



**LOCALIZAÇÃO E MAPEAMENTO SIMULTÂNEOS  
USANDO *SCANNER A LASER* E CORRESPONDÊNCIA ENTRE  
AS CARACTERÍSTICAS DO AMBIENTE**

Luciana Araujo Lemos

Orientador: Prof. Dr. Cairo L. Nascimento Jr.

# Sumário

## **1. Introdução**

- Objetivos
- Motivação

## **2. Fundamentação Teórica**

## **3. Proposta de Solução**

- Etapas da estrutura da proposta de solução
- Proposta para a correspondência de características
- Proposta para o fechamento de laço
- Proposta para o junção de segmentos

## **4. Experimentos e Resultados Obtidos**

- Estrutura da simulação no Gazebo
- Resultados dos experimentos simulados
- Resultados do experimento real

## **5. Conclusão e Trabalhos Futuros**

## Objetivos

Implementar uma solução para o problema de SLAM 2D baseado em grafo de posturas por meio da técnica de correspondência de características usando *scanner a laser* 2D.

- **Características utilizadas:**

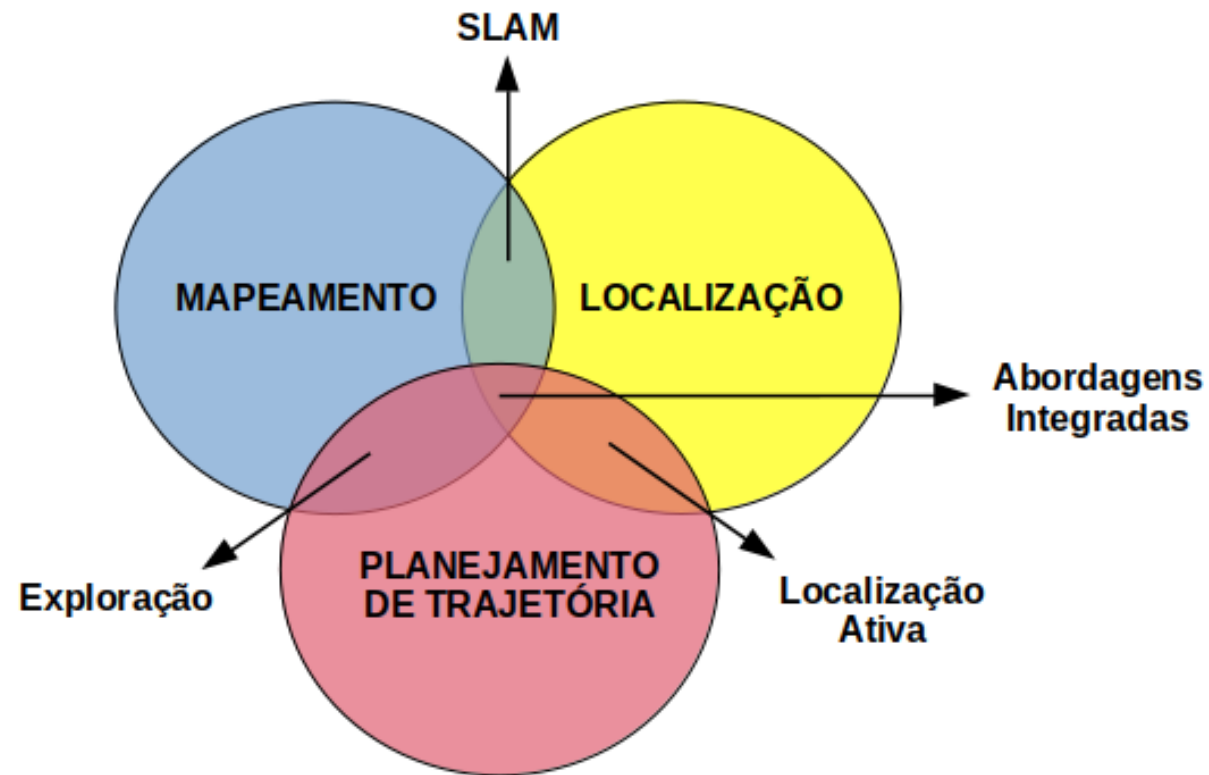
- Segmentos de reta que representam as paredes e os objetos do ambiente.
- Pontos terminais (*endpoints*) que representam as extremidades das paredes do ambiente.

# Introdução

## Motivação

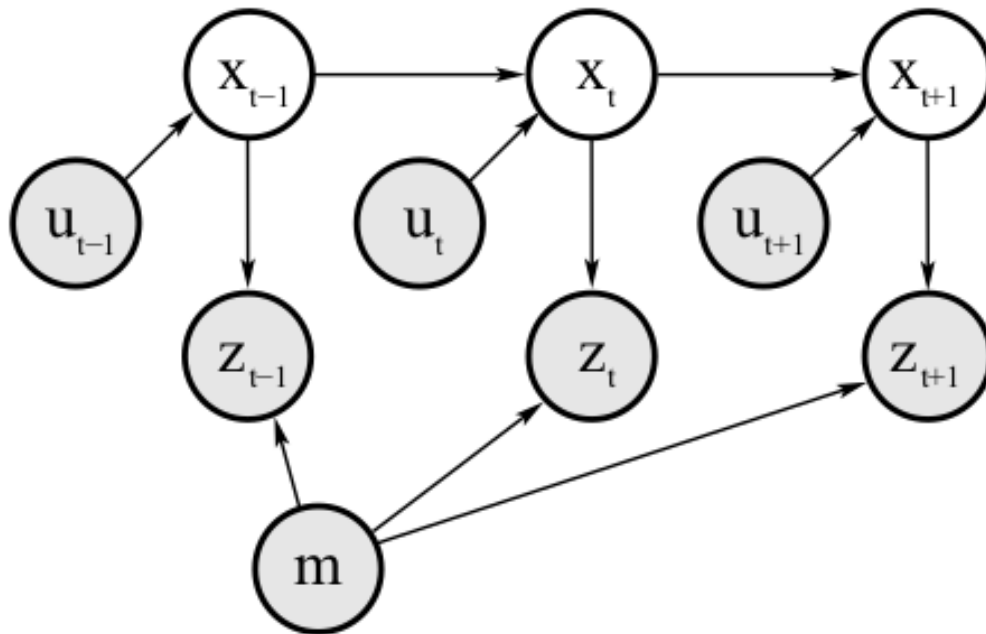


## Tarefas Básicas da Robótica Móvel



## Localização

- Consiste em estimar a postura (posição e orientação) de um robô móvel a partir do mapa do ambiente, baseado nas medidas dos sensores.



$x_t$  = postura do robô

$u_t$  = dados de controle

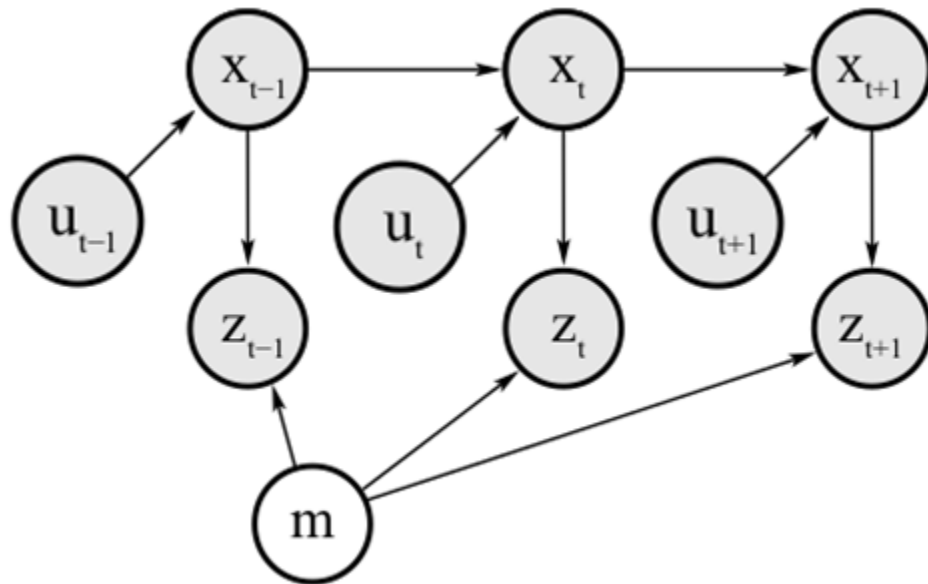
$z_t$  = medidas dos sensores do ambiente

$m$  = mapa do ambiente



## Mapeamento

- Estimar o mapa do ambiente baseado nas medidas dos sensores e das posturas adquiridas ao longo do processo de localização do robô no ambiente.



$X_t$  = postura do robô

$u_t$  = dados de controle

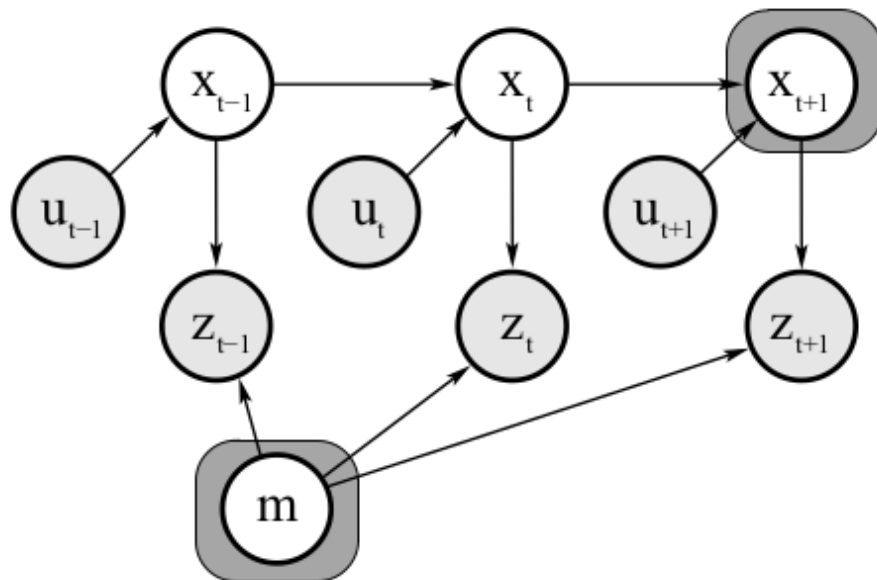
$Z_t$  = medidas dos sensores do ambiente

$m$  = mapa do ambiente

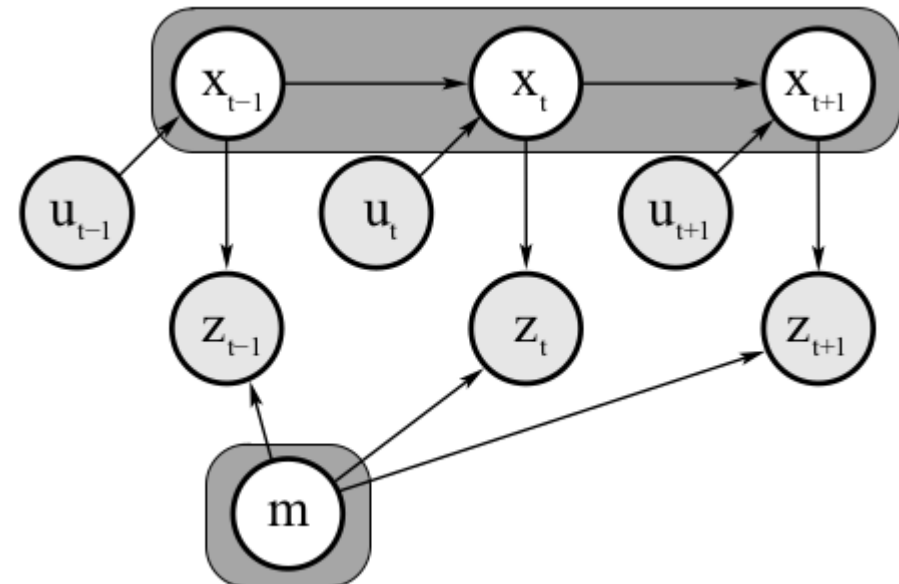
## Localização e Mapeamento Simultâneos (SLAM)

- Estimar a postura do robô e o mapa do ambiente de forma simultânea.

Online SLAM



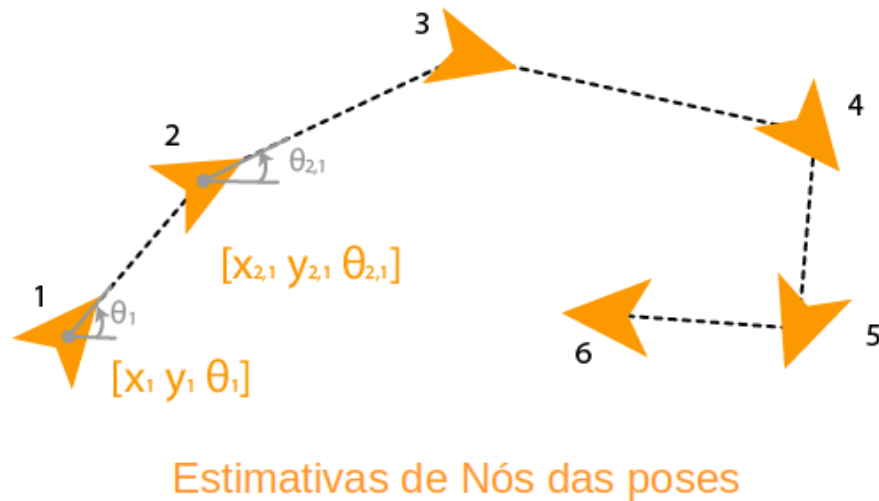
Full SLAM





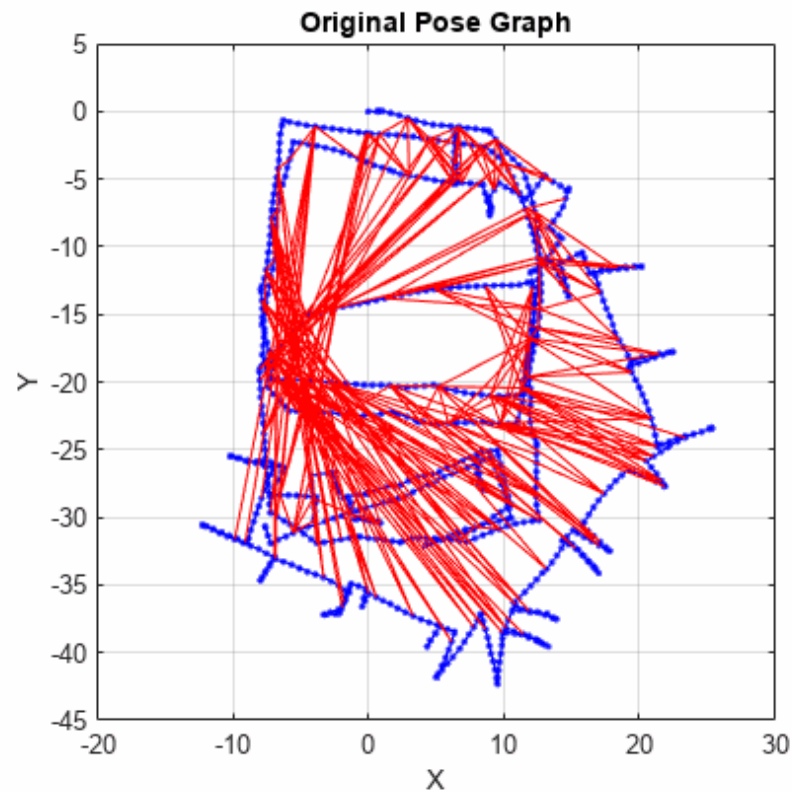
## SLAM com Grafo de Posturas

- O grafo de posturas é construído por meio do cálculo das transformações relativas entre os nós.
- A otimização do grafo de postura é necessária para minimizar o erro introduzido pelas restrições.

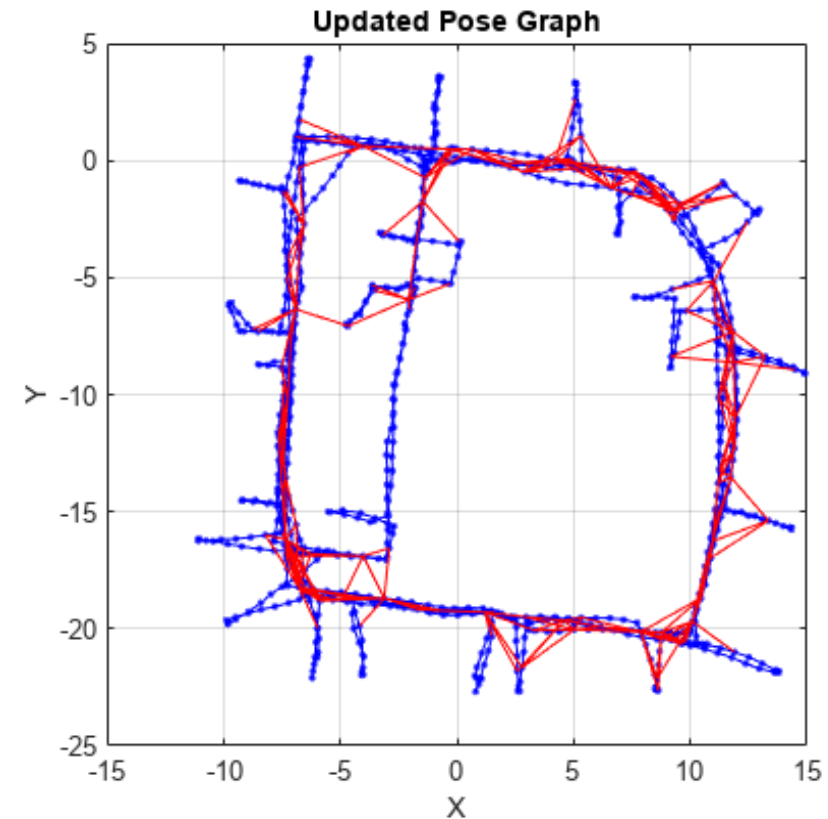


- Os nós representam as posturas do robô.
- As arestas representam as restrições espaciais no grafo.
- O grafo é chamado de grafo de poses.

- Otimização por Grafo de Posturas



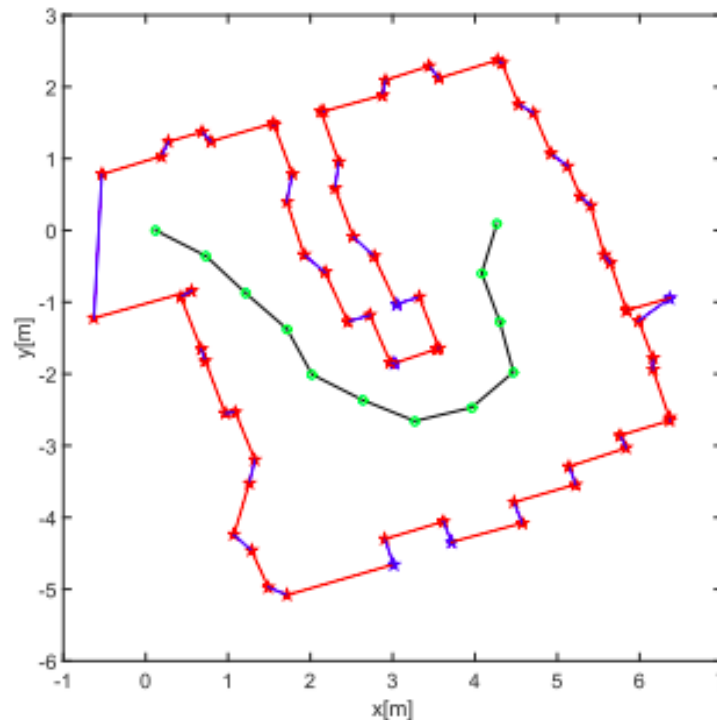
Antes da otimização



Depois da otimização

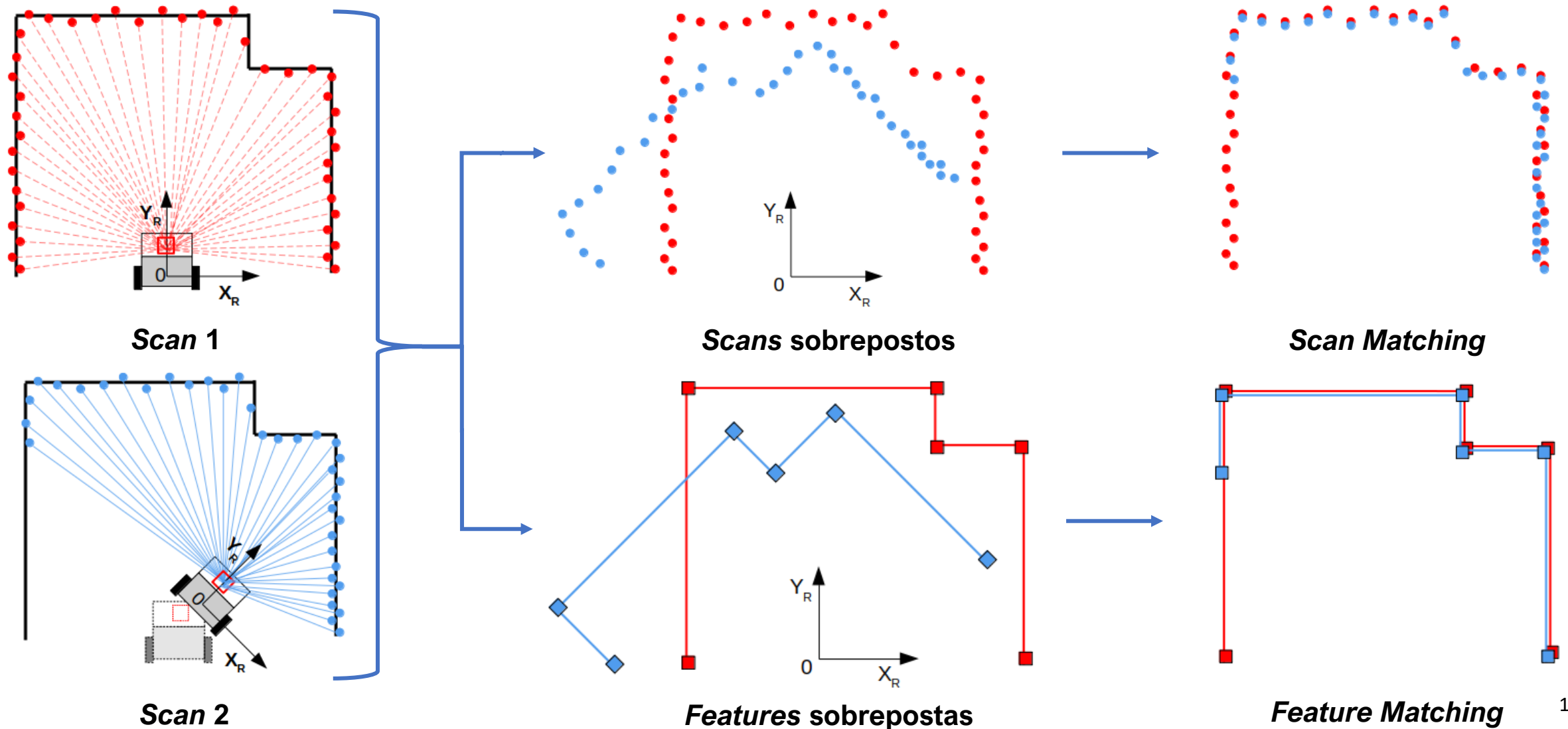
## SLAM baseado em Características

- A maioria das aplicações existentes desse tipo de método aborda características de baixo nível, como pontos, segmentos de linha, cantos e círculos.
- É capaz de estimar as posturas e o mapa baseados nas características do ambiente.

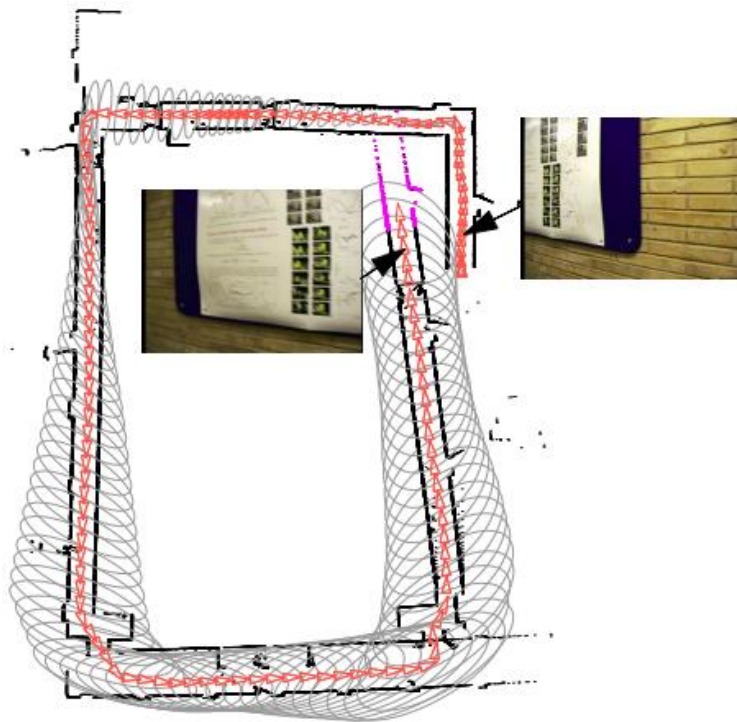


# Fundamentação Teórica

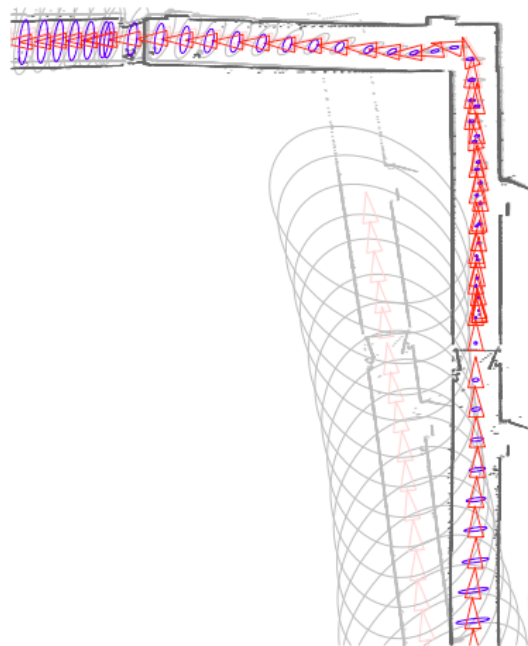
- *Scan Matching* e *Feature Matching* entre duas posturas consecutivas



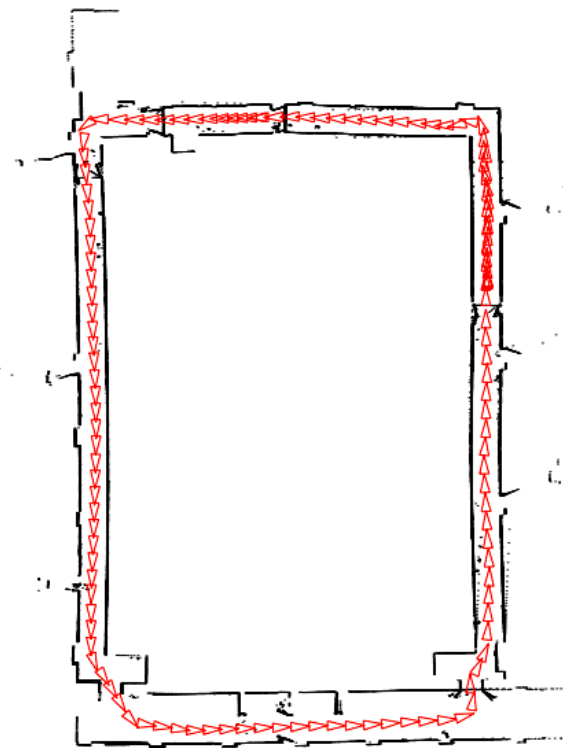
## Fechamento do Laço (*Loop Closure*)



Mapa construído com SLAM sem fechamento de laço.

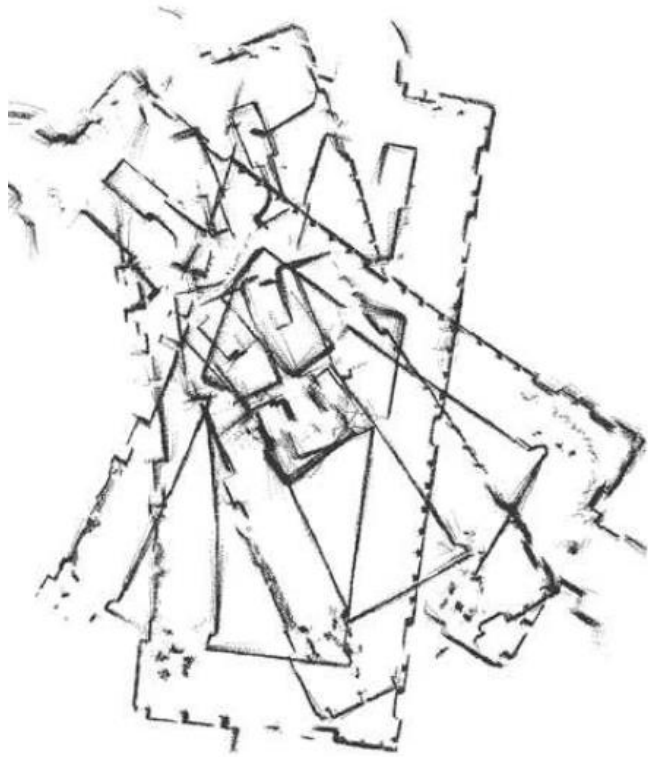


Deteção do fechamento de laço no mapa.

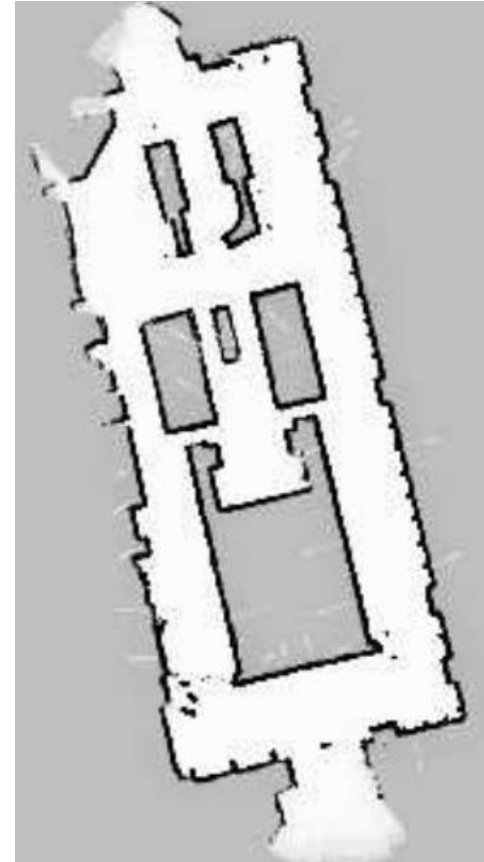


Mapa corrigido após o fechamento de laço.

## Fechamento do Laço (*Loop Closure*)



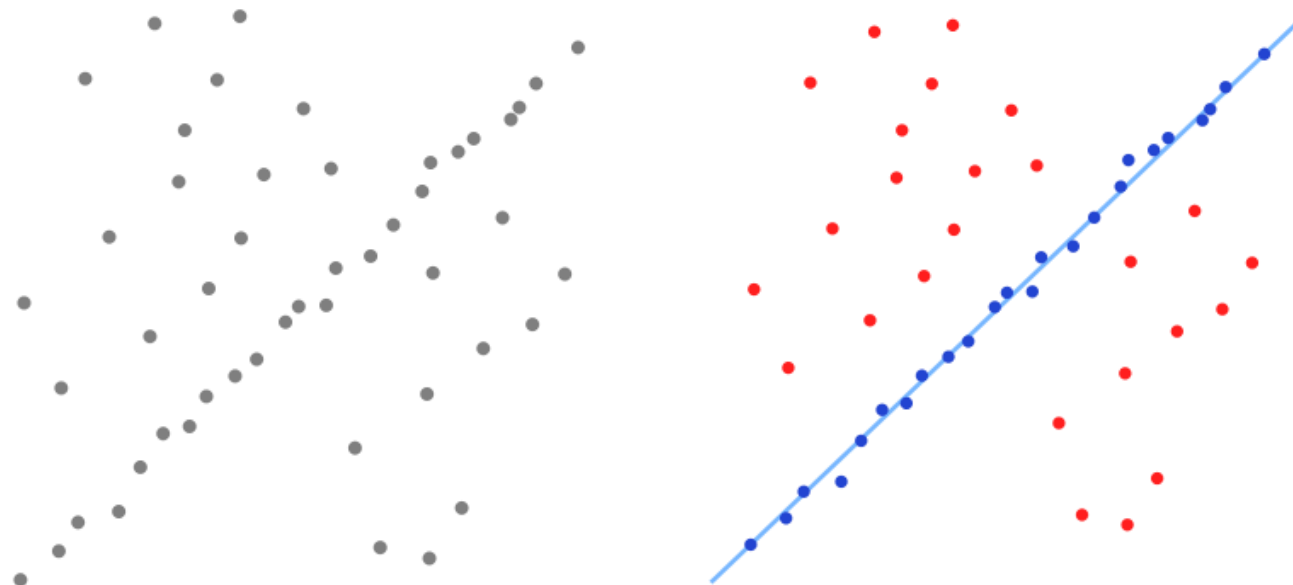
Mapa construído sem fechamento de laço.



Mapa construído com fechamento de laço.

## RANSAC (*RAN*dom *SA*mple *Co*nsensus)

- Possui o objetivo de estimar os parâmetros de um modelo por meio de um conjunto de dados que possuíam um elevado número de *outliers*.
- É formado por duas etapas que são repetidas iterativamente que são:
  - **Hipótese**
  - **Tese**



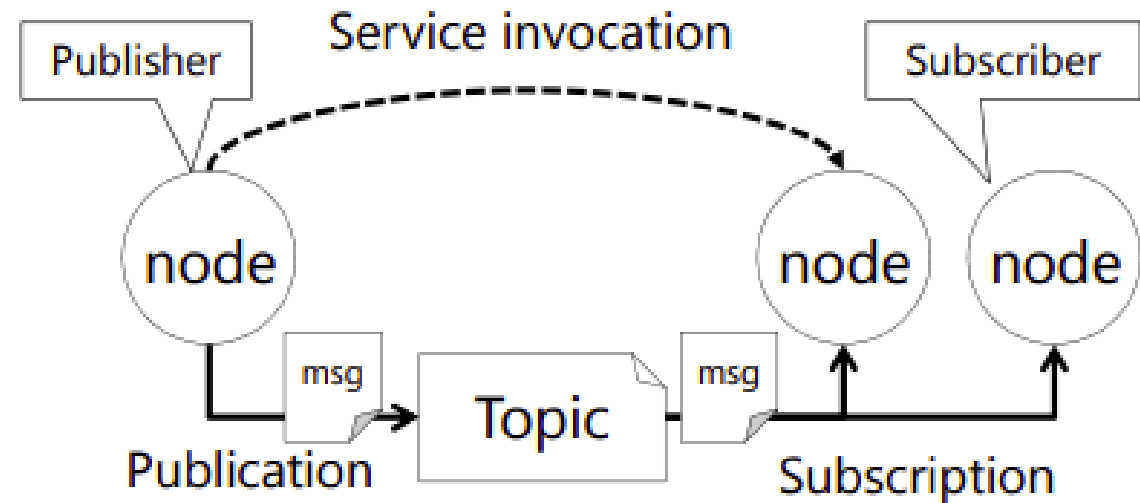


## ***Robot Operating System (ROS)***

- Utiliza o conceito de programas (nós) que trocam mensagens com outros programas executados no mesmo ou em outro computador.
- É um *framework* de código aberto desenvolvido para a área da robótica.

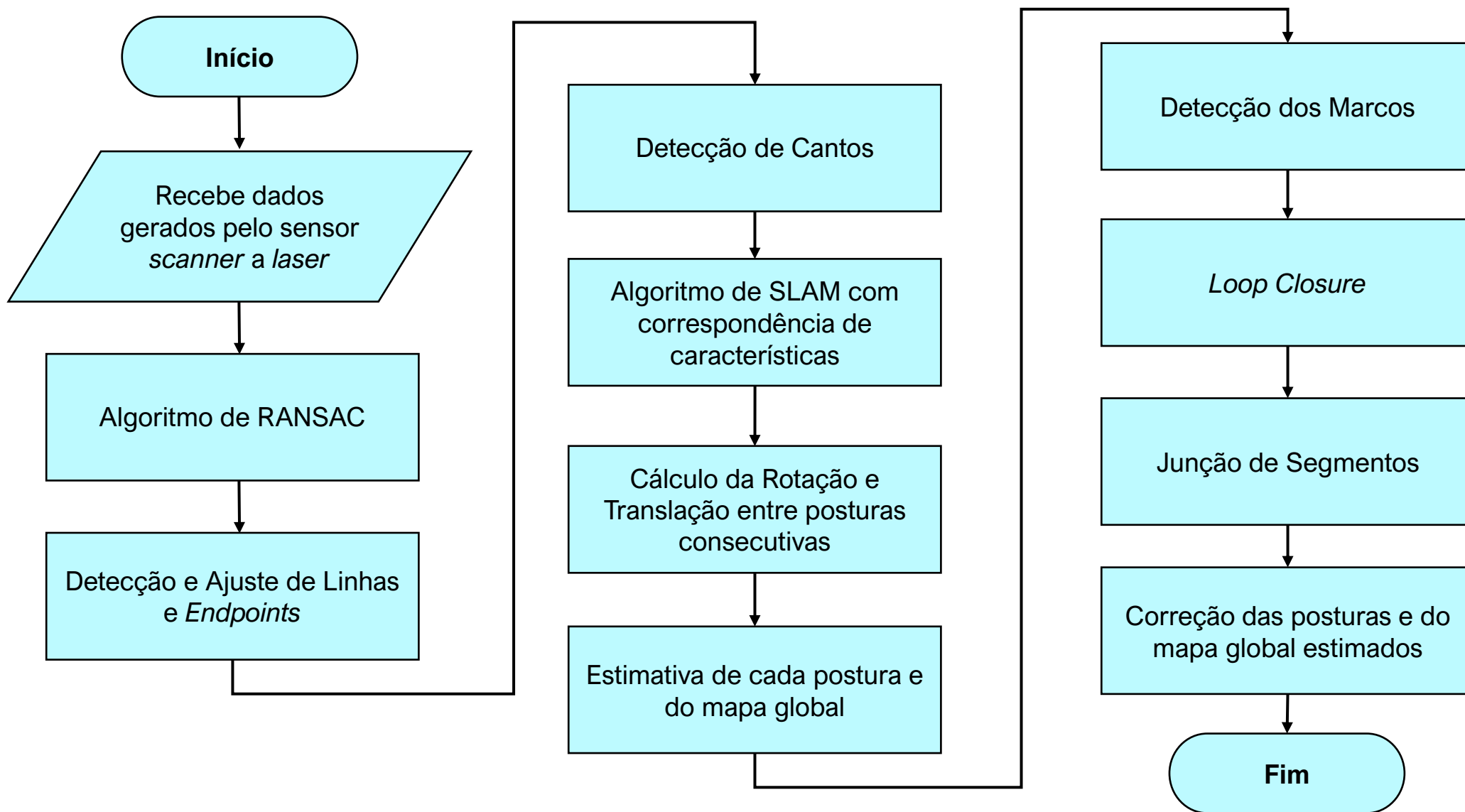
- **Principais definições utilizadas:**

- Nós
- Tópicos
- Mensagem



# Proposta de Solução

- Fluxograma da Estrutura do SLAM 2D com correspondência de características



## Etapas da estrutura da proposta de solução

### 1. Coleta de dados pelo sensor *scanner a laser*

- O sensor coleta pontos do *scan* de cada pose do robô e envia-os para o computador principal (nó *publisher*).
- O computador principal recebe os dados enviados pelo sensor e salva os pontos de cada *scan* (nó *subscriber*).

### 2. Algoritmo de RANSAC modificado

- Extração dos segmentos de reta e *endpoints*.
- Ajuste e detecção do segmentos de reta e *endpoints*.
- Detecção dos cantos.

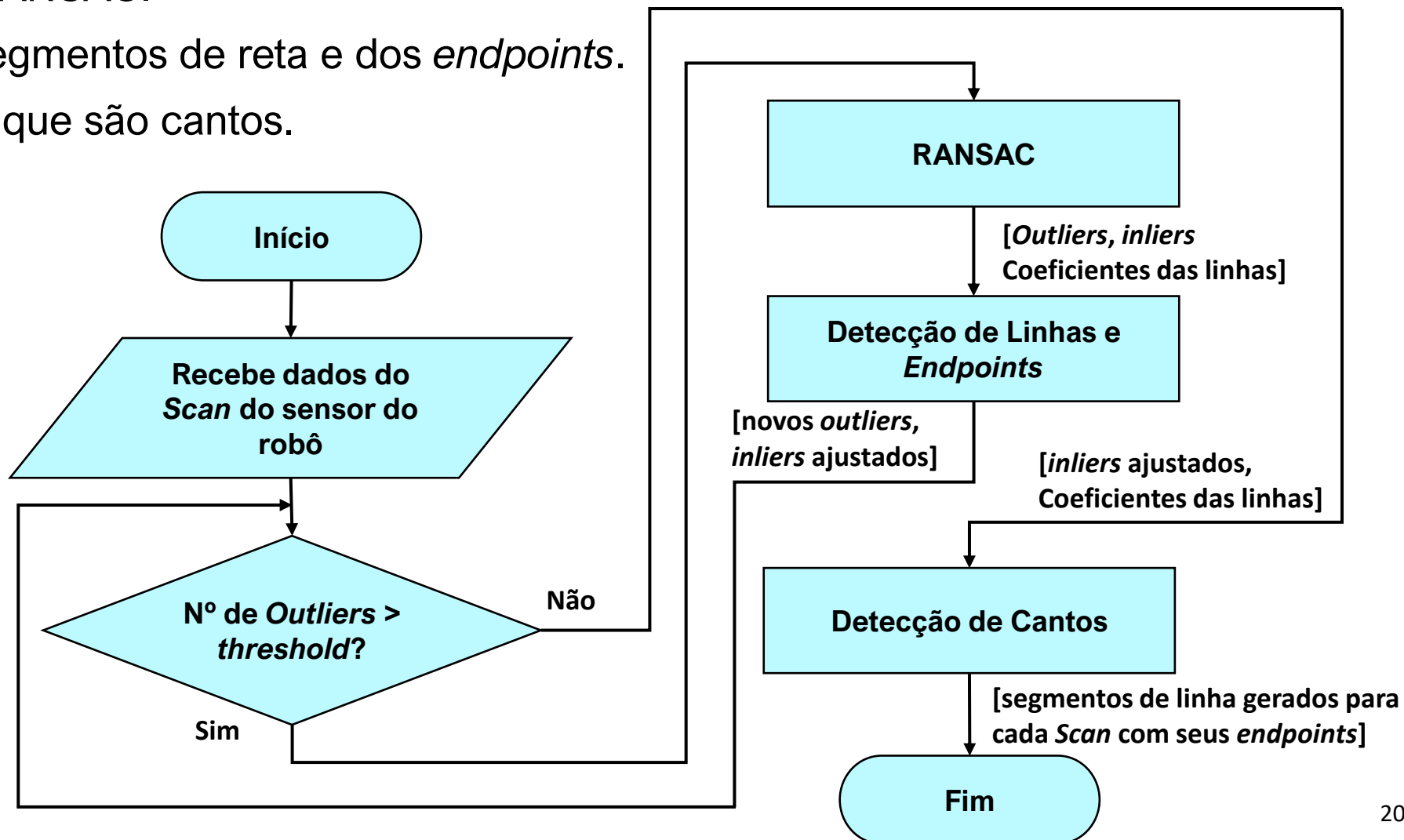
## Etapas da estrutura da proposta de solução

### 3. Algoritmo de SLAM com correspondência de características

- Cálculo da Rotação + Translação entre *scans* de poses consecutivas por meio da transformação de coordenadas.
- Estimação das Poses e do Mapa Global.
- Detecção dos Marcos.
- Fechamento do Laço.
- Junção de segmentos para atualização do Mapa Global.
- Correção das poses e do mapa global estimados.

## Proposta para o Algoritmo de RANSAC Modificado

- Extração de retas pelo RANSAC.
- Detecção e ajuste dos segmentos de reta e dos *endpoints*.
- Detecção dos *endpoints* que são cantos.

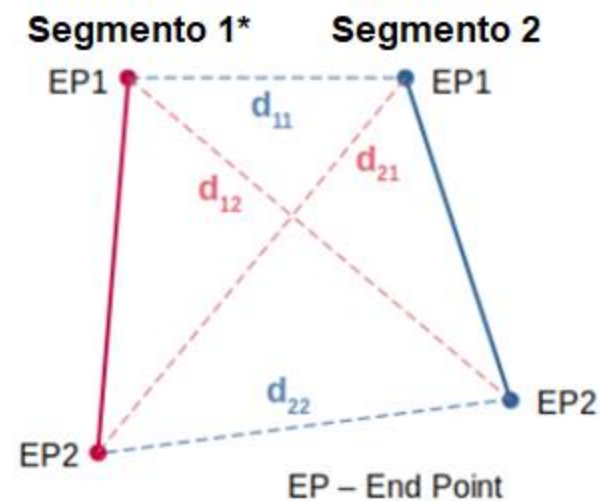


## Proposta para a Correspondência de Características

- São calculadas a rotação e a translação entre os *scans* de posturas consecutivas usando *feature matching*.
- Para cada par (segmento de reta do *scan* atual, segmento de reta do *scan* consecutivo) é gerada uma solução (rotação, translação) por minimização da soma das distâncias entre os *endpoints* dos dois segmentos:

$$d_{ij} = \sqrt{(EP_{ix}^* - EP_{jx})^2 + (EP_{iy}^* - EP_{jy})^2}$$
$$d_{ij}^{min} = \min[(d_{11})^2 + (d_{22})^2, (d_{12})^2 + (d_{21})^2]$$

onde  $(EP_{ix}^*, EP_{iy}^*)$  são as coordenadas dos *endpoints* do segmento do *scan* atual após a transformação de coordenadas (rotação, translação).



## Proposta para a Correspondência de Características

- Para cada solução (rotação, translação) é calculada a Medida de Correspondência  $MC(k)$ :

$$MC(k) = \sum_i \sum_j \exp \left[ - (d_{ij}^{min})^2 \right]$$

onde  $i$  = índice dos segmentos do *scan* atual e

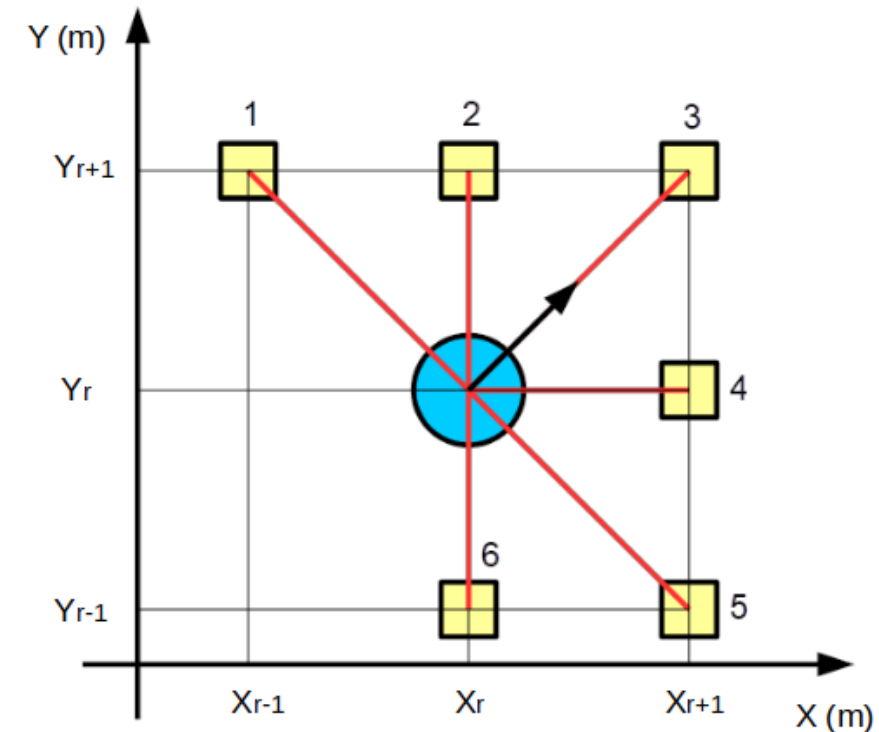
$j$  = índice dos segmentos do *scan* consecutivo.

- A melhor solução é definida como o par (rotação, translação) que maximiza a Medida de Correspondência.



## Proposta para o Fechamento de Laço (*Loop Closure*)

- Os marcos são registrados no Sistema de Coordenadas (SC) Global.
- Em cada *scan* selecionado para LC, as coordenadas dos marcos registrados são transformadas para o SC Local usando a estimativa inicial da postura no SC Global.
- Os *endpoints* do *scan* que estão próximos dos marcos registrados são selecionados para LC.



## Proposta para o Fechamento de Laço (*Loop Closure*)

- A somatória das distâncias entre os marcos e os *endpoints* selecionados para LC é usada para o cálculo do escalar  $J$ :

$$J = \sum_{i=1}^N e_i^2 = \sum_{i=1}^N (x_i^m - x_i^c)^2 + (y_i^m - y_i^c)^2$$

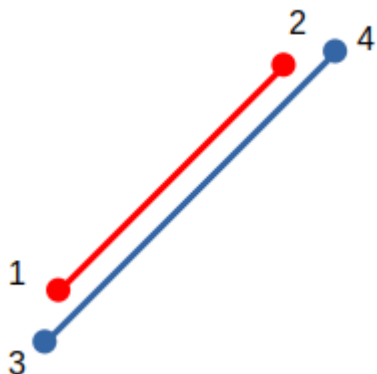
onde  $(x_i^m, y_i^m)$  e  $(x_i^c, y_i^c)$  são respectivamente as coordenadas dos marcos e *endpoints* selecionados para LC no SC Global.

- A postura que minimiza  $J$  é a postura corrigida pelo LC.

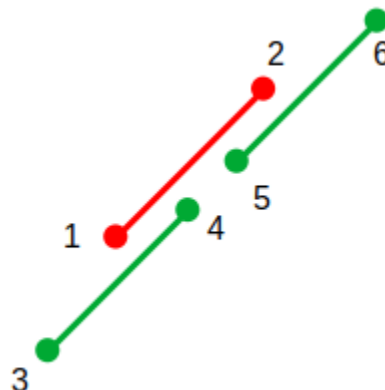
## Proposta para a Junção de Segmentos (*Merge*)

- Condição 1: Segmentos com ângulos próximos.
- Condição 2: Pelo menos um *endpoint* de um segmento deve ser próximo do outro segmento.
- É selecionado o par de *endpoints* que gera o maior segmento após a junção dos segmentos.

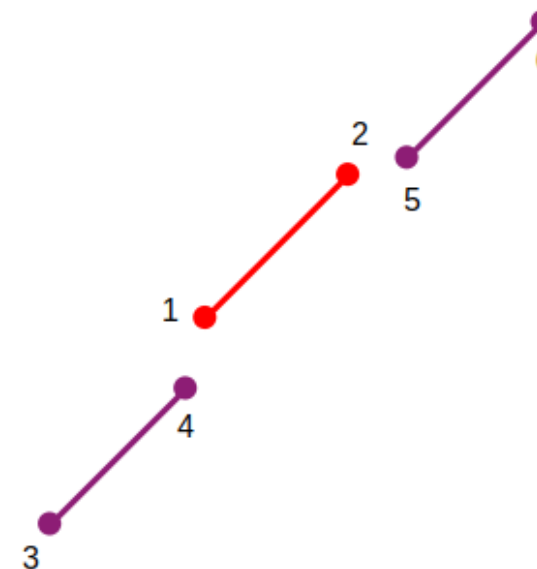
Caso 1: *Total Overlap*



Caso 2: *Partial Overlap*



Caso 3: *No Overlap*



# Experimentos e Resultados Obtidos

- Softwares utilizados para implementação da solução proposta



## Configurações para os experimentos simulados e real

### 1. MATLAB

- Algoritmo de RANSAC modificado
- Algoritmo de SLAM com correspondência de características desenvolvido

### 2. ROS

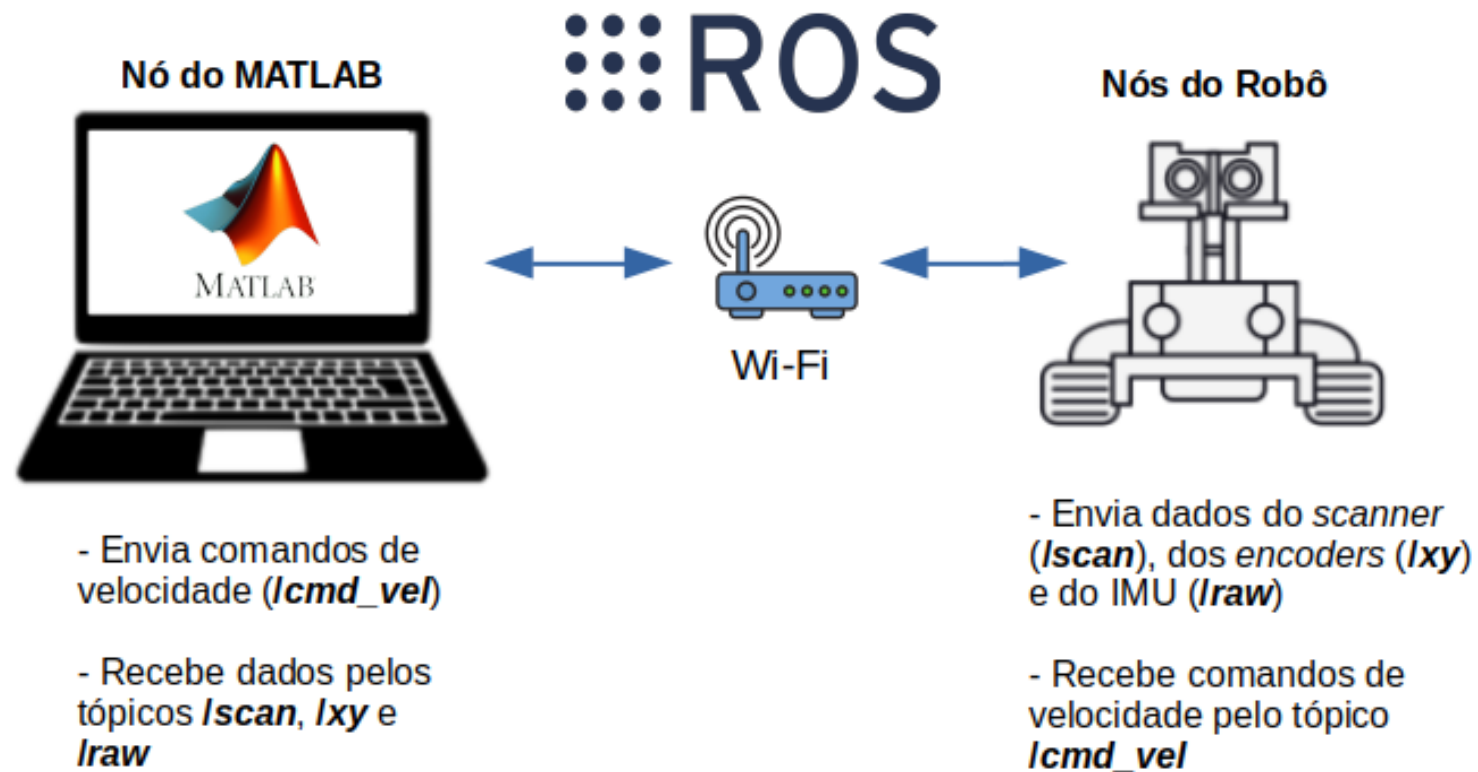
- Comunicação realizada entre o MATLAB e o robô simulado/real

### 3. Gazebo (Experimento simulado)

- Simulação do ambiente e do robô

# Experimentos e Resultados Obtidos

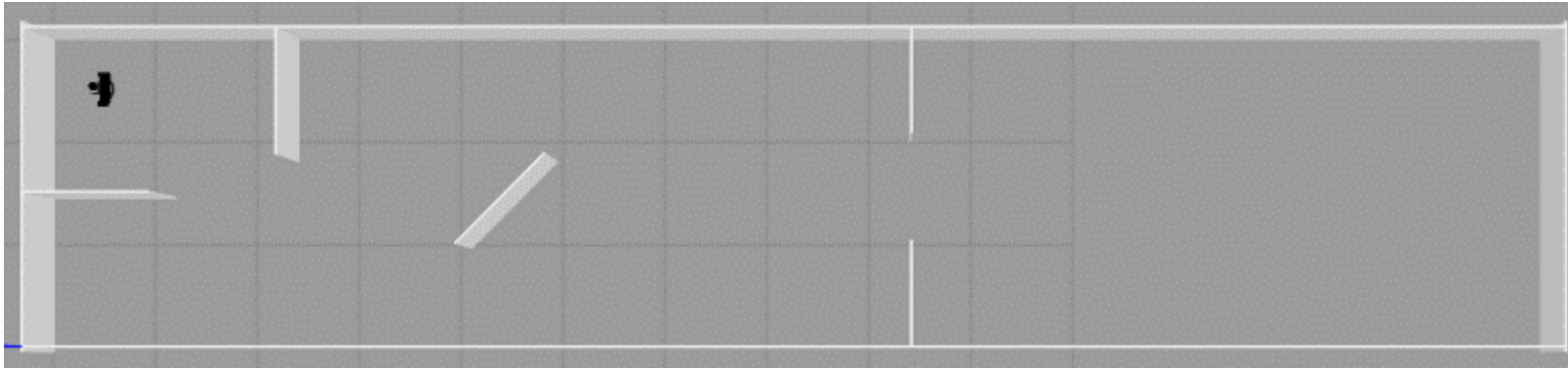
## Comunicação entre o robô e computador principal pela rede ROS



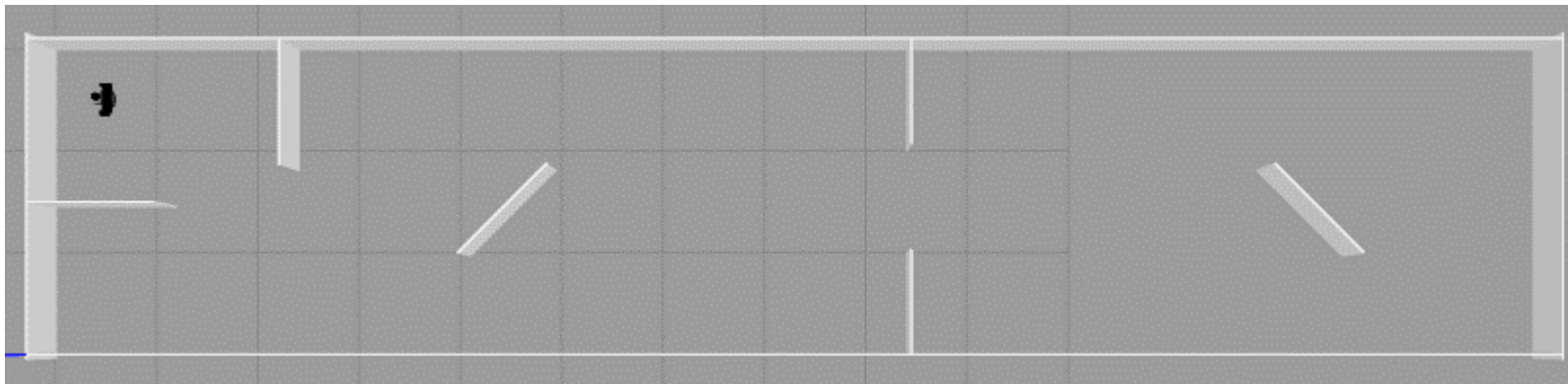
OBS:

- Na solução dos experimentos simulados foram utilizados todos os tópicos.
- Na solução do experimento real foram utilizados os tópicos: `/cmd_vel`, `/scan` e `/raw`.

## Estrutura da simulação no Gazebo



Experimento simulado 1: Ambiente com 9 paredes

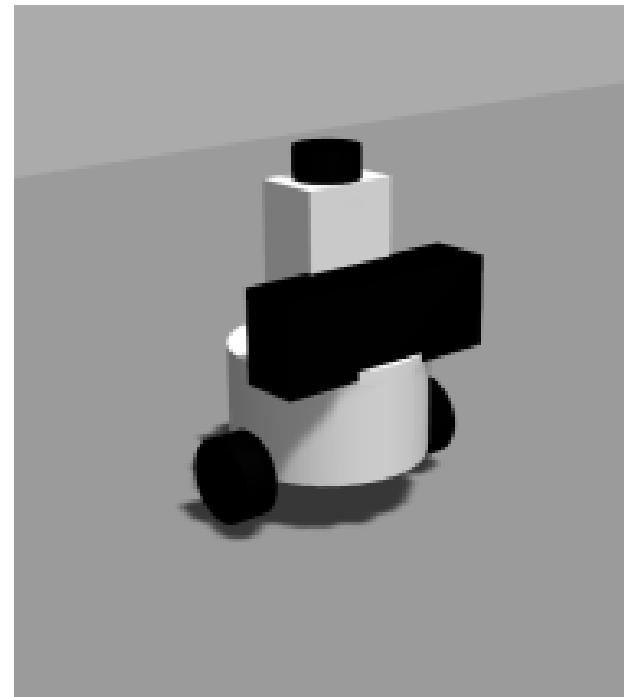


Experimento simulado 2: Ambiente com 10 paredes



## Especificações do robô simulado

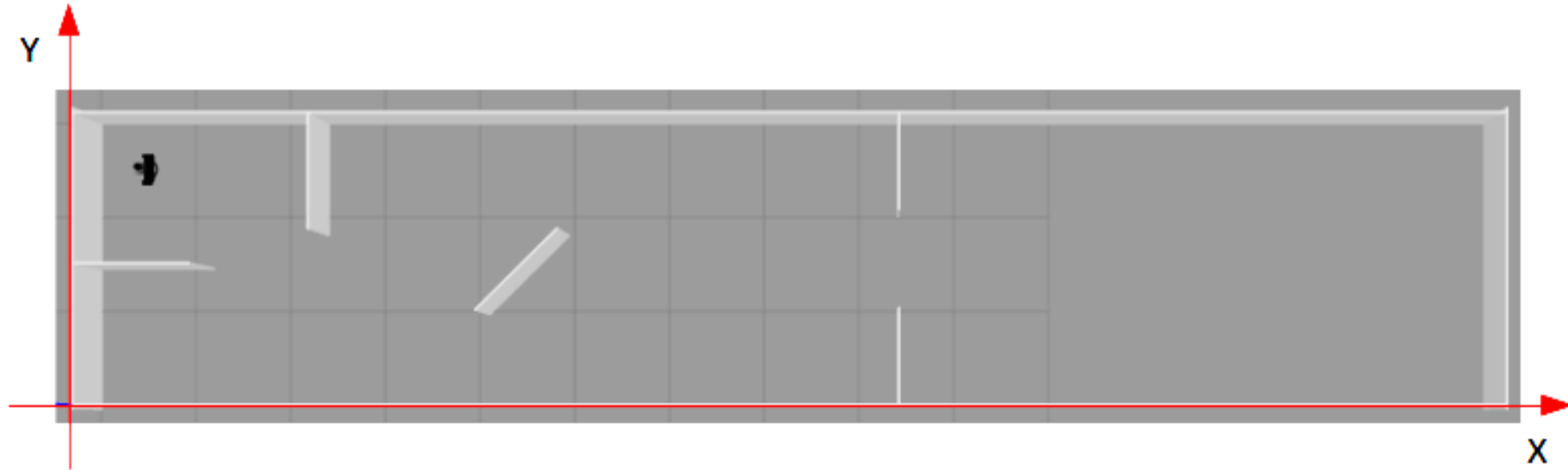
- *Scanner a Laser (LiDAR) 2D.*
- Medidas dos *encoders*.
- Posições do robô baseadas no *ground truth* do Gazebo.



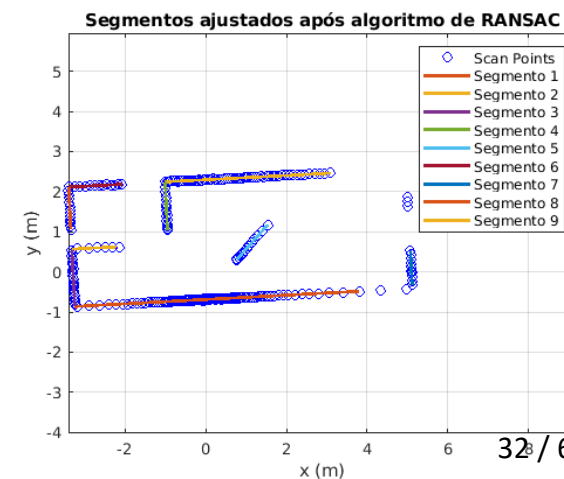
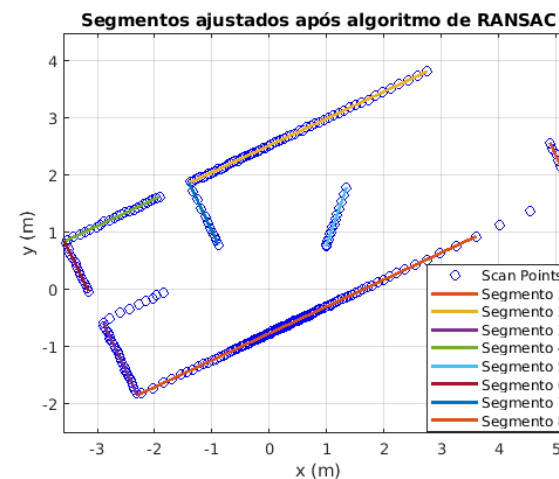
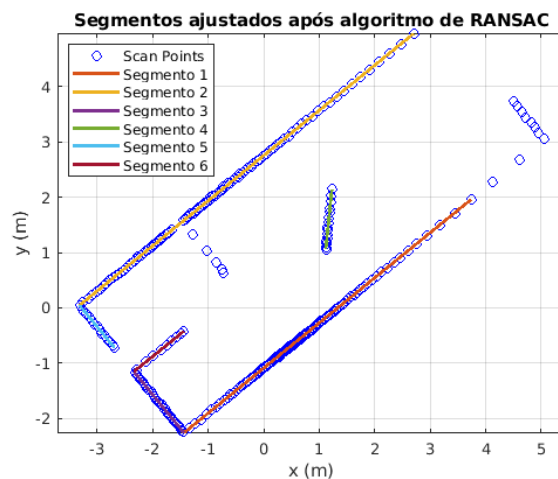
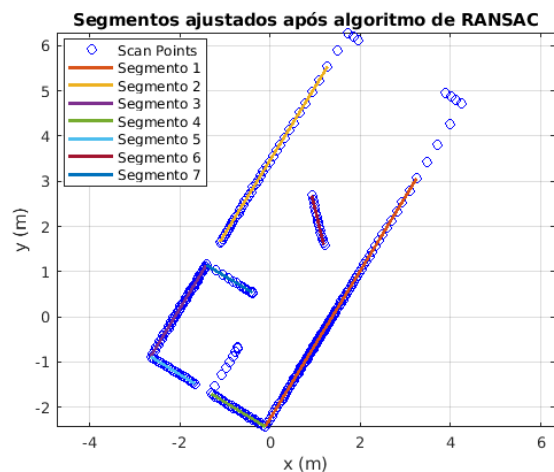
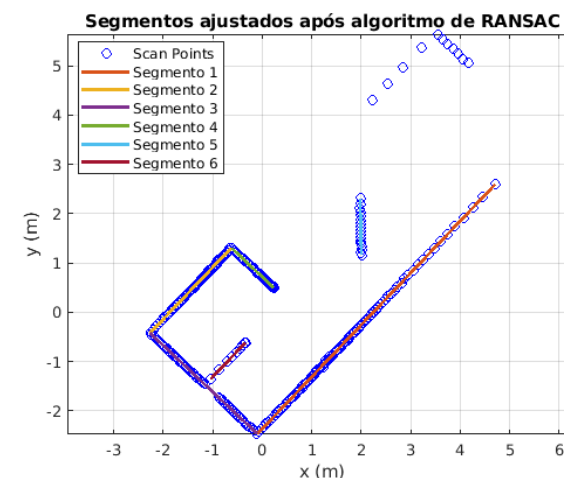
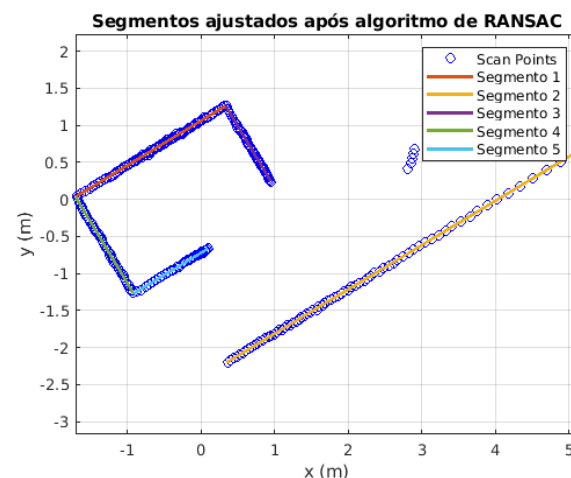
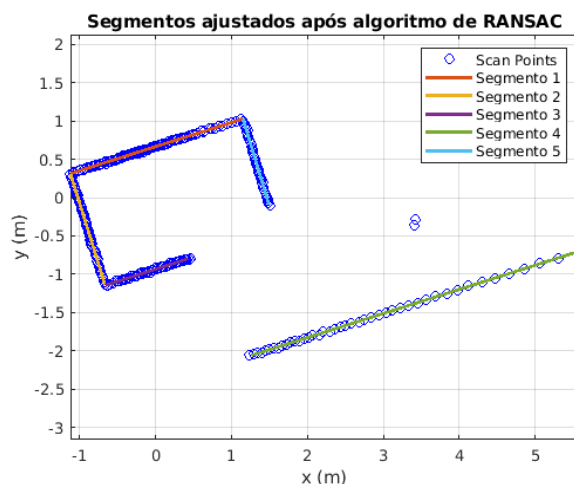
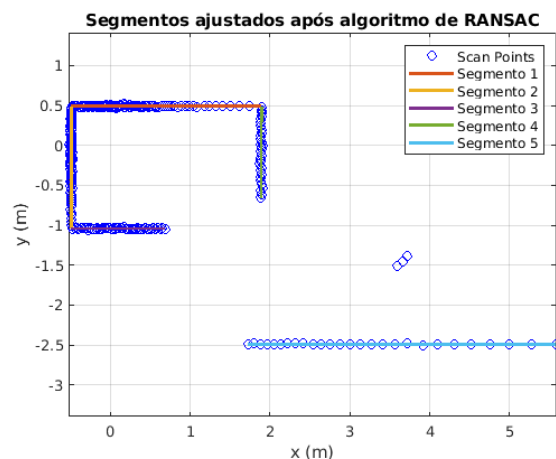
Modelo de Simulação do robô

## Experimento simulado 1

- Ambiente com 9 paredes.
- Foram coletadas 45 posturas.
- Postura inicial do robô simulado: (0,5 m; 2,5 m; 0°).
- Área:  $\cong 44 \text{ m}^2$  (14,6 m x 3 m).

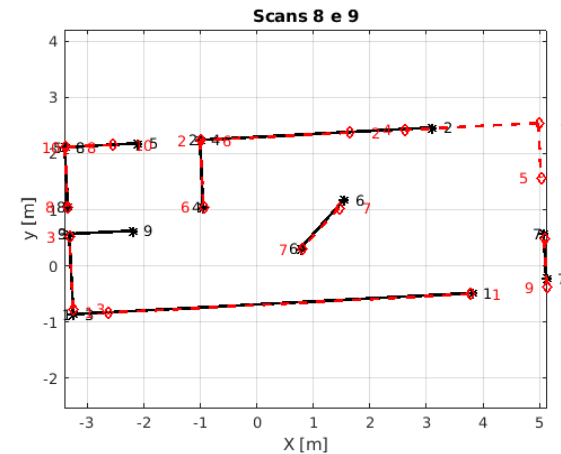
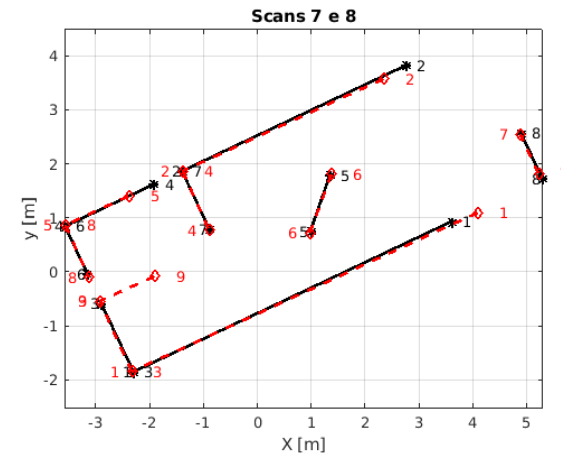
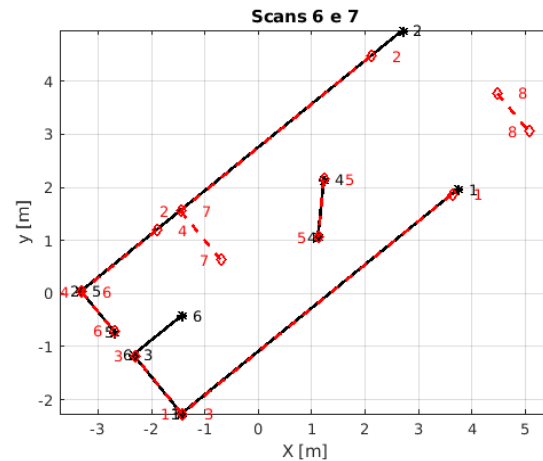
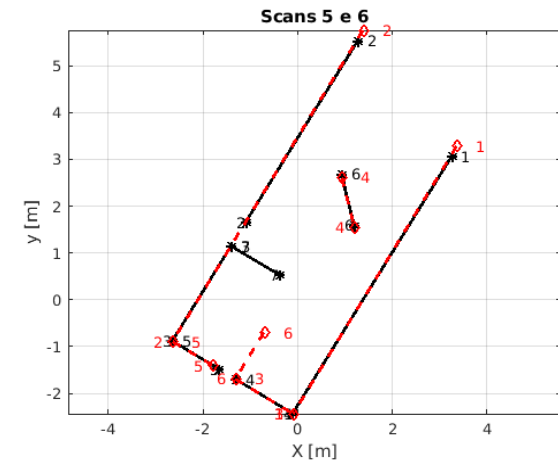
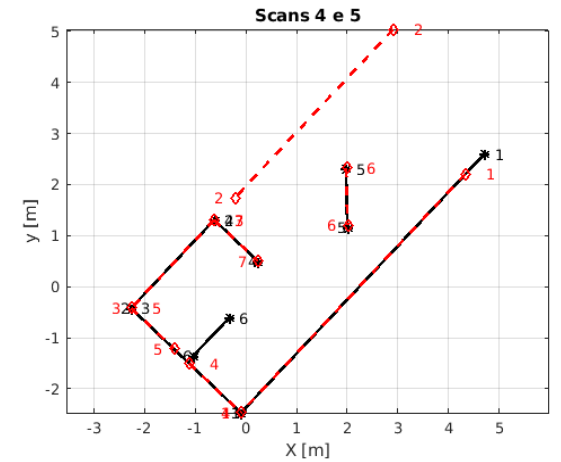
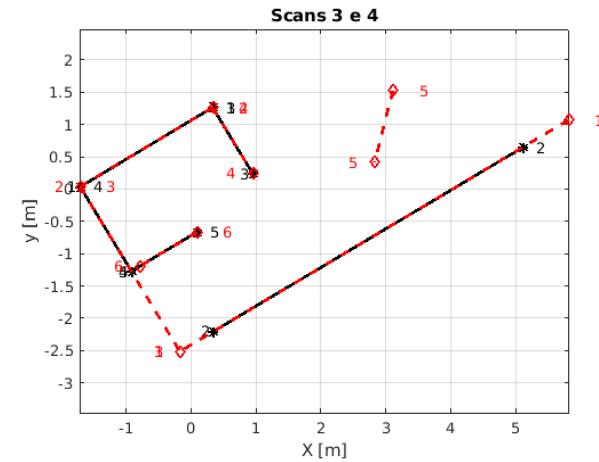
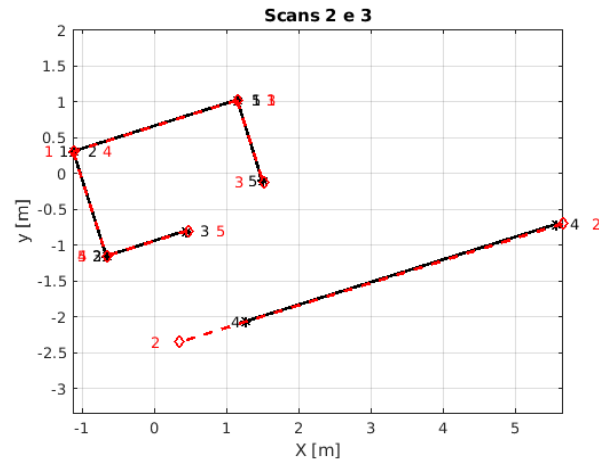
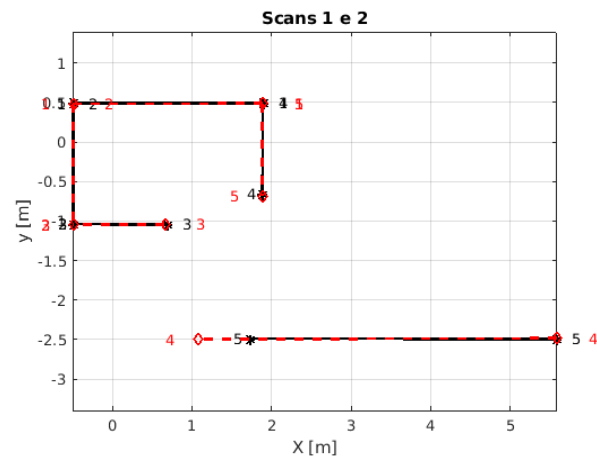


## Experimento simulado 1: Aplicação do algoritmo RANSAC modificado

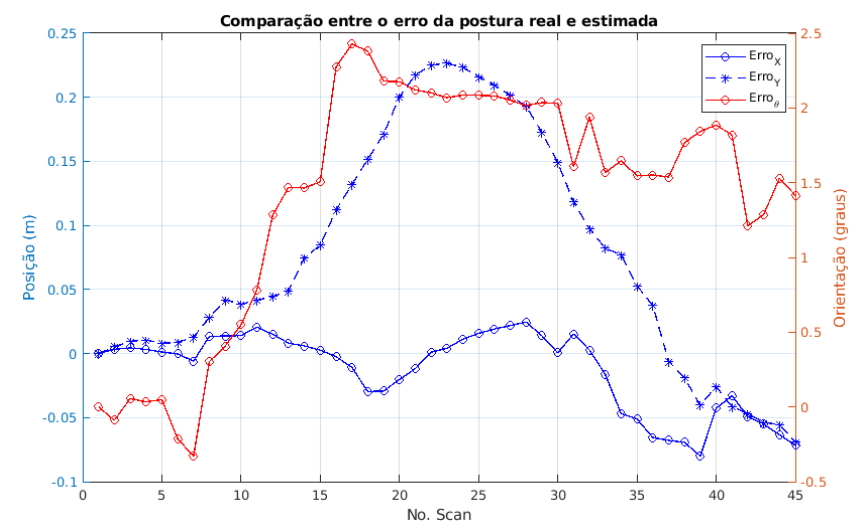
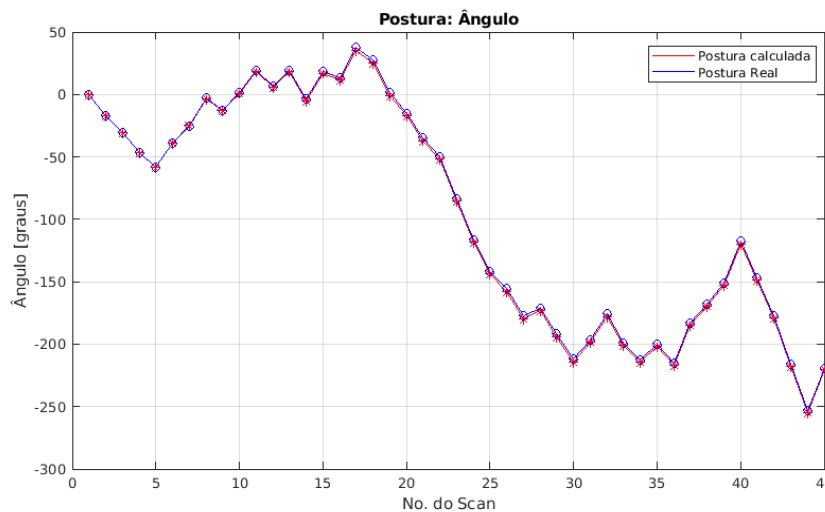
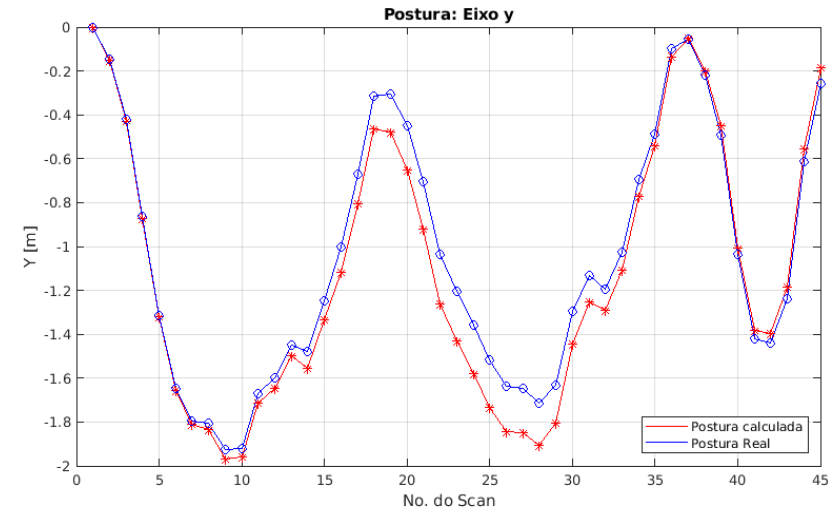
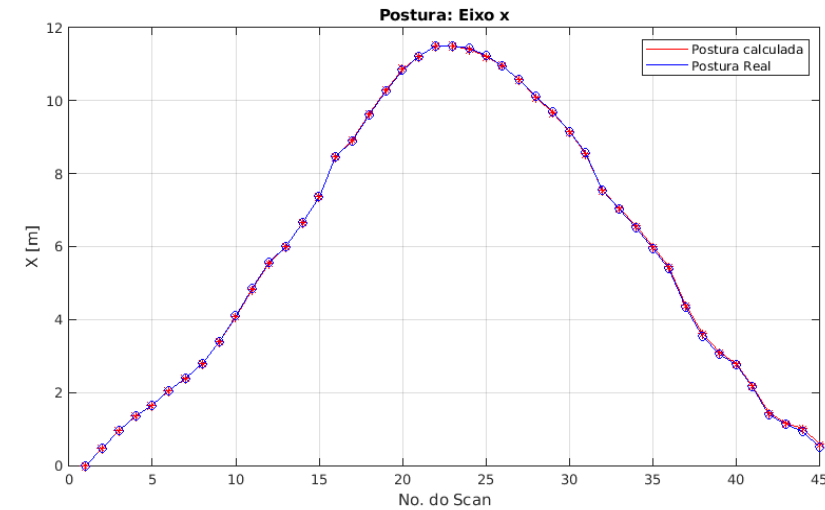


# Experimentos e Resultados Obtidos

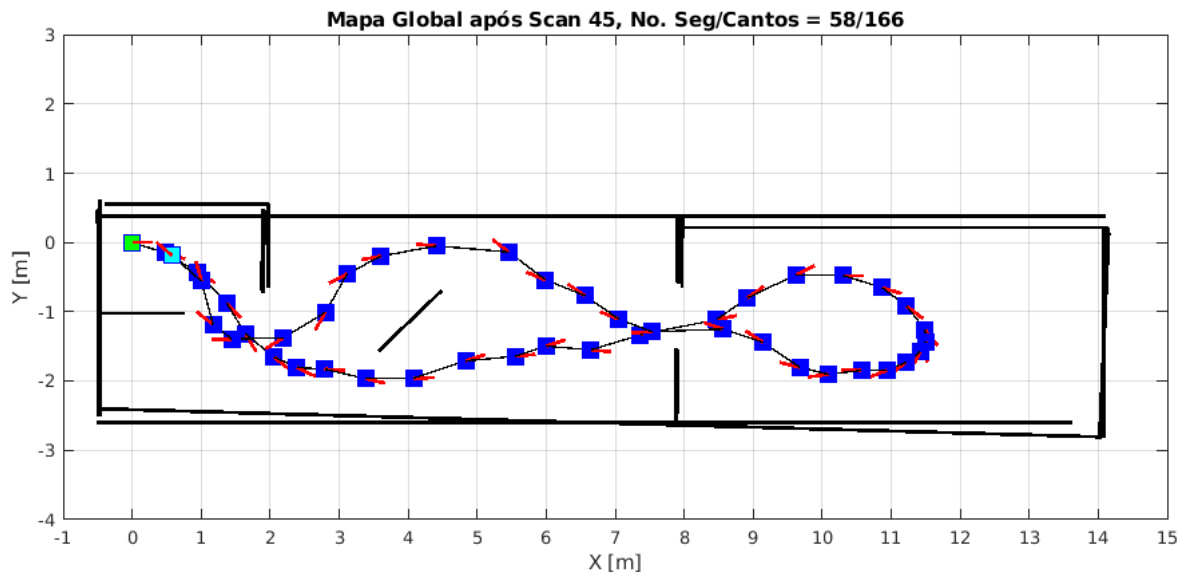
## Experimento simulado 1: *Line Matching* de posturas consecutivas



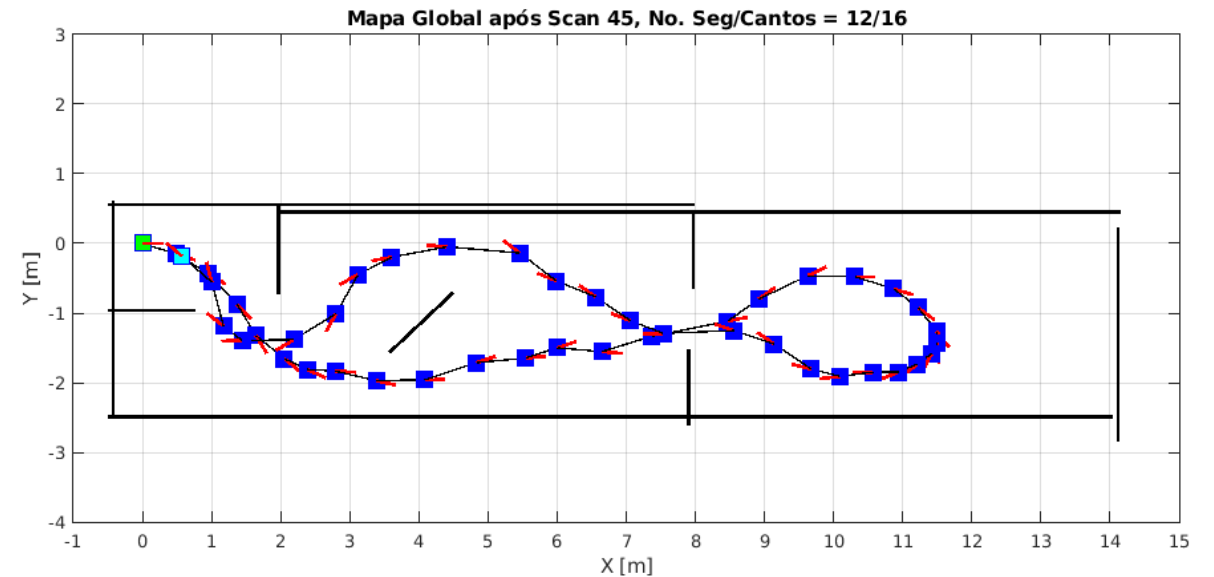
## Resultados do experimento simulado 1: Sem *Loop Closure*



## Resultados do experimento simulado 1: Sem *Loop Closure*

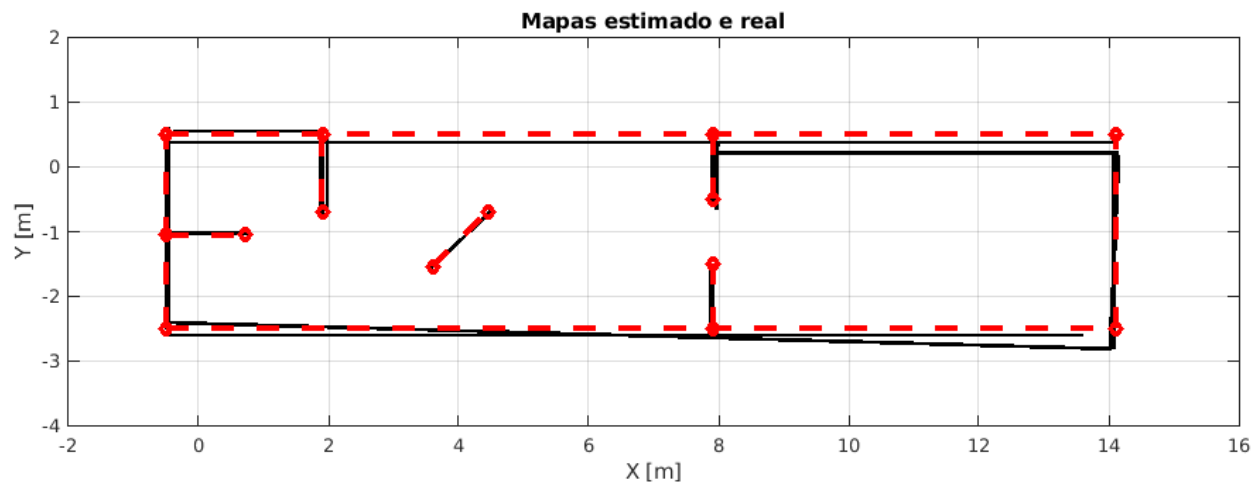


Sem junção de segmentos

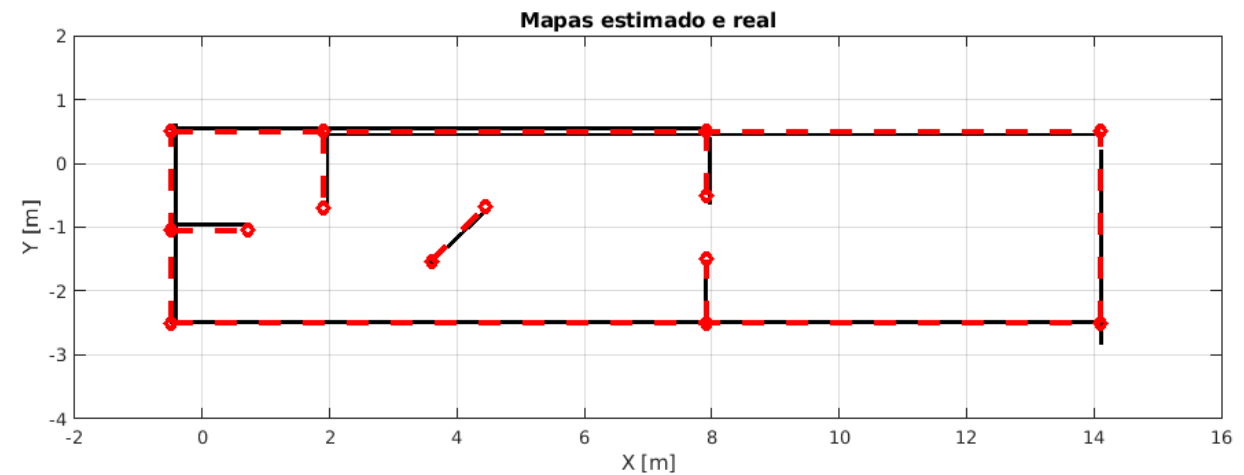


Com junção de segmentos

## Resultados do experimento simulado 1: Sem *Loop Closure*



Sem junção de segmentos

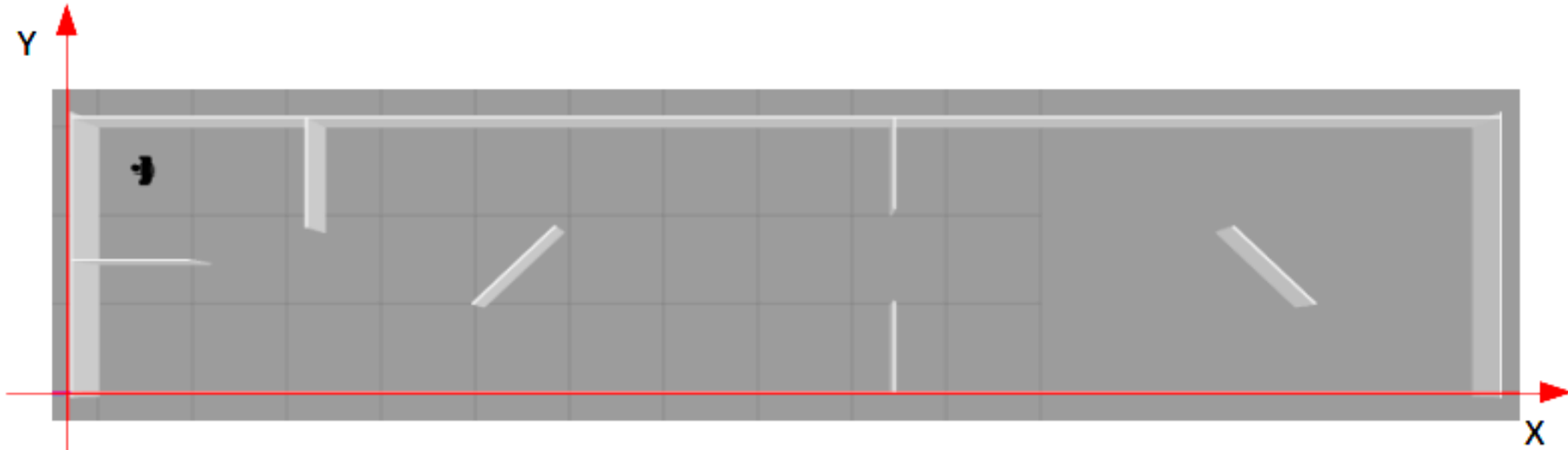


Com junção de segmentos

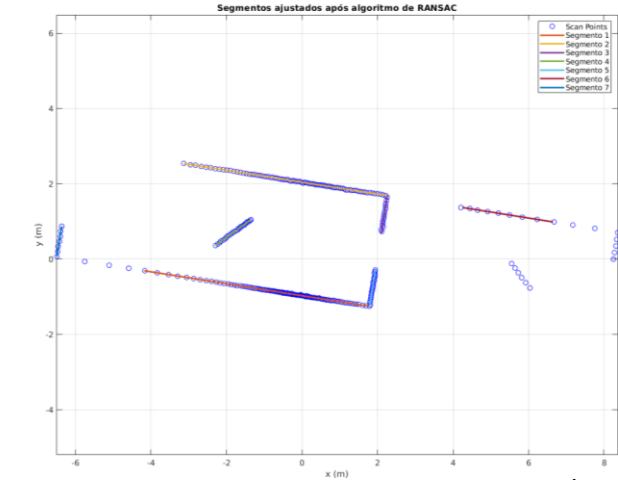
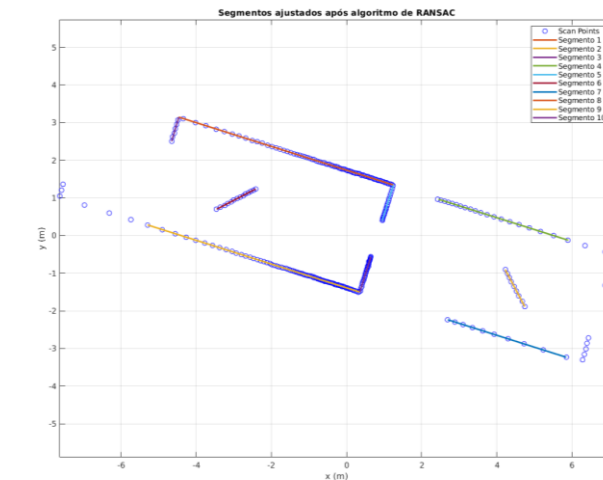
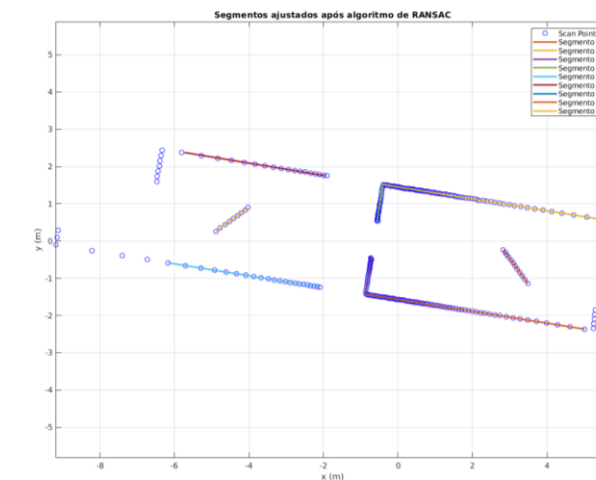
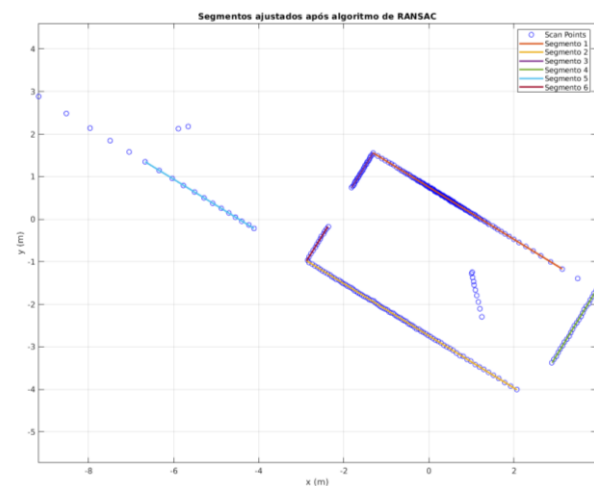
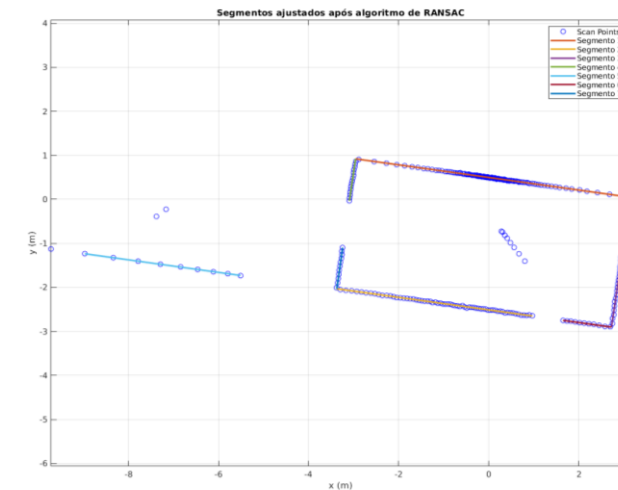
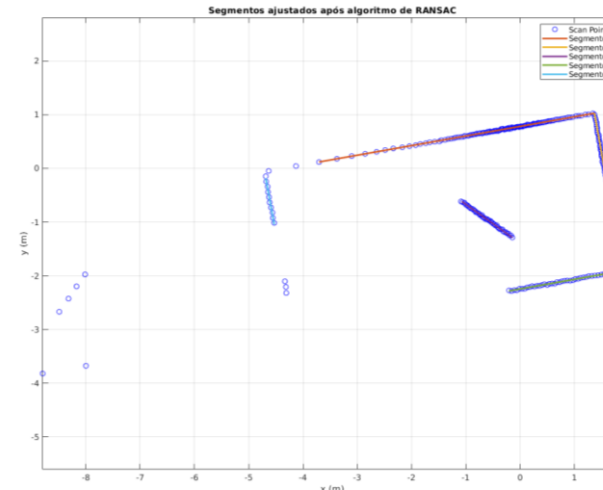
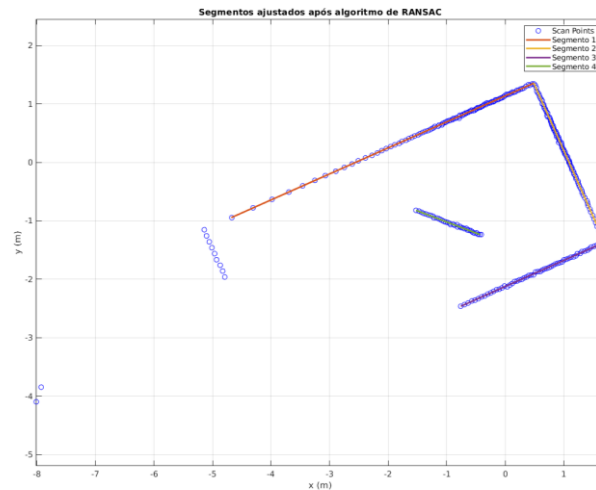
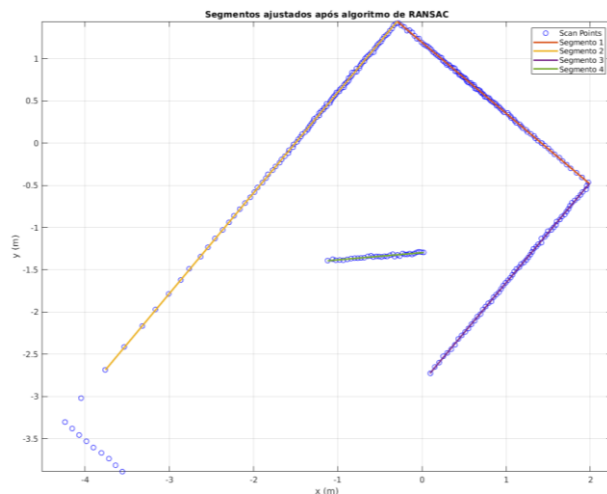


## Experimento simulado 2

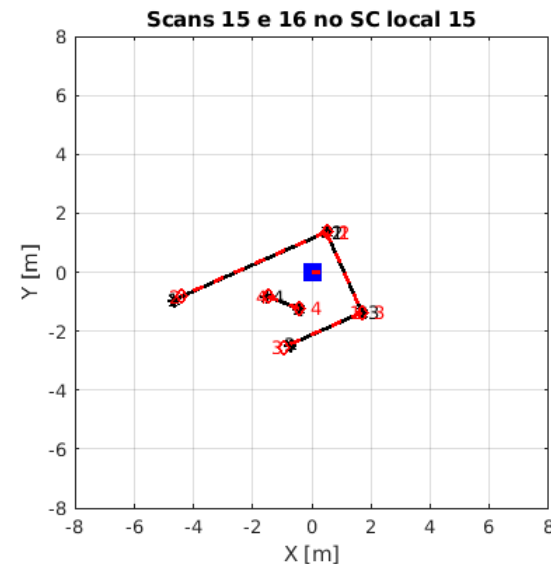
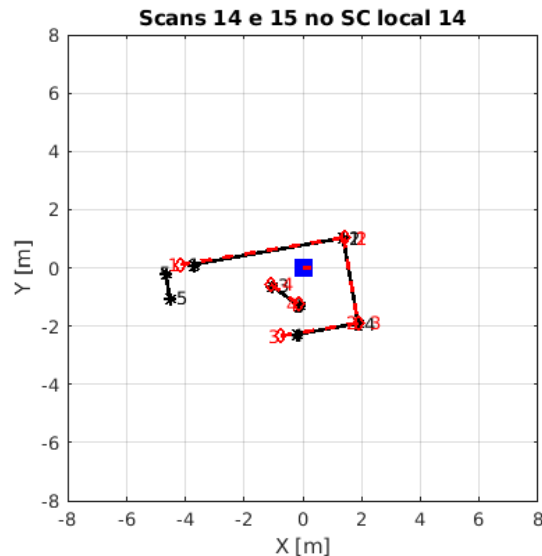
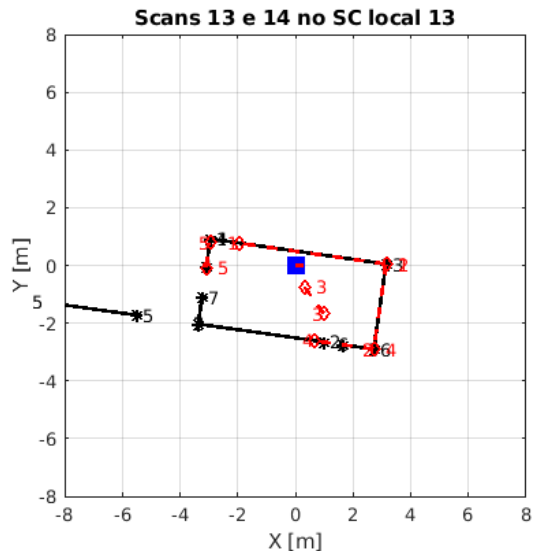
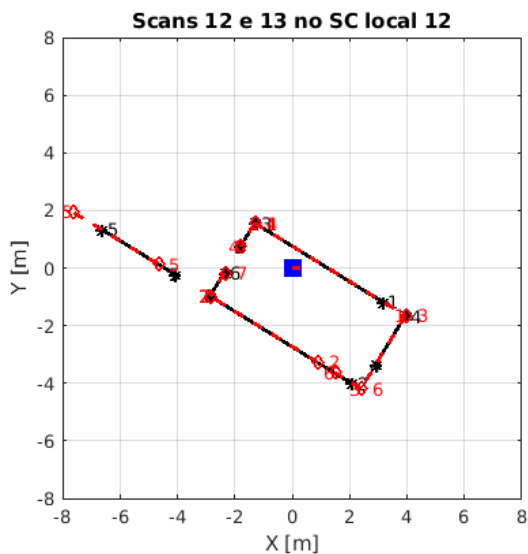
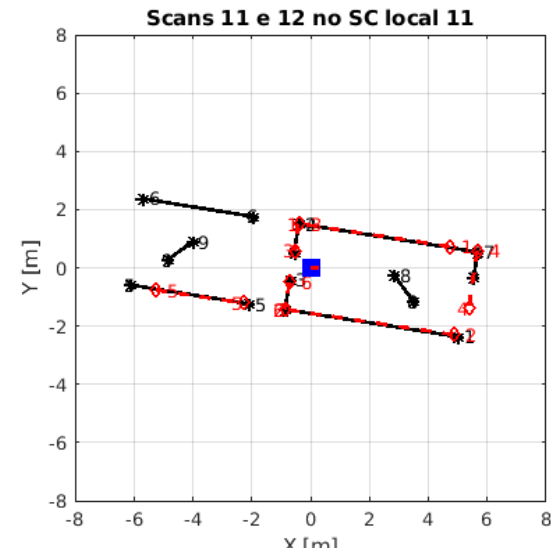
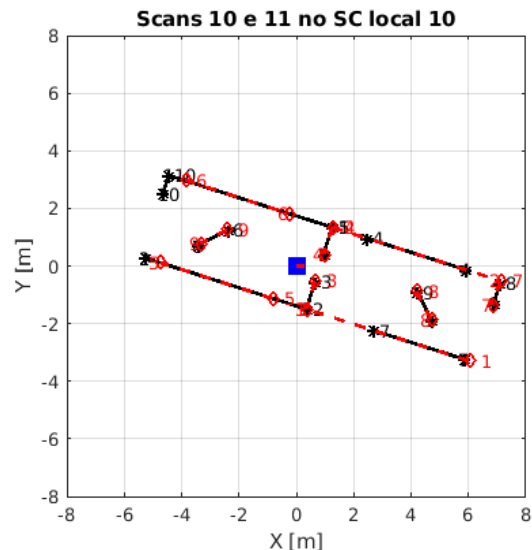
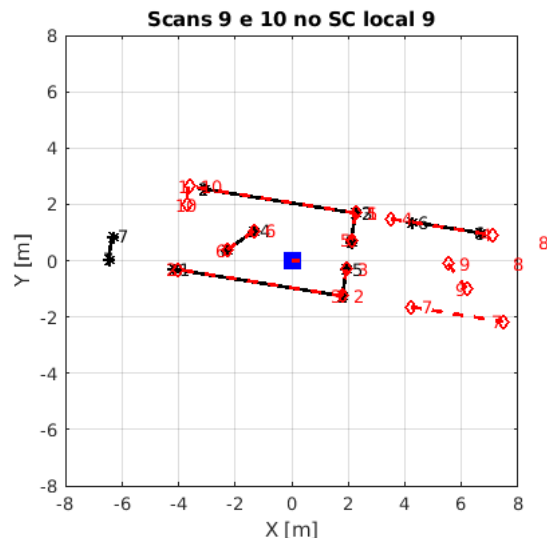
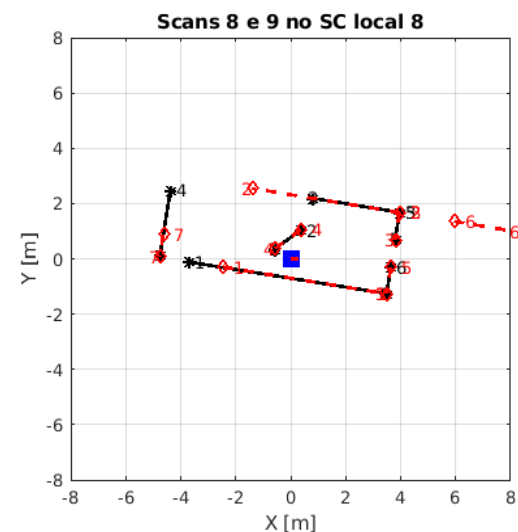
- Ambiente com 10 paredes.
- Foram coletadas 38 posturas.
- Postura inicial do robô simulado: (0,5 m; 2,5 m; 0°).
- Área:  $\cong 44 \text{ m}^2$  (14,6 m x 3 m).



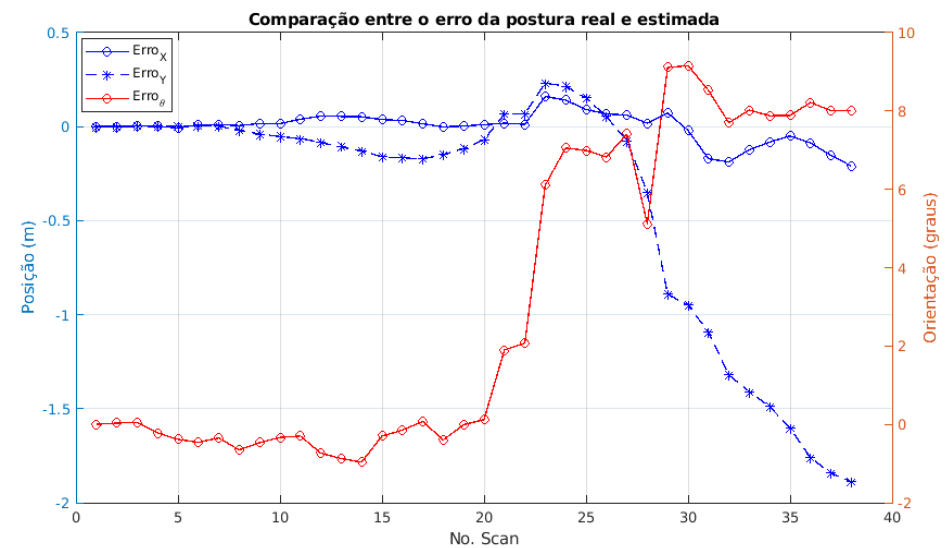
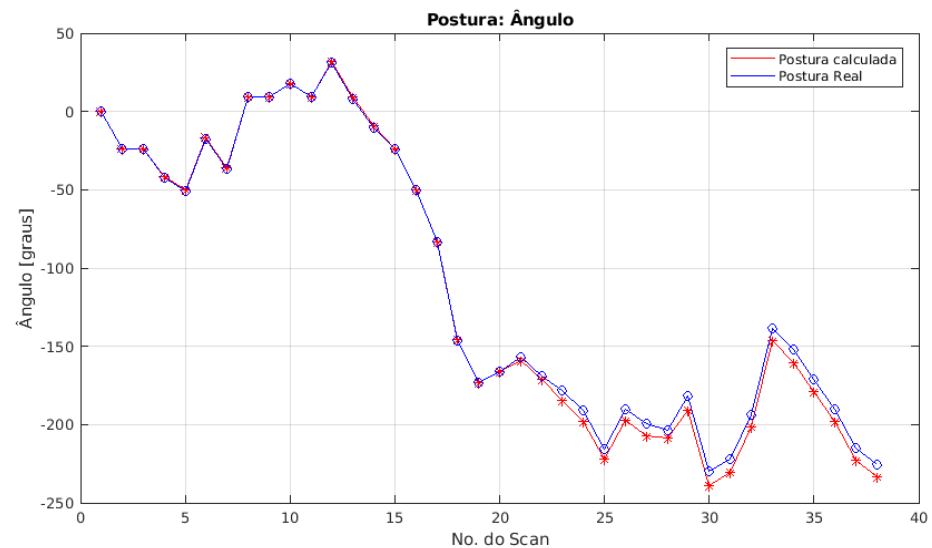
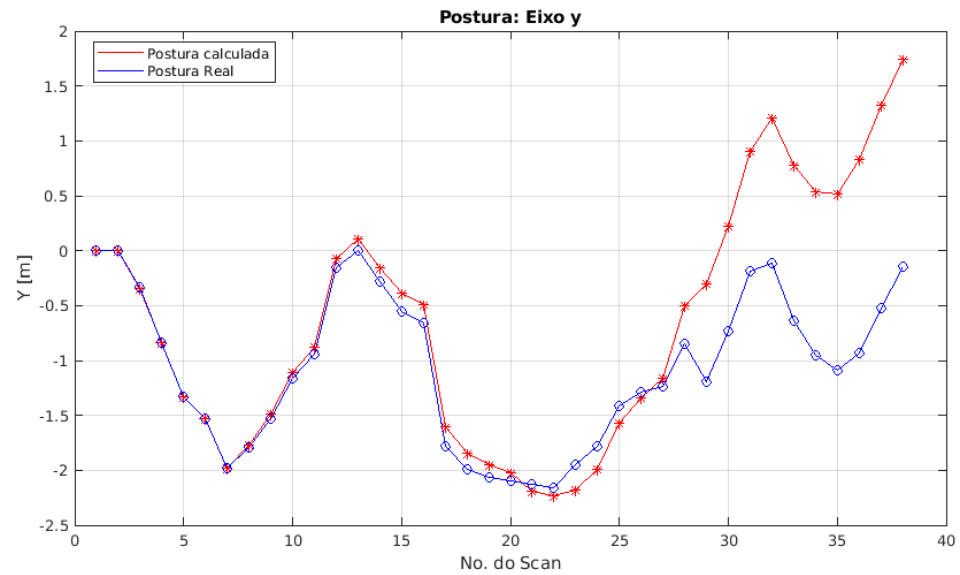
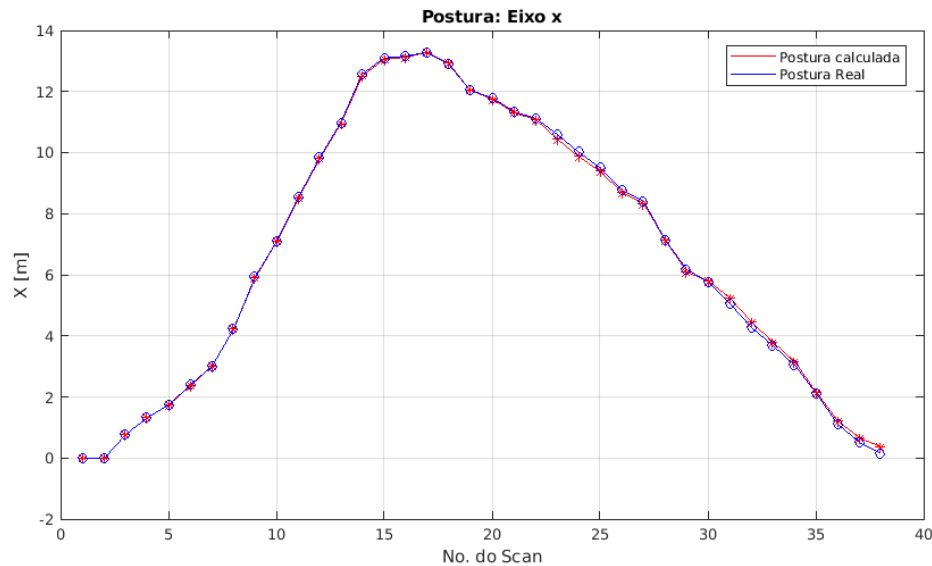
## Experimento simulado 2: Aplicação do algoritmo RANSAC modificado



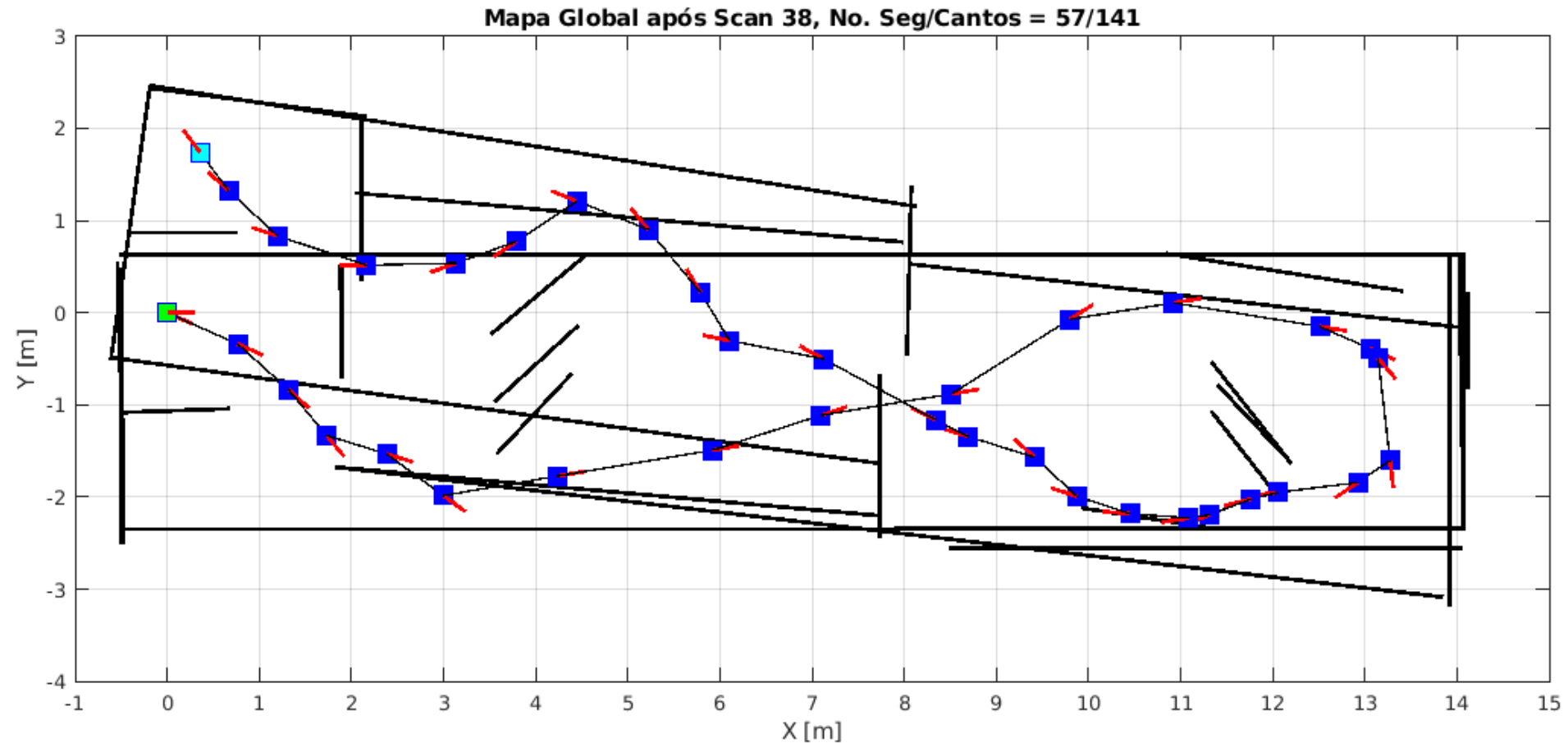
## Experimento simulado 2: *Line Matching* de posturas consecutivas



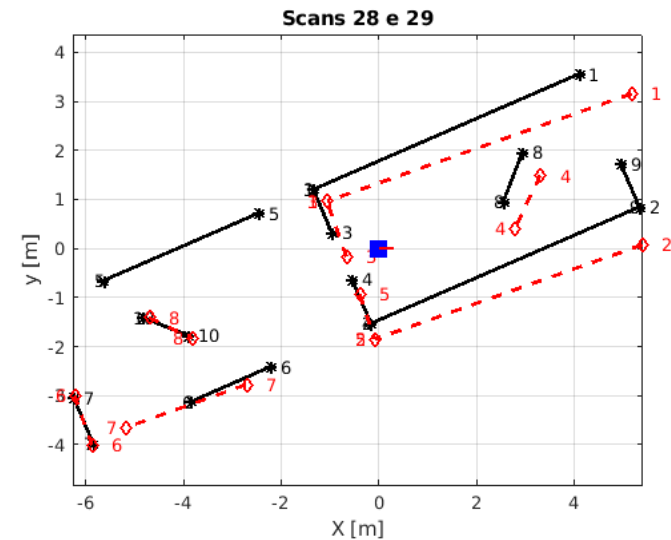
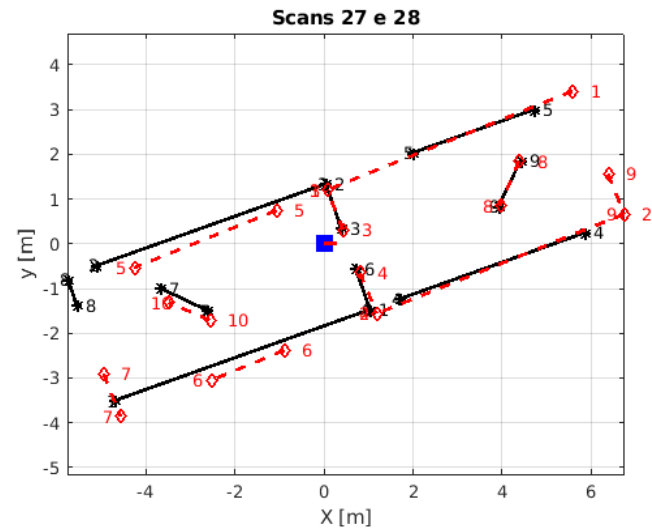
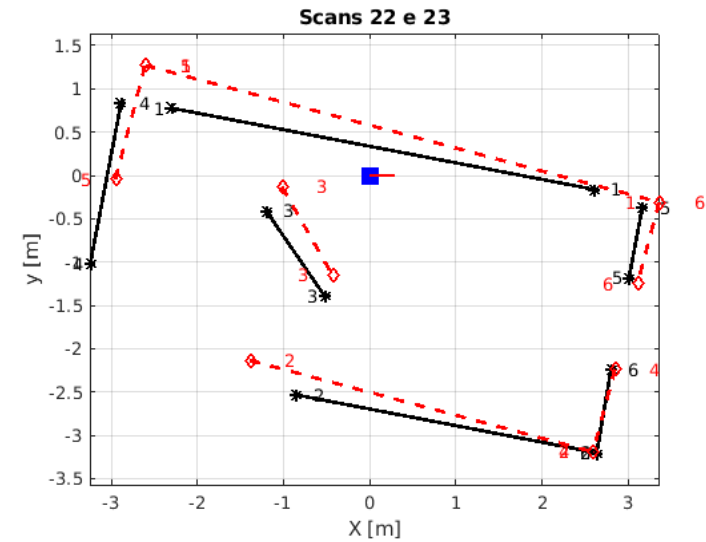
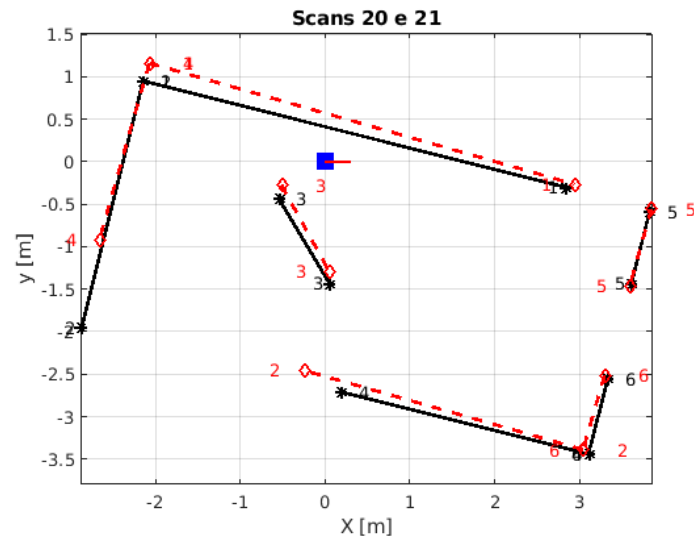
## Resultados do experimento simulado 2: Sem *Loop Closure*



## Resultados do experimento simulado 2: Sem *Loop Closure*

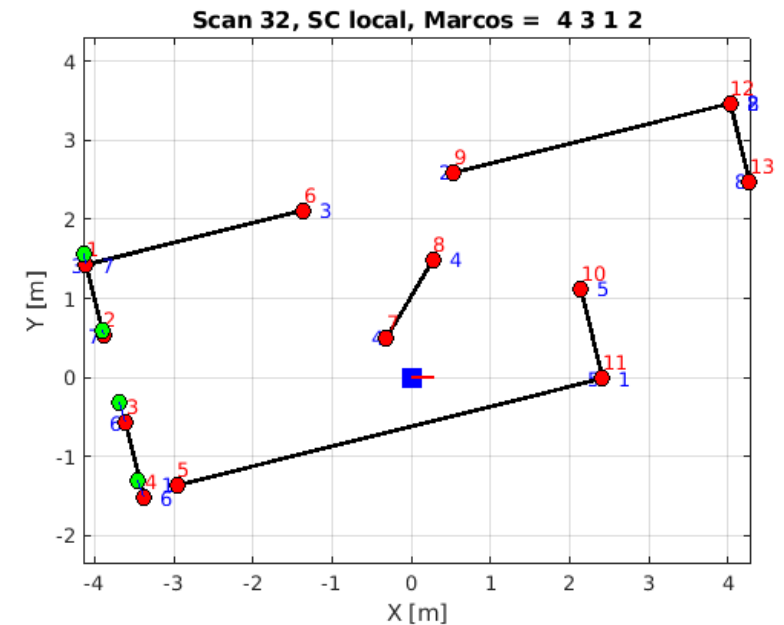
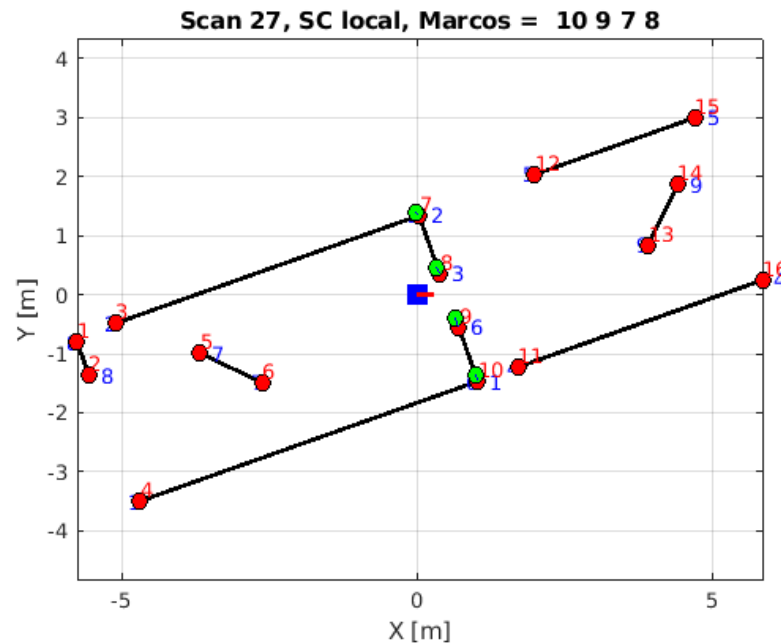
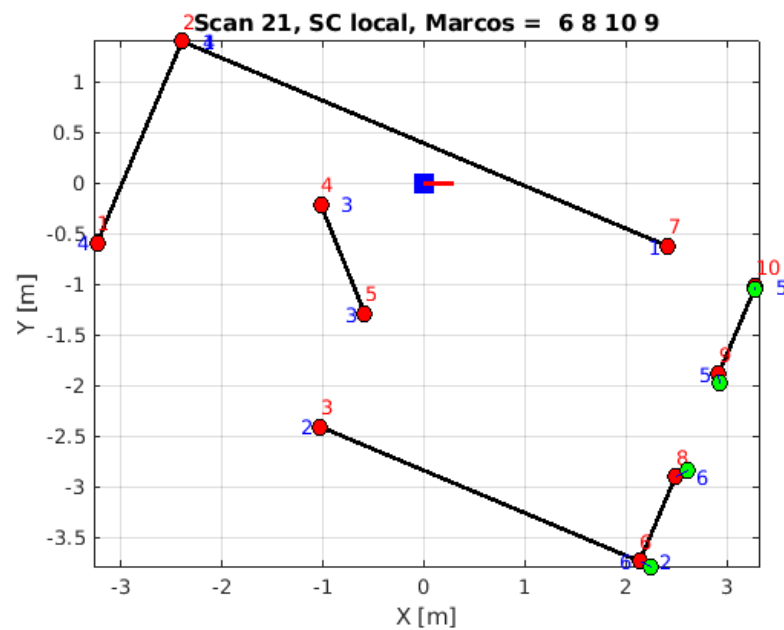


## Resultados do experimento simulado 2: Com *Loop Closure*



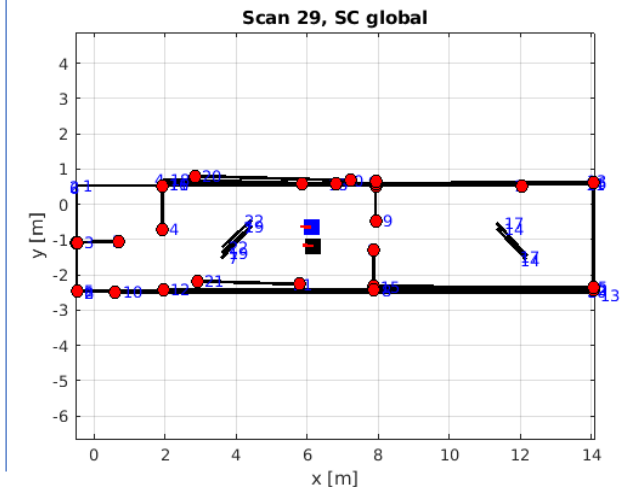
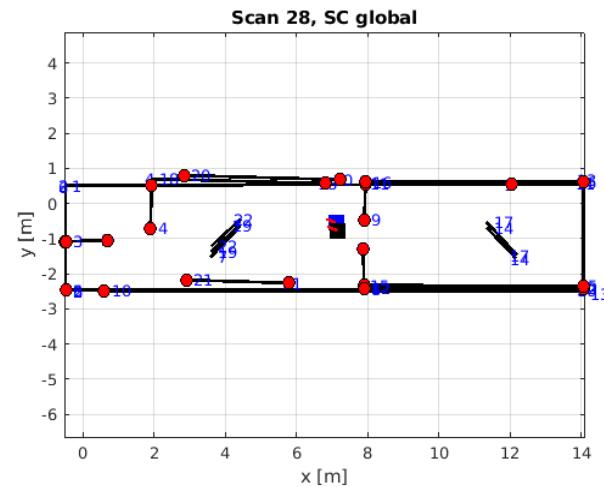
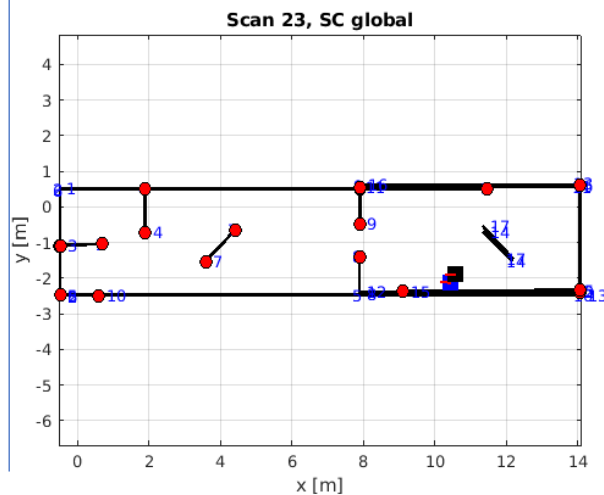
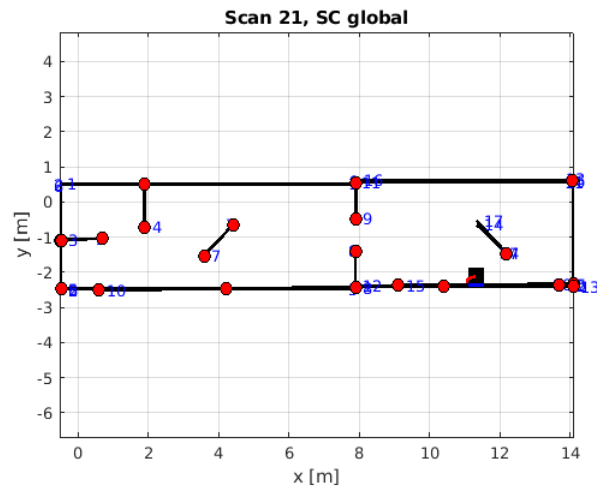
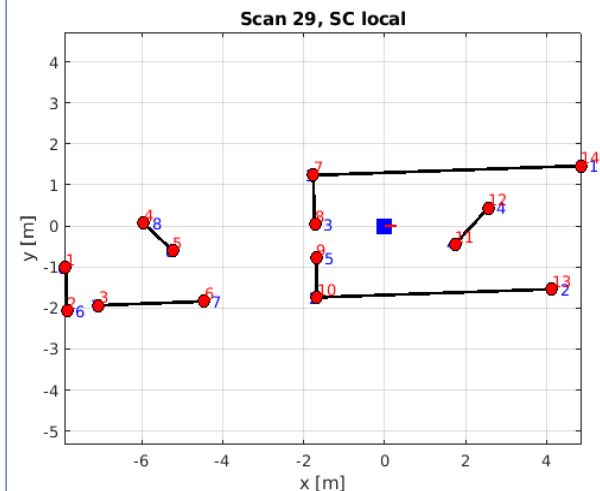
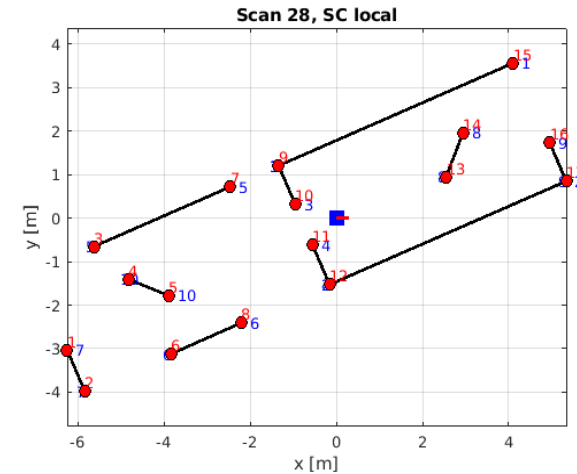
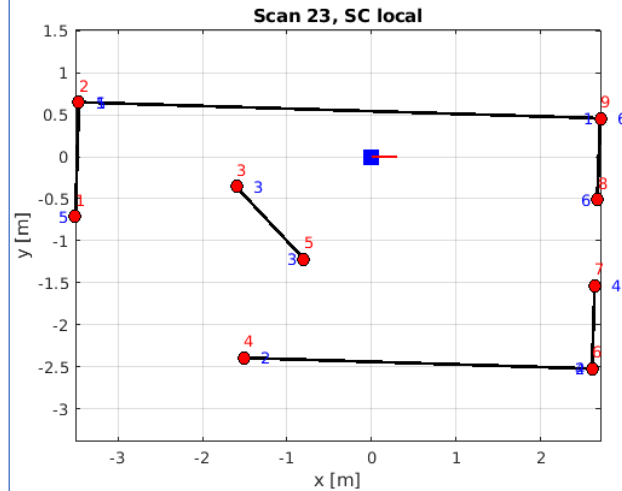
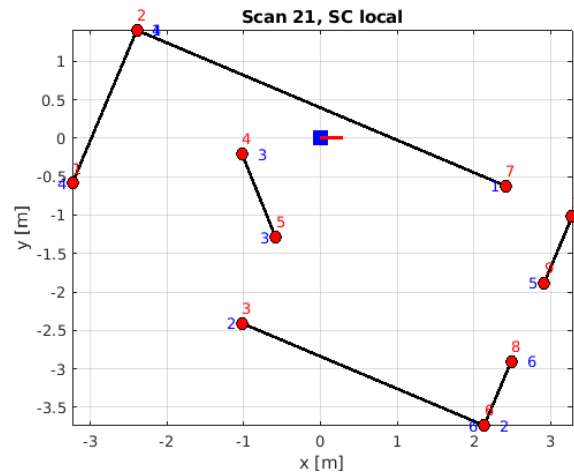
## Resultados do experimento simulado 2: Com *Loop Closure*

- Marcos: os 4 *endpoints* das paredes verticais na região central do ambiente.
- Posturas selecionadas para LC: 21 a 32, erro significativo na execução do procedimento de *line matching*.



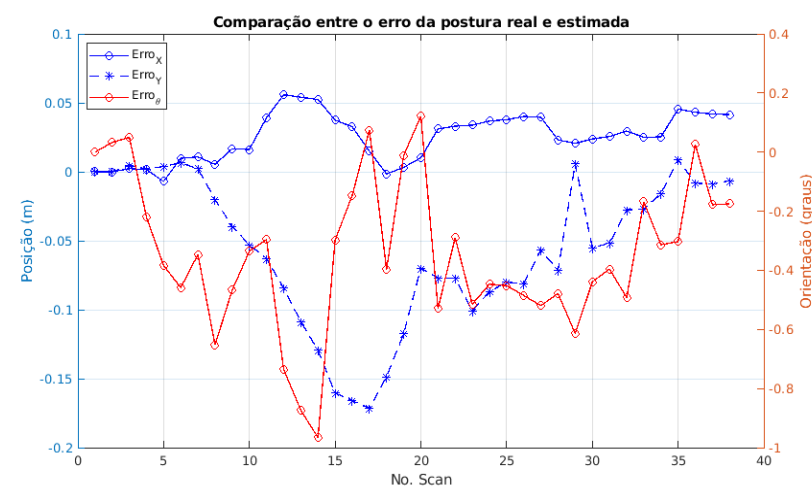
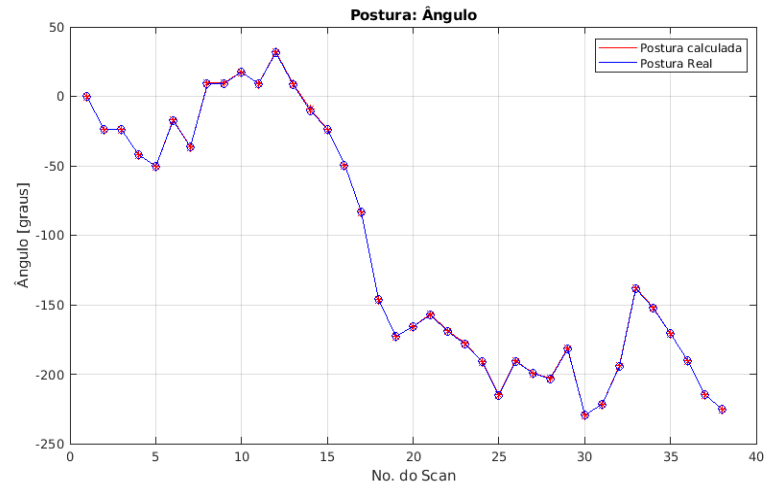
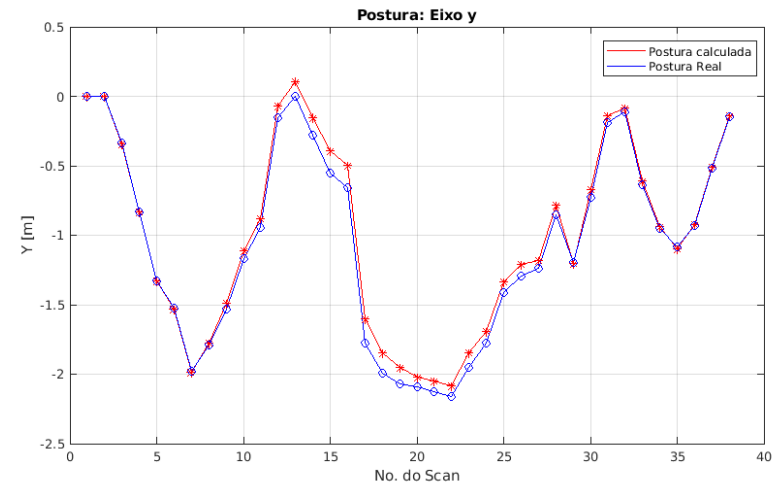
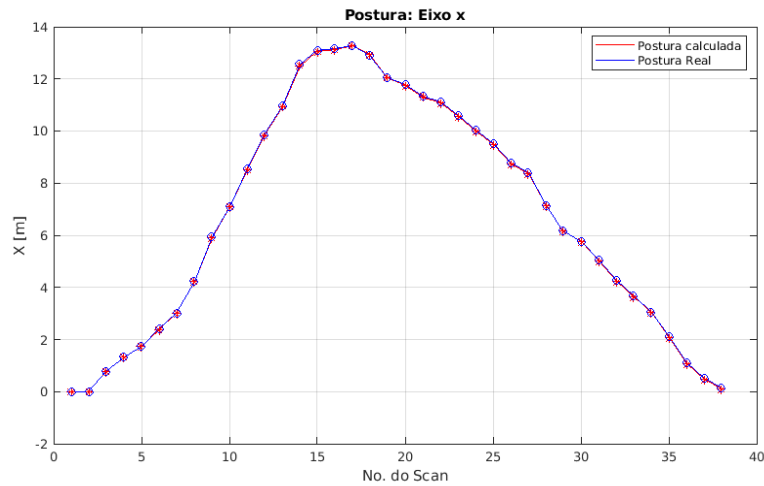
# Experimentos e Resultados Obtidos

## Resultados do experimento simulado 2: Com *Loop Closure*





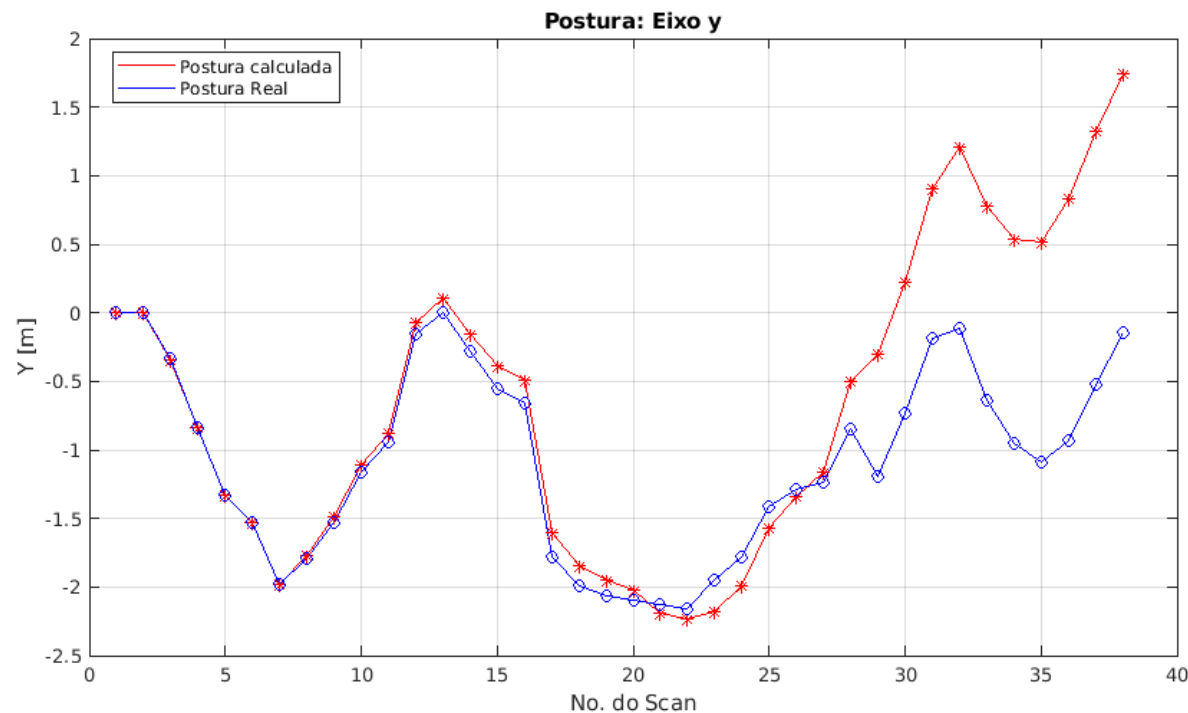
## Resultados do experimento simulado 2: Com *Loop Closure*



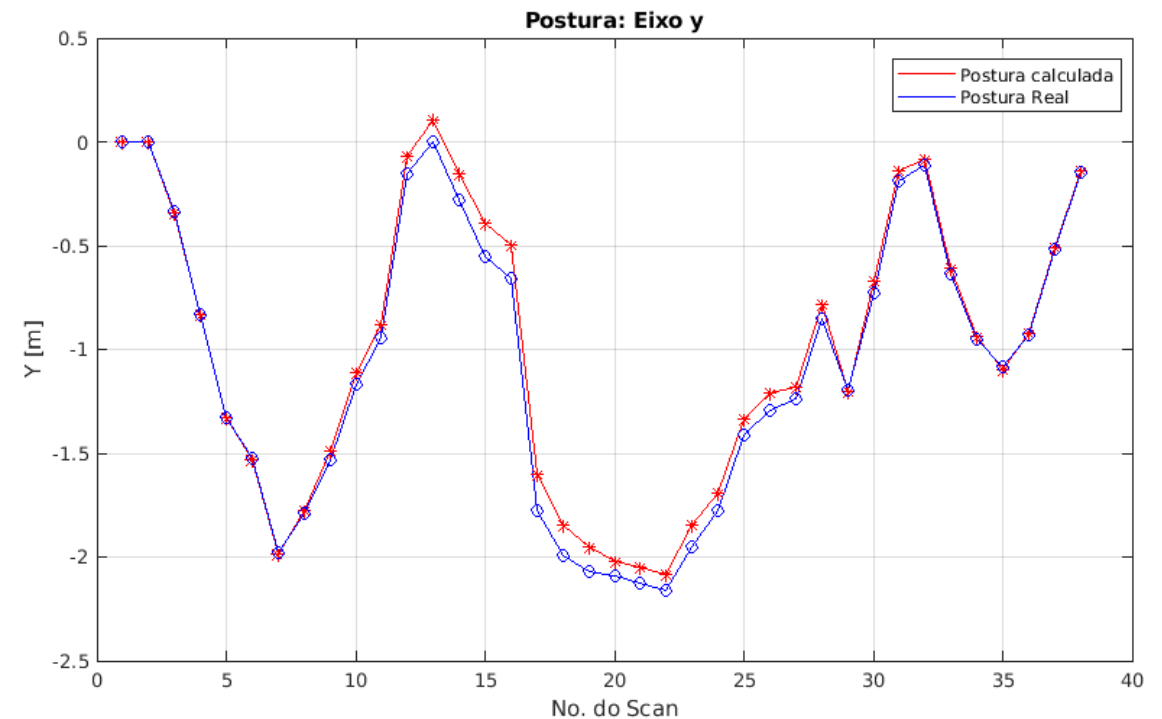
# Experimentos e Resultados Obtidos

## Resultados do experimento simulado 2: Com *Loop Closure*

Comparação entre resultados sem e com *Loop Closure*



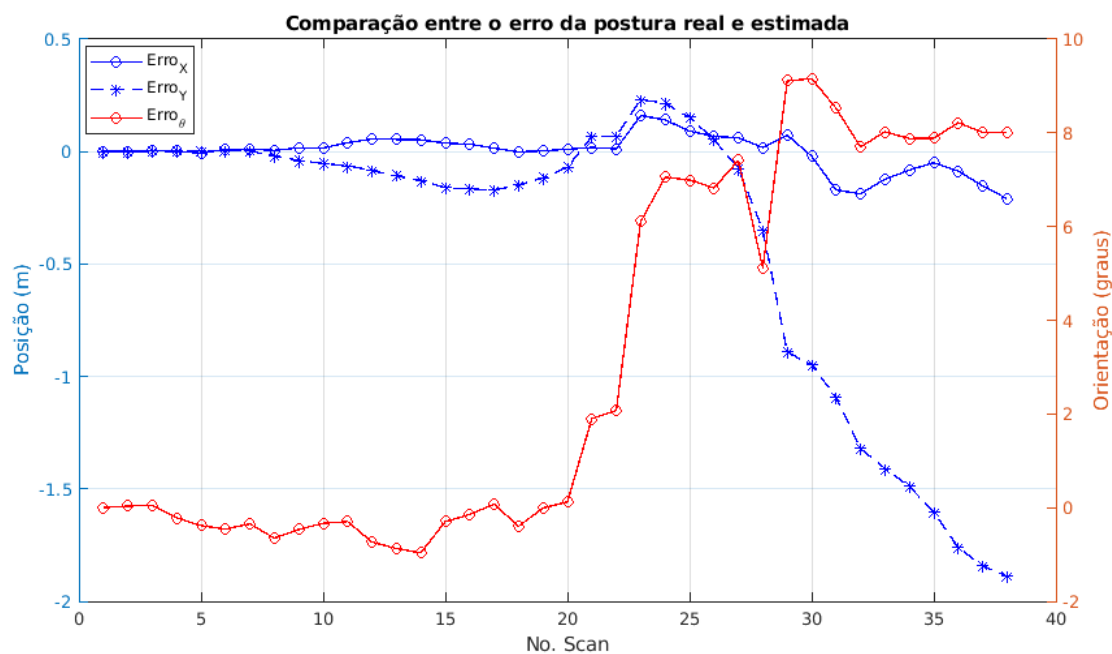
Sem *Loop Closure*



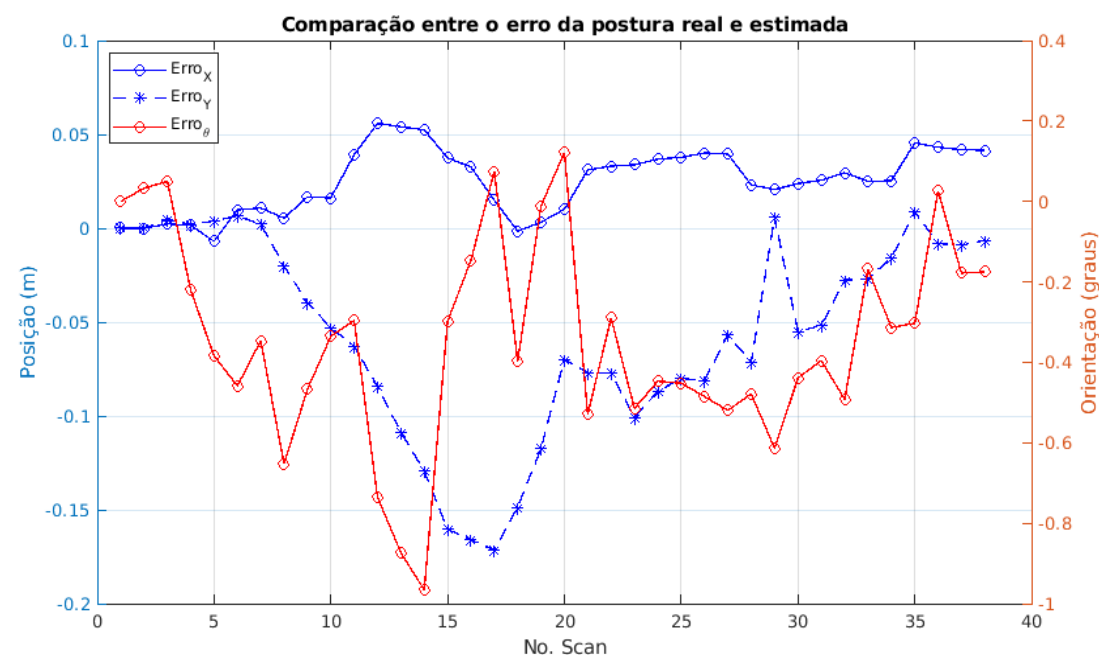
Com *Loop Closure*

## Resultados do experimento simulado 2: Com *Loop Closure*

Comparação entre resultados sem e com *Loop Closure*

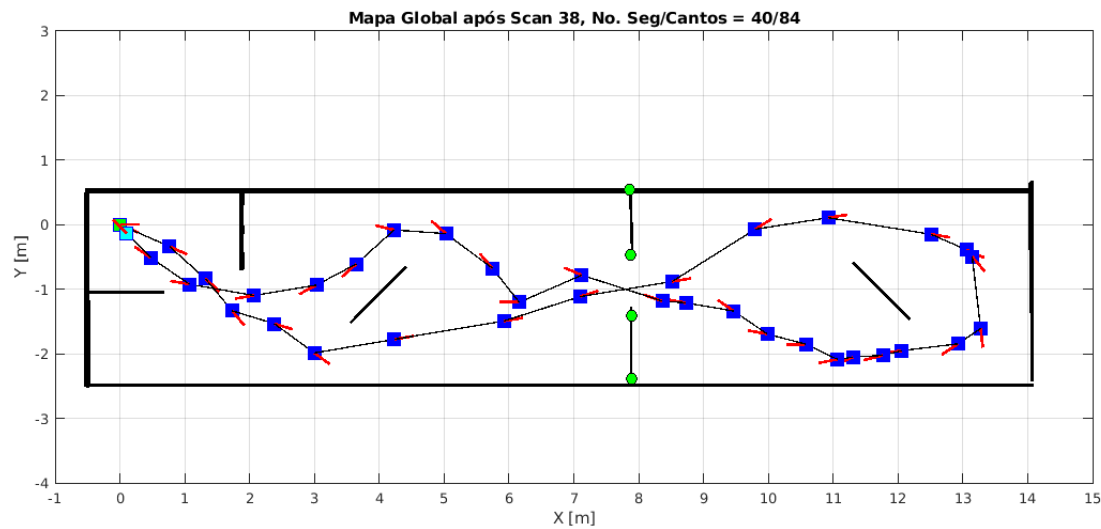


Sem *Loop Closure*

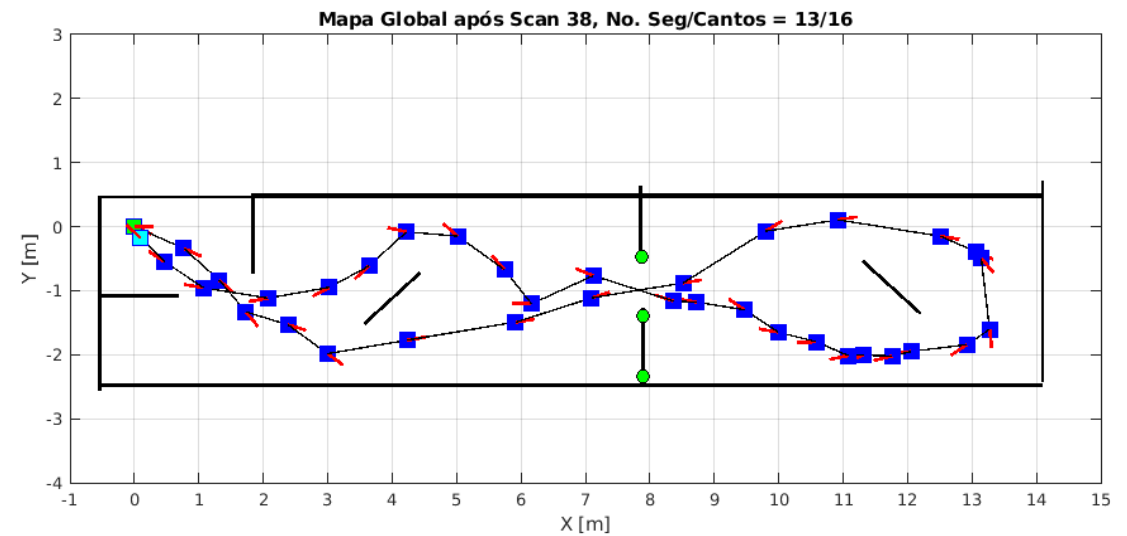


Com *Loop Closure*

## Resultados do experimento simulado 2: Com *Loop Closure*



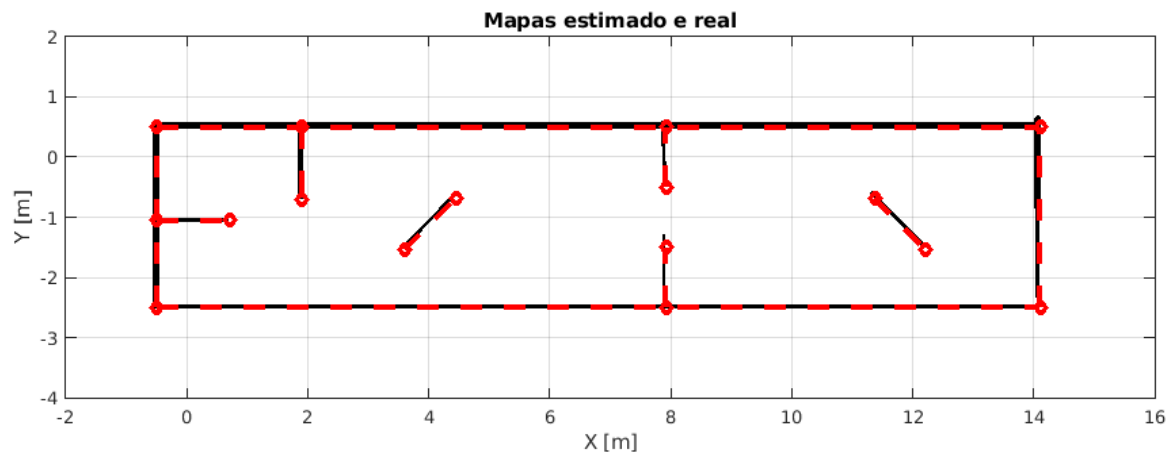
Sem junção de segmentos



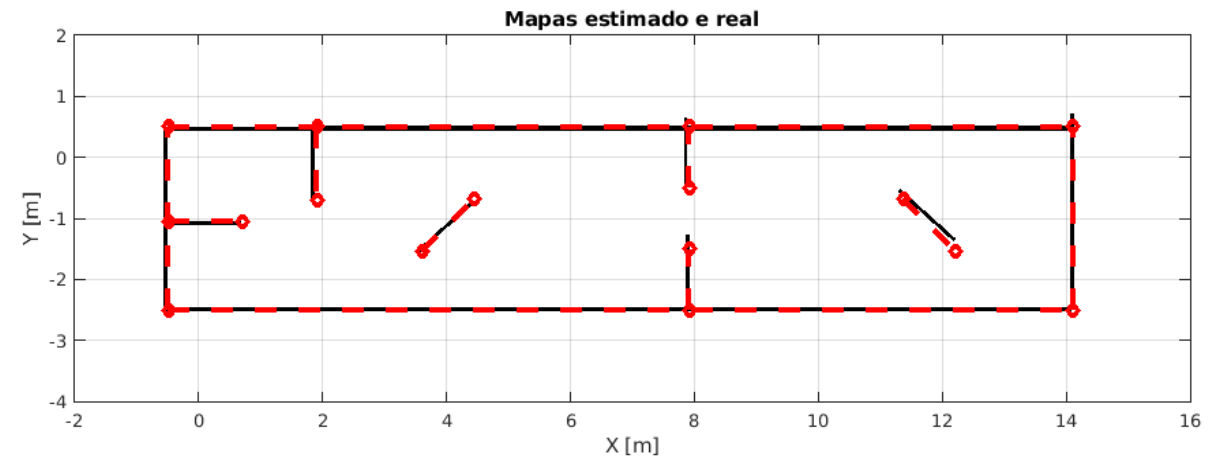
Com junção de segmentos

## Resultados do experimento simulado 2: Com *Loop Closure*

- Mapas estimado e real

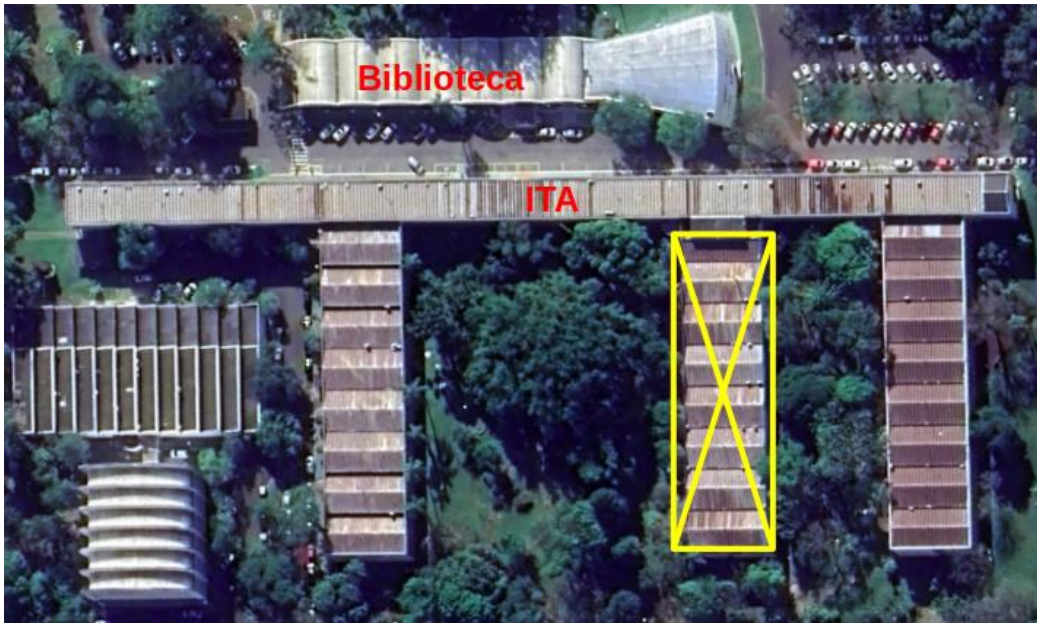


Sem junção de segmentos



Com junção de segmentos

## Estrutura do experimento real



Vista de satélite do prédio do ITA



Corredor do LMI



## Especificações do robô real

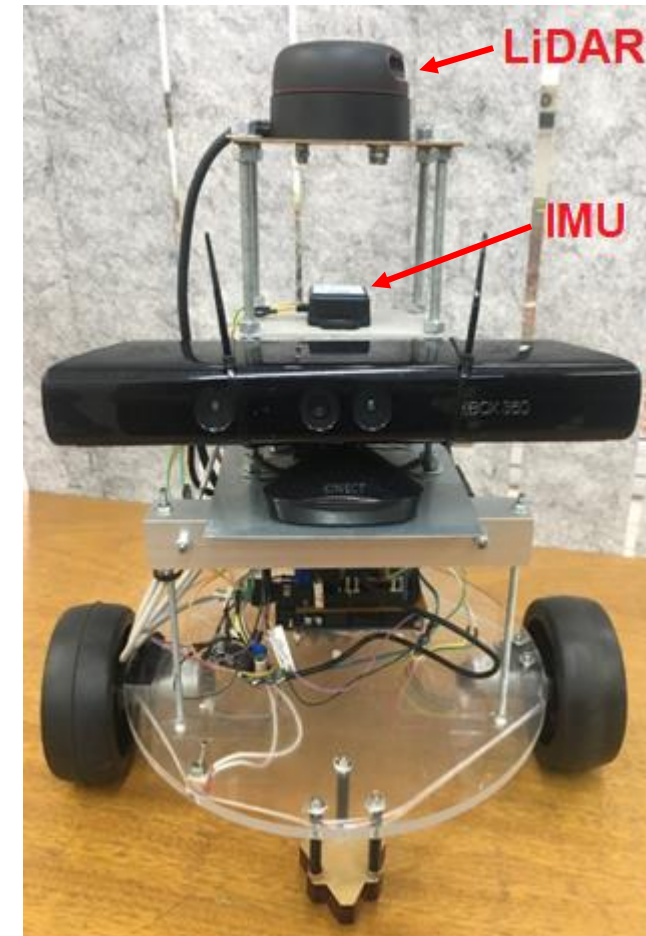
- Placas embarcadas Raspberry Pi 3B+ e Arduino Mega 2560.
- *Scanner a laser* (LiDAR) 2D SLAMTEC RPLIDAR A2M8.
- Medidas de ângulo feitas pela Bússola Eletrônica (IMU) WiT BWT901CL.



SLAMTEC RPLiDAR A2M8

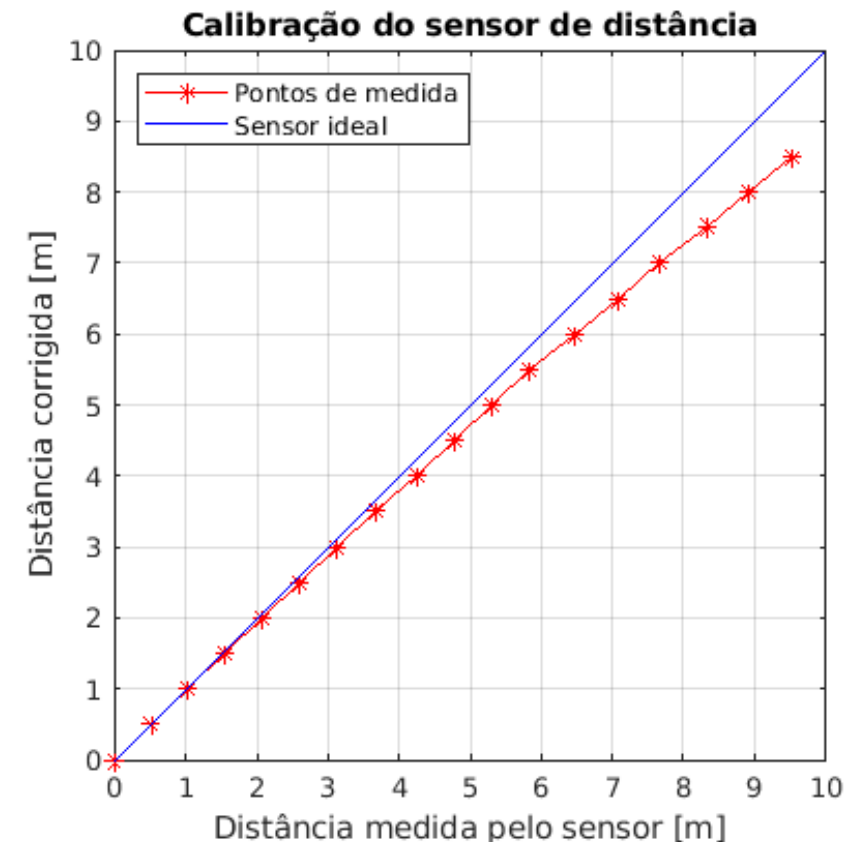
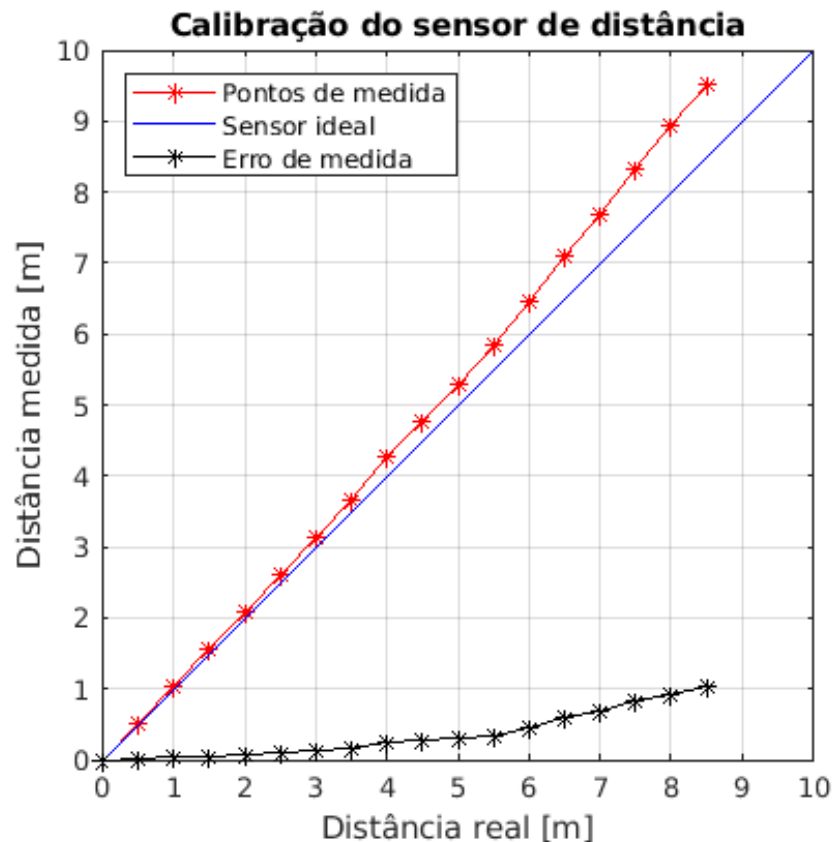


IMU WiT BWT901CL



Robô Móvel

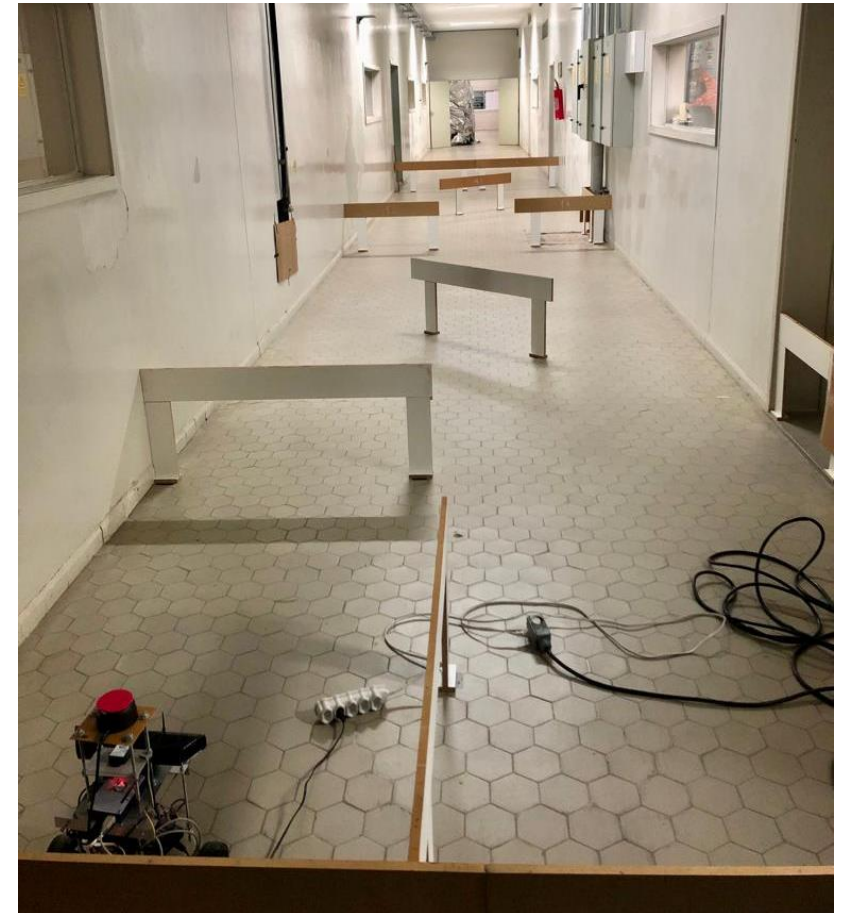
## Calibração do sensor *scanner a laser* (LiDAR)



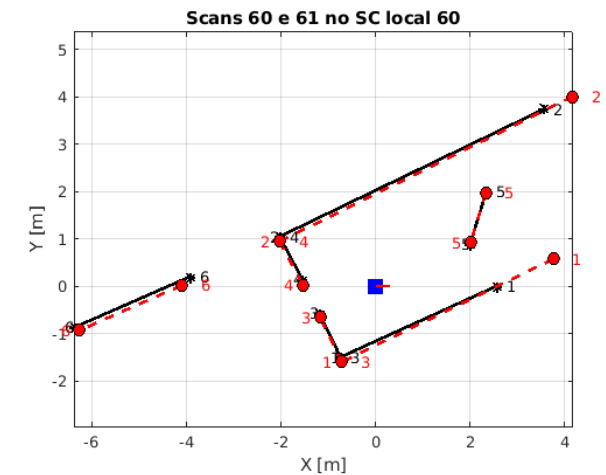
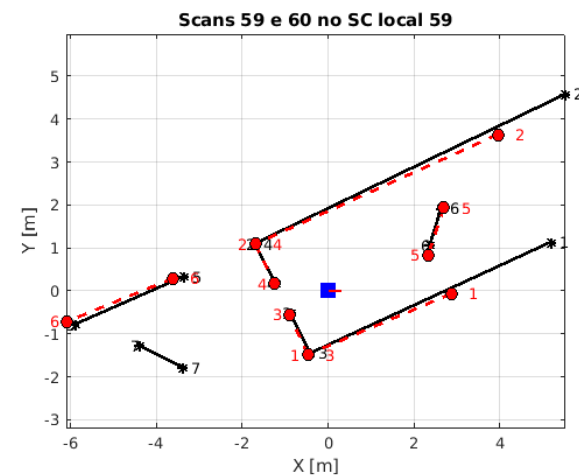
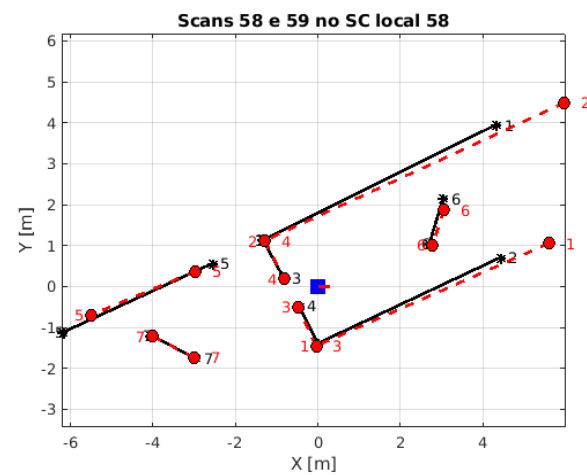
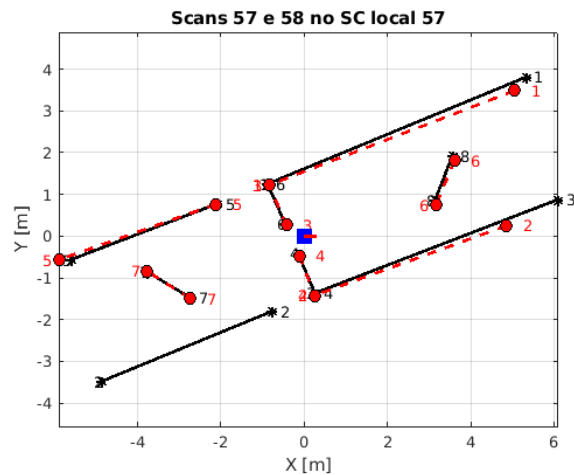
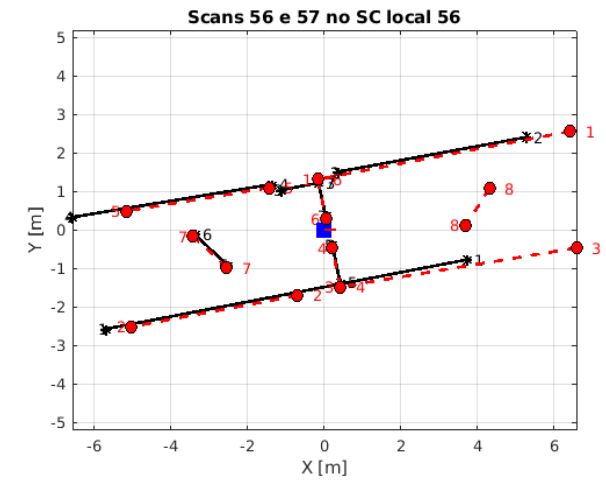
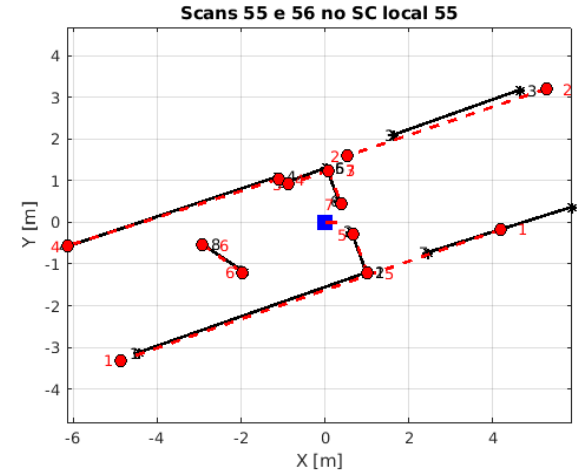
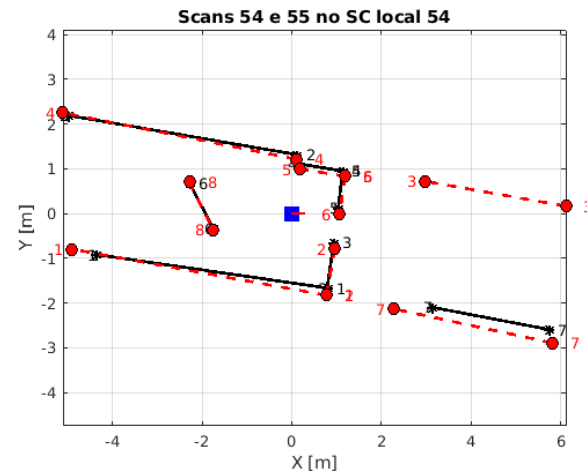
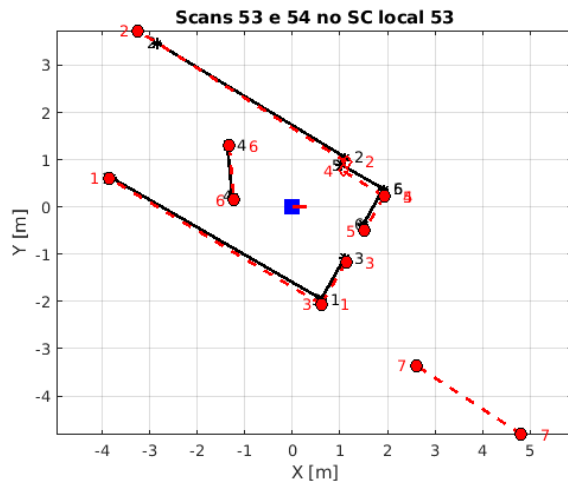


## Resultados do experimento real

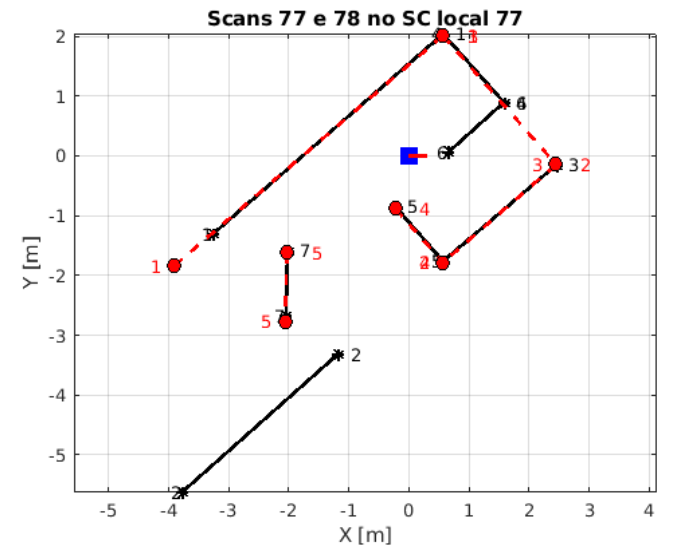
- Ambiente com 10 paredes.
- Foram coletadas 81 posturas.
- Baseado no ambiente simulado com 10 paredes.
- Área:  $\cong 41,44 \text{ m}^2$  (14,54 m x 2,85 m).



## Experimento real: Sem *Loop Closure*

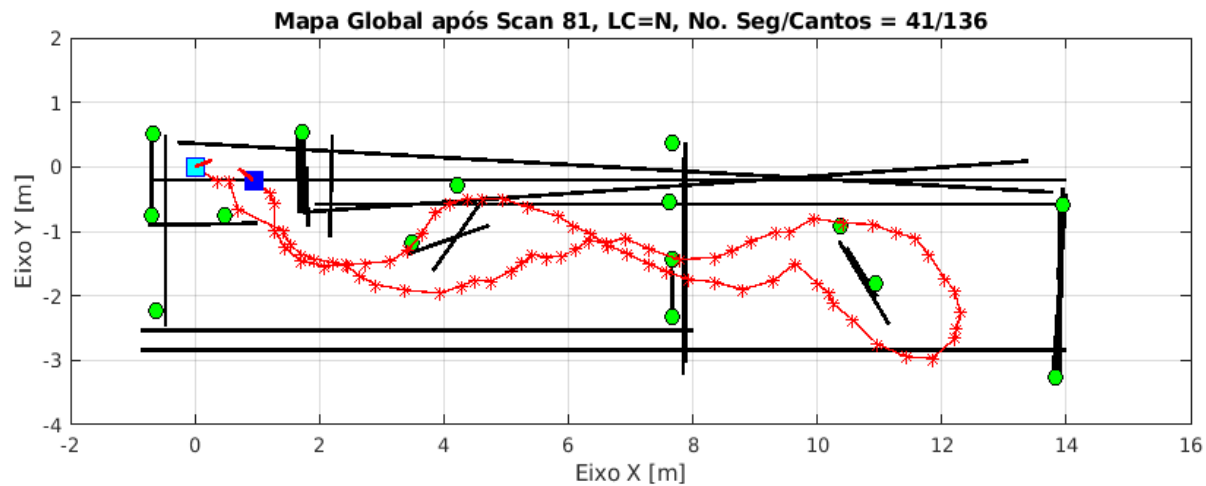


## Experimento real: Sem *Loop Closure*

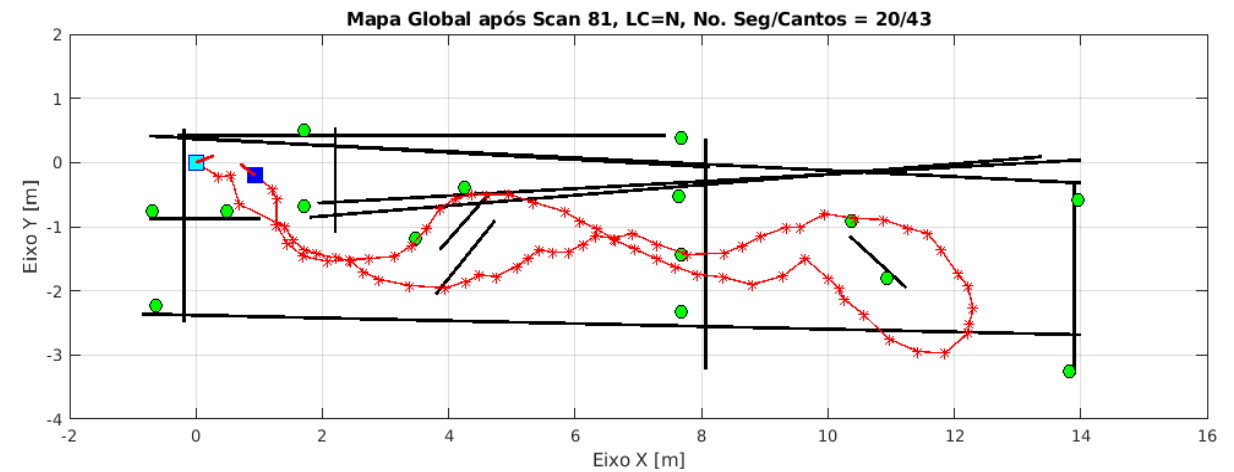


# Experimentos e Resultados Obtidos

## Resultados do experimento real: Sem *Loop Closure*



Sem junção de segmentos

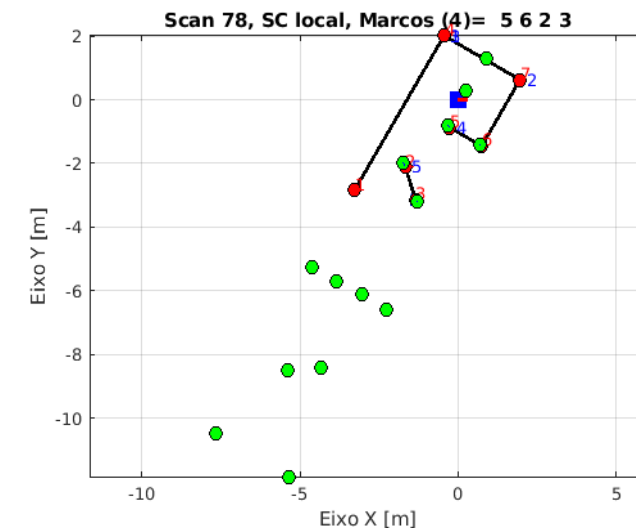
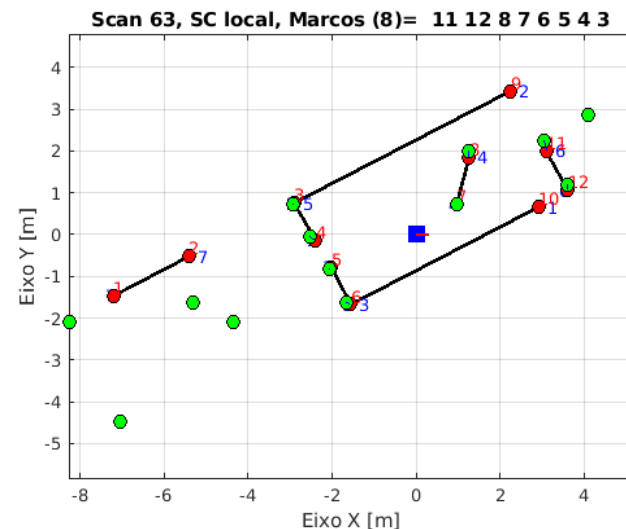
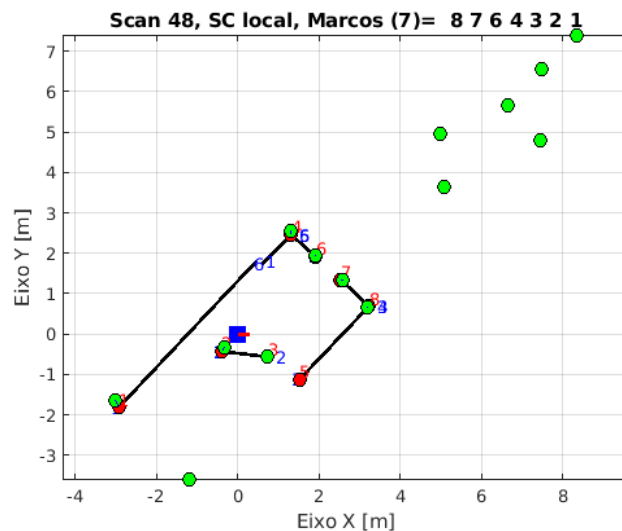
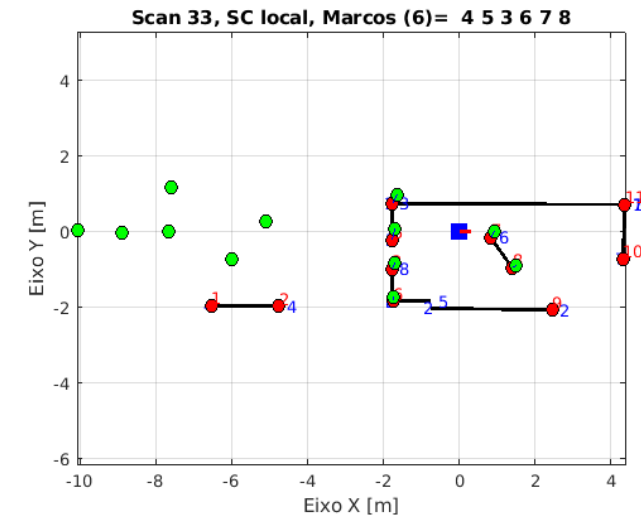
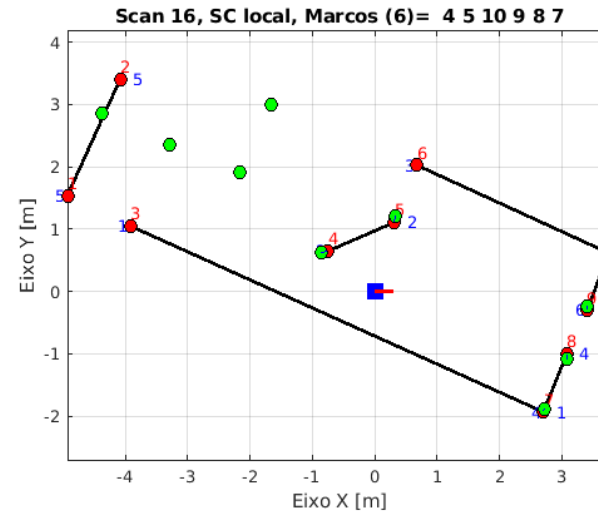
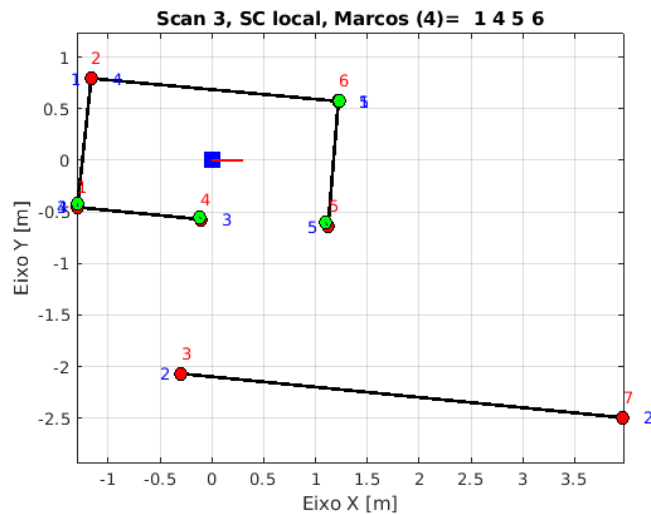


Com junção de segmentos

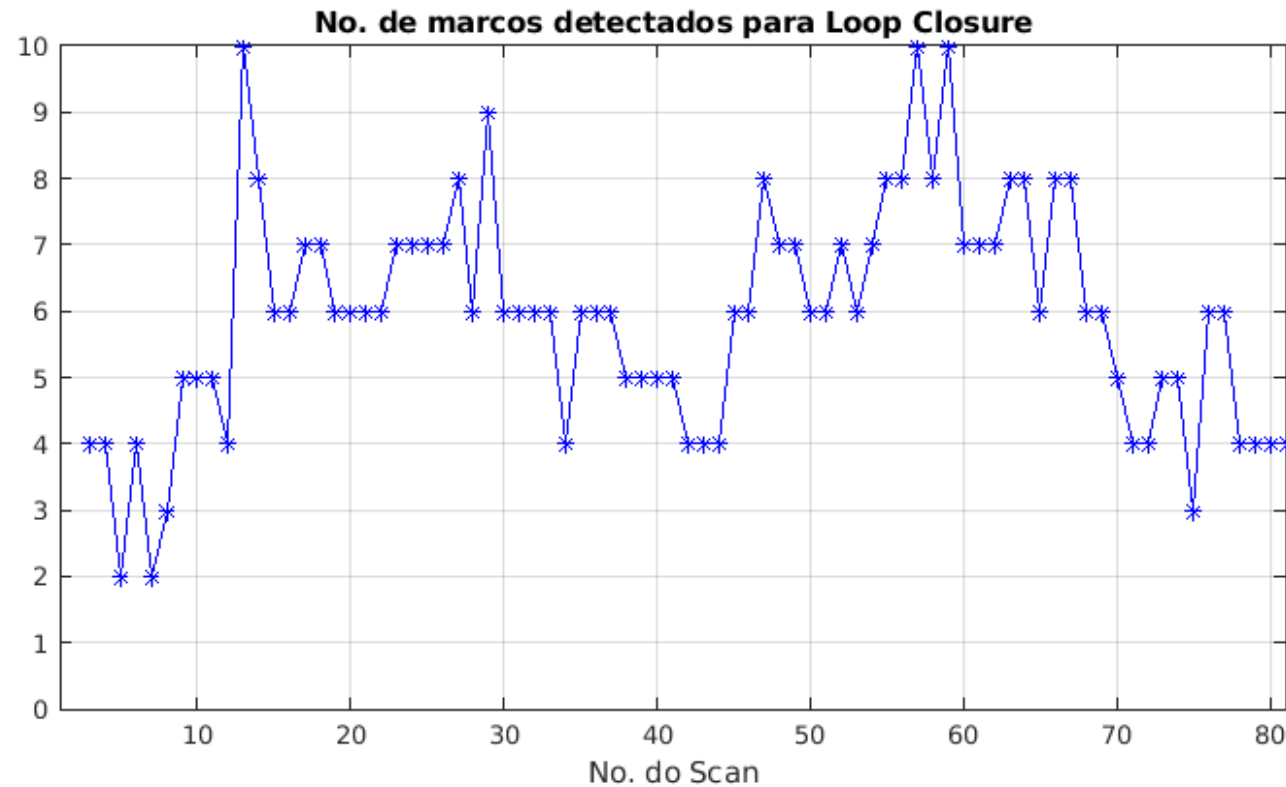
# Experimentos e Resultados Obtidos

## Experimento real: Com *Loop Closure*

- Marcos: *endpoints* a partir do scan 2 até o scan 81.



## Experimento real: Com *Loop Closure*

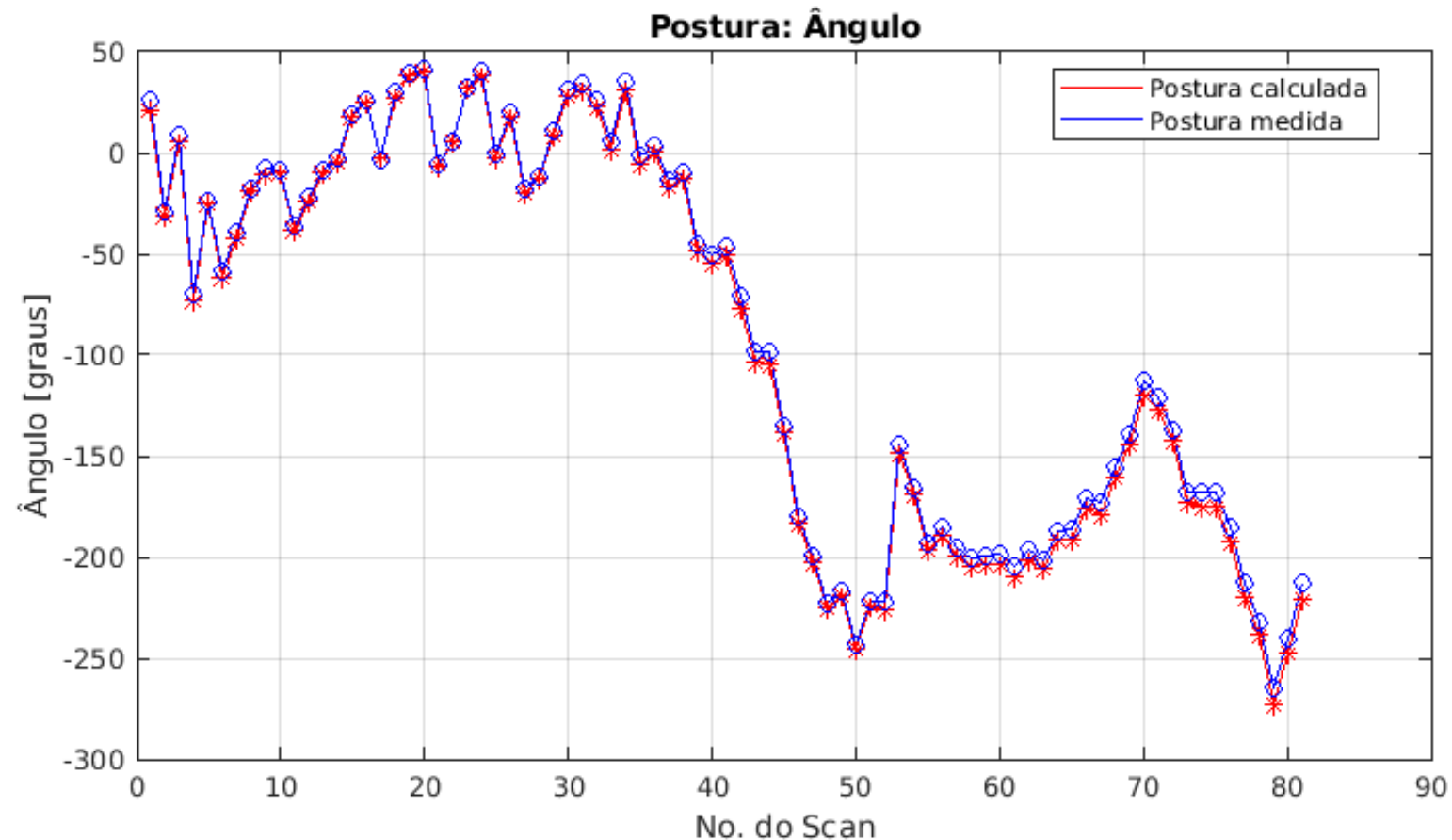


Com junção de segmentos

# Experimentos e Resultados Obtidos

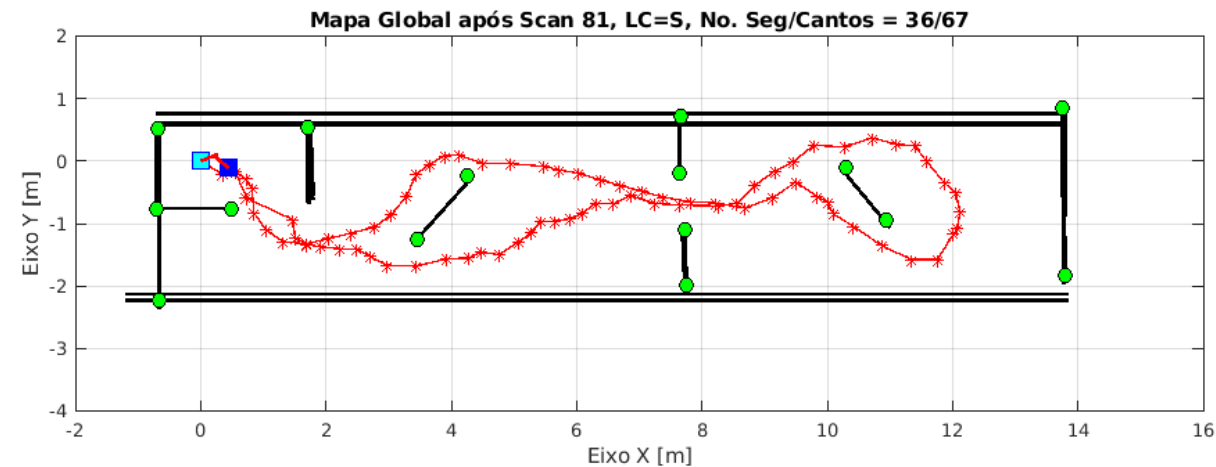
## Experimento real: Com *Loop Closure*

- Comparação entre ângulo da postura calculado pelo algoritmo de SLAM e medido pela bússola embarcada no robô.

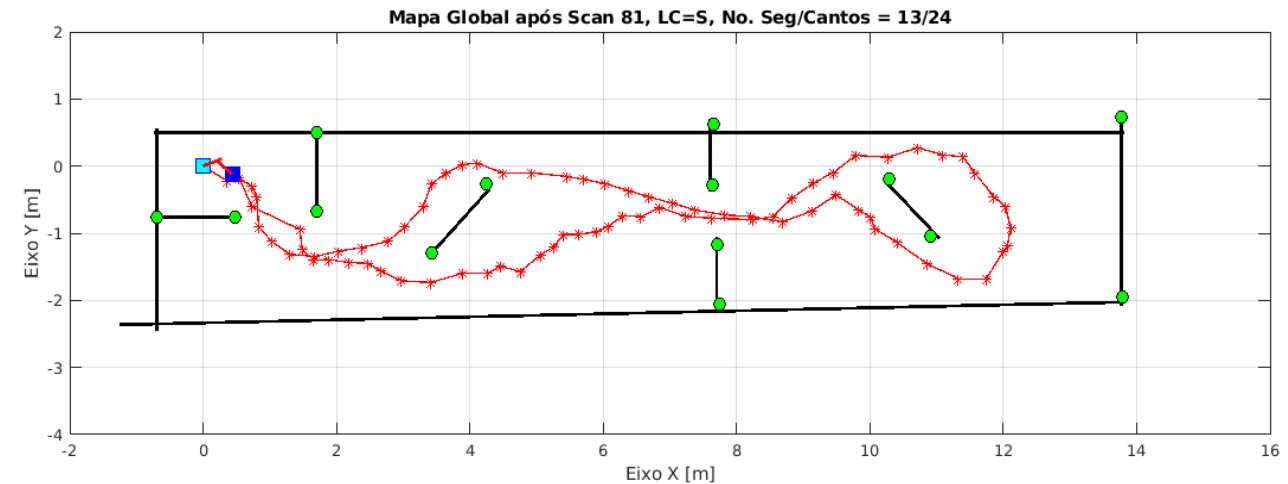


# Experimentos e Resultados Obtidos

## Experimento real: Com *Loop Closure*



Sem junção de segmentos

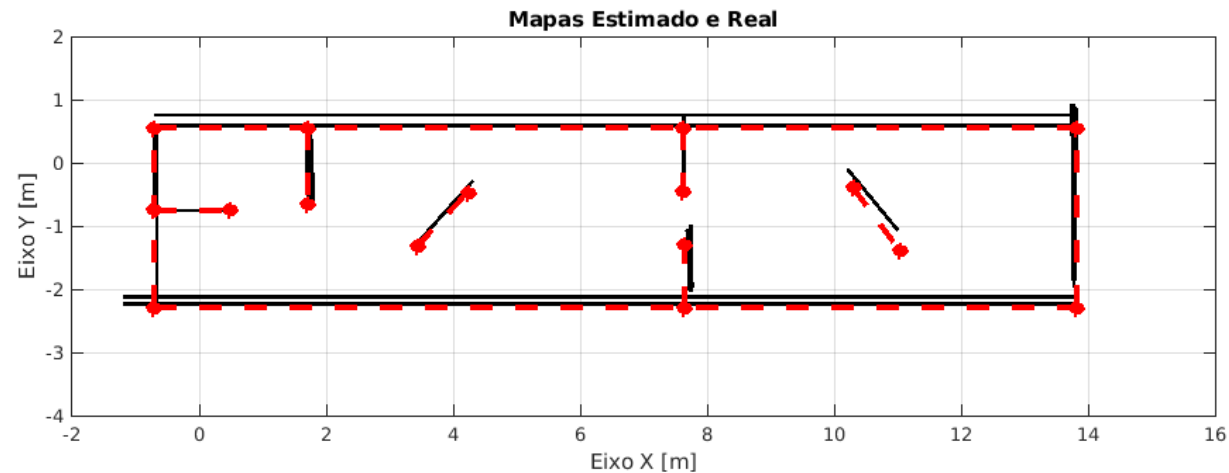


Com junção de segmentos

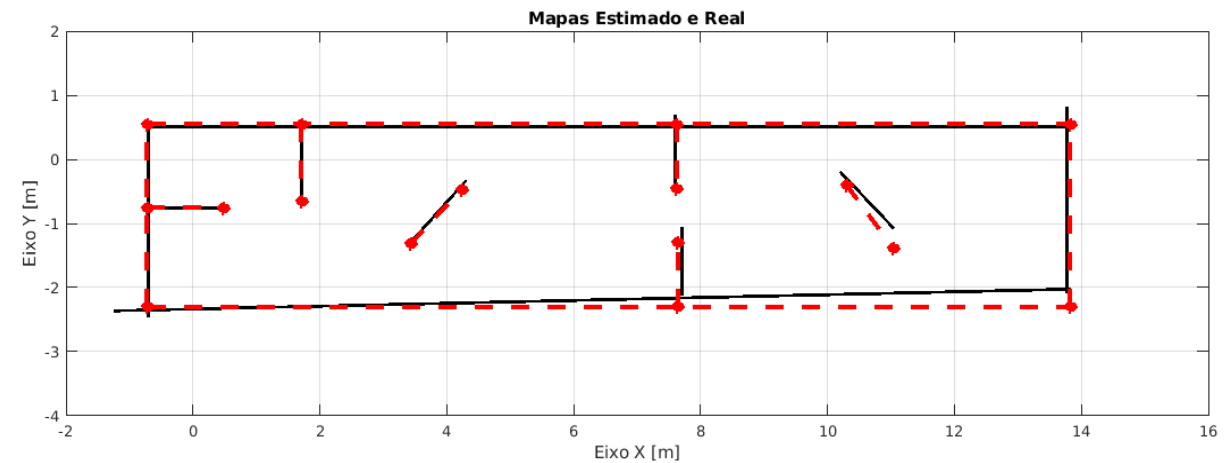


# Experimentos e Resultados Obtidos

## Experimento real: Com *Loop Closure*



Sem junção de segmentos



Com junção de segmentos

## Pontos positivos da solução proposta

- Baixo esforço computacional devido ao processamento eficiente dos dados gerados pelo *scanner a laser*.
- Representação compacta do ambiente obtida pelo uso de segmentos de reta.

## Pontos negativos da solução proposta

- Mapa global do ambiente não inclui objetos arredondados.
- Necessidade de uso de um *scanner a laser* (sensor com baixo nível de ruído, relativo alto custo, rápida resposta, alcance de 8 m).

## Conclusão

- Os resultados de SLAM 2D com correspondência de características dos experimentos simulados e real foram próximos, apresentando erros reduzidos com a técnica de fechamento de laço.
- O experimento real funcionou de forma adequada, indicando que foi atingido o objetivo deste trabalho.

## Trabalhos Futuros

- Resolver o problema de exploração autônoma utilizando o SLAM 2D com correspondência de características.
- Extração de objetos arredondados como cilindros com eixo principal na vertical e objetos retangulares que possuam cantos arredondados.
- Implementação de algoritmo de SLAM usando fusão de sensores, p. ex., LiDAR + bússola digital + odometria.
- Mapeamento 3D do ambiente utilizando câmeras de profundidade.

# Agradecimentos



**LMI**