



TÉCNICO
LISBOA

Agrupamento de trajetórias de peões

José Andrez Ferra de Figueiredo Madureira

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador(es): Prof. Alexandre José Malheiro Bernardino
Prof. Jorge dos Santos Salvador Marques

Júri

Presidente: Prof.

Orientador: Prof.

Vogal: Prof.

Maio 2019

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

Agradecimentos

Aos meu orientadores, Professor Alexandre José Malheiro Bernardino e Professor Jorge dos Santos Salvador Marques, pelo apoio, importantes contribuições e paciência no decorrer da presente dissertação.

Aos meus amigos e colegas de curso, pelo apoio, amizade e companheirismo ao longo desta etapa.

À minha namorada, Sara Moreira, pelo carinho e apoio que me deu nos momentos mais difíceis, mostrando que eu era capaz de atingir este grande objetivo.

À minha família, pelo esforço que fizeram para me proporcionar uma boa formação acadêmica e por acreditarem sempre em mim.

A todos eles, muito obrigado.

Resumo

Este trabalho estuda a representação e agrupamento de trajetórias. Este tipo de análise tem grande interesse em várias áreas (estudo de atividades humanas, estudo de padrões de comportamento de animais, meteorologia, etc.). Nesta tese é proposto um método de agrupamento de trajetórias baseado em campos vetoriais, com comutações entre estes campos. Para tal utiliza-se a informação dos percursos registados num cenário. Com esses dados, o método agrupa estas trajetórias em vários clusters e após isso verifica a existência um ou mais campos que descrevam cada parte de uma trajetória, verificando-se assim a existência, ou não, de comutações entre campos. A deteção de comutações consiste em testar várias decomposições de uma trajetória e segmentos independentes, e verificar qual delas é melhor descrita por uma sequência adequada de campos, dentro de um limite de comutações entre campos que é imposto. O método proposto foi testado com dados sintéticos simulados a partir de um cenário real e com dados reais registados no campus do IST.

Palavras-chave: trajetórias, campos vetoriais, comutações de campos, agrupamento de trajetórias de peões

Abstract

This work studies the representation and clustering of trajectories. This kind of analysis has great interest in several investigation fields (such as study of human activities, study of patterns of animal behaviour, meteorology, etc.). In this thesis is proposed a method of grouping trajectories based on vector fields, with switching between these fields. For this propose, we use the information of resgistered human trajectories in a given scenario. With these data, the method can organize these paths into several clusters and after this, it's verified the existence of one or more fields that describe each part of a trajectory, thus verifying the existence, or not, of switches between fields. Switch detection consists in testing several decompositions of a trajectory and independent segments and verifying which one is best described by an appropriate sequance of fields within a limit of switches imposed by the method. This suggest method was with simulated synthetic data from a real scene and with reald tracked data on the IST campus.

Keywords: trajectories, vector fields, swicthing, trajectory clustering

Conteúdo

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	ix
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Figuras	xiv
Lista de Símbolos	xvi
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos gerais e contribuições	3
1.3 Estrutura	3
2 Metodologias	5
2.1 Formulação do problema	5
2.1.1 Trajetória	5
2.1.2 Campos vetoriais	6
2.1.3 Estimação da Energia de Erro	8
2.2 Vector Field k-Means	9
2.2.1 Atribuição de trajetórias	9
2.2.2 Atualização de campos vetoriais	9
2.2.3 Critério de convergência	10
2.3 Comutação de trajetórias	10
2.3.1 Determinação de energias de erro parciais	10
2.3.2 Determinação de energias de erro totais	11
2.3.3 Determinação do instante de comutação	12
2.3.4 Integração com método Vector Field k-Means	13
3 Experiências	15
3.1 Experiência 1 (dados sintéticos)	15
3.2 Experiência 2 (dados reais)	16

4	Resultados	19
4.1	Experiência 1 (dados sintéticos)	19
4.1.1	Sem comutações	19
4.1.2	Uma comutação permitida	21
4.2	Experiência 2 (dados reais)	24
4.2.1	Sem comutações	24
4.2.2	Uma comutação permitida	26
4.2.3	Duas comutações permitidas	29
5	Conclusões e trabalho futuro	33
A	Inicialização do modelo	A.1

Lista de Tabelas

2.1	Energias de erro parciais do exemplo	11
2.2	Energias totais de erro ($k_1 = 1 \rightarrow k_2 = 2$)	12
2.3	Energias totais de erro ($k_1 = 2 \rightarrow k_2 = 1$)	12
2.4	Energias mínimas de cada conjunto de campos	12

Lista de Figuras

1.1	Cenário de cruzamento	2
1.2	Cenário de rotunda	2
2.1	Modelo linear por troços (curva azul) de uma trajetória contínua (curva vermelha)	6
2.2	Trajetoária original (esquerda) e trajetória segmentada (direita)	6
2.3	Exemplo de campo vetorial associado a uma grelha 3×3	7
2.4	Interpolação de campo vetorial num ponto $\alpha(t)$ não pertencente à grelha G	7
2.5	Campos vetoriais e trajetórias atribuídas a cada campo (sem comutação)	9
2.6	Exemplo de trajetória definida por 9 pontos	11
2.7	Campos vetoriais inicializados para o exemplo	11
2.8	Resultado final do exemplo de comutação	13
2.9	Fluxograma do modelo proposto, as alterações impostas pelo método de determinação de comutações estão mais carregadas	14
3.1	Cruzamento de veículos utilizado como base para conjunto de dados sintéticos	15
3.2	Conjunto de trajetórias sintéticas (círculos verdes: início da trajetória; círculos vermelhos: final da trajetória)	16
3.3	Conjunto de trajetórias captadas no IST com correção geométrica (círculos verdes: início da trajetória; círculos vermelhos: final da trajetória)	17
4.1	Trajetoárias sintéticas sem comutações (círculos verdes: início da trajetória; círculos vermelhos: final da trajetória)	20
4.2	Campos vetoriais obtidos sem comutações, para trajetórias sintéticas	20
4.3	Trajetoárias sintéticas com uma comutação permitida (círculos verdes; início da trajetória; círculos vermelhos; final da trajetória; (*): ponto de comutação da trajetória)	21
4.4	Campos vetoriais obtidos com uma comutação permitida para os dados sintéticos (trajetoárias verdes: partes de trajetórias que comutaram de campo e trajetórias vermelhas: trajetórias que não comutaram)	22
4.5	Trajetoárias que comutaram entre campos na experiência com dados sintéticos (círculos verdes: início da trajetória; círculos vermelhos: final da trajetória; Vermelho: Campo 1; Verde: Campo 2; Azul: Campo 3; Magenta: Campo 4)	23

4.6	Trajétórias reais sem comutações (círculos verdes: início da trajetória; círculos vermelhos: final da trajetória)	24
4.7	Campos vetoriais obtidos sem comutações de trajetórias (dados reais)	25
4.8	Trajétórias reais com uma comutação permitida (círculos verdes; início da trajetória; círculos vermelhos; final da trajetória; (*): ponto de comutação da trajetória)	26
4.9	Campos vetoriais obtidos com uma comutação permitida com os dados reais (trajetórias verdes: partes de trajetórias que comutaram de campo e trajetórias vermelhas: trajetórias que não comutaram)	27
4.10	Trajétórias que sofreram comutação na experiência com dados reais e uma comutação permitida (círculos verdes; início da trajetória; círculos vermelhos; final da trajetória; Vermelho: Campo 1; Amarelo: Campo 2; Verde: Campo 3; Azul ciano: Campo 4; Azul: Campo 5; Magenta: Campo 6)	28
4.11	Trajétórias reais com duas comutações permitidas (círculos verdes; início da trajetória; círculos vermelhos; final da trajetória; (*): ponto de comutação da trajetória)	29
4.12	Campos vetoriais obtidos com duas comutações permitidas (dados reais)	30
4.13	Trajétórias que sofreram comutação na experiência com dados reais e duas comutações permitidas (círculos verdes; início da trajetória; círculos vermelhos; final da trajetória; Vermelho: Campo 1; Amarelo: Campo 2; Verde: Campo 3; Azul ciano: Campo 4; Azul: Campo 5; Magenta: Campo 6)	31
A.1	Resultado de ciclo de inicialização	A.1

Lista de Símbolos

α'_n	Vetor de velocidade da trajetória n no instante t
α_n	Trajetoária n
γ	Termo de penalização por comutações de campos
λ	Termo de regularização da suavidade dos campos
A	Conjunto de trajetórias do problema
A'_k	Sub-conjunto de trajetórias descrito pelo campo X_k
c	Ponto de comutação de uma trajetória
E'	Energia de erro de um campo vetorial
E_n	Energia de erro de uma trajetória
G	Grelha triangular, de resolução $R \times R$
I_n	Energia de erro parcial de uma trajetória
K	Número total de campos vetoriais
N	Número total de trajetórias
P_n	Número total de pontos da trajetória n
R	Resolução da grelha do problema
S_n	Número total de segmentos da trajetória n
s_p	Segmento de uma trajetória
T	Duração temporal de todas as trajetórias A
T_n	Duração temporal da trajetória n
t_p^n	Coordenada temporal do ponto p de uma trajetória
X	Conjunto dos campos vetoriais
X_k	Campo vetorial k

x_p^n Coordenada espacial do ponto p no eixo horizontal

y_p^n Coordenada espacial do ponto p no eixo vertical

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Existe um grande interesse pelo estudo de fenómenos dinâmicos que se caracterizam através de trajetórias das grandezas de interesse. Por exemplo, no estudo das atividades humanas existe a necessidade de descrever as trajetórias de peões em sistemas de vídeo vigilância [1] [2] permitindo avaliar as ações das pessoas num cenário de vídeo vigilância e decidir a resposta adequada a partir dessa avaliação [3]. Além de cenários de vigilância, o estudo das atividades humanas também se aplica à análise de eventos desportivos, medição de desempenho de atletas de alta-competição [4], ambientes inteligentes [5] [6] e interação entre humanos e máquinas [7]. Na área do ambiente os investigadores procuram compreender vários tipos de fenómenos que se traduzem através de trajetórias p.ex: trajetórias de migrações de aves, o crescimento populacional, a alimentação e as interações sociais [8] e na meteorologia o estudo destes dados é utilizado na previsão das trajetórias das tempestades [9] [10].

A proliferação de sistemas de GPS (*Global Positioning System*, em Português Sistema de Posicionamento Global), que fornecem dados de trajetórias de peões e veículos levou a um aumento rápido da quantidade de dados de trajetórias disponíveis, e também, a procura por métodos que avaliem os dados registados [11].

Em geral, estes métodos encontram uma limitação comum, a avaliação de cenários propensos a cruzamento de várias trajetórias. Isto deve-se a alterações de trajetórias nessas regiões de cruzamento e que limitam a qualidade do agrupamento de trajetórias e provocam a necessidade de um número elevado de clusters que as descrevam, para compensar esta perda de qualidade [12].

Um exemplo deste problema é o mostrado na figura 1.1, quando se avalia este cruzamento observam-se diversos percursos possíveis, 12 no total (cada uma das 4 formas de chegar ao cruzamento tem 3 opções, virar para a esquerda, virar para a direita ou seguir em frente), isto sugere a existência de 12 modelos de trajetórias (clusters). Um método que não considere a comutação de percursos precisaria de 12 clusters para descrever corretamente o cenário. No entanto um modelo que as considere a possibilidade de uma comutação conseguiria descrever este mesmo cenário necessitando apenas de 4 clusters (Norte, Sul, Este e Oeste do cruzamento).



Figura 1.1: Cenário de cruzamento

Um exemplo ainda mais complexo é o de uma rotunda, apresentado na figura 1.2. Neste caso o número de trajetos possíveis é $T = E \times S$, sendo E o número de entradas e S o número de saídas, isto sem considerar que ainda há a possibilidade do mesmo veículo contornar várias vezes a rotunda. Novamente, a existência de comutações contribuiria para uma melhor avaliação das trajetórias neste cenário.



Figura 1.2: Cenário de rotunda

1.2 Objetivos gerais e contribuições

Esta tese estende o algoritmo de agrupamento de trajetórias proposto em [12] que usa campos vetoriais mas não permite a comutação entre modelos. O objetivo deste trabalho é desenvolver um método de análise de trajetórias baseado em campos vetoriais, com comutação entre campos.

Uma das principais contribuições deste trabalho é o desenvolvimento de um método de identificação de comutações de campos na análise de trajetórias baseada em campos. Esse método foi implementado no algoritmo proposto em [12].

Com esta nova implementação foram feitos testes com dados sintéticos (com 100 trajetórias) e com dados reais de trajetórias (com 134 percursos de peões).

1.3 Estrutura

O capítulo 2 descreve a formulação do problema e os métodos de agrupamento de trajetórias utilizados. O capítulo 3 descreve as experiências realizadas, em que são apresentados os conjuntos de trajetórias avaliadas e os outros parâmetros de cada cenário. No capítulo 4 são mostrados os resultados obtidos para as experiências realizadas. No capítulo 5, e último, são apresentadas as conclusões e trabalho futuro.

Capítulo 2

Metodologias

O objetivo deste trabalho é agrupar e representar conjuntos de dados de trajetórias baseado num modelo de campos vetoriais com e sem comutação de campos durante a geração da trajetória. Parte-se então apenas de um conjunto de dados registados de trajetórias e do número de campos vetoriais em que se pretende agrupar as trajetórias (entre outros parâmetros) e pretende-se ter como resultado os campos vetoriais obtidos e o conjunto de trajetórias (ou partes das mesmas) atribuído a cada campo.

Este capítulo encontra-se organizado da seguinte forma: na primeira secção será apresentado o problema e definidos alguns conceitos necessários. Na segunda secção será apresentado o algoritmo Vector Field k-Means proposto em [12], em que não são consideradas comutações entre campos pelas trajetórias. Por fim, na terceira e última secção é apresentado o modelo de identificação de comutações das trajetórias, a sua integração no modelo básico.

2.1 Formulação do problema

Nesta secção serão apresentados os conceitos necessários para compreender o problema deste trabalho. Estes conceitos são as trajetórias e a forma como é feita a sua discretização bem como os campos vetoriais e a forma como estes representam as trajetórias. Também são descritos os critérios de erro usados para avaliar a qualidade dos campos vetoriais e decidir a atribuição de trajetórias aos mesmos. A descrição deste modelo é inspirada no algoritmo Vector Field k-Means proposto em [12].

2.1.1 Trajetória

Neste trabalho as trajetória de um peão é representada através de uma função $\alpha : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^2$ e o conjunto de trajetórias conhecidas é designado por $A = \{\alpha_1, \dots, \alpha_N\}$. Cada uma das N trajetórias é composta por P pontos espaço-tempo na forma $\alpha_n = \{(\alpha_n(t_1^n), t_1^n), \dots, (\alpha_n(t_P^n), t_P^n)\}$ em que t é a coordenada temporal de um ponto e as coordenadas espaciais são dadas por $\alpha_n(t_p^n) = [x_p^n, y_p^n]^T$. As trajetórias são também representadas pelo conjunto de $P - 1$ segmentos, em que cada segmento é definido por um par de pontos consecutivos da trajetória, $s_p = [\alpha_n(t_p), \alpha_n(t_{p+1})]$.

Cada trajetória α_n é aproximada por amostras da sua trajetória real, obtidas em instantes de tempo

não uniformes (ver figura 2.1).

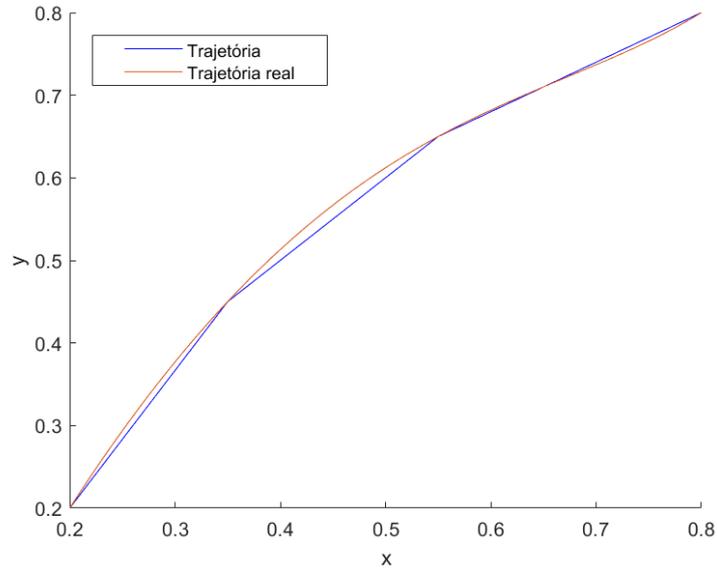


Figura 2.1: Modelo linear por troços (curva azul) de uma trajetória contínua (curva vermelha)

Neste problema, todas as trajetórias estão contidas numa grelha triangular G com $R \times R$ nós. Para a correta representação de uma trajetória por um campo vetorial, todos os segmentos da trajetória têm de ser confinados a apenas um triângulo da grelha G , sendo necessário criar novos pontos da trajetória em todas as intersecções de segmentos com a grelha, e assim, dividir cada segmento em sub-segmentos que estejam contidos em apenas um triângulo da grelha. Como se pode ver no exemplo da figura 2.2, uma trajetória que inicialmente tinha apenas 3 pontos e 2 segmentos é dividida em vários segmentos mais pequenos.

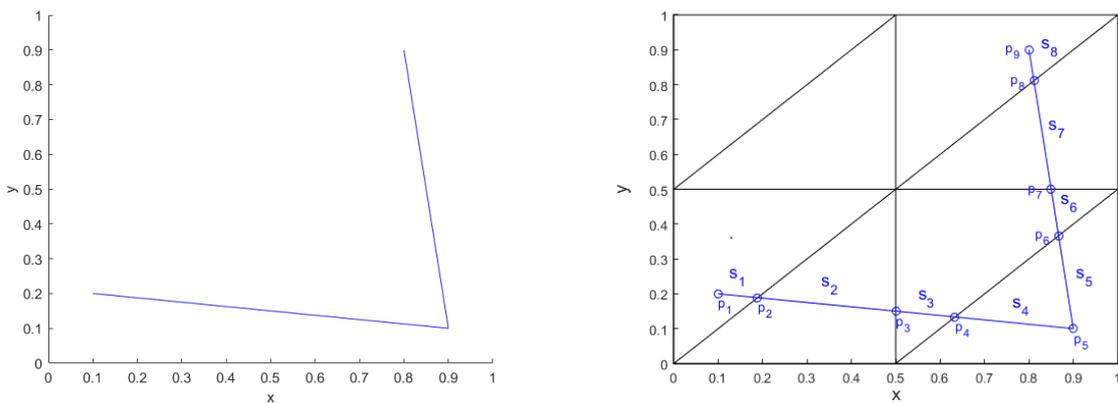


Figura 2.2: Trajetória original (esquerda) e trajetória segmentada (direita)

2.1.2 Campos vetoriais

Considera-se que o conjunto de trajetórias A é descrito por uma coleção de K campos vetoriais na forma $X : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ em que cada trajetória será aproximadamente tangente a um campo X_k . Define-se

o campo k como $X_k = [v_x^k, v_y^k]^T$ sendo que v_x^k e v_y^k são as componentes do campo vetorial segundo as direções x e y , respectivamente, em cada um dos nós da grelha G .

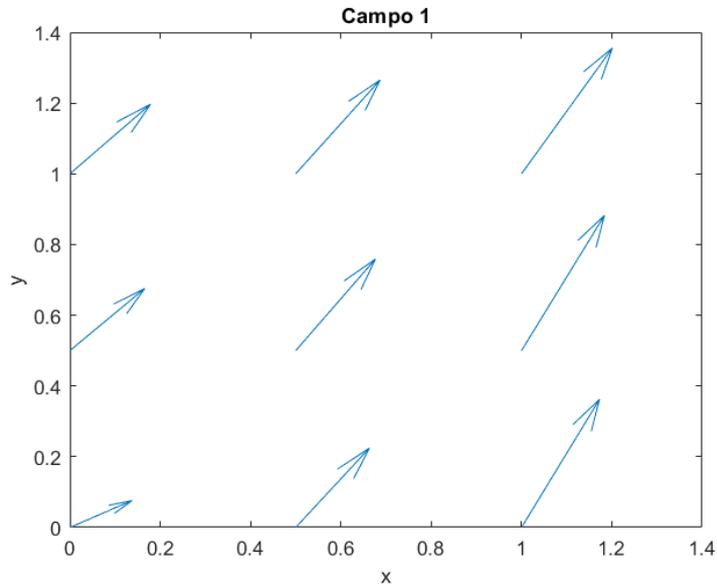


Figura 2.3: Exemplo de campo vetorial associado a uma grelha 3×3

Considera-se que o campo vetorial que descreve uma trajetória α é $X(\alpha) = \alpha'(t)$, sendo $\alpha'(t)$ o vetor de velocidade da trajetória no instante t .

Num vértice da grelha o valor do campo vetorial usado para representar uma trajetória é o valor do campo nesse vértice mas, em pontos da trajetória dentro de um triângulo da grelha, o valor do campo é obtido por interpolação dos valores dos três vértices desse triângulo.

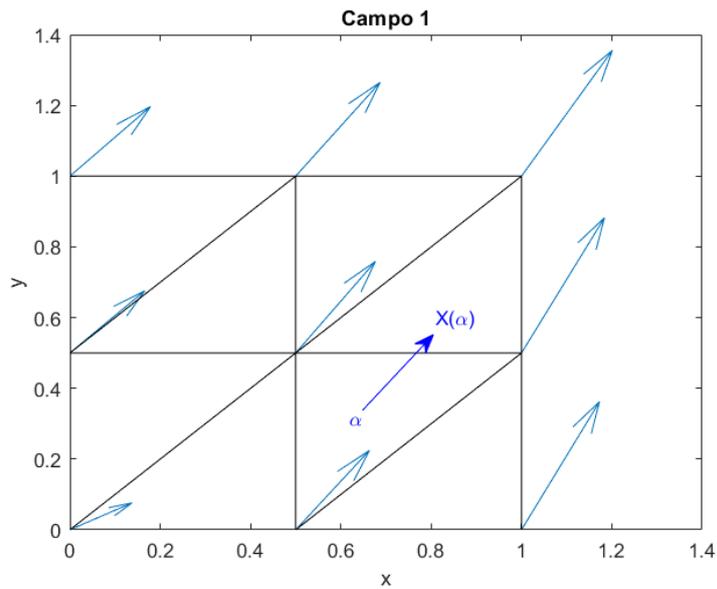


Figura 2.4: Interpolação de campo vetorial num ponto $\alpha(t)$ não pertencente à grelha G

Se o modelo fosse ideal o vetor de velocidade ao longo de cada trajetória deveria coincidir com um

dos campos de velocidade (o campo ativo). Na prática, há um erro entre a velocidade medida em cada instante e o modelo.

2.1.3 Estimação da Energia de Erro

Essencial para a resolução do problema é a estimação da energia de erro uma vez que a energia de erro é a métrica utilizada para avaliar a qualidade dos campos vetoriais e para ser escolhido o melhor campo vetorial para cada trajetória. São consideradas, neste problema, duas equações de determinação da energia de erro:

- Energia de erro de uma trajetória em relação a um campo vetorial;
- Energia de erro de um campo vetorial em relação a um conjunto de trajetórias.

A energia de erro de uma trajetória em relação a um campo vetorial é calculada através de (2.1)

$$E_n(k) = \int_{t_1}^{t_P} \| X_k(\alpha_n(t)) - \alpha'_n(t) \|^2 dt \quad (2.1)$$

que compara a velocidade da trajetória $\alpha'_n(t)$ com o campo vetorial nesse ponto (obtido por interpolação) $X_k(\alpha_n(t))$. Por se tratar de uma fórmula integral podemos determinar, isoladamente, a energia de erro de cada segmento da trajetória ou de uma porção de segmentos da trajetória e obter a energia de erro parcial (2.2).

$$I_n(k, t_i, t_f) = \int_{t_i}^{t_f} \| X_k(\alpha_n(t)) - \alpha'_n(t) \|^2 dt \quad (2.2)$$

A energia de erro de um campo vetorial em relação a um sub-conjunto de trajetórias A'_k é determinada através de (2.3)

$$E'(X_k, A'_k) = \lambda \| \Delta X_k \|^2 + \sum_{\alpha_n \in A'_k} \frac{(1-\lambda)}{T} \int_{t_1}^{t_P} \| X_k(\alpha_n(t)) - \alpha'_n(t) \|^2 dt \quad (2.3)$$

que é a soma da energia de cada uma das trajetórias com um termo de regularização (suavidade).

Em (2.3) ΔX_k é o vetor Laplaciano do campo X_k e T , que é utilizado como termo de normalização da energia de erro, é a duração total das trajetórias do problema e obtido com o seguinte somatório: $T = \sum T_n$ sendo T_n , a duração temporal da trajetória α_n . λ é o referido termo de regularização (suavidade) dos campos vetoriais obtidos. Valores pequenos deste termo levam a campos que descrevem melhor as trajetórias mas são menos suaves. Valores elevados de λ valorizam mais a suavidade dos campos.

2.2 Vector Field k-Means

Nesta secção será apresentado o método Vector Field k-Means [12] que inclui três passos: i) inicialização dos campos (apêndice A), ii) atribuição das trajetórias, e iii) atualização dos campos. Os passos ii) e iii) são executados iterativamente até o algoritmo convergir para uma solução. O método requer como entradas: i) um conjunto de trajetórias, ii) a resolução R da grelha, iii) número de campos vectoriais pretendido (K), e iv) a suavidade dos campos, λ .

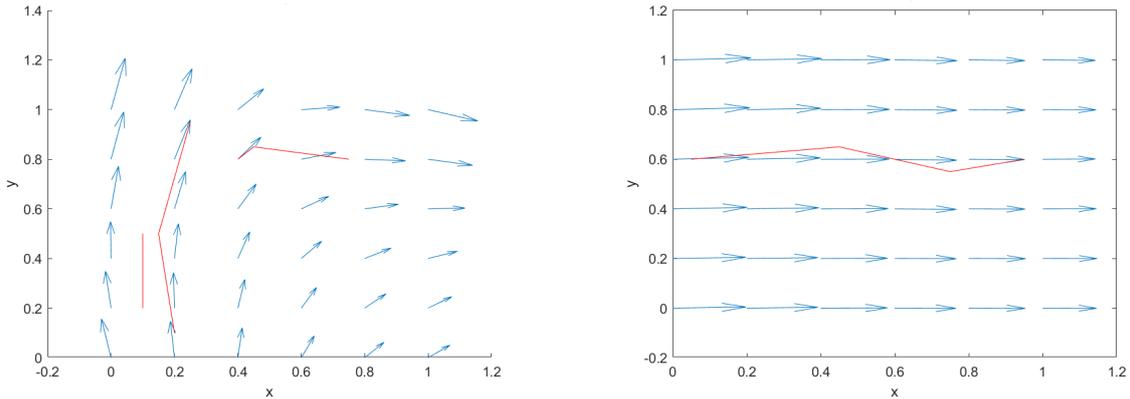


Figura 2.5: Campos vectoriais e trajetórias atribuídas a cada campo (sem comutação)

2.2.1 Atribuição de trajetórias

O ciclo de atribuição de trajetórias consiste em, tendo um conjunto de campos vectoriais X atribuir cada trajetória ao campo que melhor a descreve.

Para todas as trajetórias α_n é calculada a energia de erro $E_n(k)$ destas para todos os campos vectoriais através da fórmula da energia de erro de uma trajetória em relação a um campo vectorial (2.1). Todas as energias de erro são guardadas numa matriz. Por fim, cada trajetória é atribuída ao campo que minimiza a energia de erro.

2.2.2 Atualização de campos vectoriais

Depois de atribuir cada trajetória de treino a um dos campos vectoriais (classe), pode-se atualizar os campos vectoriais.

Cada um dos campos vectoriais é atualizado de forma independente, minimizando (2.3) para o conjunto de trajetórias A' associadas a esse campo (A_k').

A minimização da energia pode ser obtida resolvendo do sistema de matrizes 2.4, de acordo com [12]

$$(L^T L + \tilde{C}^T \tilde{C})X = \tilde{C}^T \tilde{b} \quad (2.4)$$

em que L é a matriz Laplaciana de pesos das cotangentes da grelha. \tilde{C} é a matriz obtida ao concatenar numa matriz as coordenadas baricentricas de todos os segmentos (ponto de início e fim) de uma trajetória e \tilde{b} é a concatenação em vetor das velocidades de todos os segmentos dessa trajetória.

2.2.3 Critério de convergência

O método Vector Field k-Means consiste num ciclo em que sucessivamente é feita a atribuição de trajetórias e a otimização dos campos vetoriais. Este ciclo ocorre até se verificar o critério de convergência do método, que é o resultado da atribuição de trajetórias aos campos vetoriais ser igual do ciclo imediatamente anterior. Quando isto ocorre as trajetórias já se encontram atribuídas ao campo que melhor as descreve e os campos vetoriais já se encontram otimizados para o seu conjunto de trajetórias.

2.3 Comutação de trajetórias

Nesta secção será apresentado o método de comutação de trajetórias proposto nesta tese. Este método envolve uma otimização para achar os campos que melhor descrevem cada trajetória e para determinar os instantes de comutação. Assim, uma comutação está dividida em 3 fases:

- Determinação de energias de erro parciais (até cada ponto);
- Determinação de energias de erro totais;
- Determinação do instante de comutação.

Será também explicado como é feita a integração deste método com o modelo sem comutações e as alterações ao critério de convergência do mesmo.

Começa-se por admitir que há só uma comutação mas o método pode ser alargado para outro número de comutações pretendido, sendo apenas necessário seguir a lógica aplicada a uma comutação.

2.3.1 Determinação de energias de erro parciais

Para a identificação das comutações entre campos vetoriais de uma trajetória é necessário saber a energia de erro de cada segmento da trajetória em relação a cada um dos campos de velocidades.

Para a determinação da energia de erro utiliza-se (2.2) considerando-se o primeiro instante da trajetória como instante inicial do cálculo, ou seja, as energias de erro calculadas são desde o início da trajetória até ao ponto p .

São calculados os valores da energia de erro parciais para todos os pontos da trajetória, exceto o ponto inicial, e para todos os campos vetoriais. Estes valores são todos guardados numa matriz de energias parciais $I_n(k, t_1, t_p)$ para serem utilizados mais adiante no método. Nesta matriz cada linha corresponde a um campo vetorial e cada coluna é um ponto de comutação a ser considerado, de 2 até a P .

Em seguida apresenta-se um exemplo de uma trajetória e dos valores calculados para melhor mostrar o processo de determinação das comutações. A trajetória e os campos vetoriais deste exemplo são, respetivamente, as das figuras 2.6 e 2.7.

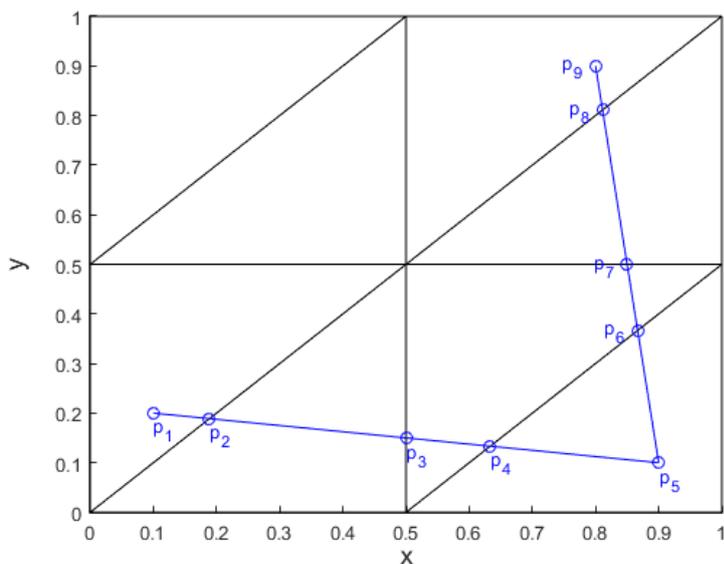


Figura 2.6: Exemplo de trajetória definida por 9 pontos

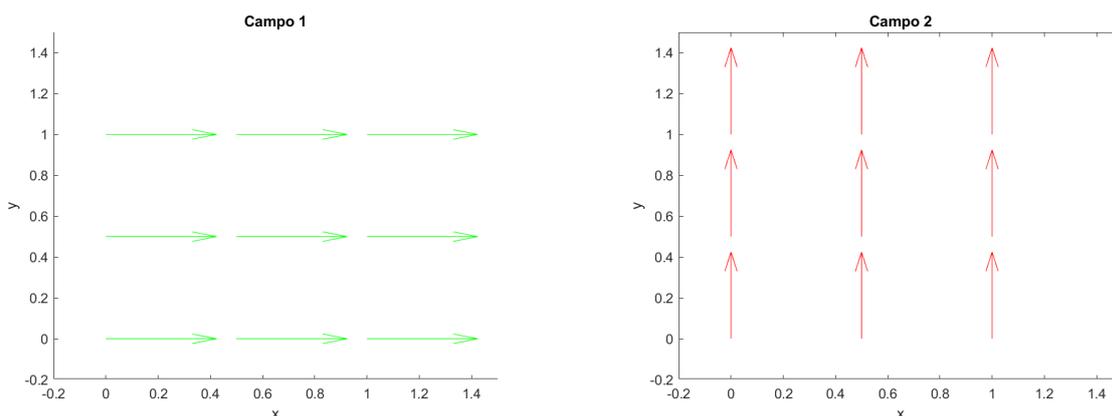


Figura 2.7: Campos vetoriais inicializados para o exemplo

Para a trajetória deste exemplo os valores obtidos para as energias de erro parciais são as apresentadas em 2.3.

$I_n(k, t_1, t_p)$	$p = 2$	$p = 3$	$p = 4$	$p = 5$	$p = 6$	$p = 7$	$p = 8$	$p = 9$
$k = 1$	0,006	0,051	0,102	0,205	0,284	0,332	0,432	0,473
$k = 2$	0,001	0,006	0,012	0,024	0,112	0,216	0,385	0,528

Tabela 2.1: Energias de erro parciais do exemplo

2.3.2 Determinação de energias de erro totais

Com as energias de erro parciais determinadas em 2.3.1 são então calculadas as energias de erro totais para cada conjunto de campos vetoriais (k_1 e k_2) e em cada ponto da trajetória até $P-1$. Para determinar estas energias basta somar a energia parcial até ao ponto de comutação c do campo em que começa a

trajetória com a energia parcial de c até ao final da trajetória, no segundo campo. Considera-se também uma penalização de erro por comutação (γ), que é um parâmetro do algoritmo e permite controlar o nível de comutações que se pretende, com um valor alto nenhuma comutação ocorre e com um valor muito baixo ou 0 é feita qualquer comutação desde que um pequeno segmento da trajetória tenha uma melhoria mínima com a comutação.

A energia de erro total com comutação da campos é a obtida através de (2.5).

$$E_n(k_1, k_2, c) = (I_n(k_1, t_1, t_c) + (I_n(k_2, t_1, t_P) - I_n(k_2, t_1, t_c))).(1 + \gamma) \quad (2.5)$$

Para o exemplo apresentado anteriormente obtém-se os seguintes resultados:

	$c = 2$	$c = 3$	$c = 4$	$c = 5$	$c = 6$	$c = 7$	$c = 8$
$E_n(k_1, k_2, c)$	0,533	0,573	0,618	0,709	0,700	0,644	0,575

Tabela 2.2: Energias totais de erro ($k_1 = 1 \rightarrow k_2 = 2$)

	$c = 2$	$c = 3$	$c = 4$	$c = 5$	$c = 6$	$c = 7$	$c = 8$
$E_n(k_1, k_2, c)$	0,468	0,428	0,383	0,292	0,301	0,357	0,426

Tabela 2.3: Energias totais de erro ($k_1 = 2 \rightarrow k_2 = 1$)

2.3.3 Determinação do instante de comutação

Com todos os valores de energia total de erro determinados, o valor mínimo para cada vetor de par de campos vectoriais é colocado numa matriz de energias com referência ao instante a que corresponde cada valor mínimo. No caso em que $k_1 = k_2$ é considerado $I_n(k_1, t_i, t_P)$, que é a energia total de erro da trajetória em relação ao campo k_1 , e naturalmente, não é considerado qualquer instante c por não se tratarem de casos de comutação.

Por fim basta minimizar o valor desta matriz e obtém-se os valores dos campos atribuídos a cada parte da trajetória e o instante da comutação.

No caso do exemplo que foi mostrado desde o início desta secção obtém-se os seguintes valores na matriz.

E_n	$k_2 = 1$	$k_2 = 2$
$k_1 = 1$	0,473	0,533
$k_1 = 2$	0,292	0,528

Tabela 2.4: Energias mínimas de cada conjunto de campos

Conclui-se assim, no caso de exemplo, que o modelo que melhor descreve a trajetória usa o campo 2 desde o início até ao ponto 5 da trajetória e o campo 1 desde o ponto 5 até ao final da trajetória, com uma energia de erro total de 0.292. A figura 2.8 mostra os segmentos associados ao campo horizontal e ao campo vertical.

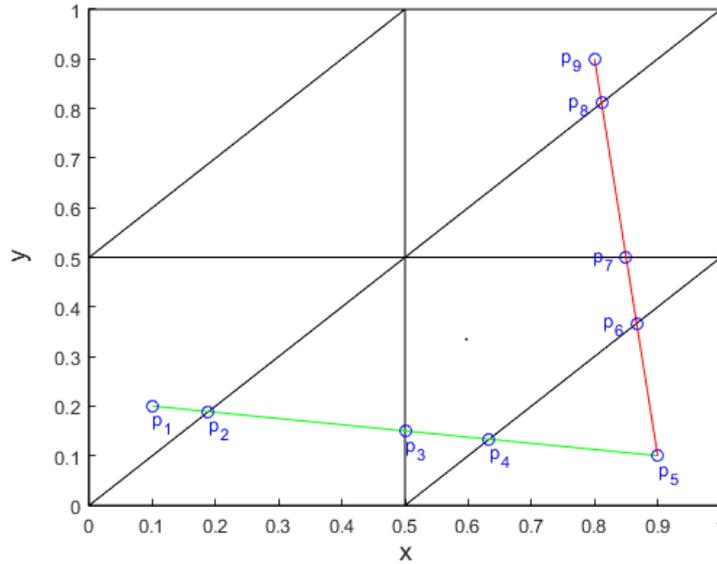


Figura 2.8: Resultado final do exemplo de comutação

2.3.4 Integração com método Vector Field k-Means

Tal como descrito em 2.2.3, o critério de convergência do método sem comutações é a obtenção de resultados iguais em dois ciclos de atribuição-atualização do algoritmo. É a seguir a esta validação da convergência dos modelos de trajetórias, e só quando os mesmos convergiram, que é feita a análise das comutações entre campos.

Após a determinação das comutações das trajetórias, e com um novo conjunto de trajetórias o algoritmo volta ao início (ciclo atribuição-atualização) até os modelos convergirem novamente e é feita novamente a análise das comutações das trajetórias iniciais do problema. Por fim, à semelhança do modelo sem comutações, a convergência do algoritmo com comutações ocorre quando os resultados de duas análises de comutações são iguais (as trajetórias comutam entre os mesmos campos e nos mesmos pontos).

Na figura 2.9 é mostrado o fluxograma do modelo proposto.

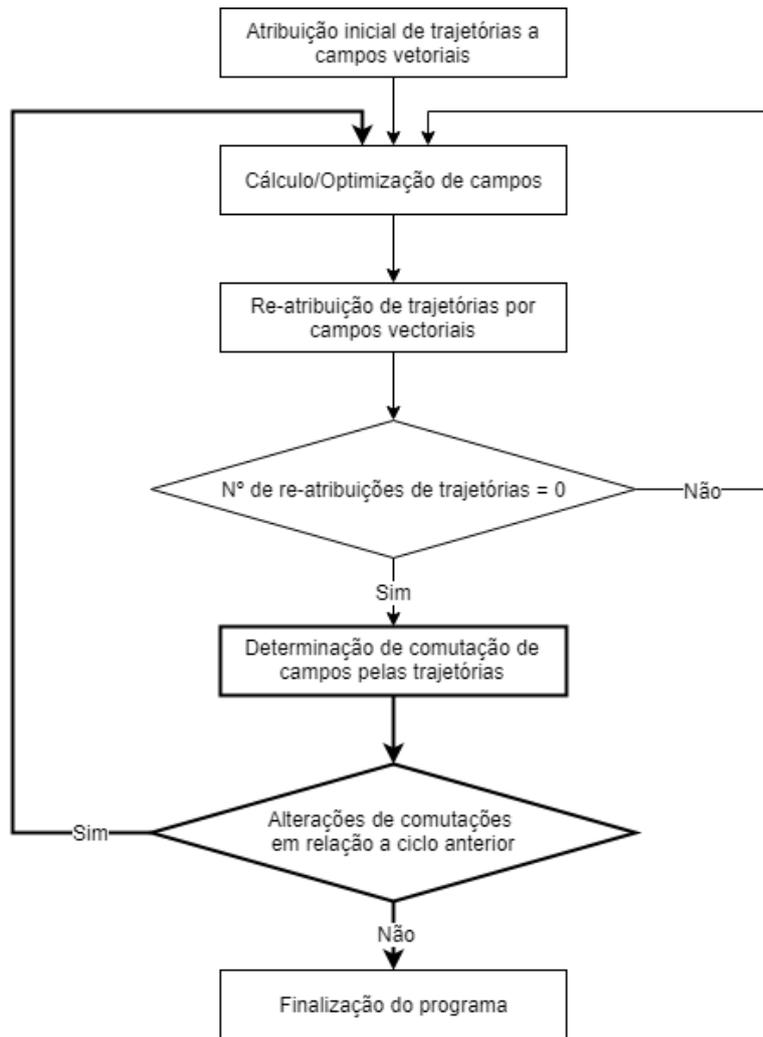


Figura 2.9: Fluxograma do modelo proposto, as alterações impostas pelo método de determinação de comutações estão mais carregadas

Capítulo 3

Experiências

Neste capítulo apresentam-se as experiências realizadas para testar o método proposto de comutações de trajetórias e avaliar o seu desempenho. Serão apresentados os conjuntos de trajetórias e restantes parâmetros das experiências (resolução, número de campos e suavidade).

3.1 Experiência 1 (dados sintéticos)

Na primeira experiência foi simulado um cruzamento de carros. O objetivo desta experiência é validar as melhorias da comutação de trajetórias num cenário semelhante a um real. Para isso foi criado um conjunto de trajetórias sintéticas baseadas num cruzamento real (figura 3.1).

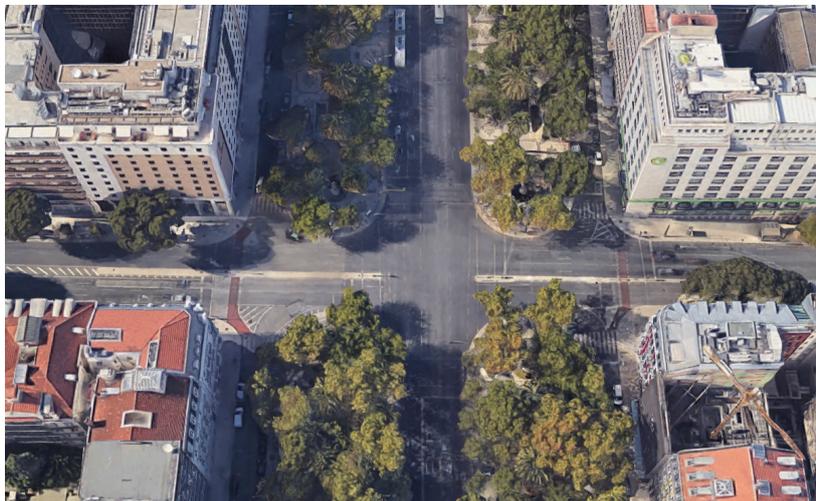


Figura 3.1: Cruzamento de veículos utilizado como base para conjunto de dados sintéticos

Foi criado um conjunto de 100 trajetórias, com um total de 1228 pontos, que pretendem estudar várias mudanças de direção neste cruzamento. Estas trajetórias estão apresentadas na figura 3.2. O ponto de início de cada trajetória está assinalado com um círculo verde e o último ponto encontra-se assinalado com um círculo vermelho. Cada trajetória está representada com uma cor diferente para melhor diferenciação das mesmas.

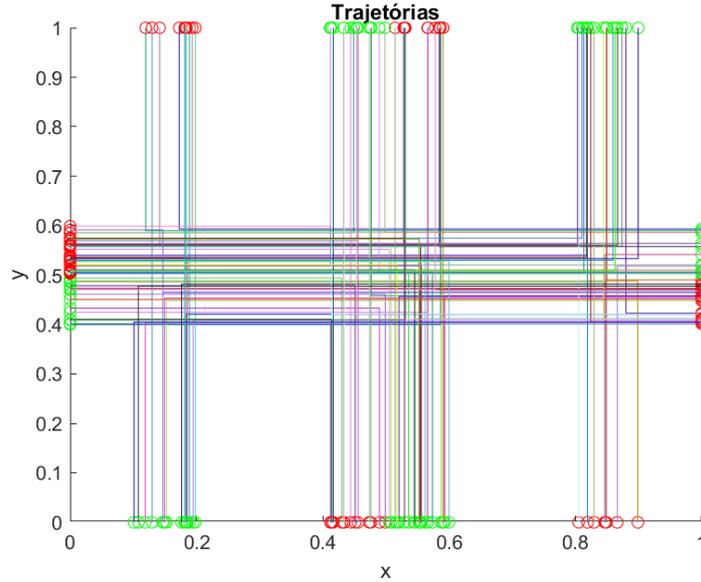


Figura 3.2: Conjunto de trajetórias sintéticas (círculos verdes: início da trajetória; círculos vermelhos: final da trajetória)

Com estes dados foram feitas duas simulações com as seguintes características:

- $R = 10$ (Resolução da grelha);
- $K = 4$ (Número de campos vetoriais);
- $\lambda = 0.8$ (Suavidade dos campos vetoriais).

Na primeira simulação não foram permitidas comutações e na segunda simulação foi permitida uma comutação com penalização por comutação de 7.5%, ou seja, $\gamma = 0.075$.

3.2 Experiência 2 (dados reais)

A segunda experiência efetuada foi com um conjunto de trajetórias reais de peões. Este conjunto de trajetórias é composto por 134 trajetórias (14308 pontos no total) que foram captadas por uma câmara estática no campus do IST.

Estas trajetórias estão representadas na figura 3.3, onde se podem ver as mesmas no cenário do IST captado. Foi feita uma correção da distorção geométrica introduzida pela câmara, usando uma homografia.

O ponto de início de cada trajetória está assinalado com um círculo verde e o último ponto encontrado assinalado com um círculo vermelho. Cada trajetória está representada com uma cor diferente para melhor diferenciação das mesmas.

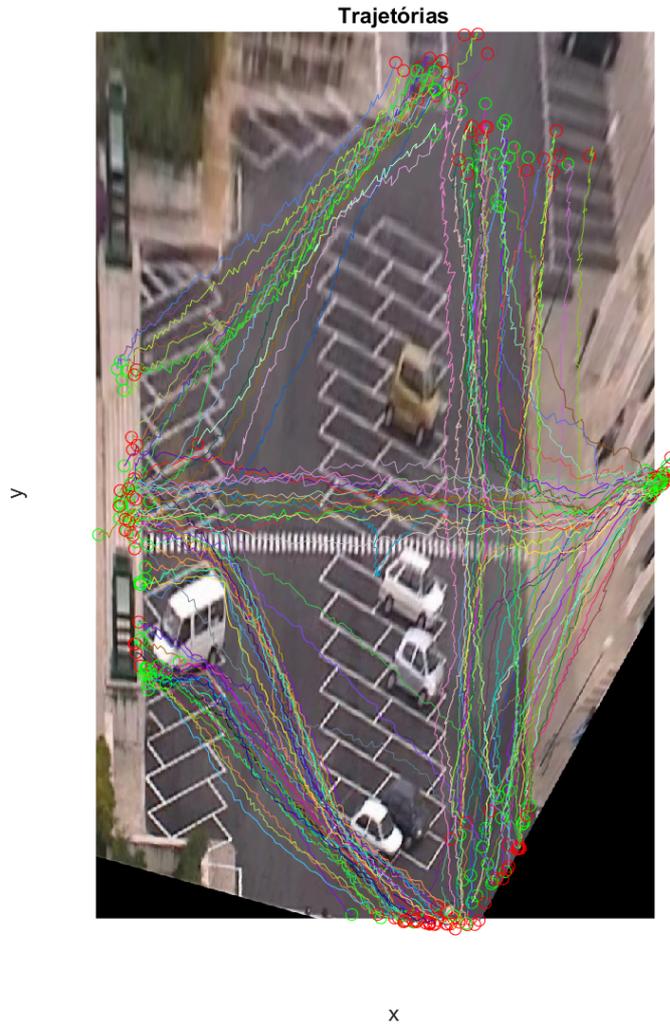


Figura 3.3: Conjunto de trajetórias captadas no IST com correção geométrica (círculos verdes: início da trajetória; círculos vermelhos: final da trajetória)

Com estes dados foram feitas três simulações com as seguintes características:

- $R = 10$ (Resolução da grelha);
- $K = 6$ (Número de campos vetoriais);
- $\lambda = 0.8$ (Suavidade dos campos vetoriais).

Na primeira simulação não foram permitidas comutações, na segunda experiência permitiu-se a cada trajetória mudar uma vez de campo, com penalização de 7.5%, ou seja, $\gamma = 0.075$, e por fim, na terceira simulação foram permitidas duas comutações com a mesma penalização de 7.5% por cada uma delas, o que significa uma penalização de 15% quando se avaliam duas comutações de trajetória.

Capítulo 4

Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados das experiências descritas no capítulo 3.

Para cada um dos conjuntos de trajetórias simuladas foram obtidos resultados com e sem comutações para ser possível avaliar melhorias. Serão apresentados os resultados graficamente (trajetórias, campos vetoriais e representação das trajetórias com comutações) e outros valores de cada simulação (número de comutações, quando aplicável, e energia de erro total das trajetórias). A energia de erro total é o somatório das energias de erro de todas as trajetórias em relação ao campo que as descreve.

Para cada resultado será também feita a discussão dos mesmos.

4.1 Experiência 1 (dados sintéticos)

Nesta seção serão mostrados os resultados obtidos com dados sintéticos de um cruzamento.

4.1.1 Sem comutações

As trajetórias da experiência 1 sem comutações são as apresentadas na figura 4.1. O ponto de início de cada trajetória está assinalado com um círculo verde e o último ponto encontra-se assinalado com um círculo vermelho. Cada trajetória está representada com uma cor diferente para melhor diferenciação das mesmas.

Os campos vetoriais e as trajetórias que são melhor descritas por cada campo são apresentados na figura 4.2.

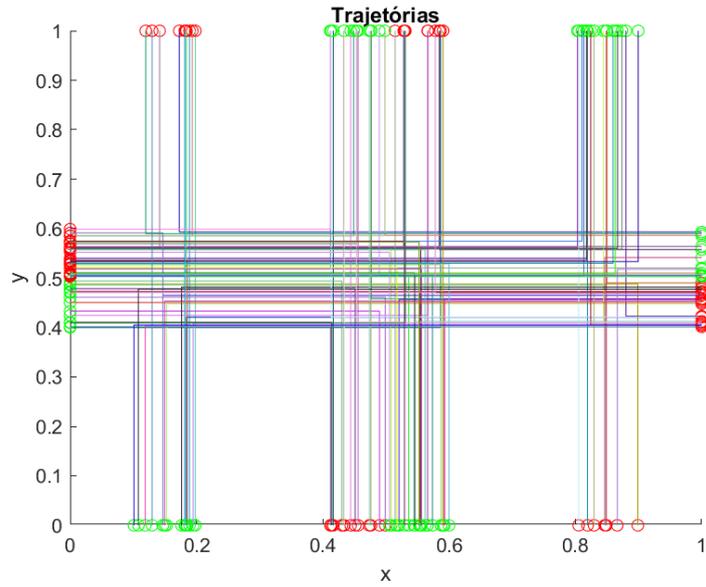


Figura 4.1: Trajetórias sintéticas sem comutações (círculos verdes: início da trajetória; círculos vermelhos: final da trajetória)

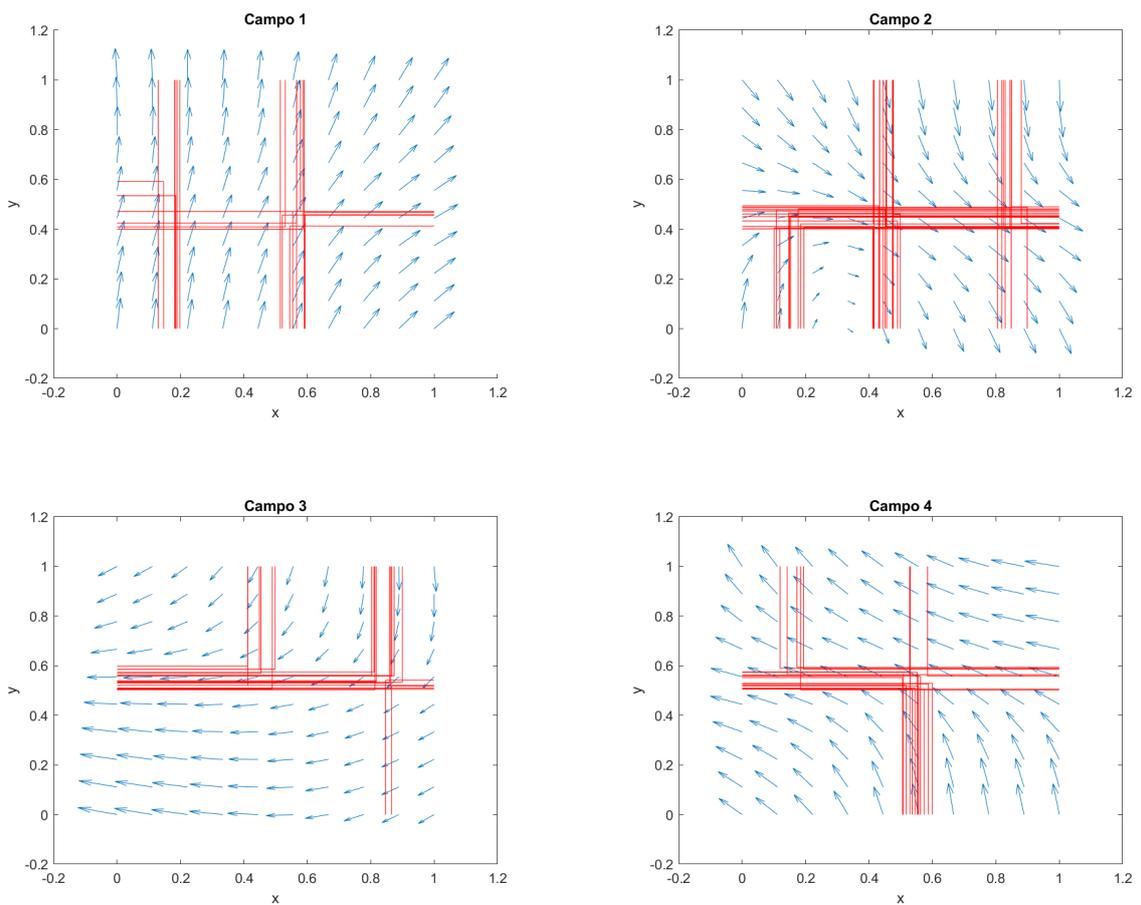


Figura 4.2: Campos vectoriais obtidos sem comutações, para trajetórias sintéticas

O erro total obtido para as 100 trajetórias, obtido nesta experiência, foi $E_t = 4.25 \times 10^4$.

Como se pode ver na figura 4.2, sem comutações os campos vetoriais conseguem adaptar-se, com um certo erro, ao formato das trajetórias nas regiões onde estas só têm uma direção. Tal não acontece nos locais dos cruzamentos das trajetórias, nestas regiões os quatro campos vetoriais não conseguem descrever com qualidade as trajetórias.

4.1.2 Uma comutação permitida

As trajetórias da experiência são as apresentadas na figura 4.3. Tal como indicado anteriormente, o ponto de início de cada trajetória está assinalado com um círculo verde e o último ponto encontra-se assinalado com um círculo vermelho. Cada trajetória está representada com uma cor diferente para melhor diferenciação das mesmas e as comutações da trajetória estão representadas com um asterisco (*) da cor da trajetória.

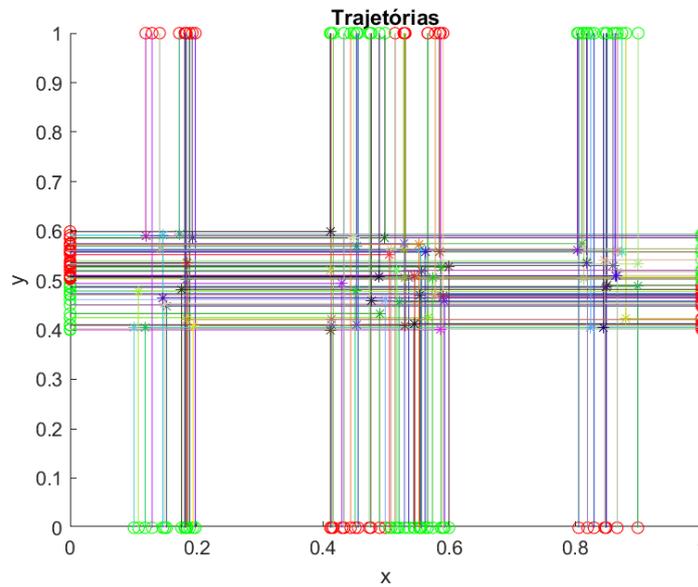


Figura 4.3: Trajetórias sintéticas com uma comutação permitida (círculos verdes; início da trajetória; círculos vermelhos; final da trajetória; (*): ponto de comutação da trajetória)

Os campos vetoriais e trajetórias, ou partes destas, que são melhor descritas por cada campo são apresentadas na figura 4.4. Nos casos em que as trajetórias sofreram comutação de campos são apresentadas de uma cor diferente, verde, ao contrário das restantes que continuam a ser representadas a vermelho.

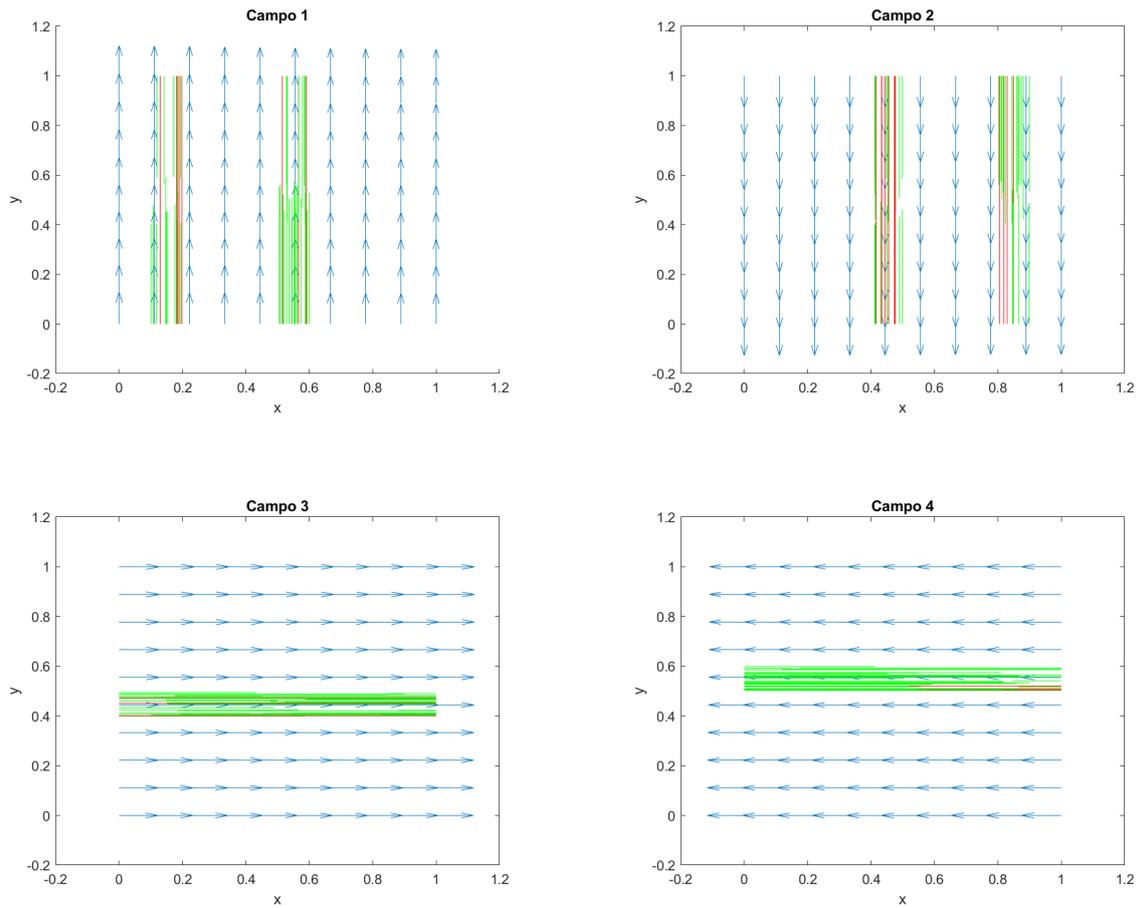


Figura 4.4: Campos vetoriais obtidos com uma comutação permitida para os dados sintéticos (trajetórias verdes: partes de trajetórias que comutaram de campo e trajetórias vermelhas: trajetórias que não comutaram)

Todas as trajetórias que sofreram comutações estão representadas na figura 4.5 em que cada cor representa um campo vetorial a que corresponde cada parte da trajetória (Vermelho: Campo 1; Verde: Campo 2; Azul: Campo 3; Magenta: Campo 4).

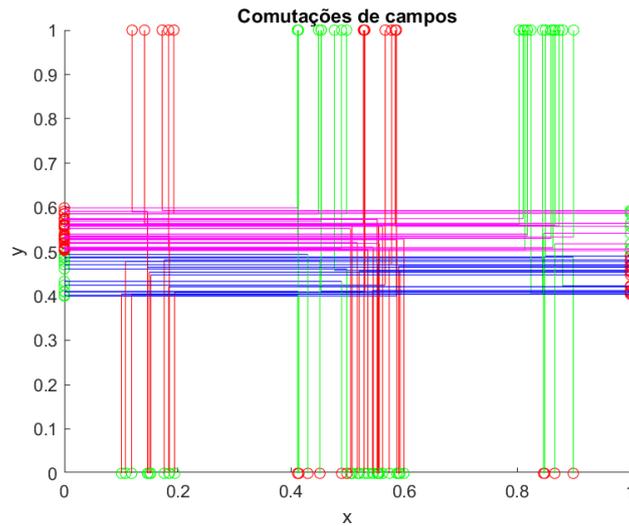


Figura 4.5: Trajetórias que comutaram entre campos na experiência com dados sintéticos (círculos verdes: início da trajetória; círculos vermelhos: final da trajetória; Vermelho: Campo 1; Verde: Campo 2; Azul: Campo 3; Magenta: Campo 4)

O erro total obtido para as 100 trajetórias, obtido nesta experiência, foi $E_t = 1.57 \times 10^4$. Este valor significa uma melhoria de 63.0% em relação ao resultado obtido sem comutações de trajetórias.

Como se pode verificar na figura 4.3 as trajetórias comutaram nos cruzamentos, nos pontos assinalados com um asterisco (*), sendo no total 74 comutações de trajetórias. Estas comutações estão também representadas em 4.4 em que se pode ver a verde as trajetórias que comutaram de trajetória (apenas a parte da trajetória que ficou atribuída ao campo em questão) e que os campos vetoriais traduzem com bastante precisão as direções das trajetórias. Na figura 4.5 confirma-se a correta comutação de todas as trajetórias. O erro produzido deve-se apenas às diferenças entre a velocidade das trajetórias e os campos vetoriais ($X(\alpha) \neq \alpha'(t)$).

4.2 Experiência 2 (dados reais)

Nesta secção serão mostrados os resultados obtidos com dados reais (campus do IST).

4.2.1 Sem comutações

As trajetórias da experiência são as apresentadas na figura 4.6. O ponto de início de cada trajetória está assinalado com um círculo verde e o último ponto encontra-se assinalado com um círculo vermelho. Cada trajetória está representada com uma cor diferente para melhor diferenciação das mesmas.

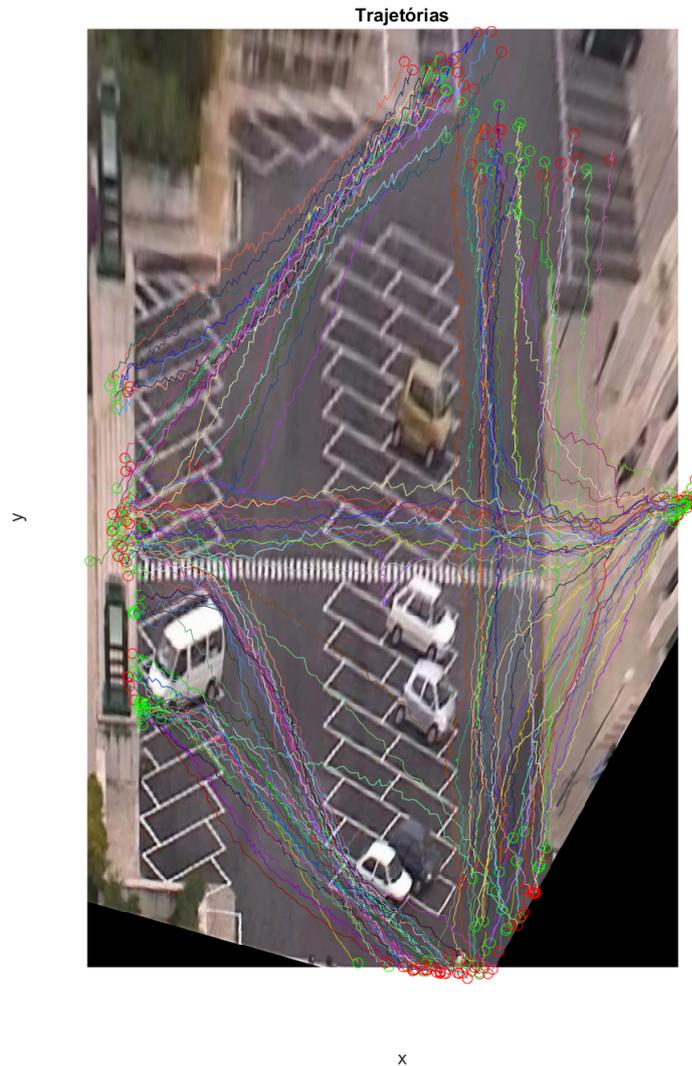


Figura 4.6: Trajetórias reais sem comutações (círculos verdes: início da trajetória; círculos vermelhos: final da trajetória)

Os campos vetoriais e trajetórias que são melhor descritas por cada campo são apresentadas na figura 4.7.

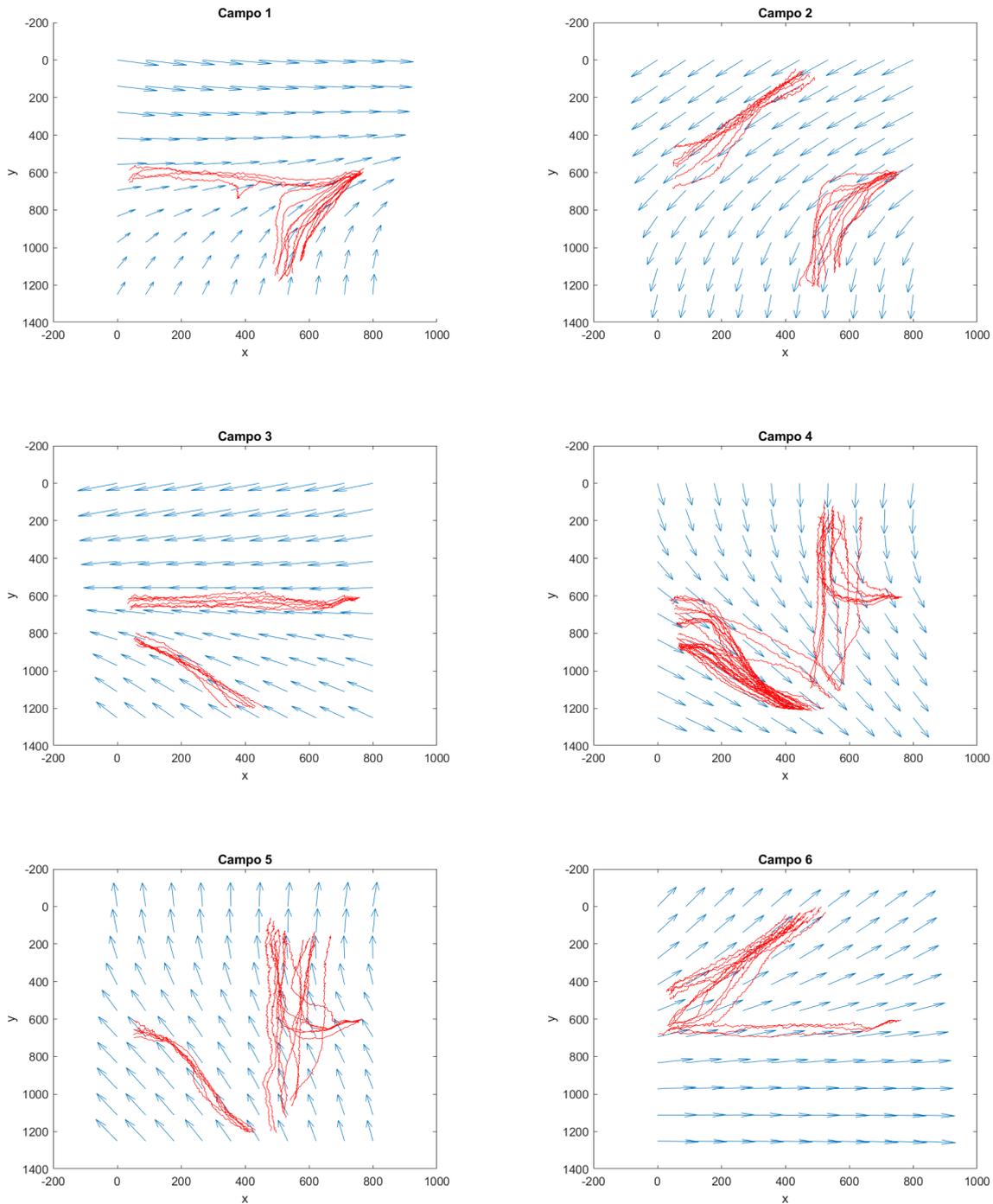


Figura 4.7: Campos vetoriais obtidos sem comutações de trajetórias (dados reais)

Com 0 comutações foi obtido um erro de $E_t = 3.27 \times 10^4$.

Os campos vetoriais obtidos são bastante satisfatórios para várias das trajetórias do conjunto, no entanto há várias trajetórias que não são bem representadas, como por exemplo várias trajetórias dos campos 4 e 5. Para representar corretamente estas trajetórias, neste conjunto de campos vetoriais, é necessário que estas comutem entre campos vetoriais.

4.2.2 Uma comutação permitida

As trajetórias da experiência são as apresentadas na figura 4.8. Tal como indicado anteriormente, o ponto de início de cada trajetória está assinalado com um círculo verde e o último ponto encontra-se assinalado com um círculo vermelho, e cada trajetória está representada com uma cor diferente para melhor diferenciação das mesmas.

As comutações da trajetória estão representadas com um asterisco (*) da cor da trajetória.

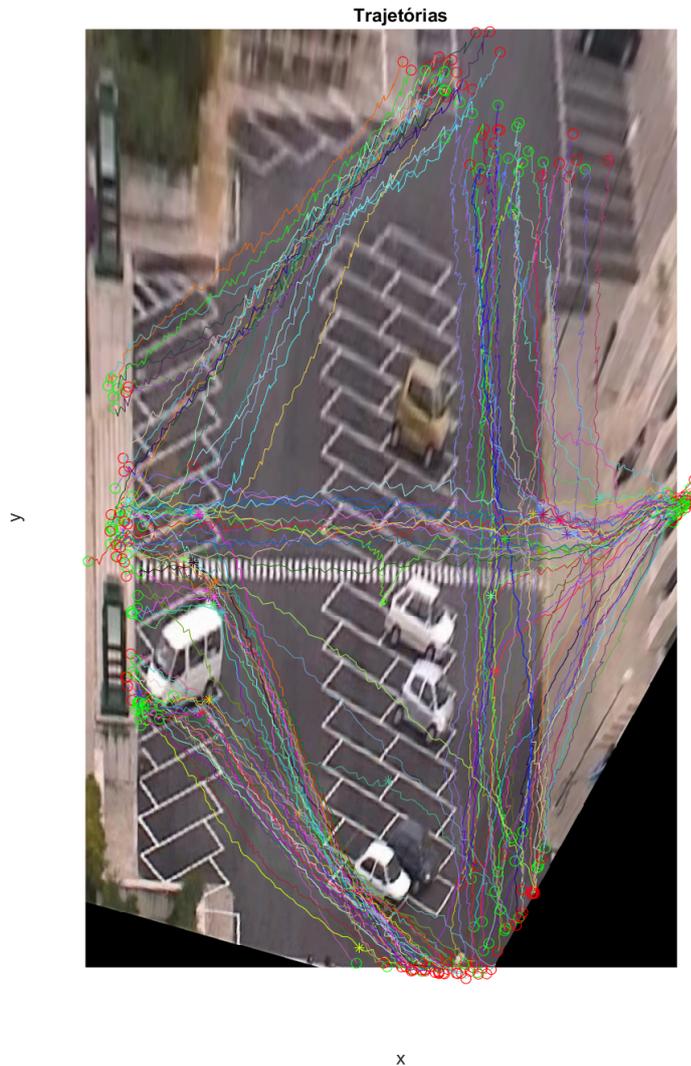


Figura 4.8: Trajetórias reais com uma comutação permitida (círculos verdes; início da trajetória; círculos vermelhos; final da trajetória; (*): ponto de comutação da trajetória)

Os campos vetoriais e trajetórias, ou partes destas, que são melhor descritas por cada campo são apresentadas na figura 4.9. Nos casos em que as trajetórias sofreram comutação de campos são apresentadas de uma cor diferente, verde, ao contrário das restantes que continuam a ser representadas a vermelho.

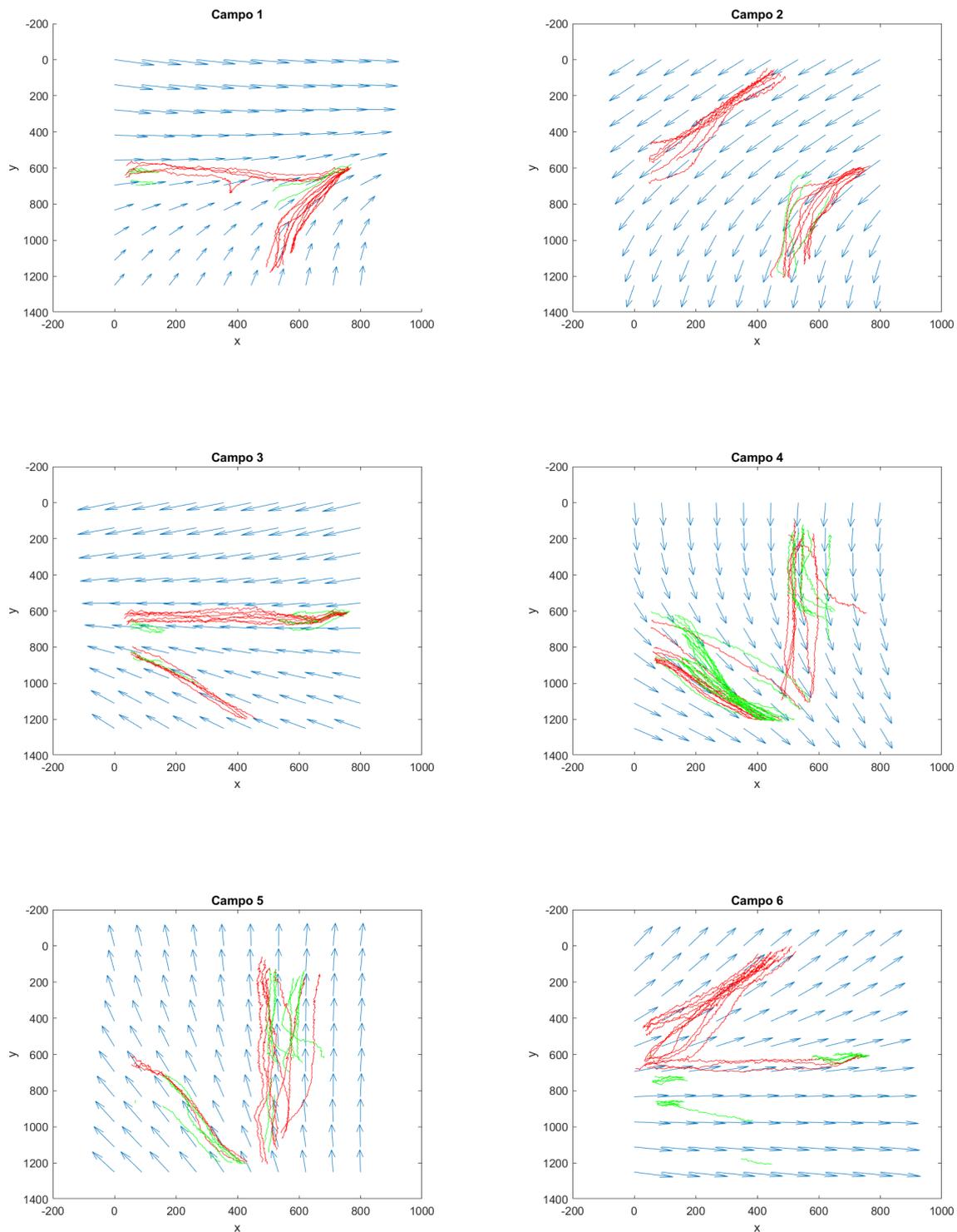


Figura 4.9: Campos vetoriais obtidos com uma comutação permitida com os dados reais (trajetórias verdes: partes de trajetórias que comutaram de campo e trajetórias vermelhas: trajetórias que não comutaram)

Todas as trajetórias que sofreram comutações estão representadas na figura 4.10 em que cada cor representa um campo vetorial a que corresponde cada parte da trajetória (Vermelho: Campo 1; Amarelo: Campo 2; Verde: Campo 3; Azul ciano: Campo 4; Azul: Campo 5; Magenta: Campo 6).

Comutações de campos



Figura 4.10: Trajetórias que sofreram comutação na experiência com dados reais e uma comutação permitida (círculos verdes; início da trajetória; círculos vermelhos; final da trajetória; Vermelho: Campo 1; Amarelo: Campo 2; Verde: Campo 3; Azul ciano: Campo 4; Azul: Campo 5; Magenta: Campo 6)

Nesta experiência o erro total obtido foi $E_t = 2.66 \times 10^4$, o que representa uma melhoria de 18.7% em relação à energia de erro obtida sem qualquer comutação de trajetória entre campos vetoriais.

No total houve 44 comutações de trajetórias nesta experiência. Estas comutações podem ser observadas na figura 4.8, marcadas com asterisco (*) e na figura 4.10.

Pode-se verificar na representação dos campos vetoriais, na figura 4.9, uma melhoria significativa na aproximação entre os campos e as trajetórias. Na experiência sem comutações (4.2.1) foram identificados os campos 4 e 5 como sendo aqueles onde as trajetórias mais divergiam dos seus campos vetoriais. Este problema foi resolvido comutando parte dessas trajetórias para outros campos vetoriais. A análise da figura 4.10 confirma a existência de bastantes comutações entre esses campos (4 e 5).

Analisando os resultados obtidos com uma comutação de trajetórias, também podemos verificar que não houve alterações visíveis nos campos vetoriais, ou seja, que as melhorias na energia do erro obtidas nesta experiência se deveram quase que exclusivamente à comutação das trajetórias entre os campos já

obtidos.

4.2.3 Duas comutações permitidas

As trajetórias da experiência são as apresentadas na figura 4.11. Tal como indicado anteriormente, o ponto de início de cada trajetória está assinalado com um círculo verde e o último ponto encontra-se assinalado com um círculo vermelho, e cada trajetória está representada com uma cor diferente para melhor diferenciação das mesmas.

As comutações da trajetória estão representadas com um asterisco (*) da cor da trajetória.

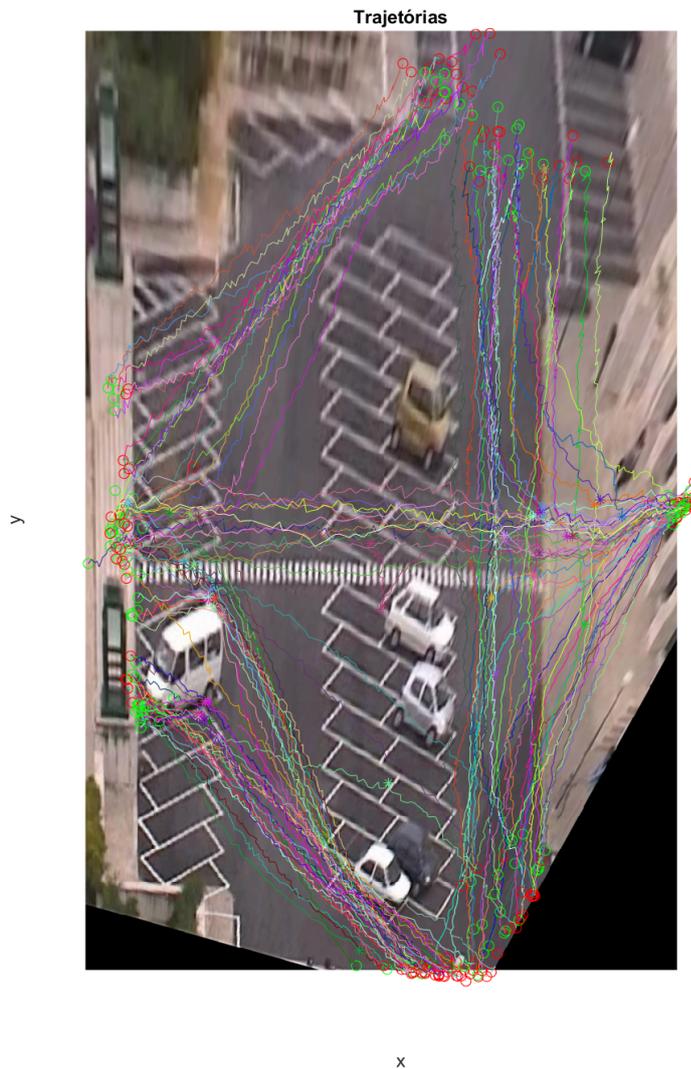


Figura 4.11: Trajetórias reais com duas comutações permitidas (círculos verdes; início da trajetória; círculos vermelhos; final da trajetória; (*): ponto de comutação da trajetória)

Os campos vetoriais e trajetórias, ou partes destas, que são melhor descritas por cada campo são apresentadas na figura 4.12. Nos casos em que as trajetórias sofreram comutação de campos são apresentadas de uma cor diferente, verde, ao contrário das restantes que continuam a ser representadas a vermelho.

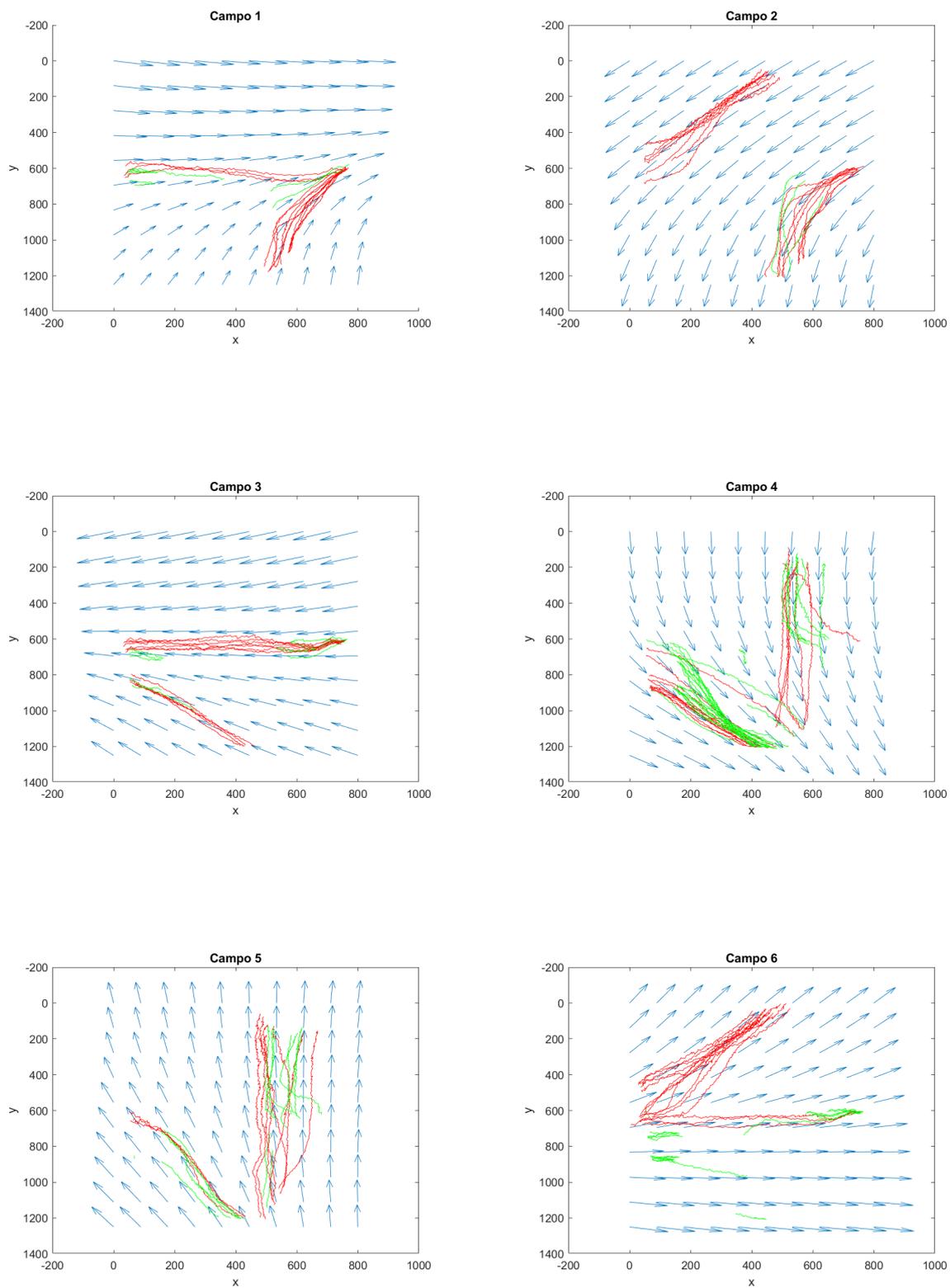


Figura 4.12: Campos vetoriais obtidos com duas comutações permitidas (dados reais)

Todas as trajetórias que sofreram comutações estão representadas na figura 4.13 em que cada cor representa um campo vetorial a que corresponde cada parte da trajetória (Vermelho: Campo 1; Amarelo: Campo 2; Verde: Campo 3; Azul ciano: Campo 4; Azul: Campo 5; Magenta: Campo 6).

Comutações de campos



Figura 4.13: Trajetórias que sofreram comutação na experiência com dados reais e duas comutações permitidas (círculos verdes; início da trajetória; círculos vermelhos; final da trajetória; Vermelho: Campo 1; Amarelo: Campo 2; Verde: Campo 3; Azul ciano: Campo 4; Azul: Campo 5; Magenta: Campo 6)

Nesta experiência com 2 comutações de trajetórias obteve-se a seguinte energia total de erro: $E_t = 2.64 \times 10^4$. Este valor é ligeiramente inferior ao obtido sem comutações e com uma comutação. Esta melhoria é de 19.3% em relação à energia de erro obtida sem qualquer comutação mas de apenas 0.8% em relação à experiência com uma comutação.

Verificaram-se 45 trajetórias a sofrerem comutações nesta experiência, o que significa que houve apenas uma trajetória a sofrer comutações em relação ao resultado obtido anteriormente, com apenas uma comutação. Destas 45, houve 4 a comutarem duas vezes de campos. Isto novamente demonstra que não houve melhorias significativas com esta experiência com duas comutações. Estas conclusões também estão visíveis na figura 4.13.

Pode ser observado, pelos resultados obtidos nas figuras 4.12 e 4.13 que a segunda comutação nestas trajetórias não trouxe melhorias significativas na forma como os campos vetoriais descrevem as trajetórias.

Capítulo 5

Conclusões e trabalho futuro

Neste trabalho foi proposto e implementado um algoritmo de análise de trajetórias baseado em campos vetoriais, com comutação de campos. Realizaram-se experiências com dados sintéticos de trajetórias e com dados de trajetórias reais obtidos no campus do IST.

Avaliaram-se os resultados obtidos com base na energia de erro total obtida, no número de comutações registadas e na representação em imagem dos campos obtidos, das trajetórias descritas por cada campo e das comutações.

Concluiu-se, com base nas experiências realizadas, que a implementação das comutações entre campos por parte das trajetórias trouxe melhorias notórias na qualidade dos resultados obtidos visíveis na representação gráfica dos mesmos como nos resultados numéricos (energia de erro e comutações). Concluiu-se ainda que, apesar de se ter obtido alguma melhoria nos resultados obtidos, a segunda comutação não compensou o aumento da complexidade do algoritmo.

O algoritmo é robusto e estável, convergindo corretamente para campos que descrevem os conjuntos de trajetórias. Apesar disso, a inicialização do algoritmo tem impacto no resultado final e como trabalho futuro poderia-se desenvolver um novo método de inicializar o algoritmo, que não esteja dependente da energia de erro.

Os parâmetros de entrada do algoritmo (resolução, número de campos, termo de suavidade e termo de penalização por comutação) acabam por ter bastante impacto nos resultados finais e, como trabalho futuro também se poderia abordar uma estratégia de pré-análise dos dados das trajetórias para se melhorar esses parâmetros.

Bibliografia

- [1] J. C. Nascimento, M. A. T. Figueiredo, J. S. Marques. “Activity recognition using mixture of vector fields”, *IEEE Trans. on Image Processing*, vol. 22, no. 5, pp. 1712 - 1725, 2013.
- [2] J. C. Nascimento, J. S. Marques and J. M. Lemos, “Modeling and classifying human activities from trajectories using a class of space-varying parametric motion fields” , *IEEE Trans. on Image Processing*, vol. 22, no. 5, pp. 2066-2080, 2013.
- [3] Barata, Catarina Nascimento, Jacinto Marques, Jorge. (2017). A sparse approach to pedestrian trajectory modeling using multiple motion fields. 2538-2542. 10.1109/ICIP.2017.8296740.
- [4] M. Perse, M. Kristan, S. Kovacic, G. Vuckovic, and J. Persa, “A trajectory-based analysis of coordinated team activity in a basketball game,” *Comput. Vis. Image Understand.*, vol. 113, no. 5, pp. 612-621, 2009.
- [5] D. Hu, S. Pan, V. Zheng, N. Liu, and Q. Yang, “Real world activity recognition with multiple goals,” in *Proc. ACM 10th Int. Conf. Series*, 2008, pp. 30-39.
- [6] “Intelligent Environments, Methods, Algorithms and Applications”, D. Monekosso, P. Remagnino and Y. Kuno Editors, Springer, 2008.
- [7] M. Pantic, A. Pentland, A. Nijholt, and T. Huang, “Human computing and machine understanding of human behavior: A survey,” in *Proc. 8th Int. Artif. Intell. Human Comput. Conf.*, 2007, pp. 239-248.
- [8] N. Ferreira et al., ”BirdVis: Visualizing and Understanding Bird Populations,”in *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 17, no. 12, pp. 2374-2383, Dec. 2011. doi: 10.1109/TVCG.2011.176
- [9] Elsner J.: Tracking hurricanes. *Bulletin of the American Meteorological Society* 84, 3 (2003), 353–356.
- [10] G. Chen, V. Kwatra, L. Wei, C. D. Hansen and E. Zhang, ”Design of 2D Time-Varying Vector Fields,”in *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 18, no. 10, pp. 1717-1730, Oct. 2012. doi: 10.1109/TVCG.2011.290
- [11] Gudmonson J., Laube P., Wolle T.: *Computational movement analysis. Springer Handbook of Geographic Information* (2012), 725–741

- [12] N. Ferreira, J. T. Klosowski, C. E. Scheidegger and C. T. Silva, “Vector Field k-Means: Clustering Trajectories by Fitting Multiple Vector Fields”, Eurographics Conference on Visualization, vol. 32 no. 3, pp. 201-210, 2013.

Apêndice A

Inicialização do modelo

A inicialização dos campos é feita no início do algoritmo vector fields k-means. O objetivo é gerar um primeiro conjunto de K campos vetoriais X e respectivos sub-conjuntos de trajetórias A'_k . Assim, o ciclo de inicialização começa por atribuir a primeira trajetória do conjunto A ao campo 1, de seguida este campo é atualizado apenas para esta trajetória e calculadas as energias de erro para todas as restantes trajetórias, usando a equação apresentada em 2.1.3 (2.1).

De seguida é selecionada a trajetória que tem maior energia de erro em relação aos campos já determinados e é otimizado o campo vetorial para essa trajetória. Este ciclo repete-se até estarem todos os campos inicializados e procede-se à atribuição das restantes trajetórias aos campos vetoriais inicializados.

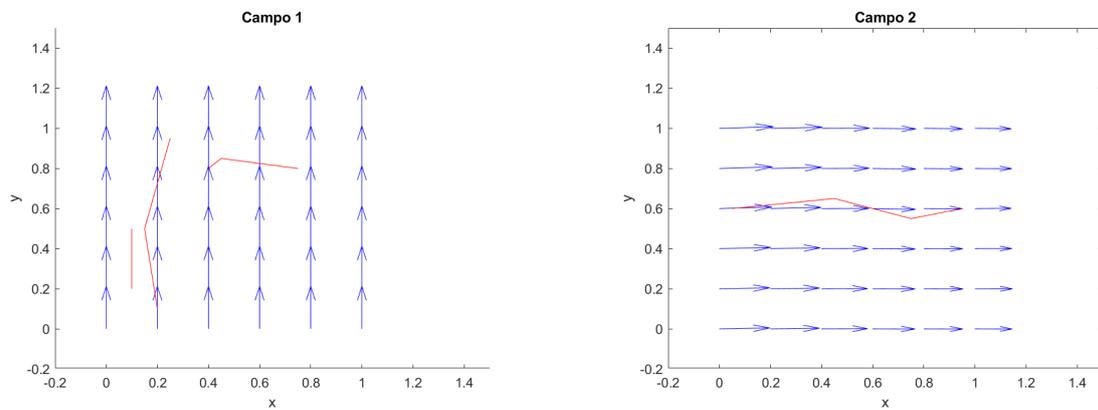


Figura A.1: Resultado de ciclo de inicialização

