

## 5 Resultados Experimentais

Os resultados obtidos neste trabalho são apresentados neste capítulo. Para o desenvolvimento deste, foi utilizado um robô móvel ("*iRobot Create*") e um único sensor LRF (*URG – 04LX – UG01*), para obter informação da localização do robô móvel e do mapa por onde este realiza seu movimento, o robô adquire dados do sensor a cada 0,2s em ambientes reais. Os resultados são divididos em : análise de "Correspondência de Varreduras" de dados reais obtidos com um LRF; a solução do problema de SLAM mediante Correspondência de Varreduras; e a solução do problema de SLAM usando o algoritmo DP-SLAM.

### 5.1 Correspondência de Varreduras

Um dos objetivos deste trabalho é a utilização de apenas um sensor (LRF) para determinar a localização do robô móvel e o mapa do ambiente. O algoritmo de Correspondência de Varreduras calcula as estimativas dos parâmetros ( $\Delta x, \Delta y, \Delta \theta$ ), mas o resultado precisa de um sensor de movimento para ser comparado numericamente.

Nas Figuras 5.1-5.7 mostra duas varreduras consecutivas do sensor nas duas primeiras colunas e a terceira coluna a sobreposição delas. Para leituras do sensor em que partes onde os contornos do ambiente apresenta alguma variedade, tais como colunas, portas, corredores perpendiculares ou outras características, o erro da sobreposição é baixo, mas para ambientes com paredes paralelas sem muitas partes diferenciadas, o erro é maior, como pode ser visto na Figura 5.6.

A convergência do processo de otimização através de Evolução Diferencial foi definida como a minimização da função objetivo, ver Equação (2-26), mas para uma boa correspondência de duas leituras, o valor desta função deve ser próxima de zero. Para essa avaliação o desempenho do algoritmo de Correspondência de Varreduras é analisado para dados reais em 7 experimentos.

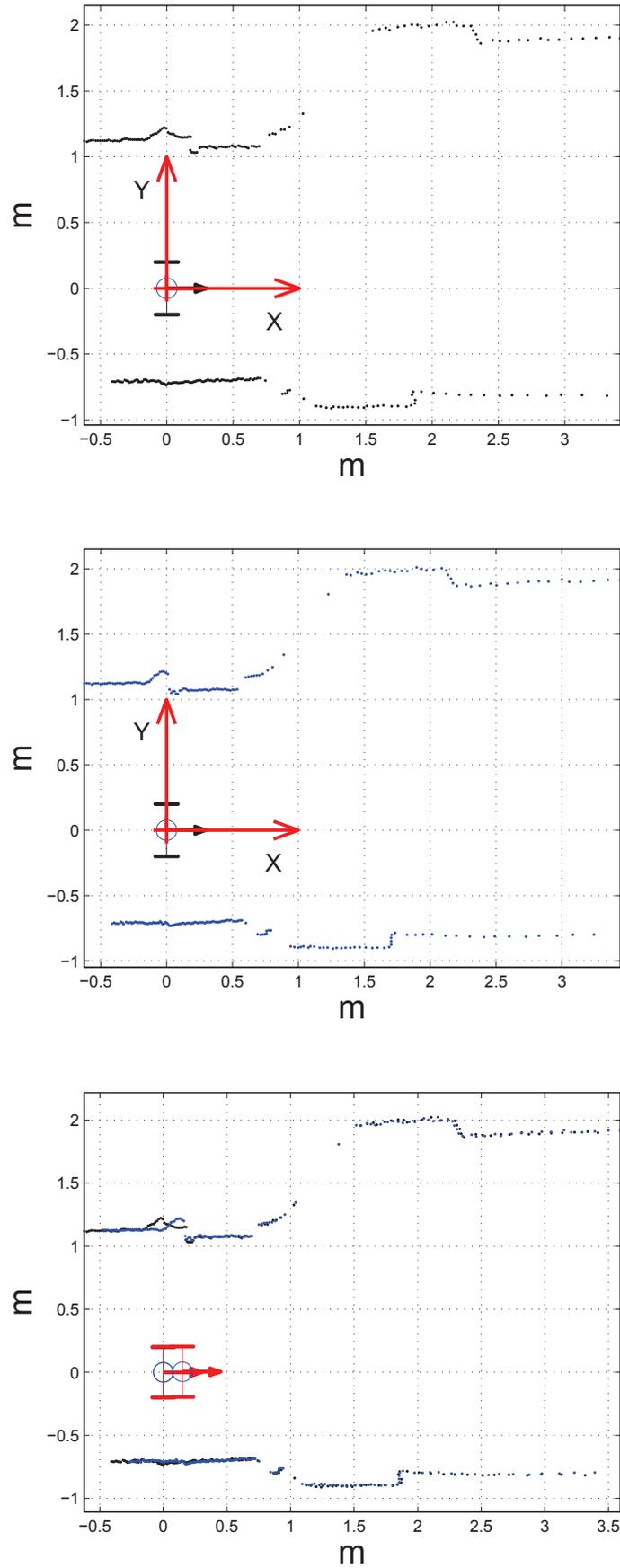


Figura 5.1: Correspondência de Varreduras com dados Reais para Diferentes Situações

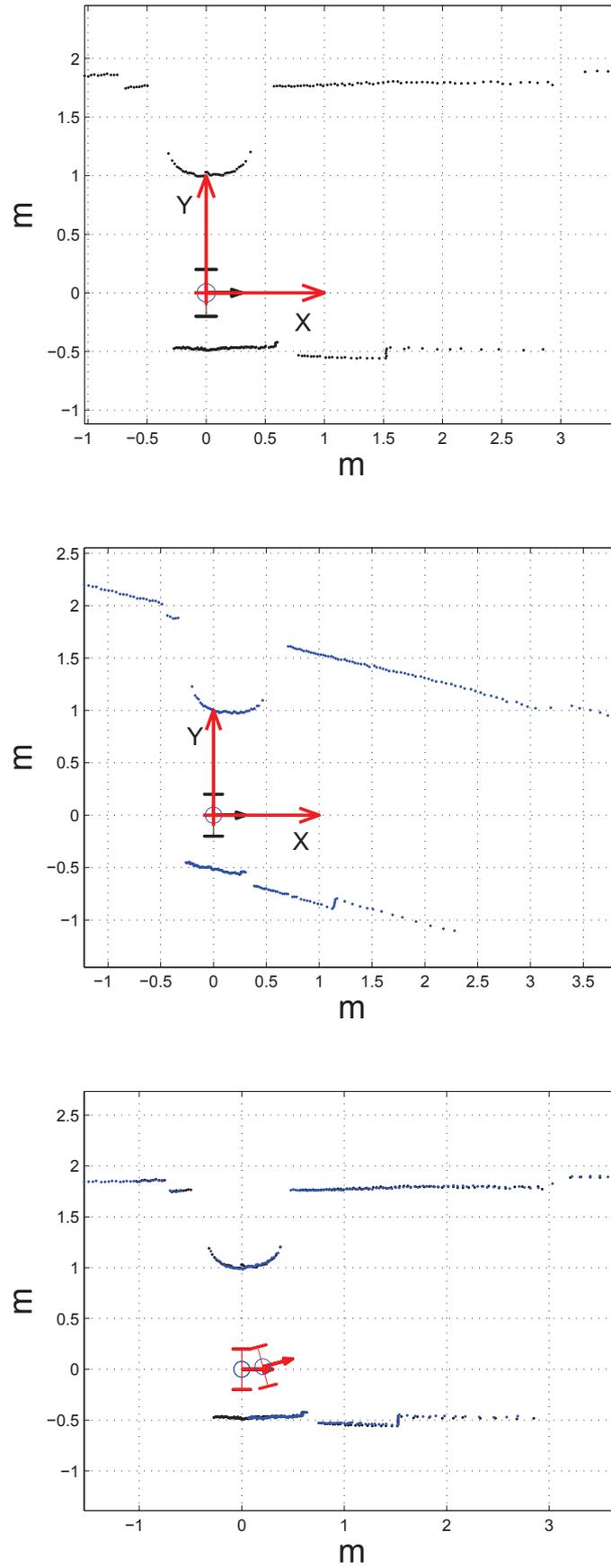


Figura 5.2: Correspondência de Varreduras com dados Reais para Diferentes Situações

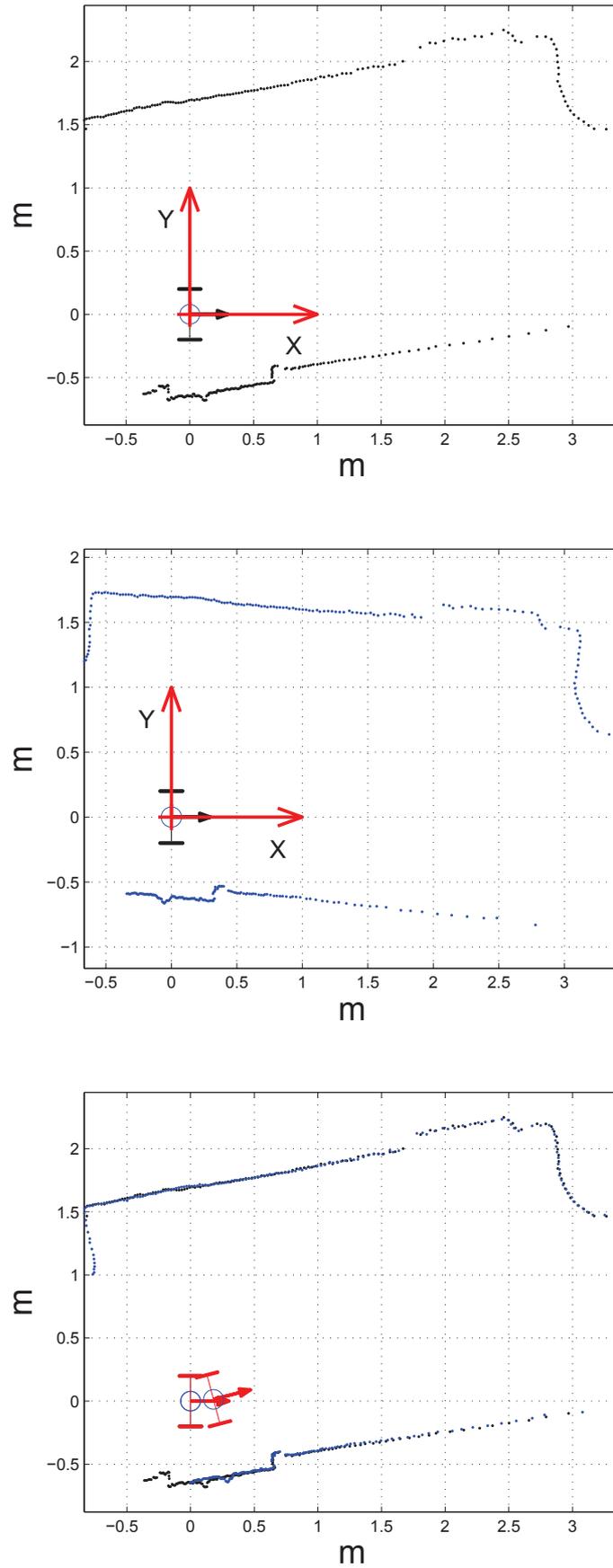


Figura 5.3: Correspondência de Varreduras com dados Reais para Diferentes Situações

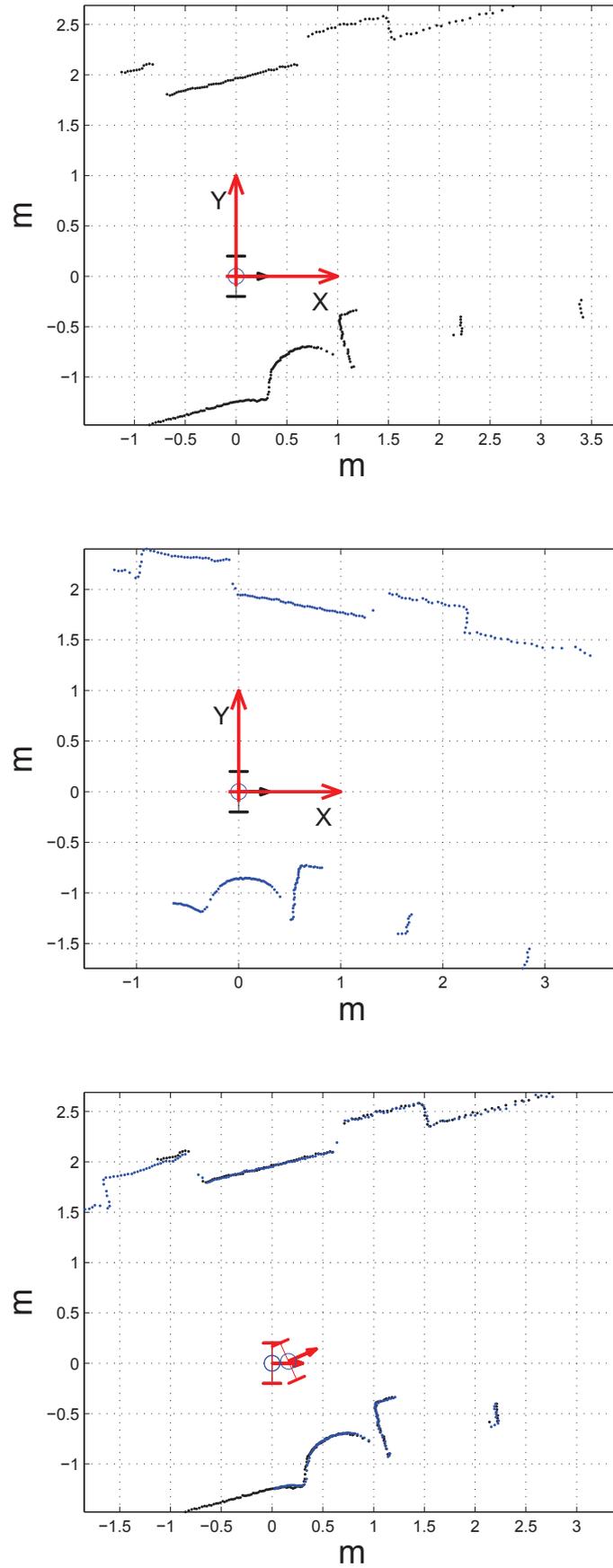


Figura 5.4: Correspondência de Varreduras com dados Reais para Diferentes Situações

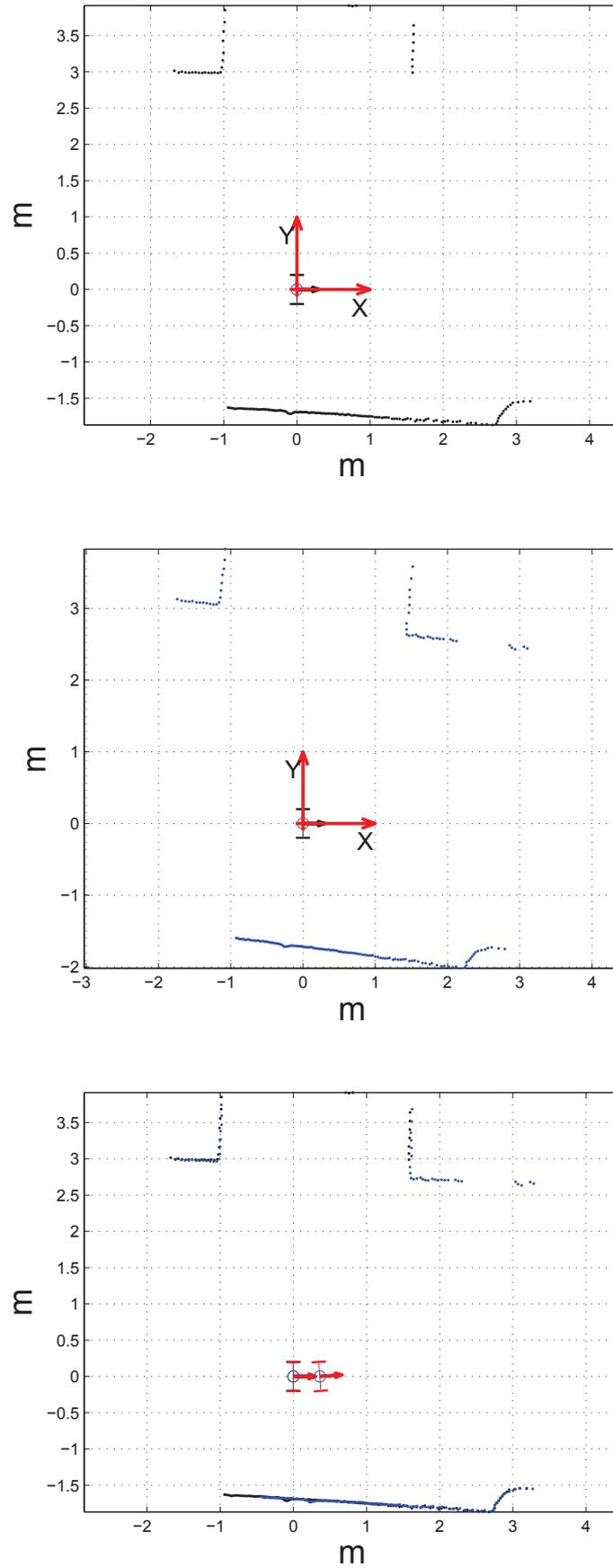


Figura 5.5: Correspondência de Varreduras com dados Reais para Diferentes Situações

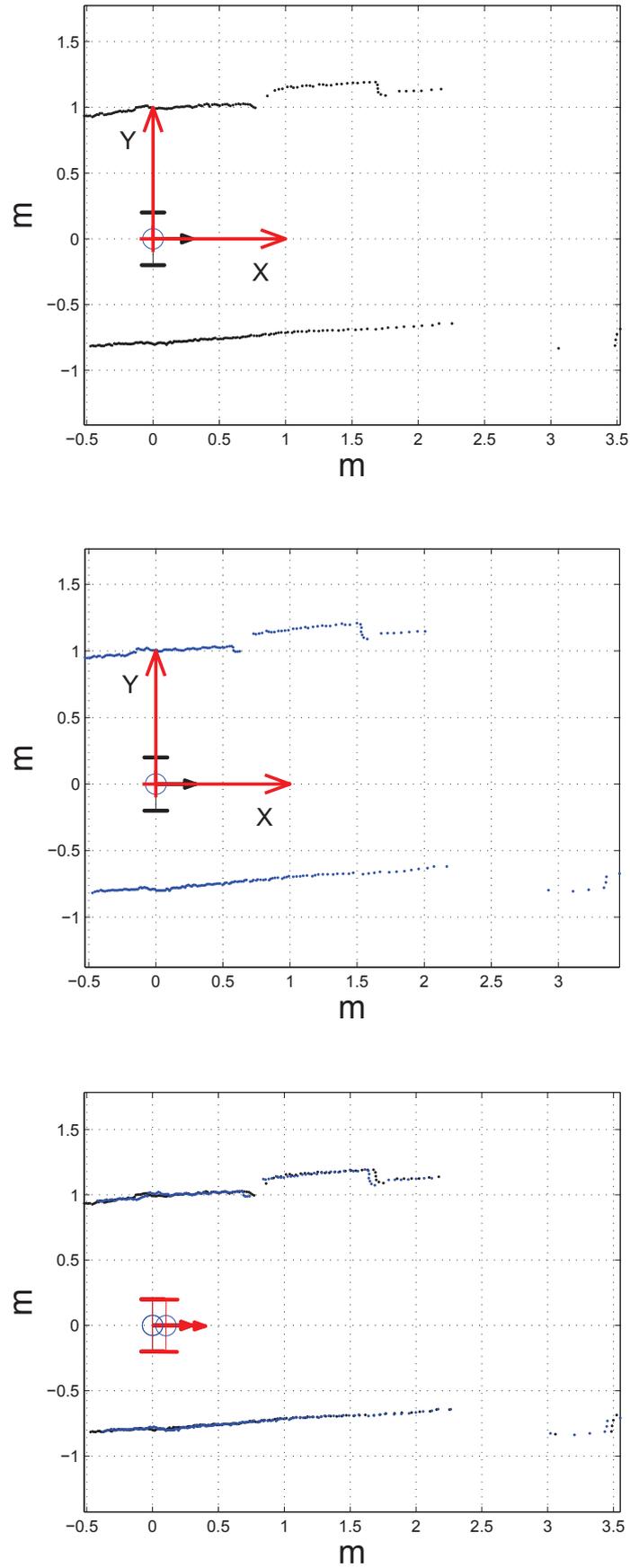


Figura 5.6: Correspondência de Varreduras com dados Reais para Diferentes Situações

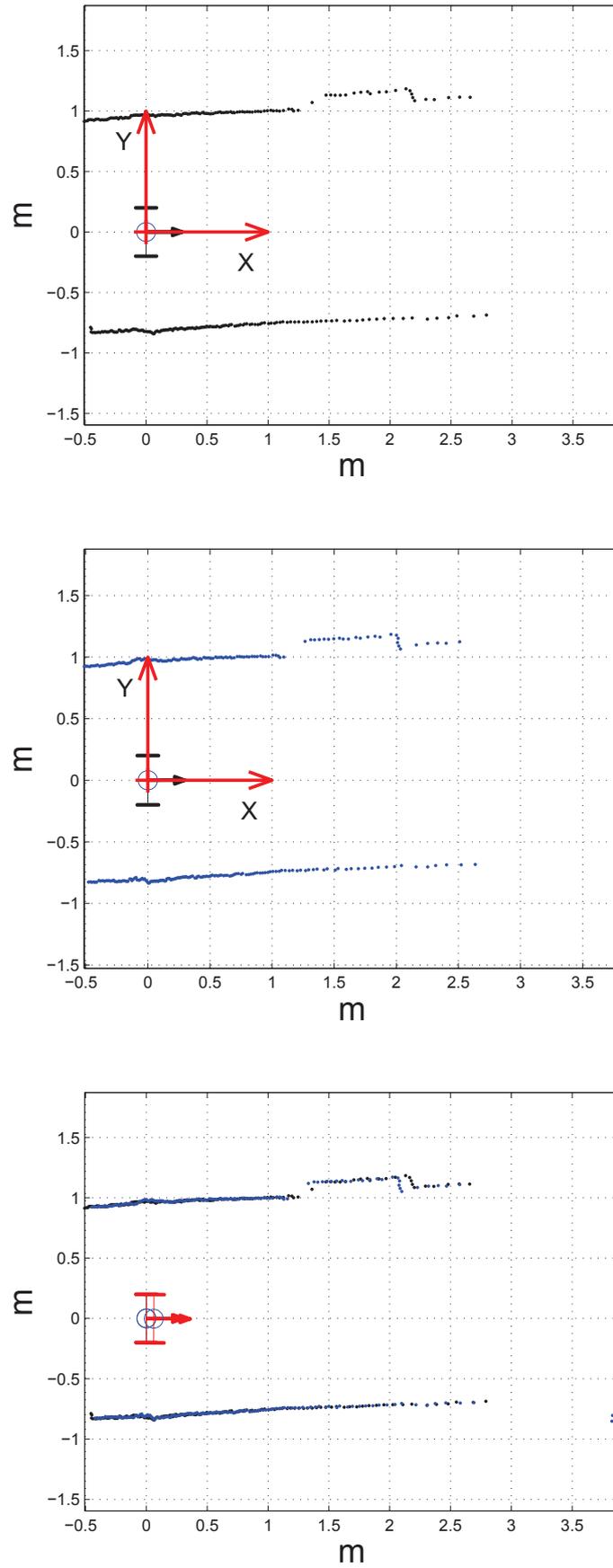


Figura 5.7: Correspondência de Varreduras com dados Reais para Diferentes Situações

O primeiro experimento foi realizado no corredor do quarto andar do Edifício Cardeal Leme da PUC-Rio, onde o robô móvel com o LRF realiza seu movimento e assim captura dados. Nesta experiência, o número de leituras feitas pelo sensor foi 376, em diferentes posições do robô móvel.

O deslocamento do robô móvel é conseguido tomando duas leituras consecutivas e aplicando algoritmo de Correspondência de Varreduras. Assim, para este experimento foram aplicadas 375 sobreposições das leituras, e cada uma delas apresenta um valor numérico de sobreposição dado pela função objetivo do processo de otimização por Evolução Diferencial. A Figura 5.8 mostra o valor da função objetivo para cada deslocamento do robô móvel. Podemos ver que a maioria dos deslocamentos apresentam um valor entre 0 e 15, assim esses deslocamentos têm uma grande probabilidade de gerar um erro pequeno "Boa sobreposição entre duas leituras", assim um valor alto da função objetivo pode ser o sinal de uma sobreposição ruim.

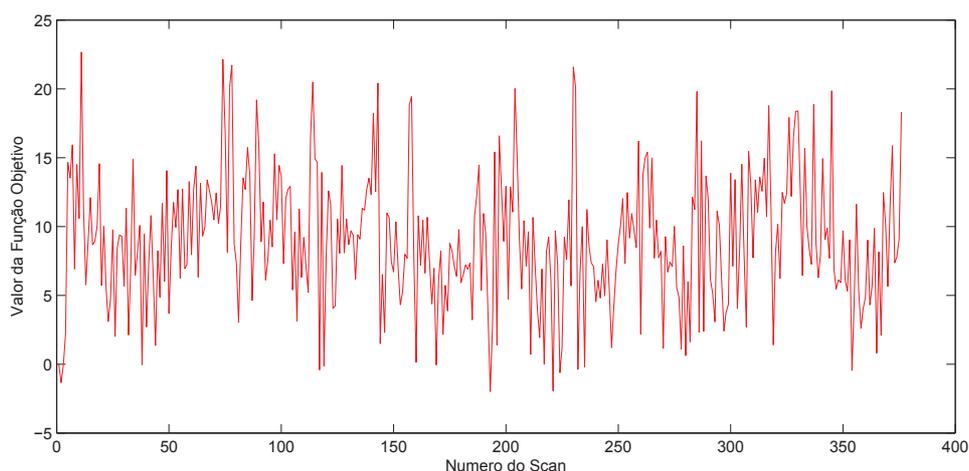


Figura 5.8: Valor numérico da Função Objetivo do Primeiro Experimento

Do mesmo modo, foram realizadas outras seis experiências, todas em ambientes internos (corredores) da PUC-Rio. A Tabela 5.1 mostra o ambiente testado e a quantidade de leituras que o robô móvel com o LRF capturou durante o seu movimento.

As Figuras 5.8, 5.10, 5.9 e 5.11 mostram o valor da função objetivo para cada deslocamento do robô móvel em cada experiência. Aqui também podemos ver que a maioria dos deslocamentos apresenta um valor entre 0 e 15, o qual indica que esses deslocamentos têm uma grande probabilidade obter um erro pequeno.

Tabela 5.1: Tabela das Experiências Realizadas.

Experiência	Local	Número de Leituras
1	4º Andar CARDEAL LEME PUC-Rio	376
2	4º Andar CARDEAL LEME PUC-Rio	557
3	1º Andar CARDEAL LEME PUC-Rio	290
4	1º Andar CARDEAL LEME PUC-Rio	964
5	1º Andar KENNEDY PUC-Rio	262
6	1º Andar CARDEAL LEME PUC-Rio	324
7	1º Andar KENNEDY PUC-Rio	772

Tabela 5.2: Percentual de leituras com função Objetivo maior que 20.

Experiência	Número de Leituras	$F_{Obj} > 20$	%
1	376	9	2.40%
2	557	9	1.62%
3	290	5	1.72%
4	964	24	2.49%
5	262	14	5.34%
6	324	14	4.32%
7	772	25	3.24%

Para melhor compreensão dos resultados, podemos definir um valor de referência experimentalmente, que pode indicar se a sobreposição foi boa ou ruim. De acordo com as experiências, este valor é estimado por 20. A Tabela 5.2 mostra o número de deslocamentos onde a função objetivo (ED) de sobreposição é maior que 20 para cada experiência.

Nem todos os valores elevados da função objetivo pelo processo de otimização indicam uma sobreposição errada, em termos gerais, um valor próximo de zero indica que a maior parte das duas leituras foram correlacionadas, mas como o robô móvel está sempre em movimento, as leituras dos sensores contêm diferentes partes do meio ambiente. Por outro lado, como as leituras são consecutivas, elas deveriam conter uma grande parte comum do ambiente, que deve ser sobreposta.

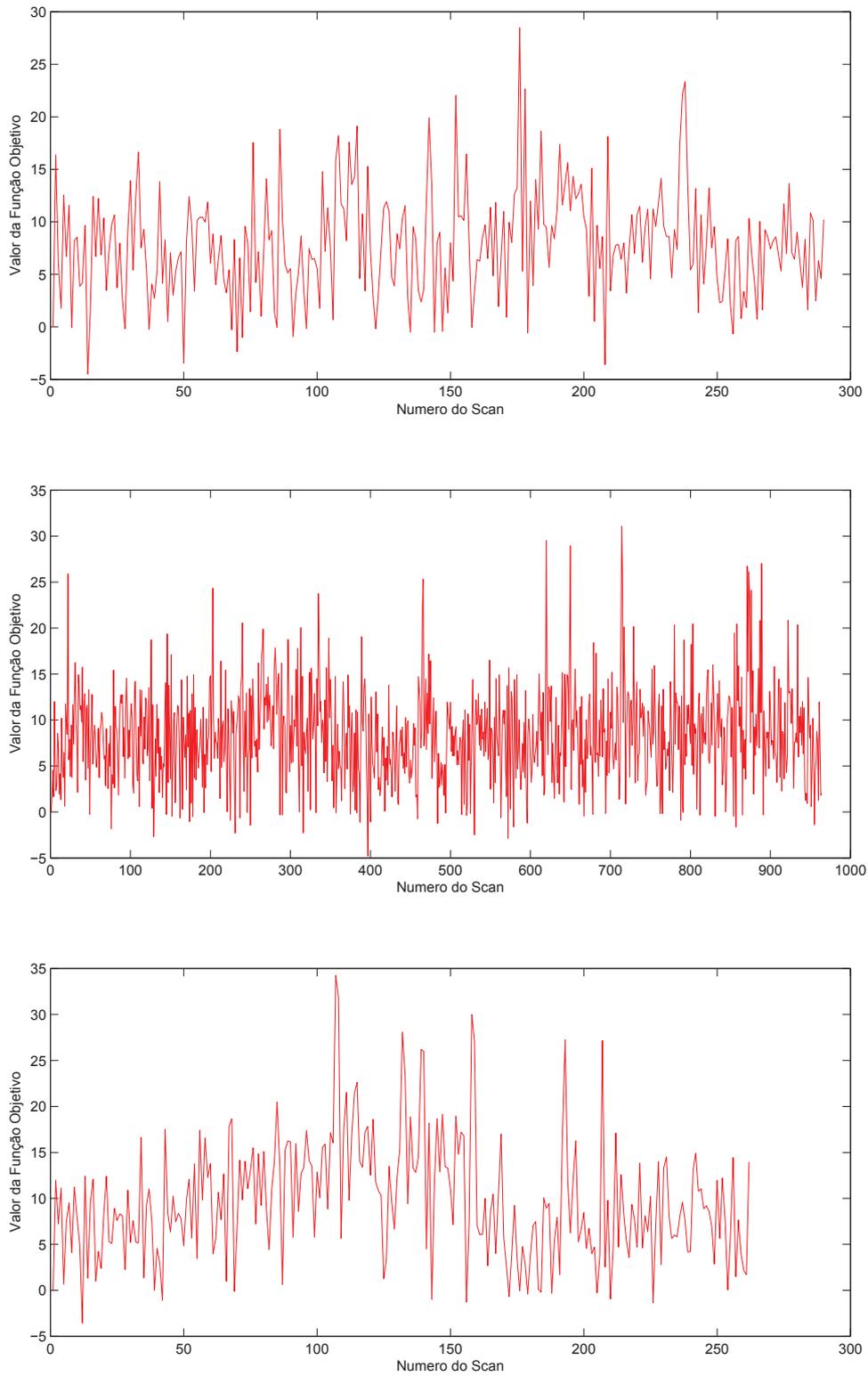


Figura 5.9: Correspondência de Varreduras com dados Reais para as Experiências 3,4 e 5

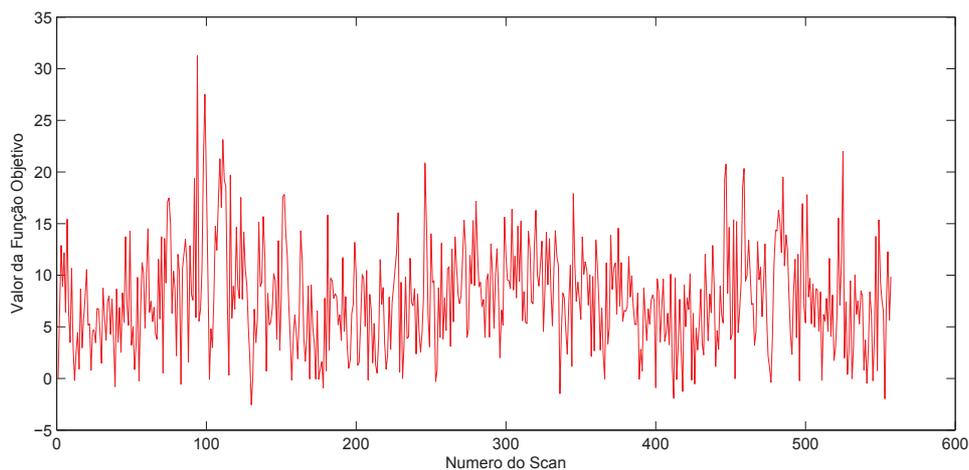


Figura 5.10: Valor numérico da Função Objetivo do Segundo Experimento

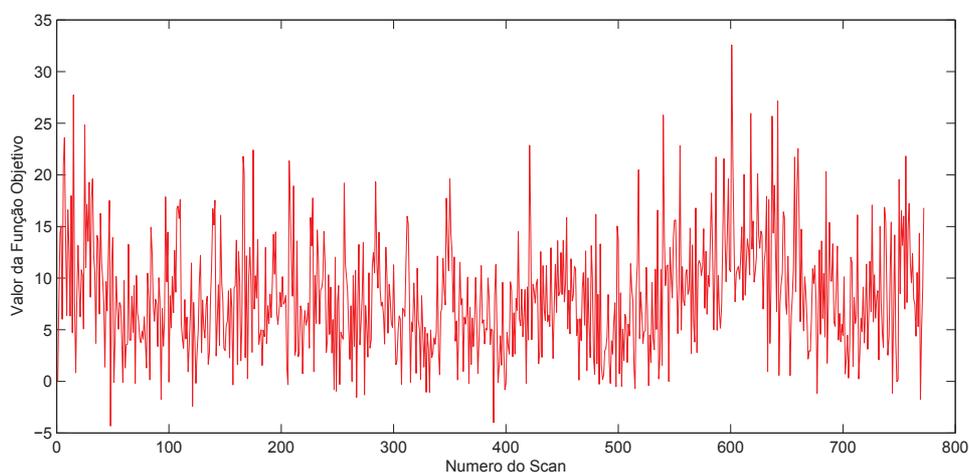


Figura 5.11: Correspondência de Varreduras com dados Reais (Experiência 7)

## 5.2 SLAM mediante Correspondência de Varreduras

Similarmente, para obter o mapa e a trajetória do robô móvel usando o algoritmo de Correspondência de Varreduras, é necessário fazer uma transformação de coordenadas de cada deslocamento do robô móvel. Assumindo assim que a posição inicial do robô móvel é  $(0,0)$ , a Figura 5.12 mostra a sua localização mediante os pontos vermelhos e o mapa mediante pontos azuis para parte do corredor no quarto andar do Prédio Cardeal Leme da PUC-Rio. É importante ressaltar que este ambiente apresenta duas paredes paralelas, uma delas com poucas características, o que faz o algoritmo de Correspondência de Varreduras ter dificuldade no momento de fazer a sobreposição de duas leituras consecutivas do sensor. Apesar disso, o mapa gerado fornece um esboço do mapa real.

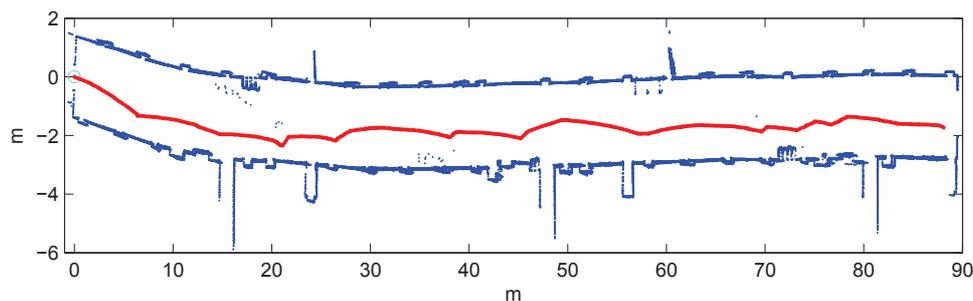


Figura 5.12: SLAM para dados reais usando Correspondência de Varreduras: Edifício Cardeal Leme 4º Andar PUC-Rio

A Figura 5.13 mostra o mapeamento do corredor no primeiro andar do Prédio Cardeal Leme da PUC-Rio, e também a trajetória do robô móvel. Ao contrário do corredor do quarto andar mapeado na Figura 5.12, neste corredor as duas paredes paralelas tem características (colunas e armários) que facilitam a sobreposição.

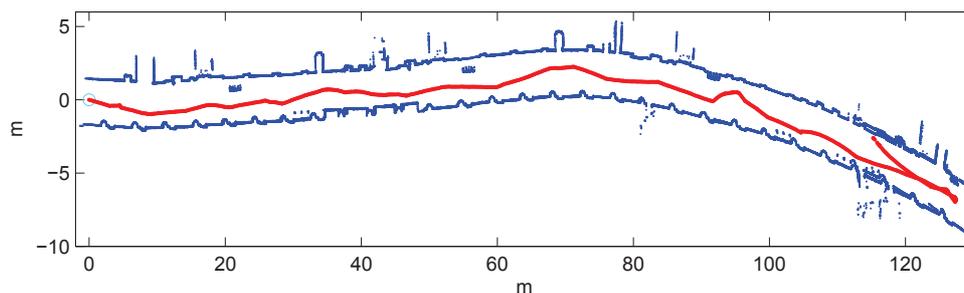


Figura 5.13: SLAM para dados reais usando Correspondência de Varreduras: Edifício Cardeal Leme 1º Andar PUC-Rio

Em ambos os experimentos, os corredores eram basicamente constituídos de paredes quase paralelas. As únicas características foram algumas colunas, portas pequenas e escadas, mas sem quinas ou corredores perpendiculares. A Figura 5.14 mostra outro ambiente com estas características. O ambiente onde o teste foi feito é o corredor do primeiro andar no Edifício Kennedy da PUC-Rio. Como se pode ver este corredor apresenta caminhos perpendiculares, colunas grandes e também paredes paralelas sem muitas características. Durante o movimento do robô móvel neste ambiente, o robô passa duas vezes por uma parte do mapa, mas é capaz de distinguir ambas as excursões

Assim, para os três ambientes testados, o algoritmo de Correspondência de Varreduras gera um mapa aproximado e estima bem a localização do robô móvel dentro do mapa. Estes mapas podem ser melhoradas usando uma repre-

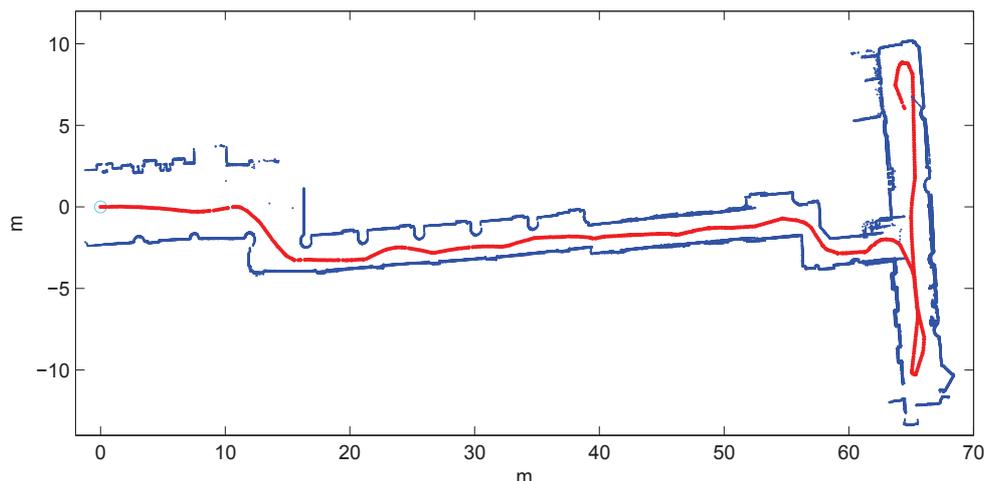


Figura 5.14: SLAM para dados reais usando Correspondência de Varreduras: Edifício Kennedy 1º Andar PUC-Rio

sentação de grade de ocupação.

### 5.3

#### Mapeamento e Localização usando DP-SLAM

O algoritmo DP-SLAM fornece um mapeamento de maior qualidade para um ambiente. Assim com a adição do modelo de movimento, descrita no capítulo 4 e as leituras do sensor LRF, nesta seção apresentamos 2D mapas, para ambientes reais onde o teste foi realizado.

Os parâmetros do algoritmo DP-SLAM usados para todos os experimentos realizados estão na Tabela 4.4, estes parâmetros são recomendadas em [4].

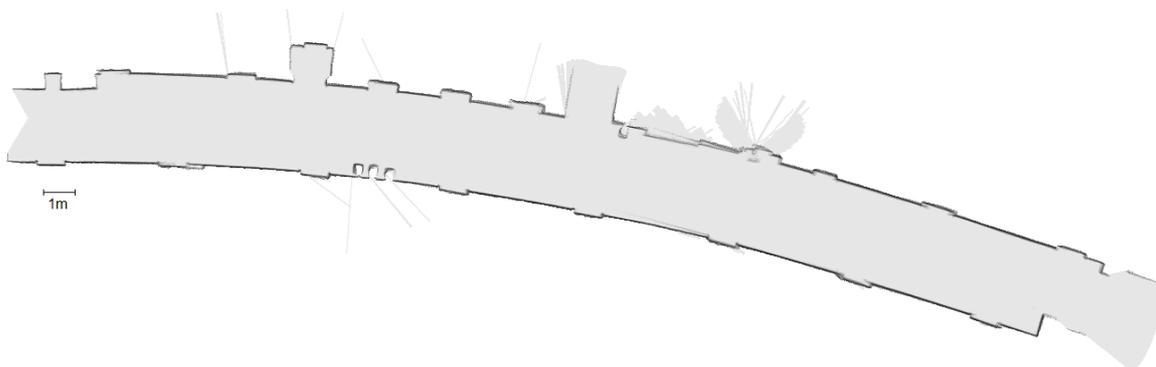


Figura 5.15: Mapa 2D do ambiente da primeira experiência obtido usando o algoritmo DP-SLAM

Para obter mapas dos ambientes reais com o algoritmo DP-SLAM, usamos os dados dos experimentos descritos na Tabela 5.1. A Figura 5.15 mostra o mapa

gerado com uma resolução de  $1m = 35\text{grades}$  para o experimento 1 do Prédio Cardeal Leme no 4º andar na PUC-Rio.

A segunda experiência em um ambiente real é mostrada na Figura 5.16, semelhante à experiência 1, referente ao corredor do 4º andar do Prédio Cardeal Leme da PUC-Rio, mas com trajeto do robô móvel bem mais longo. Para uma melhor visualização, o mapa completo é particionado em 4, ver Figura 5.19.

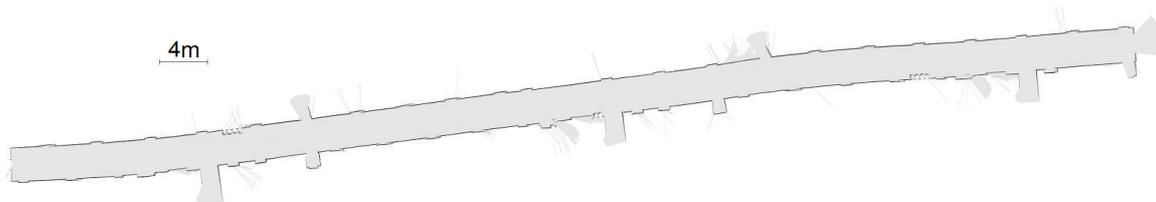


Figura 5.16: Mapa 2D do ambiente da segunda experiência obtido usando o algoritmo DP-SLAM



Figura 5.17: Mapa 2D do ambiente da quinta experiência obtido usando o algoritmo DP-SLAM

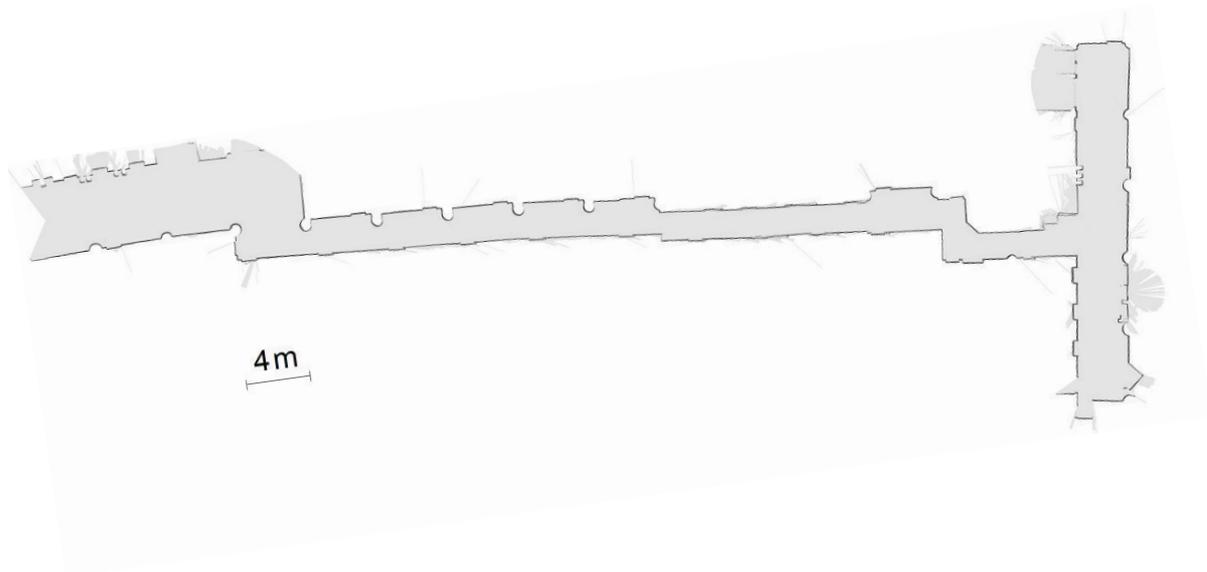


Figura 5.18: Mapa 2D do 1º andar do Prédio Kennedy usando o algoritmo DP-SLAM

O mapa gerado usando os dados da quarta experiência feita no 1º Andar do Prédio Cardeal Leme da PUC-Rio é apresentado na Figura 5.20 (a), o qual mostra o corredor deste prédio, que para uma melhor visualização é dividido em 3 partes. Neste mapa, Observam-se mais claramente as colunas, as portas, elevadores, as lixeiras, entre outras características, permitindo a criação de um melhor mapa.

Os primeiros mapas apresentados até agora são longos corredores que têm paredes quase paralelas, com algumas características menores. Mas as experiências 5 e 7, por outro lado, inclui corredores que apresentam trechos perpendiculares.

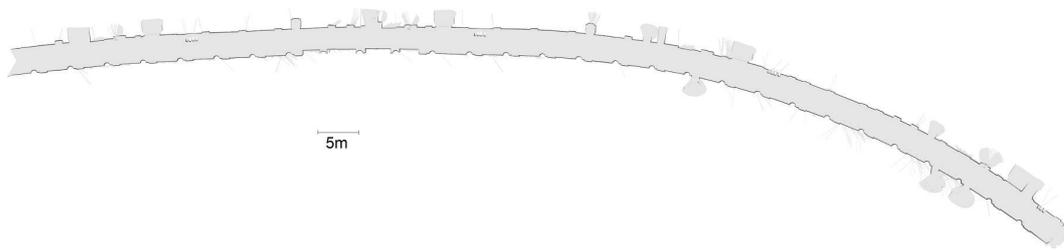
A Figura 5.17 mostra o mapa 2D de uma parte do corredor do 1º andar do Prédio Kennedy da PUC-Rio. Neste figura se pode ver que o algoritmo é capaz de gerar mapas mesmo na presença de corredores perpendiculares.

As Figuras 5.17 e 5.18 mostram o mapa do corredor do Prédio Kennedy (1º andar). Este corredor, além de possuir colunas, portas e algumas características, apresenta caminhos perpendiculares e curvas.

Por causa da longa viagem do robô móvel para executar este teste, o mapa gerado é dividido em três, para uma melhor visualização, ver Figura 5.21. Nesta figura na primeira partição do mapa, (a), podemos ver um mapeamento sem muita ambiguidade. Ao contrário da segunda partição, (b), onde no lado direito,



Figura 5.19: Detalhes do Mapa 2D do ambiente da segunda experiência obtido usando o algoritmo DP-SLAM



5.20(a): Mapa 2D do ambiente Completo

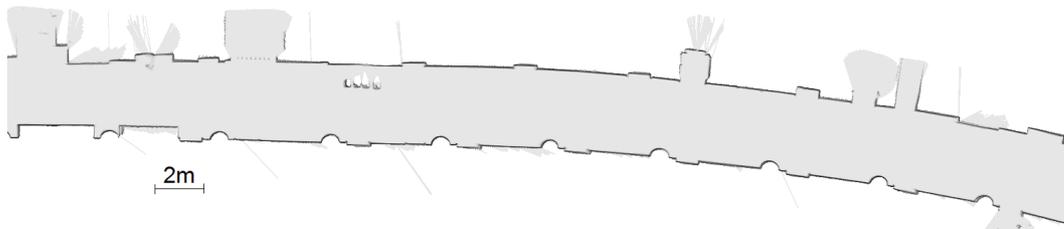
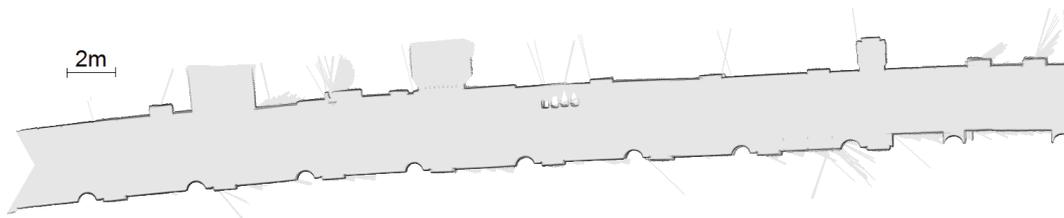


Figura 5.20: Detalhes do Mapa 2D do ambiente da quarta Experiência obtido usando o algoritmo DP-SLAM:

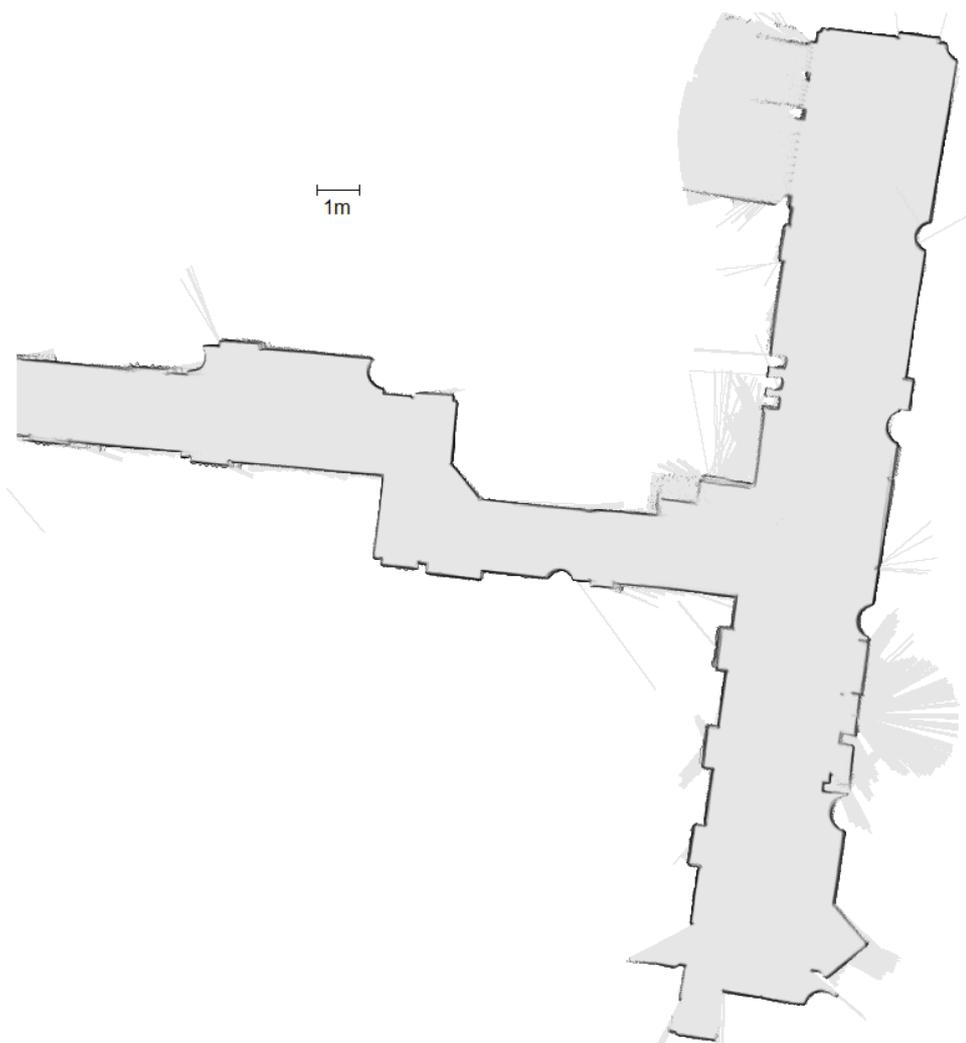
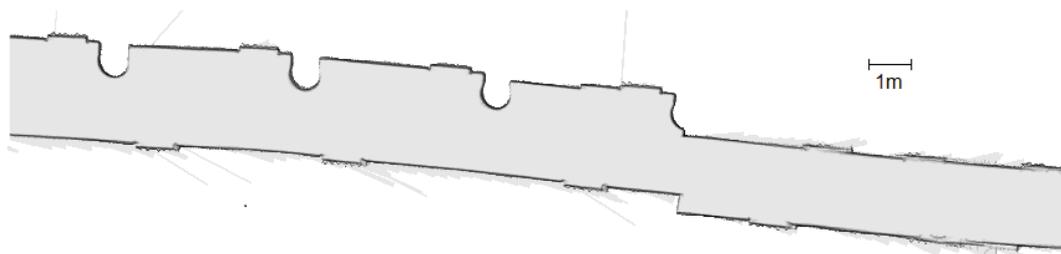
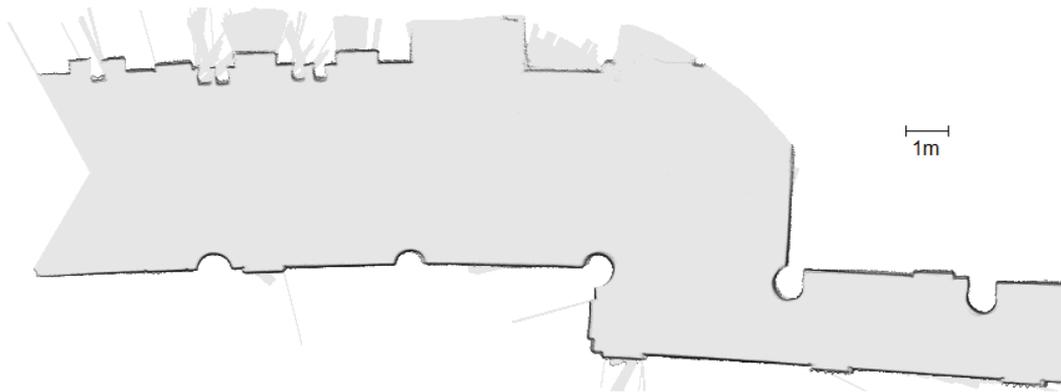


Figura 5.21: Detalhes do Mapa 2D do ambiente da sétima experiência obtido usando o algoritmo DP-SLAM

há paredes paralelas que causam erro no processo de sobreposição, o que causou ambiguidade nesta seção do mapa. O mesmo efeito ocorre na parte inicial da terceira partição do mapa, (c).

#### 5.4

#### Comparação com Plantas Baixas

Os mapas obtidos no presente trabalho podem ser comparados com as plantas baixas originais das instalações onde cada experiência teve lugar, disponibilizadas pelo Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio. As 7 experiências da Tabela 5.1 foram realizadas em três corredores da PUC-Rio, 2 no Prédio Cardeal Leme e 1 no Prédio Kennedy.

Assim a Figura 5.22 mostra a sobreposição do mapa criado por DP-SLAM com a planta baixa do quarto pavimento do Prédio Cardeal Leme da PUC-Rio. Um desalinhamento entre estes mapas pode ser observado, devido ao movimento longo do robô móvel. Este mapa corresponde à experiência número 1 da Tabela 5.1.

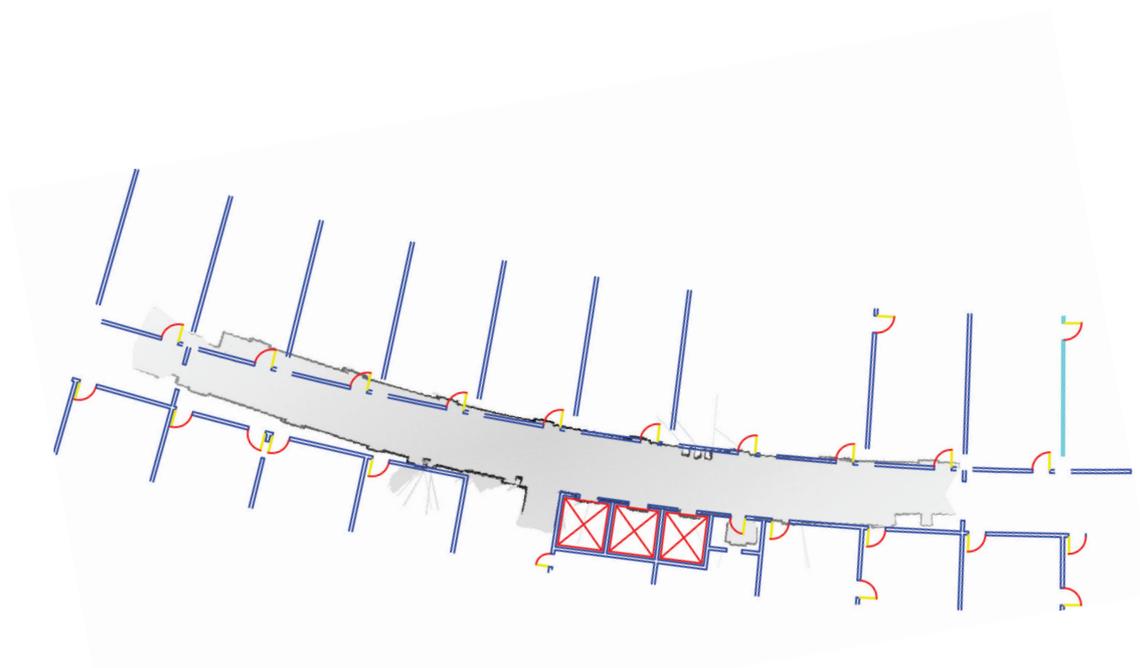
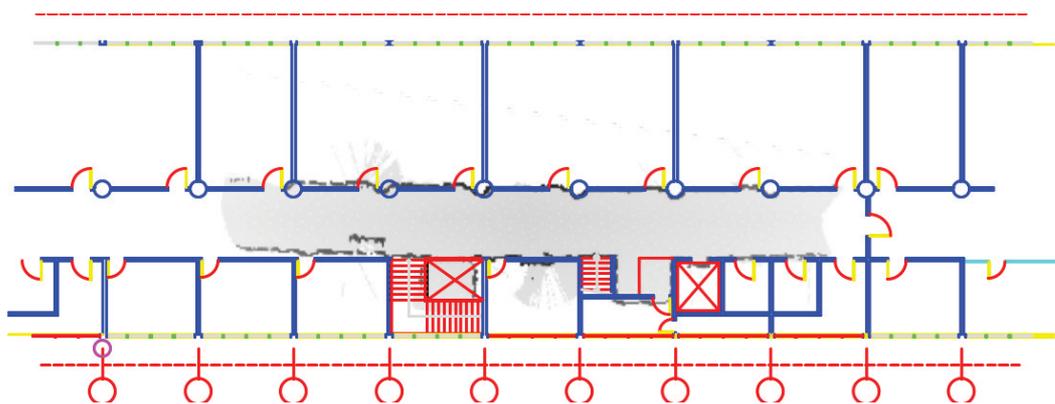
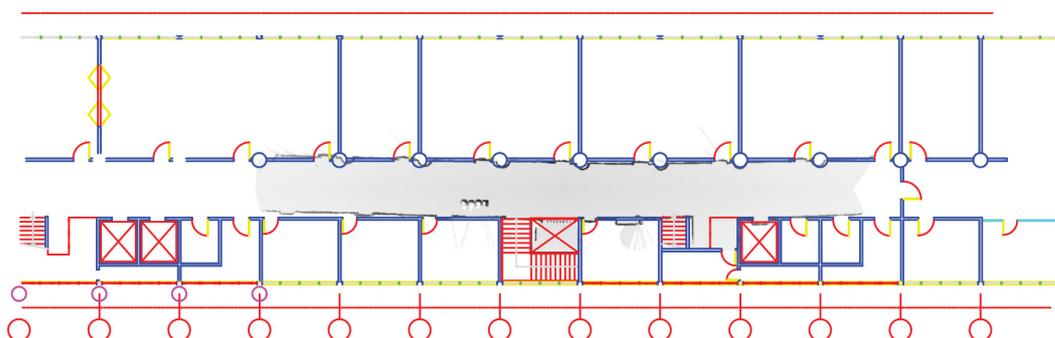


Figura 5.22: Sobreposição de mapas do Prédio Cardeal Leme 4º andar (Experimento 1)

A Figura 5.23 mostra a comparação dos mapas criados neste trabalho com a planta baixa do primeiro pavimento do Prédio Cardeal Leme da PUC-Rio. A



5.23(a): Experiência 3



5.23(b): Experiência 4

Figura 5.23: Sobreposição de mapas do Prédio Cardeal Leme 1º andar

Figura 5.23 (a) corresponde à experiência número 3 da Tabela 5.1, e a Figura 5.23 (b) a uma parte da experiência número 4, semelhante à Figura 5.22, associada a corredores longos. Note-se que, nestas experiências, as paredes são quase paralelas e a trajetória do robô móvel é praticamente em uma só direção, o que prejudica a qualidade do mapa criado.

A Figura 5.24 mostra a sobreposição do mapa criado por DP-SLAM com a planta baixa do primeiro pavimento do Prédio Kennedy da PUC-Rio. Este ambiente apresenta melhores resultados que os anteriores, devido à variedade de características que possui.

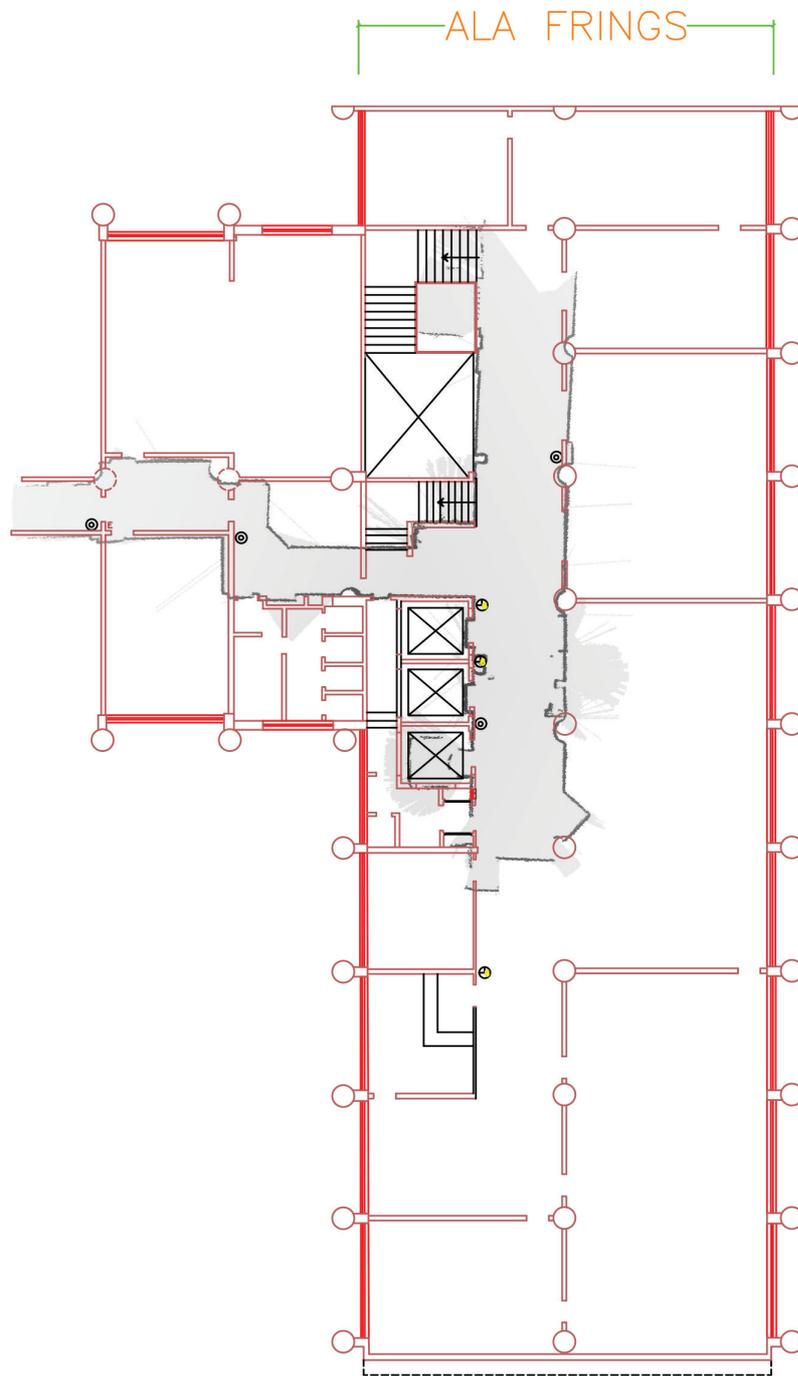


Figura 5.24: Sobreposição de mapas do Prédio Kennedy 1º andar