trabalho de 40% em que a distância obtida foi de 1,5103mm, em que o círculo branco representa o erro máximo de 2mm de distância do alvo final desejado.

Pelo resultado geral das inserções realizadas utilizando este método foi possível observar que ele apresenta uma boa acurácia - principalmente para ciclos de trabalho mais altos - porém não existe uma boa precisão. Como pode ser visto na Figura 4.10, que mostra a distância do resultado das inserções em relação ao ponto final desejado, a maior parte das inserções ficou dentro do raio de 2mm - principalmente quando se trata de ciclos de trabalho acima de 25% - tendo sido obtido apenas um erro acima de 2mm.

Observando a Tabela 4.5 é possível perceber que a média e o desvio padrão dos experimentos - se levadas em conta todas as inserções realizadas em todos os ciclos de trabalho simulados - foram muito altos, entretanto sabe-se que estes valores não representam bem os resultados obtidos, uma vez que é conhecido o fato de que o sistema não corrige bem trajetórias para ciclos de trabalho muito baixos - principalmente os de 0%. Excluindo os ciclos de trabalho de 0% é possível verificar que a média apresenta um bom valor, como já dito anteriormente, porém o desvio padrão é relativamente alto -

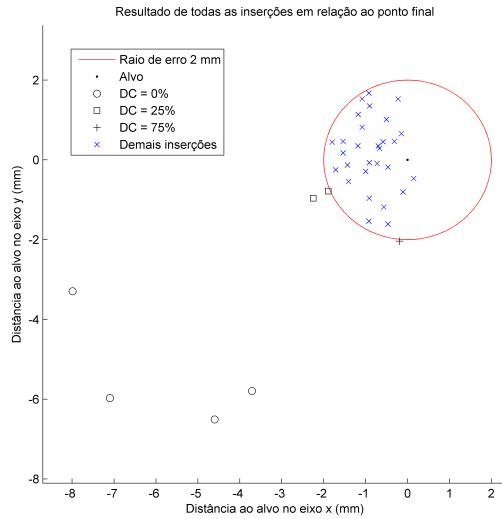


Figura 4.10: Posições relativas ao ponto final desejado da ponta da agulha no final da inserção para todos os ciclos de trabalho executados.

Tabela 4.5: Tabela de erros médios e desvio padrão para casos envolvendo diferentes ciclos de trabalho.

Dados utilizados	Quantidade de Inserções	Média da distância euclidiana (mm)	Desvio Padrão (mm)
DC = 0%	4	8,1912	1,0251
DC = 25%	4	1,9576	0,3757
DC = 50%	4	1,2403	0,5258
DC = 75%	4	1,7253	0,3012
DC = 100%	4	1,3764	0,6447
Todas as inserções	37	2,0658	2,2356
DC > 0%	33	1,3234	0,5154

0,5154mm, um quarto do raio de erro máximo desejado - confirmando a baixa precisão das inserções. Tendo em vista os valores relativos aos resultados de todas as inserções, tem-se a impressão de que a correção realizada não é muito eficiente, porém, ao verificar os dados das inserções com maiores ciclo de trabalho - que representa melhor os resultados obtidos, tendo em vista as informações conhecidas - é possível verificar que o resultado se aproxima do alvo como esperado. É possível conferir os dados de todas as inserções realizadas no Anexo A.

#### 4.2.3 Análise dos erros do método de Alcance de Alvo

Com os resultados obtidos nas inserções de Alcance de Alvo foi possível construir um histograma, desconsiderando-se as inserções com ciclo de trabalho zero. No histograma da Figura 4.11 pode-se observar algumas regiões distintas. O histograma possui uma concentração maior de pontos entre os intervalos de [0, 5 a 1] e de [1, 5 a 2], indicando que existe uma concentração maior de resultados nas

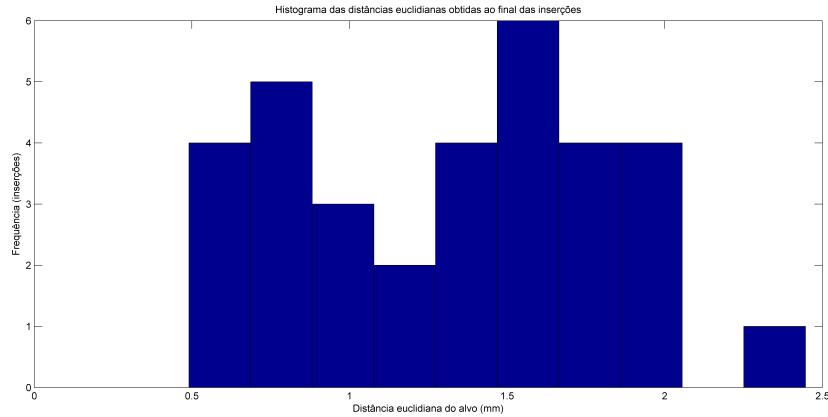


Figura 4.11: Histograma das distâncias euclidianas dos resultados obtidos ao final das inserções, excluindo as inserções de ciclo de trabalho de 0%.

proximidades do alvo e da borda do círculo de 2mm. Este fato sugere uma análise mais detalhada da posição final da ponta da agulha de cada resultado. Para isso é calculado o desvio padrão e a média para cada eixo dessas posições. Para o eixo das abscissas, obteve-se um desvio padrão de 0,5678mm e média de -0,9113mm. Para o eixo das ordenadas, obteve-se um desvio padrão de 0,944mm e média de 0,0405mm. Com esses resultados distintos pode-se construir dois histogramas, um para cada eixo.

No histograma referente ao eixo das ordenadas, pode-se observar que os resultados se comportaram de maneira a representar uma distribuição normal, embora existam pequenos desvios. Sendo assim, foi possível traçar essa distribuição dado os valores encontrados para média e desvio padrão, conforme a Figura 4.12. O valor da média sugere que houve uma distribuição uniforme ao longo desse eixo. Além disso, é possível observar que existe uma probabilidade de 95% dos resultados estarem em uma distância de 1.888mm da média, respeitando em sua quase totalidade o erro máximo desejado. Tendo em vista que para este método de Alcance de Alvo os passos da inserção são modificados, com o intuito de atingir o alvo desejado, pode-se dizer que o controle exercido sobre os passos é eficiente.

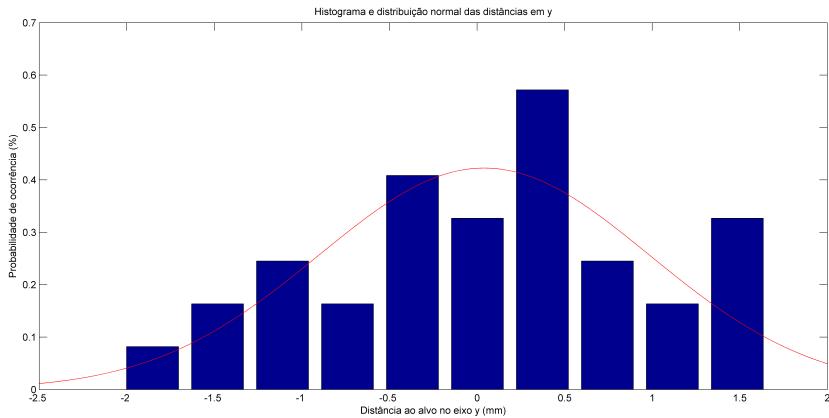


Figura 4.12: Histograma normalizado em relação à distribuição normal das distâncias no eixo y. Distribuição normal para os mesmos dados construída sobre o gráfico do histograma.

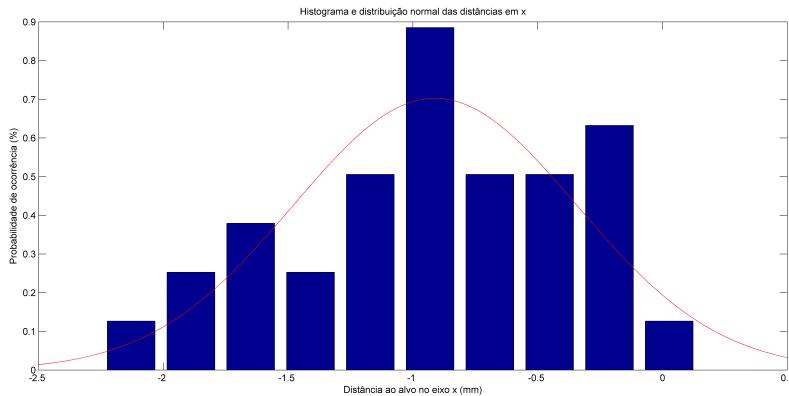


Figura 4.13: Histograma normalizado em relação à distribuição normal das distâncias no eixo x. Distribuição normal para os mesmos dados construída sobre o gráfico do histograma.

Observou-se ao se construir o histograma referente ao eixo das abscissas que havia um comportamento dos resultados semelhantes a distribuição normal. Portanto foi construído o gráfico da distribuição normal sobre o histograma, como pode ser visto na Figura 4.13. É possível inferir da média nesse eixo, que os resultados em sua maioria tendem a estar localizados antes do alvo, no segundo e terceiro quadrante do círculo desejado. Isso deve-se ao fato de que o cálculo do ângulo de saída da agulha não representa o ângulo ideal, resultando em uma distorção. Diferentemente do histograma da Figura 4.12, os valores estão menos distribuídos ao longo deste eixo, demonstrando que a correção da curvatura representa uma maior complexidade comparada com o controle em relação a profundidade da inserção. Assim como observado anteriormente, existe uma probabilidade de 95% dos resultados compreenderem uma distância de 1,1356mm da média, confirmando a análise feita sobre a distribuição dos resultados nos quadrantes citados.

Pelo fato do histograma da Figura 4.11 se tratar da distribuição dos erros da distância euclidiana entre os resultados das inserções e o alvo desejado, observa-se que as regiões distintas anteriormente devem-se ao fato do erro ser calculado utilizando-se as distâncias em  $x$  e  $y$ . Portanto o histograma construído anteriormente, representa uma soma dos erros acumulados.

Através das análises feitas anteriormente, pode-se identificar uma nova região onde se encontram os resultados em sua maioria. Tendo em vista que existe uma distribuição normal referente a cada um dos eixos citados, foi construído um novo centro representado através das médias referentes a cada eixo. Este ponto central está deslocado a esquerda do alvo inicial, como pode ser visto na Figura 4.14. Portanto é possível gerar um retângulo em volta deste ponto com altura igual a quatro vezes o desvio padrão dos erros nas ordenadas e largura quatro vezes o erro nas abscissas, representando uma área com probabilidade de 95% dos resultados estarem contidos.

Analizando a falta de precisão vista nos resultados dos experimentos pode ser atribuída ao fato de que a correção para distâncias pequenas se torna bastante difícil - como visto nos resultados dos experimentos de correção para Segmento de Trajetória - e também pelo fato de que se corrige apenas o alcance ao ponto final e não a trajetória - acredita-se que caso a agulha seguisse a trajetória a precisão seria maior, uma vez que ela viria sempre pelo mesmo caminho, alcançando o ponto final sempre vindo do mesmo lugar - o ponto referente ao penultimo passo da inserção.

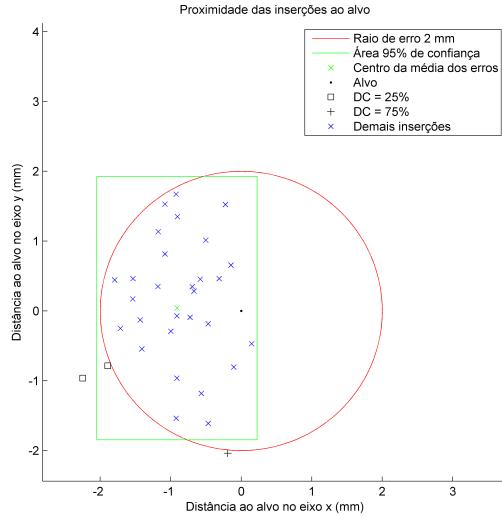


Figura 4.14: Posição final da ponta da agulha para todos os experimentos executados com ciclo de trabalho acima de 0%.

### 4.3 RESULTADOS DAS INSERÇÕES EM MALHA ABERTA

Ao final de todos os experimentos foram realizadas inserções em malha aberta para comparar com os resultados das inserções em malha fechada no modo de correção para Alcance de Alvo. Para esses experimentos foram realizadas três inserções para cada um dos mesmos valores de ciclo de trabalho dos experimentos realizados na seção anterior.

Observando as inserções de ciclo de trabalho de 0% é possível perceber que todas as inserções realizadas ultrapassaram o ponto desejado na direção x, indicando que a agulha curvou mais do que deveria, inclusive uma das inserções chegou a realizar uma curva bem próxima à curvatura máxima que pode ser realizada pela agulha - como pode ser visto na Figura 4.15. Uma vez que a linearização realizada levou em conta uma média de inserções e que a correção para ciclos de trabalho de 0% não

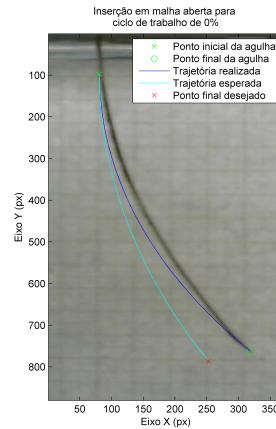


Figura 4.15: Resultado de uma inserção em malha aberta para um ciclo de trabalho de 0% em que, nesse caso, a curvatura obtida foi muito maior do que a esperada.

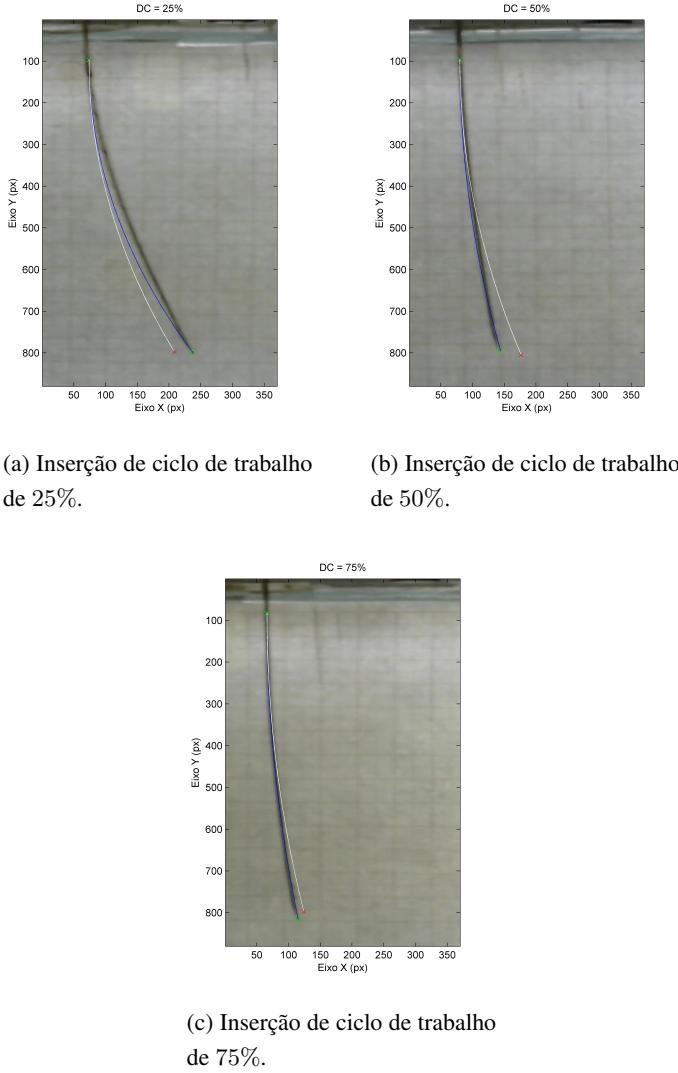
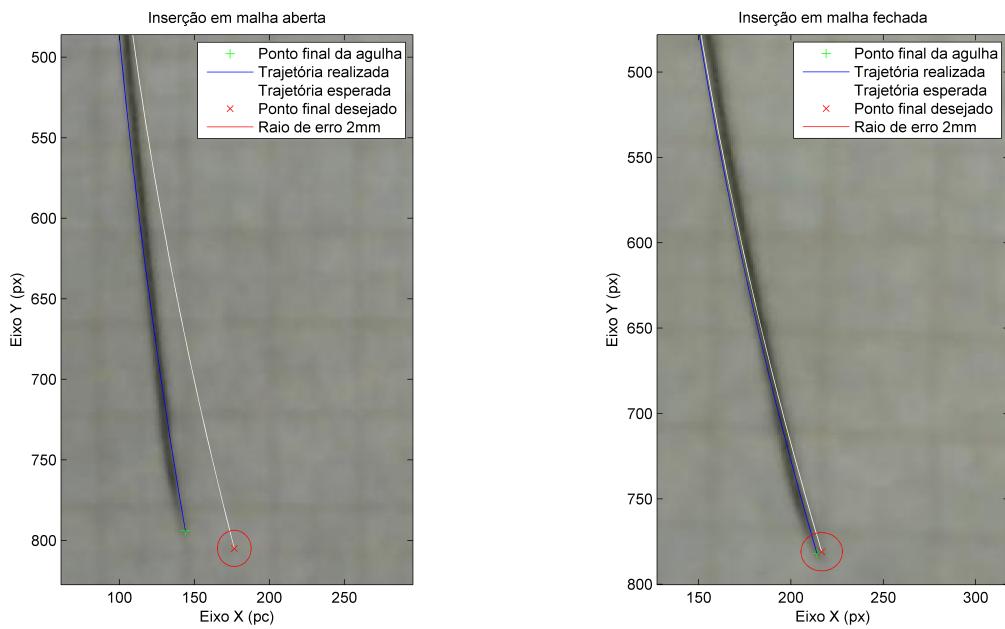


Figura 4.16: Inserções em malha aberta para diversos valores de ciclo de trabalho. Nas subfiguras as linhas azuis representam o trajeto realizado pela agulha e as linhas brancas o trajeto esperado. Em todas as inserções os erros obtidos foram maiores que 2mm.

conseguiu corrigir a trajetória, não é possível afirmar que a agulha pode curvar mais do que o esperado - como aconteceu anteriormente. Os experimentos de inserção de ciclo de trabalho de 0% foram realizados em uma gelatina nova e gelada. É possível que estes fatores alterem a curva realizada pela agulha, uma vez que, obviamente, o meio no qual a agulha é inserida influencia em sua trajetória.

Para todas as outras inserções com ciclo de trabalho acima de 0%, como visto na Figura 4.16, é possível perceber que o erro da agulha é extremamente aleatório, apresentando uma variação muito grande - indo de valores próximos a 8mm até erros pouco acima de 2,5mm - e sendo na direção horizontal do plano algumas vezes positivo e outras negativo.

Analizando os erros obtidos para as inserções em malha aberta e para as inserções em malha fechada utilizando o método de correção para Alcance de Alvo é possível verificar, de acordo com a Figura 4.17, que o fechamento da malha realmente melhorou a acurácia da inserção. E a partir de todos os dados obtidos percebe-se que mesmo o maior erro obtido em malha fechada ainda é



(a) Resultado da inserção em malha aberta.

(b) Resultado da inserção em malha fechada.

Figura 4.17: Comparação das inserções em malha aberta e malha fechada para um ciclo de trabalho de 50%.

menor que o menor erro obtido em malha aberta, comprovando, assim, os bons resultados obtidos pelo método aplicado neste trabalho e a eficiência da utilização de malhas fechadas em sistemas de guiagem de agulhas flexíveis.

## **5 DISCUSSÕES**

O trabalho anterior realizado por Geraldes [9] foi utilizado de base para dar continuidade ao principal objetivo deste novo trabalho: o fechamento da malha utilizando imagens obtidas por câmera. Os modelos teóricos sobre o curvamento da agulha foram profundamente estudados para uma melhor avaliação das possíveis realimentações a serem utilizadas. Juntamente com os modelos teóricos, a estrutura do dispositivo foi reavaliada para um melhor entendimento sobre o problema em questão. Dentre alguns trabalhos sobre realimentação já realizados, a utilização da câmera para monitorar a distância que a agulha estaria do ponto ideal serviu de base para as aplicações nesse trabalho [14]. Ao final, o objetivo de chegar a um ponto final permitindo um certo erro, foi o principal caso estudado e desenvolvido no trabalho.

### **5.1 CONCLUSÕES**

Durante todo o trabalho foram observados diversos erros, falhas e dificuldades devido à falta de manutenção do dispositivo. Todos esses erros foram solucionados ou, ao menos, contornados de maneira que fosse possível concluir os experimentos e obter respostas coesas com o objetivo inicial.

Ao início de todo o trabalho foram feitos alguns experimentos realizados por Geraldes [9] de modo a observar os erros sistemáticos verificados anteriormente e descobrir a potencial causa deles. Entre esses erros estava um que era sistematicamente observado durante os experimentos de inserção em modo antena telescópica e foi possível concluir que a provável causa desse erro se devia à flambagem inicial da agulha, verificado na Seção 4.1. Os erros observados na Seção 3.1.3 representavam, em geral, uma soma indevida no deslocamento das prensas ativas e foram contornados de maneira que fosse possível dar continuidade ao trabalho.

Entre vários testes realizados inicialmente, constatou-se que quando a prensa ativa recua com a agulha presa, o suporte frontal sofre um esforço maior, criando uma pequena folga nos anéis elásticos que prendem as hastes. Para que fosse possível contornar esse problema foi utilizada uma barra metálica acima dos suportes frontal e traseiro, restringindo os movimentos de flexão desses elementos por porcas rosqueadas à barra.

O fechamento da malha do sistema foi realizado de modo que fosse possível tanto corrigir a trajetória realizada pela agulha quanto alcançar um ponto específico escolhido de acordo com o ciclo de trabalho a ser realizado. Foi possível comparar os dois métodos de correção projetados e verificar que os dois possuem bons resultados para a situação em que são aplicados - o método de correção para Segmento de Trajetória segue melhor a curva simulada a ser realizada pela agulha, enquanto o método de correção para Alcance de Alvo possui uma exatidão muito maior que o outro método.

Uma das falhas do método de correção para Alcance de Alvo observada durante os experimentos foi a dificuldade da guiagem correta da agulha para chegar ao alvo desejado quando utilizados ciclos de trabalho muito baixos. Esse problema, porém, já era esperado, uma vez que, caso haja desvios

para ciclos de trabalho maiores, a volta à trajetória anterior e a chegada ao ponto final torna-se mais difícil, pois se faz necessária a realização de uma curvatura maior que o limite máximo previsto para a agulha.

A partir da comparação entre os experimentos em malha aberta e os procedimentos realizados no método de correção para Alcance de Alvo foi possível verificar que a inserção sem correção apresenta erros muito aleatórios e que esses erros são corrigidos - com exceção dos ciclos de trabalho muito pequenos - com acurácia, de modo a alcançar o ponto desejado. Acredita-se que essa acurácia do Alcance de Alvo pode ser ainda maior caso o limite de erro permitido seja menor, diminuindo assim o raio do alvo a ser alcançado.

A falta do sensor magnético, entretanto, acarretou uma considerável imprecisão nos experimentos realizados, tendo em vista que, sem esse elemento, problemas em relação ao deslocamento no eixo z tiveram que ser verificados visualmente, os ciclos de trabalho realizados tiveram que ser calculados utilizando propriedades trigonométricas a partir das próprias imagens obtidas pela câmera. A falta de manutenção também representou dificuldades, uma vez que era necessário, em todos os experimentos, verificar a precisão do sistema, de modo que se garantisse que não havia escorregamento na agulha - o que exigia frequentes calibrações e correções, além do consequente descarte dos experimentos em que o erro havia ocorrido devido a problemas mecânicos.

## 5.2 TRABALHOS FUTUROS

### 5.2.1 Melhorias mecânicas

O protótipo projetado por Geraldes[9] para inserção de agulhas flexíveis foi construído durante seu mestrado e diversas inserções foram realizadas até o final deste trabalho. Portanto, houve um desgaste mecânico nas peças e os únicos procedimentos de manutenção realizados foram as calibrações mecânicas já descritas anteriormente e a lubrificação das partes necessárias. Ao desmontar o dispositivo foi possível observar diversos desgastes nas peças, como, por exemplo, o surgimento de um sulco na castanha mostrado na Figura 3.4. A falta de peças de reposição impediu a reposição de algumas peças desgastadas. Para futuras inserções seria relevante a troca dessas peças desgastadas a fim de evitar a necessidade de calibração constante, ajudando a minimizar os possíveis erros aleatórios, o que leva a uma maior credibilidade nos resultados obtidos.

Além da troca de peças desgastadas, seria conveniente realizar algumas mudanças na estrutura mecânica do dispositivo. Foram projetadas neste trabalho algumas mudanças referentes aos suportes frontais e traseiros - como visto na Figura 5.1 -, além da mudança da castanha. Eles apresentam uma mudança de tamanho e a inclusão de duas barras para restringir o movimento de flexão dos suportes, de maneira que as folgas criadas durante a movimentação do mandril sejam minimizadas. A nova castanha, Figura 5.2, projetada<sup>1</sup> para minimizar o problema de flambagem na agulha, citada por Geraldes [9]. Porém, devido aos detalhes envolvidos quanto a angulação e ranhuras da castanha, não foi possível fabricá-la. Por simulações acredita-se que o problema possa ser solucionado, entretanto uma nova castanha pode ser projetada para facilitar a fabricação.

---

<sup>1</sup>peça projetada por Vitor Hugo Rezende

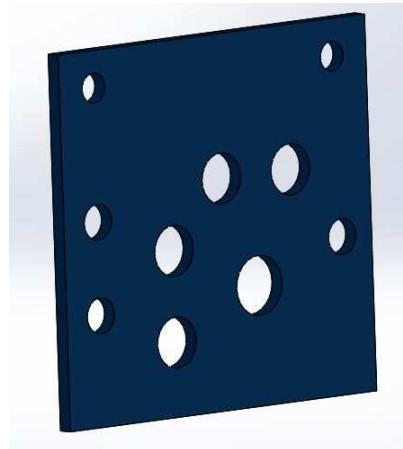


Figura 5.1: Suporte projetado para trabalhos futuros.

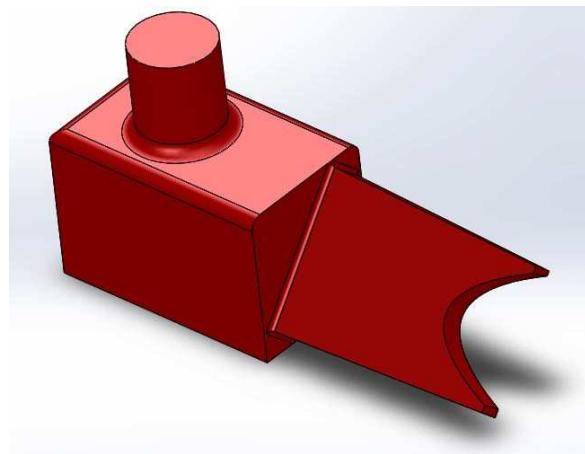


Figura 5.2: Projeto para nova castanha a ser utilizada.

Devido à possibilidade de trabalhar a inserção de agulhas flexíveis em dois módulos: antena telescópica e passos discretos, o sensor de fim de curso do mandril frontal deve ser posicionado de maneira diferente para cada um dos casos. A forma com que este sensor é fixado consiste em prendê-lo utilizando fita dupla face. Com o passar do tempo, esta fita perde um pouco a aderência, o que pode prejudicar o posicionamento deste sensor. Uma maneira de melhorar este posicionamento seria adicionar esse sensor a um trilho, de maneira que se possa ajustá-lo em alguma posição fixa.

Para atingir curvaturas maiores do que as da agulha utilizada neste trabalho e assim melhorar algumas correções na inserção, é relevante a troca desta agulha por uma outra mais flexível e portanto menos espessa. Para isso deve-se atentar para a influência da espessura da agulha com o projeto das castanhas. O projeto das castanhas deve permitir um fechamento ideal, evitando folgas ou flambagem.

### 5.2.2 Outras melhorias

As melhorias mecânicas garantem resultados mais satisfatórios, pois ajudam a minimizar erros nos procedimentos de inserção. Porém, outras melhorias podem ser feitas com o intuito de maximizar a performance do dispositivo.

Uma melhoria a ser feita envolve o cálculo do ângulo de saída, já citado no processo de binarização da Seção 4.2.1. O processo de binarização da imagem deve ser aperfeiçoado de maneira a identificar o corpo da agulha de modo mais fiel, evitando o estreitamento ou espessamento deste corpo. A troca da webcam por uma câmera de melhor qualidade de imagem pode facilitar neste processo, uma vez que a câmera atual melhorou significativamente a binarização da imagem. Uma câmera estéreo poderia ser utilizada e assim problemas com deslocamento no eixo z seriam minimizados. Uma nova estratégia para o cálculo do ângulo de saída da ponta da agulha deve ser pensada, de modo que não se provoque uma variação grande neste ângulo. Quanto mais exato este ângulo for representado, maior será a confiabilidade nos resultados obtidos.

O método de correção para Segmento de Trajetória, visto na Seção 3.4.2, é feito de maneira que cada passo representa um ponto final a ser alcançado. Isso implica uma grande quantidade de pequenas correções. Sendo assim, o método deve ser testado utilizando uma quantidade menor de pontos - com um intervalo maior de passos entre cada ponto. Como já analisado anteriormente, sabe-se que o método de correção para Segmento de Trajetória apresenta um maior erro devido ao fato de que existe apenas uma oportunidade para o alcance do último ponto desejado, portanto, o aumento da distância entre os pontos deve levar a um melhor acompanhamento da trajetória e um menor erro no último passo.

Nos experimentos realizados não foi possível executar testes capazes de identificar a eficiência em se obter curvas suscetíveis a desvio de obstáculos, como foi feito por Geraldes [9]. Os testes para este desvio devem seguir a rotina *experimentOpenLoopTrajectory*, desenvolvida por Geraldes, efetuando-se as alterações necessárias e utilizando os dois métodos criados neste trabalho para correção da inserção. Os testes podem avaliar a aplicabilidade desses métodos para o desvio de obstáculos e assim possibilitar trabalhos futuros envolvendo esta questão.

Este trabalho deixa em aberto a possibilidade de, utilizando o método de correção para Alcance de Alvo, buscar alcançar um ponto final desejado, estipulado dentro dos limites de correção possíveis, sem a necessidade de seguir uma trajetória previamente definida. Sendo assim, a agulha seria inserida sem um ciclo de trabalho preestabelecido.

## **Anexo**

**A TABELA: RESULTADOS DE TODAS AS INSERÇÕES**

Nome do experimento	Erro em x (mm)	Erro em y (mm)	Distância (mm)
'DC_0_feedbackfinal_alvo1'	-3,7097	-5,7922	6,8783
'DC_0_feedbackfinal_alvo2'	-4,6014	-6,5056	7,9684
'DC_0_feedbackfinal_alvo3'	-7,0982	-5,9705	9,2753
'DC_0_feedbackfinal_alvo4'	-7,9899	-3,2954	8,6428
'DC_10_feedbackfinal_alvo1'	-0,8976	0,5836	1,0707
'DC_10_feedbackfinal_alvo3'	-1,4326	-0,1297	1,4385
'DC_15_feedbackfinal_alvo1'	-0,1057	-0,8046	0,8116
'DC_20_feedbackfinal_alvo1'	-0,9127	-0,0719	0,9155
'DC_20_feedbackfinal_alvo3'	-0,9127	-0,9636	1,3272
'DC_25_feedbackfinal_alvo3'	-1,892	-0,7851	2,0485
'DC_25_feedbackfinal_alvo4'	-2,2487	-0,9635	2,4464
'DC_25_feedbackfinal_alvo5'	-1,7137	-0,2501	1,7318
'DC_25_feedbackfinal_alvo6'	-1,5353	0,4633	1,6037
'DC_27_feedbackfinal_alvo1'	-0,9981	-0,2911	1,0397
'DC_27_feedbackfinal_alvo2'	-1,1764	1,1356	1,6351
'DC_30_feedbackfinal_alvo1'	-1,7956	0,4441	1,8497
'DC_30_feedbackfinal_alvo2'	-0,7256	-0,0909	0,7312
'DC_40_feedbackfinal_alvo1'	-1,4088	-0,5442	1,5103
'DC_40_feedbackfinal_alvo2'	-0,6954	0,3475	0,7774
'DC_50_feedbackfinal_alvo1'	-0,4682	-1,6109	1,6776
'DC_50_feedbackfinal_alvo2'	-1,1815	0,3509	1,2325
'DC_50_feedbackfinal_alvo3'	-0,4682	-0,1842	0,5031
'DC_50_feedbackfinal_alvo4'	-1,5382	0,1725	1,5479
'DC_60_feedbackfinal_alvo1'	-0,5813	0,4537	0,7374
'DC_60_feedbackfinal_alvo2'	-0,2246	1,5237	1,5402
'DC_70_feedbackfinal_alvo1'	-0,5024	1,012	1,1299
'DC_70_feedbackfinal_alvo2'	-0,1457	0,6553	0,6713
'DC_75_feedbackfinal_alvo1'	-1,0828	0,8154	1,3555
'DC_75_feedbackfinal_alvo2'	-0,1911	-2,0381	2,047
'DC_75_feedbackfinal_alvo3'	-1,0828	1,5288	1,8734
'DC_75_feedbackfinal_alvo4'	-0,9045	1,3505	1,6254
'DC_90_feedbackfinal_alvo1'	-0,314	0,462	0,5586
'DC_90_feedbackfinal_alvo2'	-0,6706	0,2837	0,7282
'DC_100_feedbackfinal_alvo1'	-0,5663	-1,182	1,3106
'DC_100_feedbackfinal_alvo2'	-0,923	-1,5386	1,7943
'DC_100_feedbackfinal_alvo3'	0,1471	-0,4686	0,4911
'DC_100_feedbackfinal_alvo4'	-0,923	1,6716	1,9095

## Bibliografia

- [1] Mariana Bernardes. *Robot assisted steering of flexible needles for percutaneous procedures*. PhD thesis, Montpellier 2, 2012.
- [2] S. P. DiMaio and S. E. Salcudean. Needle insertion modeling and simulation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 19(5):864–875, Oct 2003.
- [3] S. P. DiMaio and S. E. Salcudean. Interactive simulation of needle insertion models. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 52(7):1167–1179, July 2005.
- [4] S. P. DiMaio and S. E. Salcudean. Needle steering and motion planning in soft tissues. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 52(6):965–974, June 2005.
- [5] Simon P DiMaio and SE Salcudean. Needle steering and model-based trajectory planning. In *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, pages 33–40. Springer, 2003.
- [6] JA Engh, G Podnar, SY Khoo, and CN Riviere. Flexible needle steering system for percutaneous access to deep zones of the brain. In *Proceedings of the IEEE 32nd annual northeast bioengineering conference*, pages 103–104. IEEE, 2006.
- [7] Gabor Fichtinger, Everette C Burdette, Attila Tanacs, Alexandru Patriciu, Dumitru Mazilu, Louis L Whitcomb, and Dan Stoianovici. Robotically assisted prostate brachytherapy with transrectal ultrasound guidancephantom experiments. *Brachytherapy*, 5(1):14–26, 2006.
- [8] Gabor Fichtinger, Theodore L DeWeese, Alexandru Patriciu, Attila Tanacs, Dumitru Mazilu, James H Anderson, Ken Masamune, Russell H Taylor, and Dan Stoianovici. System for robotically assisted prostate biopsy and therapy with intraoperative ct guidance. *Academic Radiology*, 9(1):60–74, 2002.
- [9] A. A. Geraldes. Dispositivo robotico para guiagem de agulhas flexiveis em procedimentos minimamente invasivos. Dissertacao (mestrado em engenharia eletrica), Universidade de Brasilia, 2015.
- [10] A. A. Geraldes, M. M. Marinho, M. C. Bernardes, A. P. L. Bo, and G. A. Borges. On the use of discrete steps in robot-aided flexible needle insertion. In *2013 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, pages 4867–4870, July 2013.
- [11] R.J. Webster III, J.S. Kim, N.J. Cowan, G.S. Chirikjian, and A.M. Okamura. Nonholonomic modeling of needle steering. *The International Journal of Robotics Research*, 25(5-6):509–525, May 2006.
- [12] Ann Majewicz, Joshua J Siegel, Andrew A Stanley, and Allison M Okamura. Design and evaluation of duty-cycling steering algorithms for robotically-driven steerable needles. In *2014*

*IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 5883–5888. IEEE, 2014.

- [13] Olivier Piccin, Pierre Renaud, Laurent Barbee, Bernard Bayle, Benjamin Maurin, and Michel de Mathelin. A robotized needle insertion device for percutaneous procedures. In ASME, editor, *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, volume 7, pages 433–440, Sep 2005.
- [14] K. B. Reed, A. Majewicz, V. Kallem, R. Alterovitz, K. Goldberg, N. J. Cowan, and A. M. Okamura. Robot-assisted needle steering. *IEEE Robotics Automation Magazine*, 18(4):35–46, Dec 2011.
- [15] K. B. Reed\*, A. M. Okamura, and N. J. Cowan. Modeling and control of needles with torsional friction. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 56(12):2905–2916, Dec 2009.
- [16] R. Secoli and F. Rodriguez y Baena. Closed-loop 3d motion modeling and control of a steerable needle for soft tissue surgery. In *Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on*, pages 5831–5836, May 2013.
- [17] Robert C. Susil, Kevin Camphausen, Peter Choyke, Elliot R. McVeigh, Gary S. Gustafson, Holly Ning, Robert W. Miller, Ergin Atalar, C. Norman Coleman, and Cynthia MÃ©nard. System for prostate brachytherapy and biopsy in a standard 1.5 t mri scanner. *Magnetic Resonance in Medicine*, 52(3):683–687, 2004.
- [18] P. J. Swaney, J. Burgner, H. B. Gilbert, and R. J. Webster. A flexure-based steerable needle: High curvature with reduced tissue damage. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 60(4):906–909, April 2013.
- [19] John P Swensen. *Torsional dynamics and rotational estimation of tip-steerable needles*. PhD thesis, Johns Hopkins University, Nov 2011.
- [20] John P Swensen and Noah J Cowan. Torsional dynamics compensation enhances robotic control of tip-steerable needles. In *Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on*, pages 1601–1606. IEEE, 2012.
- [21] R. J. Webster, J. Memisevic, and A. M. Okamura. Design considerations for robotic needle steering. In *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 3588–3594, April 2005.
- [22] Thomas R Wedlick and Allison M Okamura. Characterization of pre-curved needles for steering in tissue. In *2009 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, pages 1200–1203. IEEE, 2009.