

# O Problema de Visita de Polígonos\*

Gabriel F. Ushijima<sup>†</sup>

Ernesto G. Birgin<sup>†</sup>

18 de fevereiro de 2026

## Resumo

Este trabalho apresenta diferentes implementações de algoritmos para o Problema de Visita de Polígonos (Touring Polygons Problem - TPP), que consiste em encontrar um caminho de comprimento mínimo na norma Euclidiana que parte de um ponto inicial, visita uma sequência de polígonos e chega em um ponto final no plano. Em sua forma geral, o problema é NP-difícil. Por esse motivo, inicialmente consideramos uma versão simplificada em que os polígonos são convexos e não se sobrepõem, para a qual apresentamos um algoritmo exato baseado em mapas de último passo. Em seguida, para o caso não convexo, particionamos cada polígono não convexo em um conjunto de polígonos convexos e utilizamos nossa solução anterior para resolver cada combinação possível de polígonos convexos. Como essa solução é um tanto ineficiente, discutimos estratégias de otimização inteira mista para melhorar a performance dessa estratégia. Por fim, realizamos experimentos computacionais para avaliar o desempenho dos algoritmos propostos em instâncias de diferentes tamanhos e características, comparando-os com solvers comerciais. Os resultados indicam que as abordagens desenvolvidas são eficazes em uma ampla variedade de cenários.

**Palavras-chave:** problema de visita de polígonos, otimização geométrica, complexidade, experimentos numéricos.

## 1 Introdução

O Problema de Visita de Polígonos (Touring Polygons Problem - TPP), introduzido em [2], é um problema de otimização geométrica que consiste em encontrar um caminho de comprimento mínimo na norma Euclidiana que parte de um ponto inicial, visita uma sequência de polígonos e chega em um ponto final no plano. Esse tipo de problema surge naturalmente em aplicações de roteirização e planejamento de trajetórias, especialmente no contexto de veículos autônomos, nos quais é necessário garantir a visita eficiente a regiões específicas do espaço, como em tarefas de inspeção automatizada de armazéns [3, 4]. Podemos interpretar esse problema como um caso específico do Problema do Caixeiro Viajante com Regiões (*Traveling Salesman Problem with Neighborhoods* - TSPN) [1], no qual o objetivo é encontrar um caminho de comprimento mínimo que visite um conjunto de regiões arbitrárias no plano, sendo que, no TPP, essas regiões são representadas por polígonos e a ordem de visita é pré-definida.

Dentre as diversas variações do problema, consideramos inicialmente uma versão simplificada em que os polígonos são convexos e não se sobrepõem. Consideramos ainda que a distância é medida na norma Euclidiana. Para esse caso, apresentamos três abordagens distintas para resolver o problema de forma exata. As duas primeiras são baseadas em ideias descritas em [2], enquanto a terceira é uma extensão que utiliza técnicas de memoização para melhorar o desempenho em

---

\*Esse trabalho foi parcialmente apoiado pela agência FAPESP (processo 2025/13861-1).

<sup>†</sup>Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo, Rua do Matão, 1010, Cidade Universitária, 05508-090, São Paulo, SP, Brazil (e-mail: gabriel\_ushijima@ime.usp.br, egbirgin@ime.usp.br).

diversos casos que exploraremos adiante. Considerando que  $k$  é o número de polígonos e  $n$  é a soma do número de vértices dos  $k$  polígonos, as abordagens propostas são as seguintes:

1. Implementação intuitiva das ideias descritas em [2], baseadas em mapas de último passo, resolvendo o problema em tempo  $O(n^2)$ . Buscamos familiarizar o leitor com os conceitos e técnicas fundamentais para a resolução do TPP, como as regiões de primeiro contato e os mapas de último passo, que serão utilizados em todas as implementações subsequentes.
2. Implementação que melhora a eficiência da primeira ao empregar uma estratégia de busca binária para a localização de pontos nos mapas de último passo, resolvendo o problema em tempo  $O(nk \log(n/k))$ , como descrito em [2].
3. Implementação que utiliza uma técnica de memoização, com o objetivo de evitar cálculos redundantes e reduzir o custo computacional. Mantemos a mesma complexidade de pior caso da abordagem anterior,  $O(nk \log(n/k))$ , mas, a depender do tamanho dos polígonos, pode apresentar um desempenho significativamente melhor na prática.

Em seguida, buscamos resolver o caso geral do TPP, no qual os polígonos podem ser não convexos. Para isso, particionaremos cada polígono não convexo em um conjunto de polígonos convexos e aplicaremos as soluções desenvolvidas para o caso convexo sobre cada combinação possível de polígonos convexos resultantes. Essa abordagem é, a priori, ineficiente, assim buscamos otimizar o processo por meio de técnicas de otimização combinatória.

Além disso, outra forma de resolver o caso geral do TPP é modelá-lo como um problema de programação inteira mista (Mixed Integer Linear Programming - MILP) e utilizar solvers comerciais, como o Gurobi, para obter uma solução. Essa abordagem também resolve o problema de forma exata. Assim, buscamos mostrar que nossa implementação é competitiva mesmo quando comparada a solvers comerciais de alto desempenho.

## 2 O Problema de Visita de Polígonos Convexos

Inicialmente, consideramos o TPP em sua versão mais simples, na qual os polígonos são convexos e não se sobrepõem, denominada TPP Irrestrito. Utilizamos tanto a formulação quanto a solução apresentadas em [2] como base para nossas implementações. Para nossos propósitos, definimos o problema da seguinte forma:

**TPP Convexo:** Dados pontos  $s, t \in \mathbb{R}^2$  e polígonos convexos disjuntos  $P_1, \dots, P_k$ , encontre pontos  $p_i \in P_i$  para  $i = 1, 2, \dots, k$  de forma tal que o caminho que sai de  $s$ , passa por  $p_1, \dots, p_k$  e termina em  $t$  tenha comprimento mínimo.

Todas as implementações a seguir têm como base as definições e propriedades apresentadas em [2]. A seguir, incluímos as principais definições que serão utilizadas. Daqui em diante supomos que um polígono é dado como uma sequência de vértices em sentido anti-horário. Supomos ainda que  $P_0 = \{s\}$  e  $P_{k+1} = \{t\}$ .

**Caminho Parcial Ótimo ( $i$ -path):** Um  $i$ -path ( $0 \leq i \leq k$ ) até um ponto  $p \in \mathbb{R}^2$  é um caminho de comprimento mínimo que se inicia em  $s$ , termina em  $p$  e visita os polígonos  $P_1, P_2, \dots, P_i$  nessa ordem. Por estarmos considerando a distância Euclidiana, todo  $i$ -path é formado pela união de segmentos de reta; assim, tratamos caminhos como sequências ordenadas de pontos em  $\mathbb{R}^2$ . Além disso, como estamos lidando com polígonos convexos, todo  $i$ -path é único, isso ficará claro a partir da definição de mapa de último passo e suas propriedades, que apresentamos adiante. Por esse motivo, vamos nos referir a um  $i$ -path como o  $i$ -path até um ponto  $p$ .

Vale notar que o 0-path até  $p$  é simplesmente o segmento de reta  $\overline{sp}$  e o  $k$ -path até  $t$  é exatamente a solução do problema.

Veja a Figura 1 para um exemplo de um 2-path até  $t$ . Note que a ordem deve ser respeitada, pois visitar  $P_2$  antes de  $P_1$  seria mais eficiente nesse caso.

**Região de Primeiro Contato ( $T_i$ ):** Denotamos por  $T_i$  ( $1 \leq i \leq k$ ) à região de primeiro contato de um polígono  $P_i$ . Seja  $p \in P_i$  e seja  $q \in P_{i-1}$  o ponto anterior a  $p$  no  $i$ -path até  $p$ . Temos que  $p \in T_i$  se e somente se  $\overline{pq} \cap P_i = p$ . Em outras palavras,  $T_i$  consiste dos pontos  $p$  no perímetro de  $P_i$  tais que o último segmento do  $(i-1)$ -path até  $p$  não atravessa o interior de  $P_i$ . É fácil ver que apenas pontos na fronteira de  $P_i$  fazem parte de  $T_i$ . Note ainda que  $T_i$  é sempre composta por uma região contínua de arestas de  $P_i$ .

Veja a Figura 2 para um exemplo das regiões de primeiro contato  $T_1$  e  $T_2$  dos polígonos  $P_1$  e  $P_2$ , respectivamente.

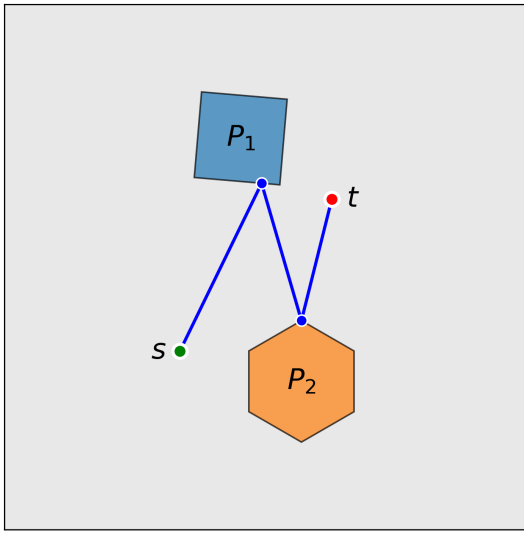


Figura 1: Caminho mínimo de  $s$  até  $t$  visitando  $P_1$  e  $P_2$ .

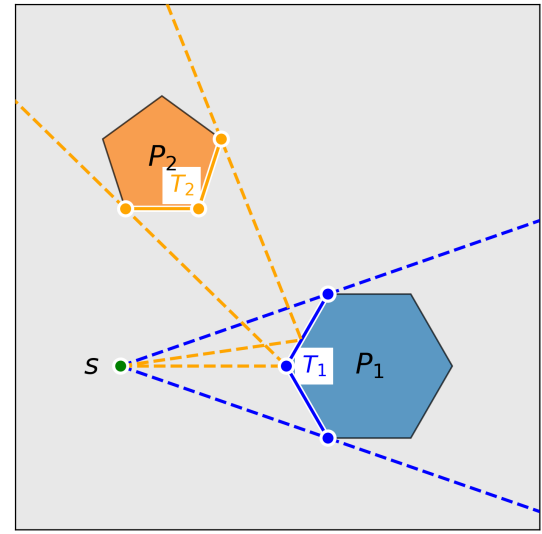


Figura 2: Região de primeiro contato  $T_1$  de  $P_1$  e  $T_2$  de  $P_2$ .

**Mapa de Último Passo ( $S_i$ ):** Denotamos por  $S_i$  ( $1 \leq i \leq k$ ) o mapa de último passo de um polígono  $P_i$ , que consiste em uma partição do plano em um número finito de regiões. Na partição podem existir duas ou mais regiões do tipo “região de vértice”, uma ou mais regiões do tipo “região de aresta” e exatamente uma região do tipo “região de atravessar”. Cada região de vértice em  $S_i$  está associada a um vértice  $v$  de  $P_i$  assim como cada região de aresta está associada a uma aresta  $e$  de  $P_i$ . Apenas vértices e arestas em  $T_i$  têm uma região associada em  $S_i$ .

Um ponto  $p \in \mathbb{R}^2$  pertence a uma região de vértice associada ao vértice  $v$  de  $P_i$  se e somente se o  $i$ -path até  $p$  tem  $\overline{vp}$  como último segmento. Analogamente, um ponto  $p \in \mathbb{R}^2$  pertence a uma região de aresta associada à aresta  $e$  de  $P_i$  se e somente se o último segmento do  $i$ -path até  $p$  inicia-se no interior de  $e$ . Por último, um ponto  $p \in \mathbb{R}^2$  pertence à região de atravessar de  $P_i$  se e somente se não pertence a nenhuma região de vértice ou aresta.

Veja a Figura 3 para um exemplo de mapa de último passo de um polígono  $P_1$ . As regiões de vértice são pintadas em vermelho, as regiões de aresta em verde e a região de atravessar em azul. Para cada região, incluímos um exemplo de ponto pertencente a ela, bem como o 1-path até esse ponto, ilustrando a definição de cada tipo de região. Note que o mapa de último passo é uma partição do plano, ou seja, cada ponto do plano pertence a exatamente uma região do mapa, notando que o polígono em si faz parte da região de atravessar.

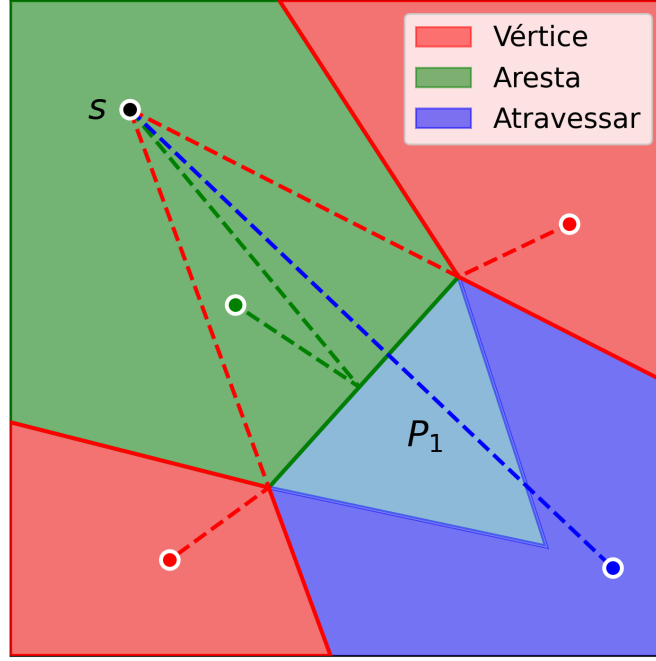


Figura 3: Exemplo do mapa de último passo  $S_1$  de  $P_1$ . Os pontos em vermelho pertencem a regiões de vértice, os pontos em verde pertencem a regiões de aresta e os pontos em azul pertencem à região de atravessar, incluímos o 1-path até cada um deles na figura.

Sejam  $p \in \mathbb{R}^2$  e  $1 \leq i \leq k$ , se dispomos de  $S_1, \dots, S_i$ , podemos determinar o  $i$ -path até  $p$  de forma eficiente, dependendo do tipo de região à qual  $p$  pertence no mapa de último passo  $S_i$ , da seguinte forma:

**Região de Vértice:** Se  $p$  pertence a uma região associada a um vértice  $v$  de  $P_i$ , então o último segmento do  $i$ -path até  $p$  é o segmento  $\overline{vp}$ . Assim, o  $i$ -path até  $p$  é simplesmente o  $(i-1)$ -path até  $v$ , seguido do segmento  $\overline{vp}$ .

A Figura 4 ilustra essa situação. Temos o ponto  $p^1$  antecedido por  $q^1$  e  $p^2$  antecedido por  $q^2$ , tanto  $q^1$  quanto  $q^2$  são vértices de  $P_2$ . Fizemos questão de incluir tanto  $p^1$  quanto  $p^2$  para ilustrar que o mapa de último passo  $S_2$  apenas nos informa sobre o **último segmento** do 2-path, não sobre o caminho completo, ou seja, não podemos afirmar nada sobre o último segmento do caminho até  $q^1$  ou  $q^2$ . De fato, no exemplo escolhido, observamos que o último segmento até  $q^1$  parte de um vértice de  $P^1$  enquanto o último segmento até  $q^2$  parte do interior de uma aresta de  $P^1$ . Para saber o caminho completo até  $p^1$  ou  $p^2$ , precisamos consultar  $S_1$  além de  $S_2$ .

**Região de Atravessar:** Se  $p$  pertence à região de atravessar de  $P_i$ , então o último segmento do  $i$ -path até  $p$  atravessa o interior de  $P_i$ . Nesse caso, o  $i$ -path até  $p$  é dado pelo  $(i-1)$ -path até  $p$ . A Figura 5 ilustra essa situação, em que o 2-path até  $p$  é o mesmo que o 1-path até  $p$  e atravessa  $P_2$ .

**Região de Aresta:** Se  $p$  pertence a uma região associada a uma aresta  $e = \overline{uv}$  de  $P_i$ , então refletimos o ponto  $p$  em relação à reta que contém  $e$ , obtendo um ponto refletido  $p'$ . Calculamos o  $(i-1)$ -path até  $p'$  cujo último segmento parte de um ponto  $q'$  e chamamos de  $q$  à interseção do segmento  $\overline{q'p'}$  com a aresta  $e$ . O  $i$ -path até  $p$  é então formado pela parte do  $(i-1)$ -path até  $p'$  que vai desde o início (ponto  $s$ ) até o ponto  $q$ , seguida do segmento  $\overline{qp}$ . A Figura 6 ilustra essa situação, mostrando como o ponto deve ser refletido e então como usamos o  $(i-1)$ -path até  $p'$  para determinar o  $i$ -path até  $p$ .

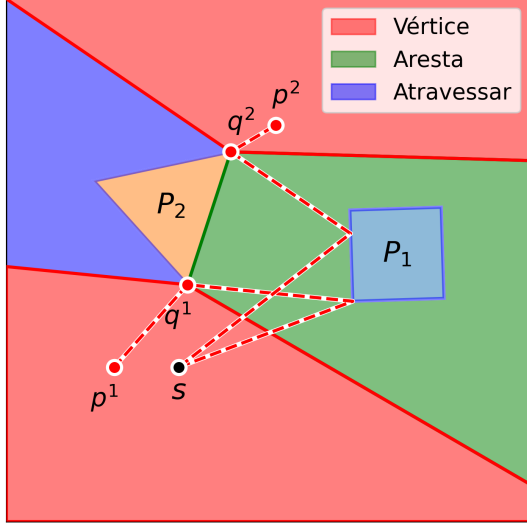


Figura 4: 2-path até  $p^1$  e  $p^2$ , que estão em regiões de vértice.

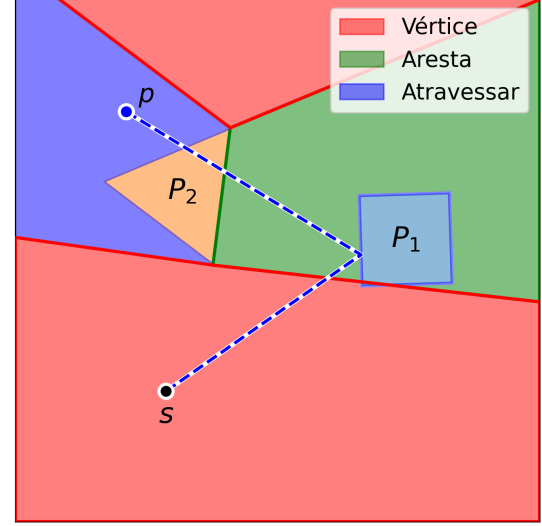


Figura 5: 2-path até  $p$ , que está em uma região de atravessar.

A seguir, apresentamos a fórmula para calcular o ponto refletido  $p'$  e o ponto de interseção  $q$ . Usamos o operador  $\cdot$  para denotar o produto escalar, o operador  $\|\cdot\|$  para denotar a norma euclidiana e o operador  $\times$  para denotar o produto vetorial<sup>1</sup>, todos em  $\mathbb{R}^2$ :

$$p' = p + 2 \frac{(u - p) \cdot (v - u)}{\|v - u\|^2} (v - u), \quad (1)$$

$$q = q' + \frac{(u - q') \times (v - u)}{(p' - q') \times (v - u)} (p' - q'). \quad (2)$$

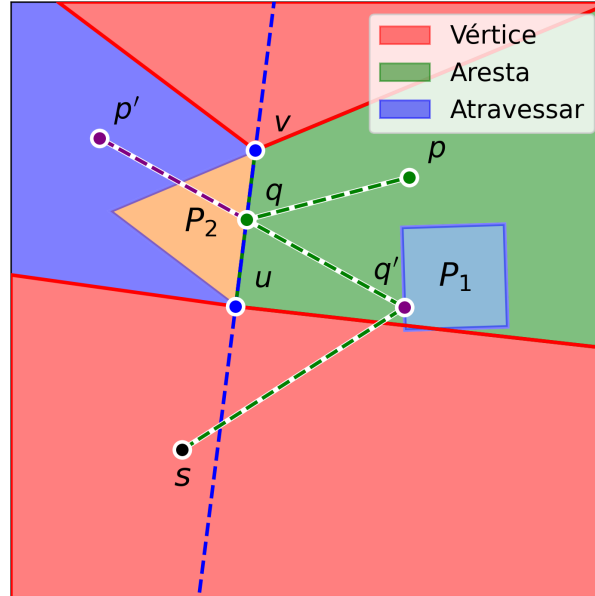


Figura 6: 2-path até  $p$ , que pertence a uma região de aresta associada à aresta  $\overline{uv}$  de  $P_2$ . Ilustramos o ponto refletido  $p'$ , o ponto que antecede  $p'$ ,  $q'$  e o ponto de interseção  $q$ .

<sup>1</sup>Para dois vetores  $a = (a_x, a_y)$  e  $b = (b_x, b_y)$ , temos  $a \times b = a_x b_y - a_y b_x$ .

Com base nessas ideias, implementamos o Algoritmo 1, que, dado um ponto  $p \in \mathbb{R}^2$  e um índice  $1 \leq i \leq k$ , retorna o  $i$ -path até  $p$  como uma sequência de pontos em  $\mathbb{R}^2$ , desconsiderando o último ponto do caminho,  $p$ , que é conhecido. Assumimos também a existência de uma função **LocalizaPonto**, que, dado  $p \in \mathbb{R}^2$  e  $1 \leq i \leq k$ , localiza o ponto  $p$  no mapa de último passo  $S_i$  de  $P_i$  e retorna a região  $R$  à qual  $p$  pertence. Essa região carrega tanto o tipo de região à qual o ponto pertence assim como o vértice  $v$  da região se for uma região de vértice ou a aresta  $e$  se for uma região de aresta.

---

**Algoritmo 1:** Consulta Caminho

---

**Entrada:**  $p, i, s, (P_1, \dots, P_i), (T_1, \dots, T_i), (S_1, \dots, S_i)$

**Saída :**  $i$ -path até  $p$  como uma sequência de pontos em  $\mathbb{R}^2$ , desconsiderando  $p$ .

---

```

1 define ConsultaCaminho( $p, i, s, (P_1, \dots, P_i), (T_1, \dots, T_i), (S_1, \dots, S_i)$ ):
2   se  $i = 0$  :
3     retorna  $[s]$ 
4    $R \leftarrow \text{LocalizaPonto}(p, P_i, T_i, S_i)$ 
5   se  $R$  corresponde a um vértice  $v$  de  $P_i$  :
6      $\mathbb{P} \leftarrow \text{ConsultaCaminho}(v, i-1, s, (P_1, \dots, P_{i-1}), (T_1, \dots, T_{i-1}), (S_1, \dots, S_{i-1}))$ 
7     retorna  $\mathbb{P} \oplus [v]$  // Adiciona  $v$  ao final do caminho  $\mathbb{P}$ 
8   senão se  $R$  corresponde a uma aresta  $e = \overline{uv}$  de  $P_i$  :
9      $p' \leftarrow$  reflexão de  $p$  em relação à reta que contém  $e$  (Veja 1)
10     $\mathbb{P} \leftarrow \text{ConsultaCaminho}(p', i-1, s, (P_1, \dots, P_{i-1}), (T_1, \dots, T_{i-1}), (S_1, \dots, S_{i-1}))$ 
11     $q' \leftarrow$  último ponto de  $\mathbb{P}$ 
12     $q \leftarrow$  ponto de interseção entre as retas que passam por  $\overline{q'p'}$  e  $e$  (Veja 2)
13    retorna  $\mathbb{P} \oplus [q]$  // Adiciona  $q$  ao final do caminho  $\mathbb{P}$ 
14   senão se  $R$  corresponde a atravessar  $P_i$  :
15     retorna  $\text{ConsultaCaminho}(p, i-1, s, (P_1, \dots, P_{i-1}), (T_1, \dots, T_{i-1}), (S_1, \dots, S_{i-1}))$ 

```

---

O Algoritmo 1 permite calcular o  $i$ -path até qualquer ponto  $p \in \mathbb{R}^2$  de forma eficiente, podendo ser utilizado para obter o  $k$ -path até  $t$ , que corresponde exatamente à solução do problema. O algoritmo recebe como entrada o ponto  $p$ , o ponto inicial  $s$ , o índice  $i$ , os polígonos  $P_\ell$  para  $\ell = 1, \dots, i$  e suas respectivas regiões de primeiro contato  $T_i$  e mapas de último passo  $S_i$  e devolve o caminho. O algoritmo é recursivo e faz apenas uso da função **LocalizaPonto** que definiremos em breve.

Frequentemente nos interessamos apenas pelo último segmento do  $i$ -path até  $p$ . Ainda, no caso em que um ponto pertence a uma região associada a um vértice de  $P_i$ , é possível determinar o último segmento diretamente, sem a necessidade de calcular o restante do caminho. Dessa forma, implementamos o Algoritmo 2, que, dado um ponto  $p \in \mathbb{R}^2$  e um índice  $1 \leq i \leq k$ , retorna o ponto inicial do último segmento do  $i$ -path até  $p$ . O algoritmo recebe como dados de entrada os mesmos dados de entrada do Algoritmo 1.

Esses dois algoritmos serão utilizados em todas as implementações discutidas a seguir. A diferença entre elas estará na implementação do algoritmo **LocalizaPonto** e na forma como calculamos as regiões de primeiro contato  $T_i$  e os mapas de último passo  $S_i$  para cada polígono  $P_i$ .

## 2.1 Primeira Abordagem

A alto nível, o algoritmo para resolver o TPP Convexo é o seguinte: para cada  $1 \leq i \leq k$ , calculamos a região de primeiro contato  $T_i$  de  $P_i$  utilizando  $T_1, \dots, T_{i-1}$  e  $S_1, \dots, S_{i-1}$  através do Algoritmo 3, depois calculamos o mapa de último passo  $S_i$  de  $P_i$  utilizando  $T_1, \dots, T_i$  e  $S_1, \dots, S_{i-1}$  através do Algoritmo 4. Por fim, calculamos o  $k$ -path até  $t$  utilizando o Algoritmo 1. A seguir, vamos

---

**Algoritmo 2:** Consulta Último Passo

---

**Entrada:**  $p, i, s, (P_1, \dots, P_i), (T_1, \dots, T_i), (S_1, \dots, S_i)$ **Saída** : Ponto que precede  $p$  no  $i$ -path até  $p$ .

---

```
1 define ConsultaÚltimoPasso( $p, i, s, (P_1, \dots, P_i), (T_1, \dots, T_i), (S_1, \dots, S_i)$ ):
2   se  $i = 0$  :
3     retorna  $s$ 
4    $R \leftarrow \text{LocalizaPonto}(p, P_i, T_i, S_i)$ 
5   se  $R$  corresponde a um vértice  $v$  de  $P_i$  :
6     retorna  $v$ 
7   senão se  $R$  corresponde a uma aresta  $e = \overline{uv}$  de  $P_i$  :
8      $p' \leftarrow$  reflexão de  $p$  em relação à reta que contém  $e$  (Veja 1)
9      $q' \leftarrow \text{ConsultaÚltimoPasso}(p', i - 1, s, (P_1, \dots, P_{i-1}), (T_1, \dots, T_{i-1}), (S_1, \dots, S_{i-1}))$ 
10     $q \leftarrow$  ponto de interseção entre  $\overline{q'p'}$  e  $e$  (Veja 2)
11    retorna  $q$ 
12  senão se  $R$  corresponde a atravessar  $P_i$  :
13    retorna
      ConsultaÚltimoPasso( $p, i - 1, s, (P_1, \dots, P_{i-1}), (T_1, \dots, T_{i-1}), (S_1, \dots, S_{i-1})$ )
```

---

detalhar as implementações de cada um desses passos.

Primeiramente, para calcular a região de primeiro contato  $T_i$  de um polígono  $P_i$ , precisamos determinar quais arestas de  $P_i$  pertencem a  $T_i$ . Seja  $e = \overline{uv}$  uma aresta de  $P_i$ ,  $p$  um ponto qualquer dessa aresta e  $q$  o ponto que precede  $p$  no  $(i - 1)$ -path até  $p$ . Note que  $e \in T_i$  se, e somente se,  $q$  está do lado externo de  $e$ . Esse teste vale para qualquer ponto na aresta  $e$ , assim, escolhemos utilizar um vértice para potencialmente reutilizar esse resultado adiante. A Figura 7 ilustra como podemos usar essa ideia para determinar a região de primeiro contato de um polígono, realizando o teste para ambos os vértices de cada aresta do polígono, note que as arestas em verde tem o ponto que precede os vértices em seu lado externo enquanto as arestas em vermelho tem o ponto que precede os vértices no lado interno. Implementamos essa ideia no Algoritmo 3, utilizando o vértice  $u$  como o ponto  $p$  para determinar se a aresta  $e$  pertence a  $T_i$ .

---

**Algoritmo 3:** Região de Primeiro Contato

---

**Entrada:**  $i, s, (P_1, \dots, P_i), (T_1, \dots, T_{i-1}), (S_1, \dots, S_{i-1})$ **Saída** : Região de primeiro contato  $T_i$  de  $P_i$  como um conjunto de arestas de  $P_i$ .

---

```
1 define RegiãoDePrimeiroContato( $i, s, (P_1, \dots, P_i), (T_1, \dots, T_{i-1}), (S_1, \dots, S_{i-1})$ ):
2    $T_i \leftarrow \emptyset$ 
3   para cada aresta  $e$  de  $P_i$  :
4      $u \leftarrow$  vértice anterior de  $e$ 
5      $v \leftarrow$  vértice posterior de  $e$ 
6      $q \leftarrow \text{ConsultaÚltimoPasso}(u, i - 1, s, (P_1, \dots, P_{i-1}), (T_1, \dots, T_{i-1}), (S_1, \dots, S_{i-1}))$ 
7     se  $(q - u) \times (v - u) < 0$  :
8        $T_i \leftarrow T_i \cup e$ 
9   retorna  $T_i$ 
```

---

Uma vez que temos  $T_i$ , podemos calcular o mapa de último passo  $S_i$  de  $P_i$ , para tal, vamos primeiro retomar as condições de otimalidade local discutidas em [2, **Local Optimality Conditions.**], que nos permitem determinar o mapa de último passo  $S_i$  de um polígono  $P_i$  a partir da

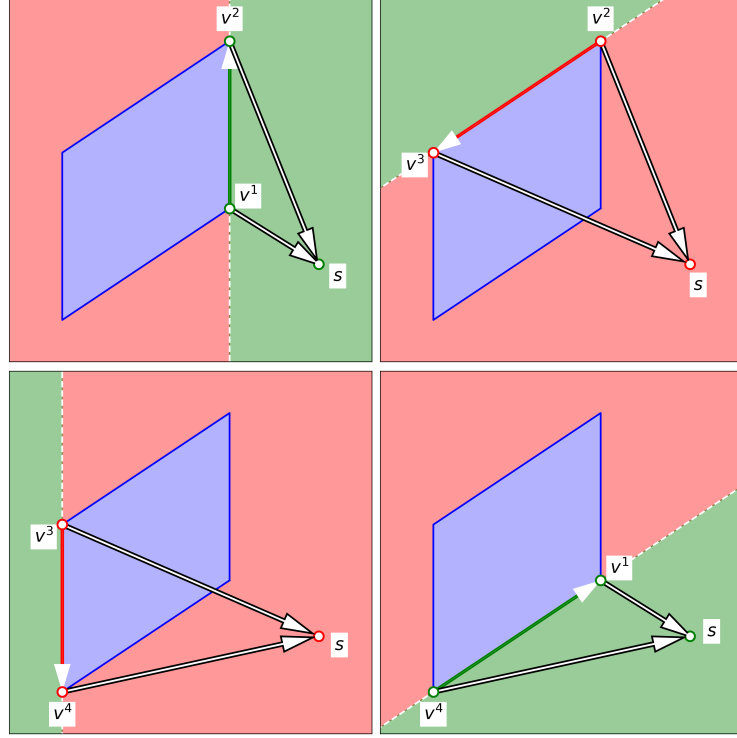


Figura 7: Usamos o Algoritmo 3 para determinar a região de primeiro contato do polígono. Pintamos em verde as arestas que pertencem a  $T_i$  e em vermelho as que não pertencem.

região de primeiro contato  $T_i$ . Seja  $v$  um vértice de um polígono qualquer  $P$  com arestas incidentes  $e^1$  e  $e^2$  e suponha que desejamos visitar  $P$  partindo de  $q$  e terminando em  $p$ . Para que o caminho mínimo de  $q$  até  $p$  passe por  $v$ , é necessário que  $p$  esteja dentro do cone definido por  $v$  e por um par ordenado de raios que partem de  $v$  determinados a partir de  $e^1$  e  $e^2$  nessa ordem.

O raio associado a uma aresta  $e$  incidente a  $v$  será  $v - q$  se  $q$  está do lado interno de  $e$  ou  $q' - v$  onde  $q'$  é a reflexão de  $q$  em relação à reta perpendicular a  $e$  que passa por  $v$  caso contrário. Assim, concluímos a condição de otimalidade local para um vértice  $v$  de  $P$ , no entanto, como todo  $i$ -path é único, temos que otimalidade local implica otimalidade global. Assim, para determinar o mapa de último passo  $S_i$  de  $P_i$ , basta calcular os pares ordenados de raios associados a cada vértice de  $P_i$  que tem uma aresta incidente pertencente a  $T_i$ . Implementamos essa ideia no Algoritmo 4, onde, para cada vértice  $v$  de  $P_i$  que tem uma aresta incidente pertencente a  $T_i$ , calculamos os raios associados a  $v$  e associamos o par ordenado desses raios a  $v$  em  $S_i$ .

Uma vez que sabemos calcular  $T_i$  e  $S_i$ , desejamos implementar o algoritmo **LocalizaPonto**, que localiza um ponto  $p$  no mapa de último passo  $S_i$ . Na primeira abordagem, implementamos esse procedimento de forma direta, verificando inicialmente todas as regiões associadas a vértices, depois todas as regiões associadas a arestas e, caso o ponto não pertença a nenhuma dessas regiões, retornando a região de atravessar  $P_i$ . Para verificar se um ponto  $p$  pertence a uma região associada a um vértice  $v$  de  $P_i$  com raios  $r^1$  e  $r^2$ , primeiro determinamos se o ângulo de abertura entre  $r^1$  e  $r^2$  é menor ou maior que  $180^\circ$ . Se o ângulo for menor que  $180^\circ$ , então  $p$  pertence à região associada a  $v$  se o produto vetorial entre  $r^1$  e  $\vec{vp}$  for positivo e o produto vetorial entre  $\vec{vp}$  e  $r^2$  for negativo. Caso contrário,  $p$  pertence à região associada a  $v$  se o produto vetorial entre  $r^1$  e  $\vec{vp}$  for positivo **ou** o produto vetorial entre  $\vec{vp}$  e  $r^2$  for negativo. Essas situações são ilustradas na Figura 8.

Além disso, desejamos verificar se um ponto  $p$  pertence a uma região associada a uma aresta  $e$  de  $P_i$ . Para isso, consideramos que  $u$  e  $v$  são os vértices que definem a aresta  $e$ , em sentido anti-horário, e tomamos  $r^1$  como o segundo raio associado ao vértice  $u$  e  $r^2$  como o primeiro raio associado ao vértice  $v$  em  $S_i$ . Então,  $p$  pertence à região associada a  $e$  se estiver do lado externo



---

**Algoritmo 4:** Mapa de Último Passo

---

**Entrada:**  $i, s, (P_1, \dots, P_i), (T_1, \dots, T_i), (S_1, \dots, S_{i-1})$

**Saída :** Mapa de último passo  $S_i$  de  $P_i$  como uma associação de pares ordenados de raios aos vértices das arestas de  $T_i$ .

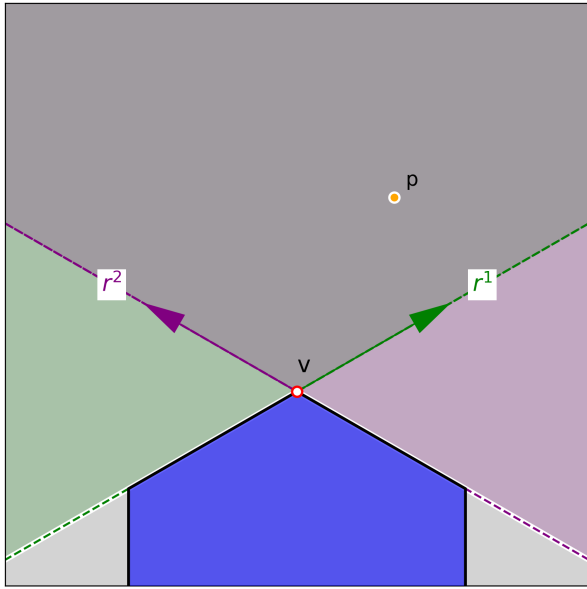
---

// Função auxiliar para calcular o raio refletido na aresta  $e = \overline{uv}$  incidente a  $v$  onde  $q$  é o ponto que precede  $v$  no  $(i-1)$ -path até  $v$ .

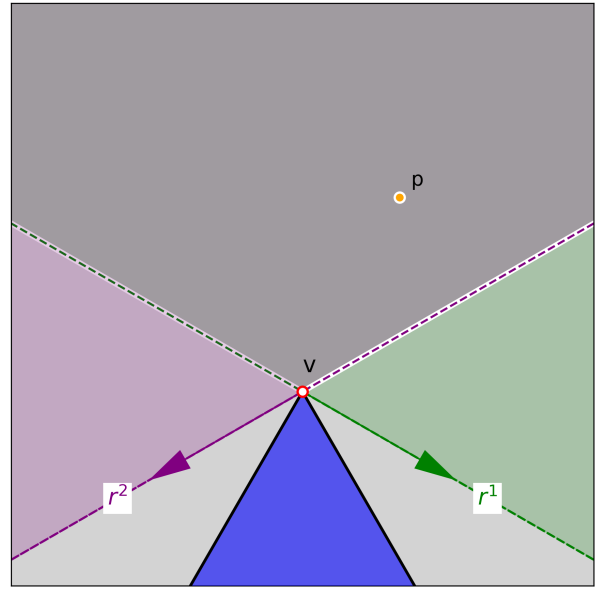
```
1 define Reflexão( $q, v, e$ ):
2   se  $(u - v) \times (q - v) \geq 0$  :
3     retorna  $v - q$ 
4   senão
5      $e_{\perp} \leftarrow$  vetor perpendicular a  $e$  que passa por  $v$ 
6      $q' \leftarrow$  reflexão de  $q$  em relação à reta que contém  $e_{\perp}$  (Veja 1)
7     retorna  $q' - v$ 

8 define MapaDeÚltimoPasso( $i, s, (P_1, \dots, P_i), (T_1, \dots, T_i), (S_1, \dots, S_{i-1})$ ):
9    $S_i \leftarrow \emptyset$ 
10  para cada vértice  $v$  de  $P_i$  tal que existe uma aresta  $e$  em  $T_i$  incidente a  $v$  :
11     $e^1 \leftarrow$  aresta anterior de  $v$  em  $P_i$ 
12     $e^2 \leftarrow$  aresta posterior de  $v$  em  $P_i$ 
13     $q \leftarrow$  ConsultaÚltimoPasso( $v, i-1, s, (P_1, \dots, P_{i-1}), (T_1, \dots, T_{i-1}), (S_1, \dots, S_{i-1})$ )
14     $r^1 \leftarrow$  Reflexão( $q, v, e^1$ )
15     $r^2 \leftarrow$  Reflexão( $q, v, e^2$ )
16    Associa  $(r^1, r^2)$  a  $v$  e adiciona à  $S_i$ 
17  retorna  $S_i$ 
```

---



(a) Ângulo de abertura menor que  $180^\circ$ .



(b) Ângulo de abertura maior que  $180^\circ$ .

Figura 8: Verificação de pertinência de um ponto a uma região associada a um vértice em um mapa de último passo.

da aresta  $e$  e entre os raios  $r^1$  e  $r^2$ , como ilustrado na Figura 9.

Uma vez que conseguimos verificar se um ponto pertence a uma região associada a um vértice

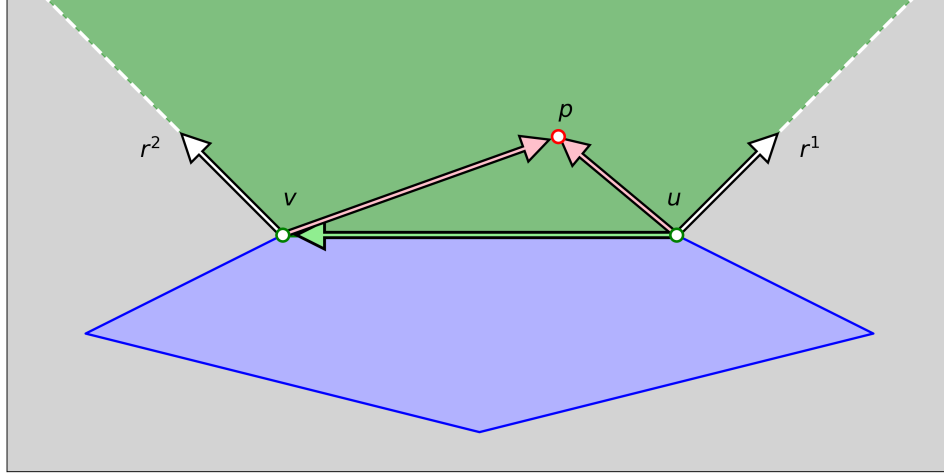


Figura 9: Verificando se um ponto pertence a uma região associada a uma aresta.

ou a uma aresta de  $P_i$ , podemos implementar o algoritmo **LocalizaPonto** de forma direta, como mostrado no Algoritmo 5. Realizamos dois laços: o primeiro verifica todas as regiões associadas a vértices de  $P_i$  pertencentes a  $T_i$  e o segundo verifica todas as regiões associadas a arestas de  $P_i$  pertencentes a  $T_i$ . Caso o ponto  $p$  não pertença a nenhuma dessas regiões, retornamos a região de atravessar  $P_i$ .

---

**Algoritmo 5:** Localiza Ponto — Primeira Abordagem

---

**Entrada:**  $p, P_i, T_i, S_i$

**Saída** : Região de  $S_i$  que contém  $p$ .

---

```

1 define LocalizaPonto( $p, P_i, T_i, S_i$ ):
2   para cada vértice  $v$  de  $P_i$  tal que existe uma aresta  $e$  em  $T_i$  incidente a  $v$  :
3      $(r^1, r^2) \leftarrow$  raios associados a  $v$  em  $S_i$ 
4     se  $r^1 \times r^2 \geq 0$  :
5       se  $(r^1 \times (p - v) > 0) \wedge (r^2 \times (p - v) < 0)$  :
6         retorna região associada a  $v$ 
7     senão
8       se  $(r^1 \times (p - v) > 0) \vee (r^2 \times (p - v) < 0)$  :
9         retorna região associada a  $v$ 
10  para cada aresta  $e = \overrightarrow{uv}$  de  $P_i$  pertencente a  $T_i$  :
11     $r^1 \leftarrow$  segundo raio associado a  $u$  em  $S_i$ 
12     $r^2 \leftarrow$  primeiro raio associado a  $v$  em  $S_i$ 
13    se  $(r^1 \times (p - u) > 0) \wedge (r^2 \times (p - v) < 0) \wedge ((p - u) \times (v - u) < 0)$  :
14      retorna região associada a  $e$ 
15  retorna região de atravessar  $P_i$ 

```

---

Finalmente, uma vez que sabemos calcular  $T_i$ ,  $S_i$  e localizar um ponto  $p$  em  $S_i$ , podemos implementar o algoritmo completo para resolver o TPP, conforme mostrado no Algoritmo 6. Esse algoritmo itera sobre todos os polígonos  $P_1, \dots, P_k$ , calculando  $T_i$  e  $S_i$  para cada polígono por meio dos algoritmos discutidos anteriormente. Após calcular todas as regiões de primeiro contato e mapas de último passo, o algoritmo retorna o  $k$ -path até o ponto  $t$  utilizando o Algoritmo 1. Esse algoritmo também será utilizado na segunda abordagem, na qual apenas o algoritmo **LocalizaPonto**

será modificado.

---

**Algoritmo 6:** TPP Irrestrito — Implementação Completa

---

**Entrada:** Pontos  $s$  e  $t$ , sequência de polígonos convexos disjuntos  $(P_1, \dots, P_k)$

**Saída** :  $k$ -path até  $t$ .

---

```

1 define TPP_Irrestrito( $s, t, (P_1, \dots, P_k)$ ):
2    $(T_1, \dots, T_k) \leftarrow \emptyset$ 
3    $(S_1, \dots, S_k) \leftarrow \emptyset$ 
4   para cada  $i \leftarrow 1$  até  $k$  :
5      $T_i \leftarrow \text{RegiãoDePrimeiroContato}(i, s, (P_1, \dots, P_i), (T_1, \dots, T_{i-1}), (S_1, \dots, S_{i-1}))$ 
6      $S_i \leftarrow \text{MapaDeÚltimoPasso}(i, s, (P_1, \dots, P_i), (T_1, \dots, T_i), (S_1, \dots, S_{i-1}))$ 
7   retorna ConsultaCaminho( $t, k, s, (P_1, \dots, P_k), (T_1, \dots, T_k), (S_1, \dots, S_k)$ )

```

---

## 2.2 Segunda Abordagem

Na segunda abordagem, alteramos apenas a implementação do algoritmo **LocalizaPonto**, utilizando uma estratégia de busca binária para localizar o ponto  $p$  no mapa de último passo  $S_i$ . Definimos  $u^1, \dots, u^m$  como os vértices de  $P_i$  que pertencem a  $T_i$ , ordenados em sentido anti-horário. A ideia central do algoritmo é utilizar *arestas fictícias* que conectam dois vértices  $u^i$  e  $u^j$ , formando uma nova região  $R$ . Essa região possui a propriedade de que é possível verificar se  $p$  pertence a  $R$  em tempo  $O(1)$ , e  $p$  está em  $R$  se e somente se está em alguma região de vértice ou de aresta entre  $u^i$  e  $u^j$ . Dessa forma, podemos empregar uma estratégia de busca binária para localizar  $p$  em  $S_i$ .

Assumimos que o ponto  $p$  não está no interior do polígono  $P_i$ . Esse fato é garantido pela hipótese de que os polígonos são disjuntos, incluindo os pontos  $s$  e  $t$ . Caso seja necessário lidar com situações em que  $p$  possa estar no interior de  $P_i$ , o algoritmo pode ser iniciado com uma verificação de pertinência em tempo  $O(\log|P_i|)$ . Essa verificação, no entanto, não será discutida aqui, pois não é o foco deste trabalho.

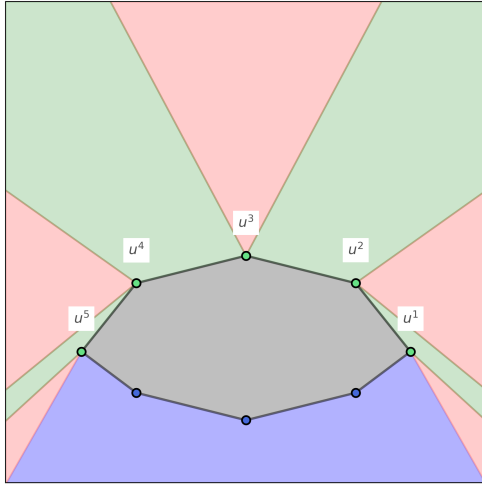
A Figura 10 será utilizada para descrever cada etapa do algoritmo. O primeiro quadro apresenta um polígono  $P_i$  com 8 vértices, dos quais 5 pertencem a  $T_i$ , denotados por  $u^1, \dots, u^5$ . As regiões de vértice estão destacadas em vermelho, as regiões de aresta em verde e a região de travessia em azul. O objetivo é localizar um ponto nesse mapa de último passo. O algoritmo possui dois passos iniciais e, em seguida, inicia a busca binária, conforme descrito a seguir:

### Algoritmo para localizar um ponto $p$ em $S_i$ :

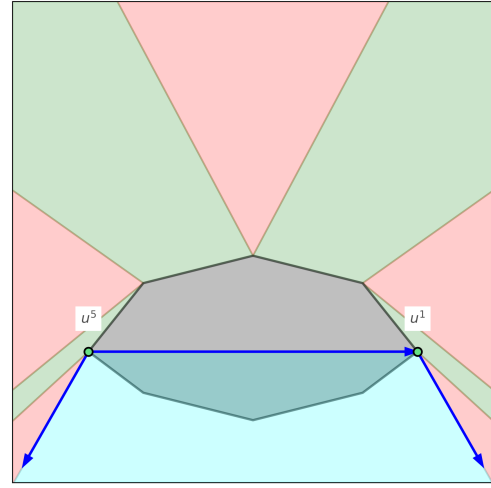
**Passo 1.** Verificar se  $p$  está na região de travessia de  $P_i$  (Quadro 2): criamos uma aresta fictícia entre  $u^5$  e  $u^1$ , gerando uma região  $R$  que contém exatamente a região de travessia e parte de  $P_i$ . A verificação se  $p$  pertence a  $R$  é feita utilizando a mesma estratégia do Algoritmo 5, considerando  $u^5$  e  $u^1$  como os vértices que definem a aresta fictícia e o segundo raio de  $u^5$  e o primeiro raio de  $u^1$  como os raios que delimitam  $R$ . Caso  $p$  pertença a  $R$ , retornamos a região de travessia.

**Passo 2.** Verificar se  $p$  está em alguma região de vértice de  $u^1$  ou  $u^5$  (Quadro 3): utilizamos a mesma verificação do Algoritmo 5. Se  $p$  pertencer a alguma dessas regiões, retornamos a região correspondente.

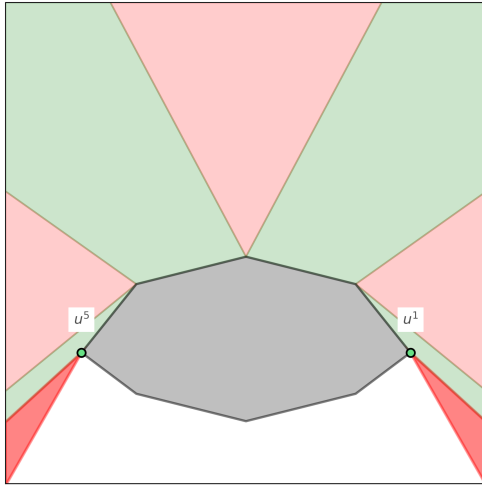
**Passo 3.** Busca binária (Quadro 4): sabendo que  $p$  não está nem na região de travessia nem nas regiões de vértice de  $u^1$  ou  $u^5$ , iniciamos a busca binária entre os vértices  $u^1$  e  $u^5$ .



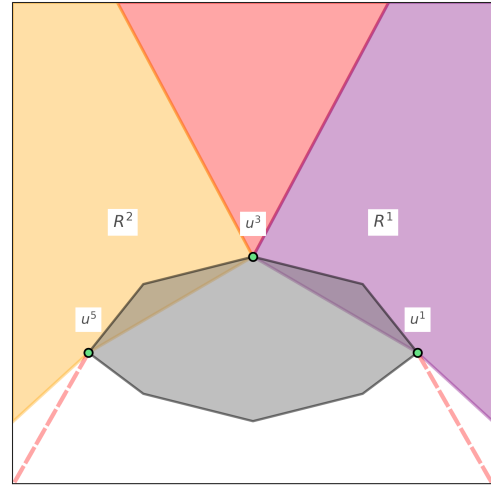
(a) Visão geral do polígono.



(b) Verificando região de travessia.



(c) Verificando regiões de vértice adjacentes à região de travessia.



(d) Particionando o restante do plano em duas regiões de aresta e uma de vértice.

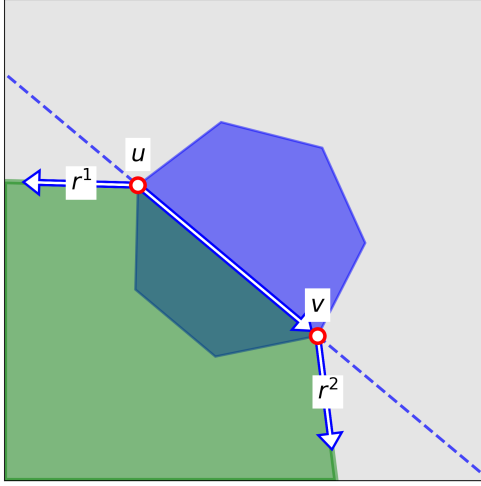
Figura 10: Ilustração dos três passos do algoritmo de busca binária para localizar um ponto em um mapa de último passo.

Selecionamos  $u^3$  como vértice intermediário e verificamos se  $p$  pertence à região de vértice de  $u^3$ . Em caso afirmativo, retornamos essa região.

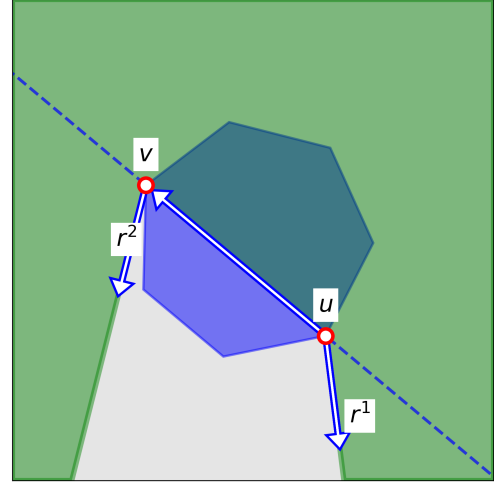
Caso contrário, criamos duas arestas fictícias, uma entre  $u^1$  e  $u^3$  e outra entre  $u^3$  e  $u^5$ , gerando as regiões  $R_1$  (em roxo) e  $R_2$  (em laranja). Verificamos se  $p$  pertence a  $R_1$ ; se sim, repetimos esse passo recursivamente considerando apenas os vértices entre  $u^1$  e  $u^3$ . Caso contrário, sabemos que  $p$  pertence a  $R_2$  e repetimos esse passo considerando apenas os vértices entre  $u^3$  e  $u^5$ . Esse passo é repetido até que  $p$  pertença a uma região de vértice ou restem apenas dois vértices em que concluímos que  $p$  está na região de aresta entre esses dois vértices.

A maior parte desse algoritmo é direta de implementar, exceto pela verificação se  $p$  pertence à região  $R_1$ . Isso ocorre porque essa região pode assumir formas que não são cobertas pela verificação original do Algoritmo 5. Em particular, ao criar uma aresta fictícia entre dois vértices  $u$  e  $v$  com raios  $r^1$  e  $r^2$ , pode ocorrer que esses raios formem um ângulo maior que  $180^\circ$  ou estejam em lados distintos da aresta fictícia, como ilustrado na Figura 11.

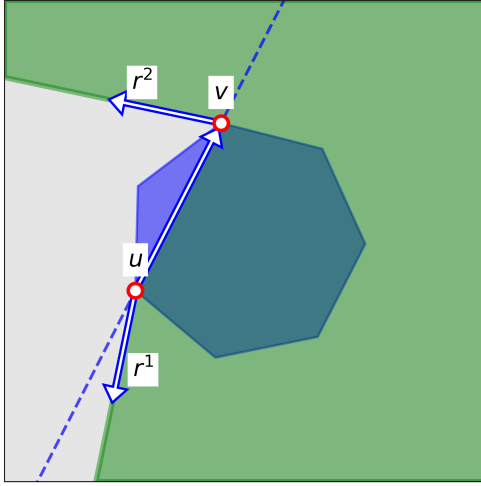
Desejamos determinar se um ponto  $p$  pertence à região de aresta fictícia entre os vértices  $u$



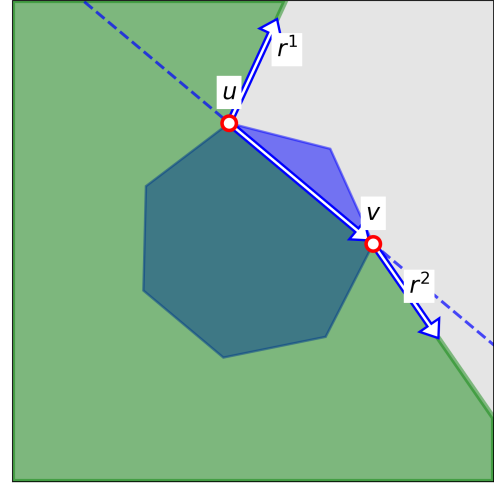
(a) Ambos raios no lado negativo.



(b) Ambos raios no lado positivo.



(c) Raios em lados diferentes.



(d) Raios em lados diferentes.

Figura 11: Ilustração dos 4 casos possíveis ao verificar se um ponto pertence à região de uma aresta fictícia entre dois vértices.

e  $v$ , delimitada pelos raios  $r^1$  partindo de  $u$  e  $r^2$  partindo de  $v$ . Os casos são definidos pelo lado em que  $r^1$  e  $r^2$  se encontram em relação à direção  $d = v - u$ , e tratamos cada situação separadamente:

- (a)  $d \times r^1 < 0 \wedge d \times r^2 < 0$ : Verificamos se  $p$  está entre os raios  $r^1$  e  $r^2$  e do lado externo da aresta  $\overline{uv}$ .
- (b)  $d \times r^1 > 0 \wedge d \times r^2 > 0$ : Esse caso é o complemento do anterior. Verificamos se  $p$  não está entre os raios  $r^1$  e  $r^2$  e se está do lado interno da aresta  $\overline{uv}$ .
- (c)  $d \times r^1 < 0 \wedge d \times r^2 > 0$ : Inicialmente verificamos de que lado da reta que contém  $\overline{uv}$  o ponto  $p$  se encontra. Se  $p$  estiver do lado externo, verificamos se está do lado negativo de  $r^2$ ; caso contrário, verificamos se está do lado positivo de  $r^1$ .
- (d)  $d \times r^1 > 0 \wedge d \times r^2 < 0$ : Procedemos de forma análoga ao caso anterior, invertendo os testes correspondentes aos raios.

Com essas verificações, podemos implementar o algoritmo `LocalizaPonto` utilizando a estratégia de busca binária, conforme apresentado no Algoritmo 7. Nesse algoritmo, implementamos

a função auxiliar **VerificaAresta**, responsável por verificar se  $p$  pertence à região de uma aresta fictícia entre dois vértices  $u$  e  $v$ , de acordo com os casos discutidos anteriormente. A verificação se  $p$  pertence à região de vértice de um dado vértice  $u^{mid}$  é abstraída, pois é idêntica àquela utilizada no Algoritmo 5.

A principal vantagem dessa abordagem é que a busca binária reduz o número de verificações para localizar  $p$  em  $S_i$  de  $O|T_i|$  para  $O(\log|T_i|)$ , o que pode representar uma melhoria significativa quando  $P_i$  possui muitos vértices em  $T_i$ . Analisaremos o impacto dessa modificação com mais detalhes na análise de complexidade.

### 2.3 Terceira Abordagem

Antes de discutirmos a terceira abordagem, apresentamos a motivação para essa nova implementação do algoritmo **LocalizaPonto**. Considere o caso de um único polígono  $P_1$  com um grande número de vértices, por exemplo, um milhão. Pela segunda abordagem, calculamos  $T_1$ , em seguida  $S_1$  e, finalmente, realizamos uma única consulta ao mapa de último passo  $S_1$  para localizar o ponto  $t$ . No entanto, essa consulta utiliza no máximo cerca de 20 regiões de vértice de  $P_1$  para localizar  $t$  em  $S_1$ . Assim, acabamos calculando aproximadamente 999 980 regiões de vértice que nunca são utilizadas. Diante disso, na terceira abordagem buscamos empregar uma estratégia de memoização, de modo a calcular apenas as regiões de vértice de  $P_i$  que são efetivamente necessárias para localizar os pontos consultados no mapa de último passo  $S_i$ .

O primeiro problema a ser resolvido é determinar se uma dada aresta  $e = \overline{uv}$  de  $P_i$  pertence a  $T_i$  realizando apenas uma única chamada ao algoritmo **ConsultaÚltimoPasso**. Para isso, reutilizamos a ideia do Algoritmo 3, que originalmente calculava  $T_i$  por completo. Agora, ao invés de verificar todas as arestas de  $P_i$ , testamos apenas a aresta  $e$ , calculando o último passo  $q$  do  $(i-1)$ -path até o vértice  $u$  da aresta  $e$  e afirmamos que  $e$  está em  $T_i$  se e somente se  $q$  está do lado externo de  $e$ .

Em seguida, precisamos calcular os raios associados a um vértice  $v$  de  $P_i$  em  $S_i$ , novamente realizando apenas uma única chamada ao algoritmo **ConsultaÚltimoPasso**. Para isso, adaptamos a ideia do Algoritmo 4, que originalmente calculava  $S_i$  por completo. Agora, em vez de calcular os raios para todos os vértices de  $P_i$ , calculamos apenas os raios associados ao vértice  $v$ . Contudo, esse algoritmo pressupõe que sabemos quais arestas de  $P_i$  pertencem a  $T_i$ , de modo que precisamos determinar se as arestas incidentes em  $v$  pertencem a  $T_i$  sem realizar chamadas adicionais ao algoritmo **ConsultaÚltimoPasso**.

Para resolver isso, retomamos a caracterização de que, dada uma aresta  $e$  de  $P_i$ , um ponto  $p$  em  $e$  e o último passo  $q$  do  $(i-1)$ -path até  $p$ , temos que  $e \in T_i$  se e somente se  $q$  está do lado externo de  $e$ . Assim, seja  $v$  um vértice de  $P_i$  e sejam  $e^1$  e  $e^2$  as arestas incidentes em  $v$ . Calculamos o último passo  $q$  do  $(i-1)$ -path até  $v$  e verificamos se o ponto  $q$  está do lado externo de  $e^1$  e de  $e^2$ , determinando, assim, se essas arestas pertencem a  $T_i$  respectivamente. Com essa informação, podemos adaptar diretamente o Algoritmo 4 para calcular apenas os raios associados a  $v$  em  $S_i$ .

Uma observação importante é que, como não conhecemos previamente  $T_i$ , pode ocorrer de tentarmos calcular os raios associados a um vértice  $v$  de  $P_i$  em  $S_i$  sem que nenhuma das arestas incidentes em  $v$  pertença a  $T_i$ . Nesse caso, o algoritmo não precisa de qualquer modificação, pois seu comportamento natural é retornar dois raios com a mesma direção do último segmento do  $(i-1)$ -path que chega a  $v$ . Isso corresponde a uma região vazia em  $S_i$ , o que é consistente com o fato de que  $v$  não pertence a  $T_i$ .

Com essas ideias, podemos finalmente descrever a implementação do algoritmo **LocalizaPonto** utilizando a estratégia de memoização. Reutilizamos a busca binária da segunda abordagem, mas agora os passos iniciais são simplificados, pois a verificação da região de travessia é postergada para o final do algoritmo. O procedimento segue da seguinte forma:

**Algoritmo para localizar um ponto  $p$  em  $S_i$ :**

---

**Algoritmo 7:** Localiza Ponto — Segunda Abordagem

---

**Entrada:**  $p, P_i, T_i, S_i$ **Saída** : Região de  $S_i$  que contém  $p$ .

---

```
1 define LocalizaPonto( $p, P_i, T_i, S_i$ ):
2   define VerificaAresta( $u, v$ ):
3      $r^1 \leftarrow$  segundo raio associado a  $u$  em  $S_i$ 
4      $r^2 \leftarrow$  primeiro raio associado a  $v$  em  $S_i$ 
5      $d \leftarrow v - u$ 
6     se  $d \times r^1 < 0 \wedge d \times r^2 < 0$  :
7        $\lfloor$  retorna  $r^1 \times (p - u) > 0 \wedge r^2 \times (p - v) < 0 \wedge (p - u) \times (v - u) < 0$ 
8     senão se  $d \times r^1 > 0 \wedge d \times r^2 > 0$  :
9        $\lfloor$  retorna  $r^1 \times (p - u) \leq 0 \wedge r^2 \times (p - v) \geq 0 \wedge (p - u) \times (v - u) \geq 0$ 
10    senão se  $d \times r^1 < 0 \wedge d \times r^2 > 0$  :
11      se  $(p - u) \times (v - u) < 0$  :
12         $\lfloor$  retorna  $r^2 \times (p - v) < 0$ 
13      senão
14         $\lfloor$  retorna  $r^1 \times (p - u) > 0$ 
15    senão
16      se  $(p - u) \times (v - u) < 0$  :
17         $\lfloor$  retorna  $r^1 \times (p - u) > 0$ 
18      senão
19         $\lfloor$  retorna  $r^2 \times (p - v) < 0$ 
20   $u^1, \dots, u^m \leftarrow$  vértices de  $P_i$  em  $T_i$ , ordenados em sentido anti-horário
21  se VerificaAresta( $u^m, u^1$ ) :
22     $\lfloor$  retorna região de atravessar  $P_i$ 
23  se  $p$  está na região de vértice de  $u^1$  :
24     $\lfloor$  retorna região associada a  $u^1$ 
25  se  $p$  está na região de vértice de  $u^m$  :
26     $\lfloor$  retorna região associada a  $u^m$ 
27   $l \leftarrow 1$ 
28   $r \leftarrow m$ 
29  while  $l + 1 \neq r$  do
30     $mid \leftarrow \lfloor (l + r) / 2 \rfloor$ 
31    se  $p$  está na região de vértice de  $u^{mid}$  :
32       $\lfloor$  retorna região associada a  $u^{mid}$ 
33    se VerificaAresta( $u^l, u^{mid}$ ) :
34       $\lfloor$   $r \leftarrow mid$ 
35    senão
36       $\lfloor$   $l \leftarrow mid$ 
37  retorna região associada a aresta  $\overline{u^l u^r}$ 
```

---

**Passo 1.** Sejam  $v^1, \dots, v^m$  os vértices de  $P_i$  ordenados em sentido anti-horário. Calculamos os raios associados a  $v^1$  em  $S_i$  e verificamos se  $p$  pertence à região de vértice de  $v^1$ . Em

caso afirmativo, retornamos essa região.

**Passo 2.** Seja  $v' = v^{\lfloor m/2 \rfloor}$ . Calculamos os raios associados a  $v'$  em  $S_i$  e verificamos se  $p$  pertence à sua região de vértice. Se isso ocorrer, retornamos essa região.

Caso contrário, criamos as arestas fictícias entre  $u$  e  $v'$  e entre  $v'$  e  $v^m$ , gerando as regiões  $R_1$  e  $R_2$ . Verificamos se  $p$  pertence a  $R_1$  utilizando o mesmo procedimento descrito no Algoritmo 7. Se sim, repetimos esse passo considerando apenas os vértices entre  $u$  e  $v'$ ; caso contrário, repetimos esse passo considerando apenas os vértices entre  $v'$  e  $v^m$ .

Assim seguimos até que encontremos um vértice  $v^k$  tal que  $p$  pertença à sua região de vértice ou restem apenas dois vértices  $v^l$  e  $v^r$ . Nesse último caso, sabemos que  $p$  deve estar na região de aresta entre esses vértices.

**Passo 3.** Caso  $p$  não tenha sido localizado em uma região de vértice, concluímos que ele está na região de aresta entre os dois últimos vértices  $v^l$  e  $v^r$ . Para finalizar, com uma única consulta, determinamos se essa aresta pertence a  $T_i$ . Se pertencer, retornamos a região de aresta correspondente; caso contrário, retornamos a região de travessia de  $P_i$ .

Dessa forma, concluímos a descrição da terceira abordagem para a implementação do algoritmo **LocalizaPonto** utilizando memoização. Optamos por não apresentar o pseudocódigo completo dessa abordagem, pois ele seria muito semelhante ao Algoritmo 7, diferindo apenas pelas modificações discutidas acima.

## 2.4 Análise de Complexidade

Começamos analisando a complexidade da primeira abordagem. Seja  $|P_i|$  o número de vértices do polígono  $P_i$  e  $|T_i|$  o número de arestas em  $T_i$ . Seja ainda  $k$  o número total de polígonos na sequência  $P_1, \dots, P_k$  e  $n$  o número total de vértices em todos os polígonos, isto é,

$$n = \sum_{i=1}^k |P_i|.$$

**LocalizaPonto 5:** A complexidade desse algoritmo é  $O(|T_i|)$ , pois, no pior caso, é necessário verificar todas as regiões de vértice e de aresta associadas a  $T_i$  para localizar o ponto  $p$ .

**ConsultaÚltimoPasso 2 e ConsultaCaminho 1:** Ambos os algoritmos iniciam com uma chamada ao algoritmo **LocalizaPonto**. O pior caso ocorre quando o ponto  $p$  pertence à região de travessia de  $P_i$  ou a uma região de aresta, o que exige uma nova consulta ao mapa de último passo  $S_{i-1}$ . Assim, no pior caso, são feitas  $i$  chamadas ao algoritmo **LocalizaPonto**, resultando em uma complexidade total de:

$$O\left(\sum_{j=1}^i |T_j|\right).$$

**RegiãoDePrimeiroContato 3 e MapaDeÚltimoPasso 4:** Ambos os algoritmos realizam uma única passagem pelos vértices de  $P_i$ , fazendo uma consulta para cada vértice. Dessa forma, a complexidade desses algoritmos é:

$$O\left(|P_i| \sum_{j=1}^i |T_j|\right).$$



**TPP completo 6:** O algoritmo executa uma chamada para calcular  $T_i$  e  $S_i$  para cada  $i = 1, \dots, k$ , e ao final realiza uma chamada para consultar o caminho até o ponto  $t$ . Assim, a complexidade total do algoritmo TPP é dada por:

$$\begin{aligned}
O\left(\sum_{i=1}^k |P_i| \sum_{j=1}^i |T_j| + \sum_{j=1}^k |T_j|\right) &= O\left(\sum_{i=1}^k |P_i| \sum_{j=1}^i |P_j| + \sum_{j=1}^k |P_j|\right) \\
&= O\left(\sum_{i=1}^k |P_i| \sum_{j=1}^i |P_j|\right) \\
&= O\left(\sum_{i=1}^k |P_i| \sum_{j=1}^k |P_j|\right) \\
&= O\left(\sum_{i=1}^k |P_i| \cdot n\right) \\
&= O(n^2).
\end{aligned}$$

Assim, concluímos que a complexidade total do algoritmo TPP utilizando a primeira abordagem é  $O(n^2)$ . A seguir, analisamos a complexidade da segunda abordagem.

**LocalizaPonto 7:** A complexidade desse algoritmo é  $O(\log|T_i|)$ , correspondente ao pior caso da busca binária utilizada para localizar o ponto  $p$  em  $S_i$ .

**ConsultaÚltimoPasso 2 e ConsultaCaminho 1:** De forma análoga ao caso anterior, o pior caso envolve  $i$  chamadas ao algoritmo **LocalizaPonto**, resultando na complexidade:

$$O\left(\sum_{j=1}^i \log|T_j|\right).$$

**RegiãoDePrimeiroContato 3 e MapaDeÚltimoPasso 4:** Cada um desses algoritmos itera sobre os vértices de  $P_i$  e realiza uma consulta para cada vértice. Portanto, a complexidade é:

$$O\left(|P_i| \sum_{j=1}^i \log|T_j|\right).$$

**TPP completo 6:** O custo total do algoritmo é:

$$\begin{aligned}
O\left(\sum_{i=1}^k |P_i| \sum_{j=1}^i \log|T_j| + \sum_{j=1}^k \log|T_j|\right) &= O\left(\sum_{i=1}^k |P_i| \sum_{j=1}^i \log|P_j|\right) \\
&= O\left(\sum_{i=1}^k |P_i| \sum_{j=1}^k \log|P_j|\right) \\
&= O\left(n \sum_{j=1}^k \log|P_j|\right).
\end{aligned}$$

Observando que a soma  $\sum_{j=1}^k \log|P_j|$  é maximizada quando todos os polígonos possuem o mesmo número de vértices, isto é, quando  $|P_j| = n/k$  para todo  $j$ , obtemos que a complexidade final do algoritmo TPP usando a segunda abordagem é:

$$O(nk \log(n/k)).$$

Dessa forma, concluímos que a complexidade final do algoritmo TPP utilizando a segunda abordagem é  $O(nk \log(n/k))$ . Essa complexidade coincide exatamente com a apresentada por Dror et al. (2003) [2], o que indica que nossa implementação atinge a mesma eficiência assintótica da proposta original.

Por fim, resta analisar a complexidade da terceira abordagem. Essa análise é mais delicada, pois a complexidade do algoritmo **LocalizaPonto** passa a depender fortemente da instância específica, em particular da distribuição dos vértices nos polígonos e das consultas efetivamente realizadas ao mapa de último passo. Ainda assim, é imediato observar que a terceira abordagem nunca será pior do que a segunda, uma vez que, no pior caso, todas as regiões de vértice em  $T_i$  serão calculadas, recuperando exatamente o comportamento da segunda abordagem. Assim, concluímos que a complexidade da terceira abordagem é  $O(nk \log(n/k))$  no pior caso, podendo ser significativamente melhor em instâncias favoráveis, dependendo do padrão das consultas realizadas.

## Referências

- [1] Esther M. Arkin, Sándor P. Fekete, and Joseph S. B. Mitchell. The traveling salesman problem with neighborhoods: A survey. In Gregory Gutin and Abraham P. Punnen, editors, *The Traveling Salesman Problem and Its Variations*, pages 377–443. Springer, Boston, MA, 2005.
- [2] Moshe Dror, Alon Efrat, Anna Lubiw, and Joseph S. B. Mitchell. Touring a sequence of polygons. In *Proceedings of the Thirty-Fifth Annual ACM Symposium on Theory of Computing*, STOC '03, pages 473 – 482, New York, NY, USA, 2003. Association for Computing Machinery.
- [3] Jianxian Liu and Hongyuan Liu. Research on path optimization method for warehouse inspection robot. *Applied Artificial Intelligence*, 37(1), 2023.
- [4] Karl J. Obermeyer. Path planning for a uav performing reconnaissance of static ground targets in terrain. *GNC-31: Intelligent Control in Aerospace Applications*, 2009.