

## Uso de Coordenadas Geográficas para Estimação Automática de Rumo Aplicada a Navegação Aérea Autônoma de Veículos Aéreos Não Tripulados

Marielcio Gonçalves Lacerda <sup>1</sup>

Camila Souza dos Anjos <sup>1,2</sup>

Élcio Hideiti Shiguemori <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Estudos Avançados – IEAv  
Caixa Postal 6044 – 12.228-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{marielcio, camilasa, elcio}@ieav.cta.br

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 – 12.227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil

**Abstract.** With the increasing use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), mainly in military applications, it becomes necessary to develop alternatives to the navigation of these air vehicles providing the independence of the GNSS (Global Navigation Satellite System). One possible alternative is endow the UAV with a navigation system based on image interpretation by providing its positioning in the whole way. But this system is subject to errors due their complexity. Therefore, this paper presents an automatic system for the estimation of direction of flight this will help autonomous navigation to conduct verification of errors of route and possible corrections during the UAV flight. Such a system is fed with information from Latitude and Longitude of two points obtained from the image processing. Thus, it is estimated the path followed by the UAV, and the path to be followed in the next path used for attain a desired point and provide the information of distance between the two points considered. To obtain this information, the decision tree algorithm was implemented in C ++, this algorithm was chosen because it has a very low computational cost. The decision tree developed provides all possible paths in the Earth's surface, generating the estimate from the true course and distance in meters and nautical miles.

**Palavras-chave:** autonomous navigation, UAV (Unmanned Aerial Vehicle), navegação autônoma, VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado), ARP (Aeronave Remotamente Pilotada),

### 1. Introdução

Recentemente, tem-se observado um contínuo aumento do emprego de Veículos Aéreos Não-Tripulados (VANTs), também denominados drones ou Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARPs). Tais aeronaves apresentam expectativas crescentes em aplicações duais, ou seja, civis e militares, tais como: operações de vigilância, reconhecimento, monitoramento ambiental e agrícola, aerolevanteamento, transporte de carga, ataque a alvos no solo etc. (Medeiros et al., 2010; Castro et al., 2009; Shiguemori et al., 2008; Martins et al., 2006). O uso de VANT tem aumentado, principalmente, pela possibilidade de serem utilizados em regiões inóspitas por motivo de condições geográficas ou de conflitos, de modo a não submeter a tripulação a nenhum tipo de risco.

Atualmente, um dos maiores desafios nesta área é dotar um VANT da capacidade de navegação autônoma, de modo a reduzir a dependência dos Sistemas de Navegação Global por Satélite (GNSS) (Martins et al., 2006), cuja tecnologia é dominada por poucos países, países estes que em situações extremas podem atenuar a qualidade do sinal, tornando o sistema impreciso para a navegação aérea.

A Navegação Aérea consiste em conduzir uma aeronave em segurança, entre pontos determinados. É a condução de um veículo voador com habilidade e segurança através do espaço com a observação de pontos de referência (Infraero, 2014). Portanto, para que a navegação seja precisa, é fundamental que sejam conhecidas a localização atual da aeronave e seu rumo entre pontos conhecidos.

A Navegação Aérea Autônoma é imprescindível em muitas situações devido à necessidade de que o VANT realize uma missão sem a interferência humana durante todo o trajeto, como em missões de reconhecimento em território inimigo ou em locais de difícil acesso.

Uma das abordagens para navegação aérea autônoma consiste em capturar e processar imagens da região sobrevoada para realizar comparações em tempo real com um conjunto de imagens georreferenciadas, visando a estimação da posição do VANT (Medeiros et al., 2010; Castro et al., 2009; Shiguemori et al., 2008). O sistema de visão captura uma grande quantidade de dados que devem ser processados em tempo real de modo que informações extraídas realimentem os sistemas de controle e navegação. Estes procedimentos são fundamentais para o cumprimento seguro e eficiente de uma missão pré-planejada do VANT (Shiguemori et al., 2008).

O planejamento de uma trajetória consiste na determinação de uma sequência de coordenadas de navegação, também denominadas pontos de referência ou *waypoints*, que é enviado para o sistema de controle do veículo autônomo, para realizar a navegação de uma coordenada de origem até uma coordenada de destino (Medeiros et al., 2010).

Devido à complexidade dos sistemas de navegação autônomos baseados por imagens, torna-se necessário o uso de ferramentas de confirmação das informações de voo. Uma possibilidade de desenvolvimento de uma dessas ferramentas é um sistema capaz de gerar a informação do rumo da aeronave baseado na informação das coordenadas de dois pontos. Para navegação aérea, as coordenadas são expressas no sistema de coordenadas geodésicas, onde cada coordenada é formada por uma latitude, uma longitude e uma altitude (Medeiros et al., 2010). Para esse artigo é relevante apenas a informação da latitude e longitude.

O tema abordado neste trabalho tem por objetivo fazer uso de coordenadas geográficas para estimação automática do rumo de um VANT para aplicação na navegação aérea autônoma, com o emprego de uma árvore de decisão. Com isso, propõe-se desenvolver um instrumento de auxílio à navegação autônoma, devendo ser utilizado em conjunto com outros sistemas que gerem as coordenadas como informação, por exemplo, interpretação automática de imagens em tempo real (Santos et al., 2013; Horta et al., 2012; Goltz et al., 2011). No presente trabalho, além da estimação automática do rumo, realiza-se o cálculo da distância (em Metros e em Milhas Náuticas) dos pontos considerados.

## **2. Sistema de Navegação Baseado em Coordenadas Geográficas**

A rota é a projeção, na superfície terrestre, da trajetória prevista ou percorrida por uma aeronave; é, na prática, uma reta traçada em uma carta aeronáutica que indica o caminho percorrido ou a percorrer por uma aeronave. O rumo é a direção da rota; é o ângulo formado entre o Norte de Referência e a Rota. A proa é o ângulo formado entre o eixo longitudinal da aeronave e o Norte de Referência (Gomes, 2014). O Rumo e a Proa podem ser Verdadeiros ou Magnéticos. Quando considerado o ângulo formado entre o Norte Verdadeiro e o Rumo ou a Proa, tem-se a direção Verdadeira (RV – Rumo Verdadeiro e PV – Proa Verdadeira). Quando considerado o ângulo formado entre o Norte Magnético e o Rumo ou a Proa, tem-se a direção Magnética (RV – Rumo Magnético e PV – Proa Magnética).

A informação da proa pode ser fornecida pelo sistema inercial da aeronave, no entanto, o rumo deve ser estimado. A estimação do rumo é importante porque pode ter influência do vento e turbulência, principalmente para aeronaves de pequeno porte, como é o caso dos VANT. Para a estimação do rumo deve ser fornecida a posição da aeronave.

O tema abordado visa o cálculo do rumo entre dois pontos de coordenadas informadas por um sistema de processamento de imagens. Os pontos representam um ponto de origem e um ponto de chegada, ou ainda, pontos intermediários entre um voo mais longo. Portanto, a aplicação deste estudo ocorre antes e/ou durante a realização do voo, de modo que é possível calcular o rumo que deve ser voado, bem como verificar se o rumo que está sendo voado está

correto, possibilitando que sejam realizados os ajustes necessários nos trechos de voo. O sistema tem como informação básica de entrada as coordenadas geográficas dos pontos, no formato: Latitude – GG.MM.SS.X e Longitude – GGG.MM.SS.X. Sendo que: G é o valor em graus, de 00 a 90 para as Latitudes ou de 000 a 180 para as Longitudes; M é o valor em minutos, de 00 a 59; S é o valor em segundos, de 00 a 59; e X indica a direção S ou N para as Latitudes e E ou W para as Longitudes.

Neste trabalho é proposto o uso de uma árvore de decisão. A árvore de decisão foi escolhida por ser uma ferramenta de uso consagrado na literatura, sendo uma estrutura amplamente usada na implementação de sistemas especialistas e em problemas de classificação e, principalmente, por ter um baixo custo computacional.

Para facilitar a compreensão das análises realizadas, considerou-se a existência de quatro quadrantes em relação às coordenadas, conforme a Figura 1.

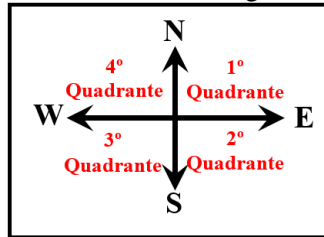


Figura 1 – Separação dos Quadrantes Considerados

Denominou-se que a Diferença de Longitude entre os pontos é chamada  $D_X$  e a Diferença de Latitude entre os pontos,  $D_Y$ .

Para que todos os casos sejam abordados, dividiu-se a análise do problema em três partes. No primeiro caso, considera-se que os dois pontos abordados estejam no mesmo quadrante, com Latitude e Longitude de mesma orientação. No segundo caso, considera-se que os dois pontos estejam em quadrantes vizinhos, portanto, os dois têm Latitude de mesma orientação e Longitude de orientação diferente (1º e 4º quadrantes ou 2º e 3º quadrantes); ou os dois têm Longitude de mesma orientação e Latitude de orientação diferente (1º e 2º quadrantes ou 3º e 4º quadrantes). E no terceiro caso, considera-se que os dois pontos estejam em quadrantes opostos, portanto, os dois têm Latitudes e Longitudes de orientação diferente (1º e 3º quadrantes ou 2º e 4º quadrantes). A seguir, detalha-se cada uma dessas análises, demonstrando os cálculos envolvidos.

### 2.1. Primeiro Caso: Os dois pontos estão no mesmo quadrante

Inicia-se o cálculo obtendo  $D_X$  (Equação 1) e  $D_Y$  (Equação 2). Como as Latitudes dos dois pontos considerados tem a mesma orientação, a Diferença é obtida pela subtração dos dois valores. O mesmo ocorre com as Longitudes.

$$(D_X = X_2 - X_1) \quad (1)$$

$$(D_Y = Y_2 - Y_1) \quad (2)$$

Nota-se que as diferenças  $D_X$  e  $D_Y$  e a distância entre os pontos  $P_1$  e  $P_2$  formam um triângulo retângulo (Figura 2), o que permite que a distância entre os pontos seja determinada pelo *Teorema de Pitágoras*. Portanto, a distância entre os dois pontos é dada pela Equação 3.

$$\text{Distância} = \sqrt{D_X^2 * D_Y^2} \quad (3)$$

E o ângulo formado entre os dois pontos é dado pelas relações trigonométricas no triângulo retângulo (Equação 4).

$$\text{Tg Ang} = \left| \frac{D_X}{D_Y} \right| \quad (4)$$

Como os valores de Latitude e Longitude variam de forma diferente para cada Quadrante, faz-se necessário a análise de todos os casos possíveis, conforme Figura 2.

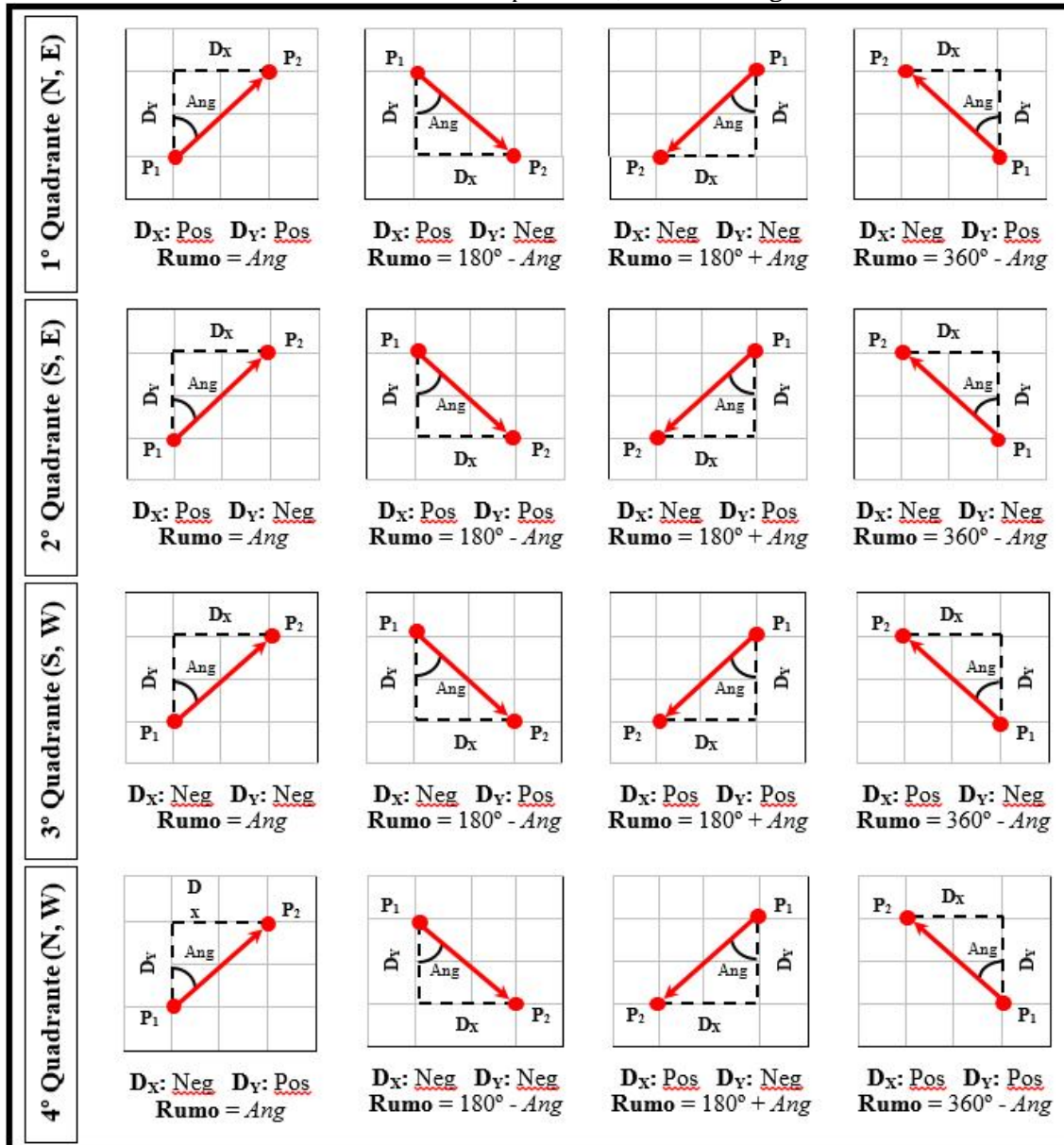


Figura 2 – Possibilidades da distribuição dos pontos para o 1° Caso.

Percebe-se que o cálculo das diferenças  $D_x$  e  $D_y$  é imprescindível para a estimação do valor do Rumo, pois, como dito anteriormente, para cada quadrante ocorre a variação de Latitude e Longitude de forma diferente, sendo necessário a verificação dos sinais de  $D_x$  e  $D_y$  em cada caso para cada um dos quadrantes considerados.

Ocasionalmente, pode acontecer que a aeronave considerada esteja voando sobre um Meridiano, o que faz com que não ocorra a variação de Longitude, ou sobre um Paralelo, o que faz com que não ocorra a variação de Latitude. Quando não ocorrer variação da Longitude, o valor de  $D_x$  será igual a 0, e, conseqüentemente, Distância =  $D_y$ . Quando não ocorrer variação da Latitude, o valor de  $D_y$  será igual a 0, e, conseqüentemente, Distância =  $D_x$ . Para estimar o valor do Rumo da aeronave nesses casos, faz-se necessário a interpretação do sinal de  $D_x$  e  $D_y$  em cada caso possível, conforme verificado na Figura 3.

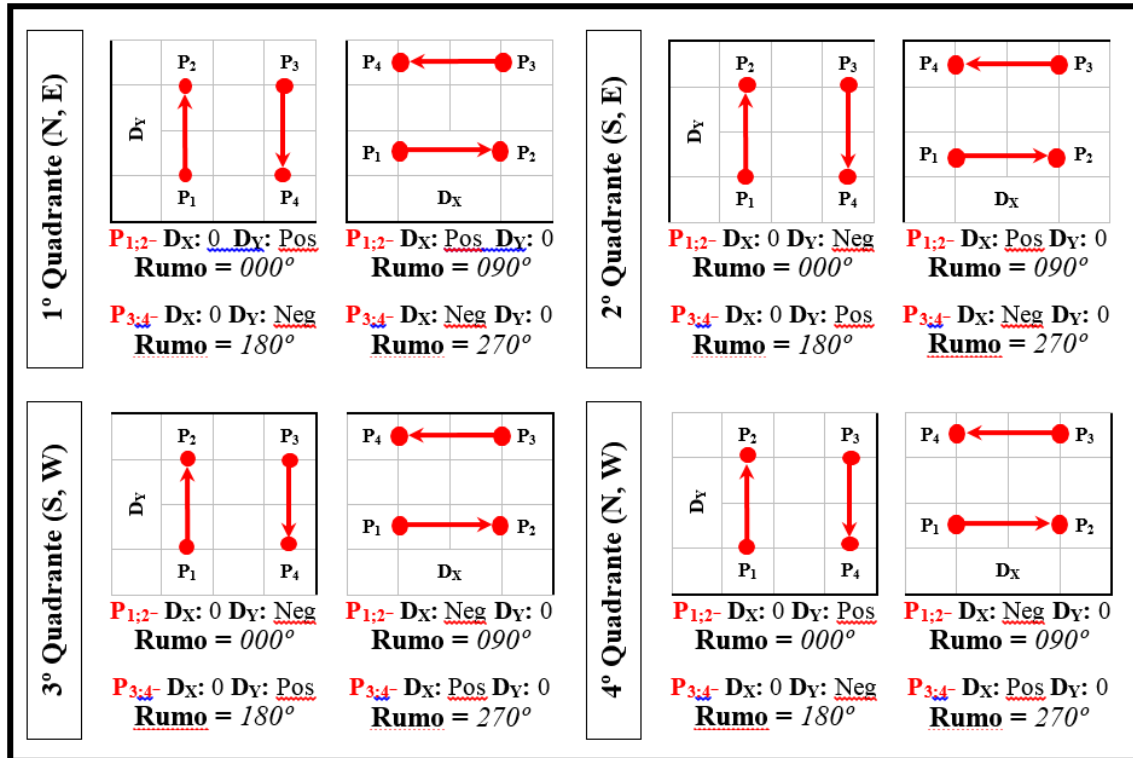


Figura 3 – Possibilidades do 1º Caso com voo sobre um Meridiano ou Paralelo.

## 2.2. Segundo Caso: Os dois pontos estão em quadrantes vizinhos

Quando os dois pontos possuem Longitudes de orientação diferentes, o valor de  $D_x$  é obtido pela Equação 5 e será sempre um valor positivo e o valor de  $D_y$  é obtido conforme visto na Equação 2. Nesse caso, para a definição do valor do Rumo passa a ser importante a análise da Longitude do Ponto de Origem e o sinal de  $D_y$ , conforme demonstrado na Figura 4.

$$(D_x = X_2 + X_1) \quad (5)$$

Quando os dois pontos possuem Latitudes de orientação diferente, o valor de  $D_y$  é obtido pela Equação 6 e será sempre um valor positivo e o valor de  $D_x$  é obtido conforme visto na Equação 1. Nesse caso, para a definição do valor do Rumo passa a ser importante a análise da Latitude do Ponto de Origem e o sinal de  $D_x$ , conforme demonstrado na Figura 4.

$$(D_y = Y_2 + Y_1) \quad (6)$$

A distância entre os dois pontos é calculada conforme já visto na Equação 3, e o ângulo formado entre os dois pontos é obtido conforme já visto na Equação 4.

Da mesma forma que no primeiro caso, pode acontecer que o VANT esteja voando sobre um Meridiano (não ocorre variação de Longitude –  $D_x = 0$ ) ou sobre um Paralelo (não ocorre variação de Latitude –  $D_y = 0$ ). Para estimação do Rumo, faz-se necessário a interpretação do sentido de voo em cada caso possível e conhecer a orientação da Latitude ou da Longitude do ponto de origem, conforme verificado na Figura 5.

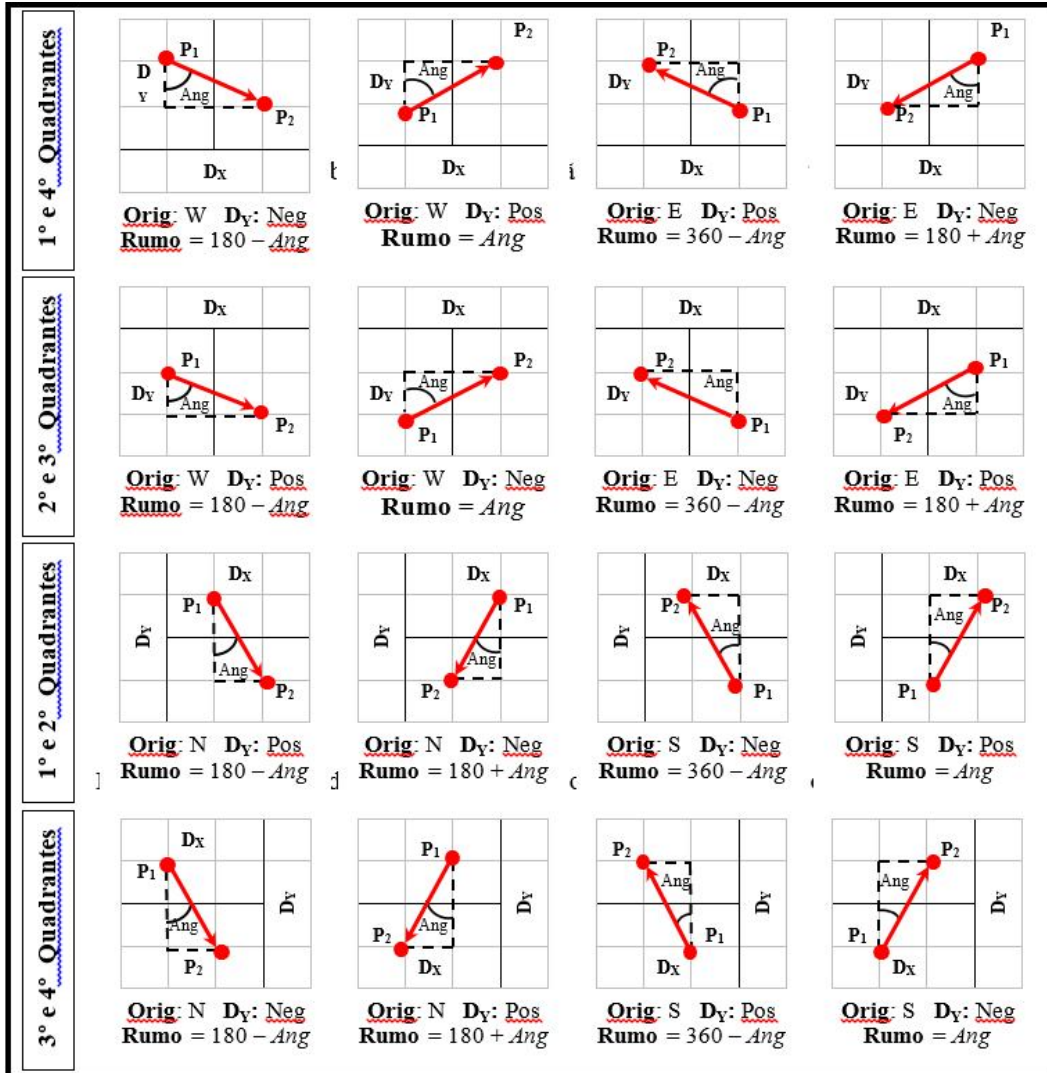


Figura 4 – Possibilidades da distribuição dos pontos para o 2° Caso.

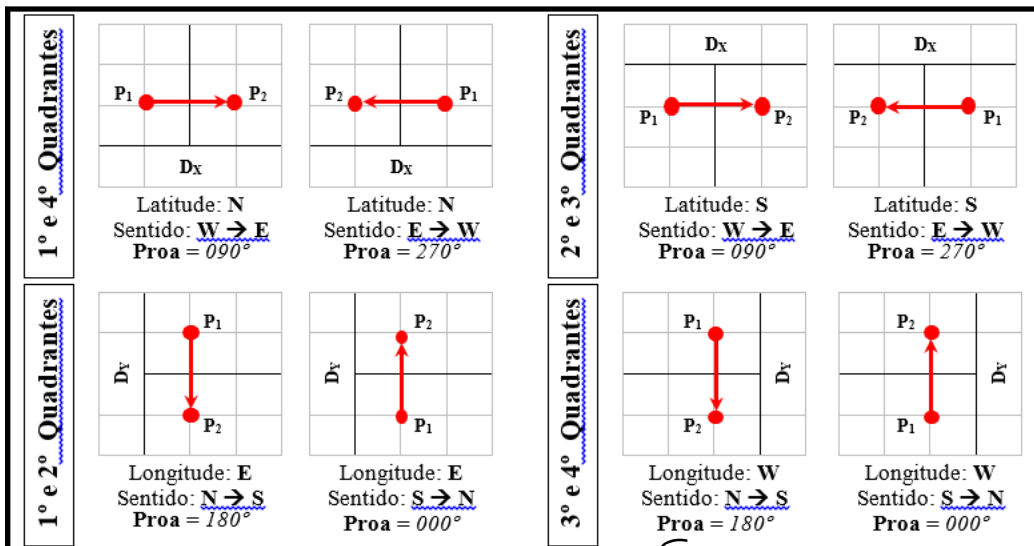


Figura 5 – Possibilidades do 2° Caso com voo sobre um Meridiano ou Paralelo.

### 2.3. Terceiro Caso: Os dois pontos estão em quadrantes opostos

Como os dois pontos possuem Latitudes e Longitudes de orientações diferentes, os valores de  $D_X$  e  $D_Y$  são obtidos, respectivamente pelas Equações 5 e 6, já apresentadas. Como os valores de  $D_X$  e  $D_Y$  serão sempre positivos, é necessário a análise do sentido de voo para determinação do Rumo do VANT, conforme Figura 6.

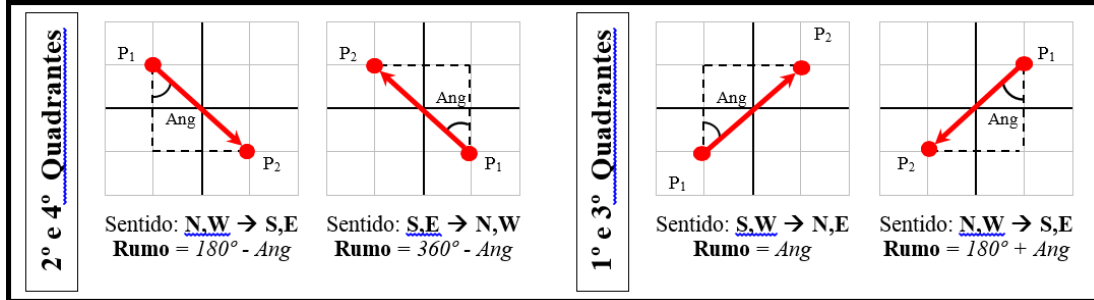


Figura 6 – Possibilidades da distribuição dos pontos para o 2º Caso.

### 3. Resultados e Discussão

Realizada todas as análises anteriormente descritas, desenvolveu-se uma árvore de decisão que é apresentada na Figura 7.

Essa árvore foi implementada em um programa desenvolvido em C++ e foram realizados diversos testes que apresentaram corretamente o valor do rumo. Foram realizados testes nos três casos abordados e nas possibilidades dentro de cada caso. Escolheu-se o 1º Caso e o 3º Quadrantes para exemplificar todas as possibilidades de cálculo de estimativa de rumo e uma possibilidade em cada das demais situações. Os resultados destes testes são apresentados na Tabela 1.

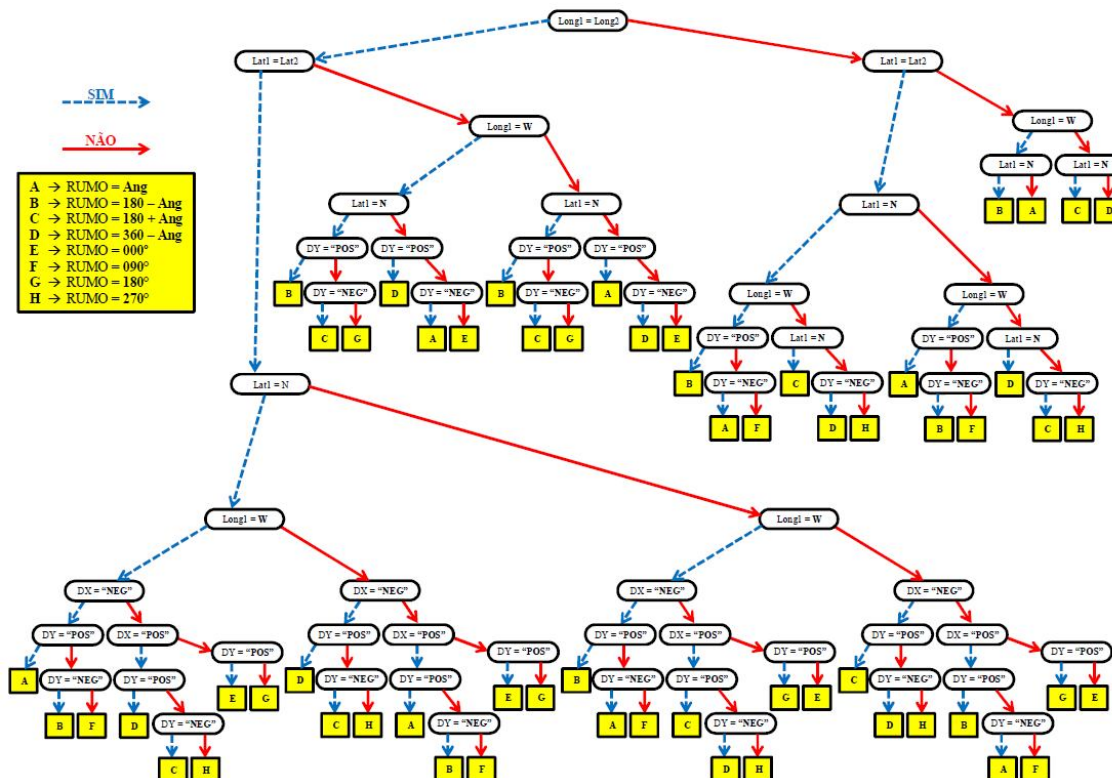


Figura 7 – Árvore de Decisão para estimação do valor do Rumo

Tabela 1 – Resultados dos Testes Realizados no Sistema

Caso	Quadrante	Coordenadas Origem		Coordenadas Destino		Dist. (Km)	Rumo
1°	3°	23°30'40"S	045°00'30"W	16°20'30"S	040°25'32"W	945,52	032°
1°	3°	28°18'34"S	048°43'26"W	33°52'05"S	035°07'48"W	1.631,96	113°
1°	3°	30°08'14"S	019°11'13"W	31°20'32"S	024°06'02"W	562,18	256°
1°	3°	33°50'20"S	030°08'14"W	16°41'09"S	054°34'52"W	3.318,25	306°
1°	3°	42°15'34"S	002°09'08"W	14°31'22"S	002°09'08"W	3.082,10	000°
1°	3°	04°09'20"S	030°08'14"W	04°09'20"S	024°06'02"W	670,79	090°
1°	3°	22°29'38"S	002°09'08"W	34°49'29"S	002°09'08"W	1.370,20	180°
1°	3°	09°05'19"S	030°08'14"W	09°05'19"S	054°34'52"W	2.716,2	270°
2°	1° e 2°	30°08'14"N	019°11'13"E	31°20'32"S	024°06'02"E	6.853,41	176°
2°	2° e 3°	09°05'19"S	030°08'14"E	34°49'29"S	002°09'08"W	4.599,27	231°
2°	3° e 4°	04°09'20"S	030°08'14"W	09°05'30"N	024°06'02"W	1.617,51	024°
2°	4° e 1°	22°29'38"N	002°09'08"W	04°09'20"S	054°34'52"W	6.534,10	243°
3°	1° e 3°	12°15'34"N	002°09'08"E	02°09'08"S	012°09'08"W	2.256,35	224°
3°	2° e 4°	23°30'40"S	045°00'30"E	16°20'30"N	040°25'32"W	10.475,50	296°

#### 4. Conclusão

Pode-se verificar que é possível estimar o valor do rumo de um VANT conhecendo-se as Coordenadas Geográficas (Latitude e Longitude) de dois pontos de sua rota. Pode-se também utilizar um sistema de transformação de Coordenadas, e assim as coordenadas podem estar em qualquer sistema de coordenadas, como o UTM, por exemplo.

O trabalho aqui desenvolvido tem grande aplicabilidade em sistemas de navegação autônomo para VANTs, pois permite que o VANT faça a verificação da rota entre dois pontos, fazendo as correções necessárias para cumprir a missão ao qual foi designada.

#### 5. Referências Bibliográficas

Castro, A. P.; Silva, J.; Medeiros, F.; Shiguemori, E. Restauração de Imagens e Detecção Automática de características à Navegação Aérea Autônoma. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 6813-6819.

Goltz, G.; Shiguemori, E.; Velho, H. UAV Position Estimation By Image Processing Using Neural Networks. In: X Congresso Brasileiro de Inteligência Computacional, 2011, Fortaleza, CE. Sociedade Brasileira de Redes Neurais, 2011.

Horta, E.; Shiguemori, E.; Velho, H.; Braga, A. Extração de características e casamento de padrões aplicados à estimação de posição de um VANT. In: XIX Congresso Brasileiro de Automática, 2012, Campina Grande. SBA, 2012. v. 1. p. 5045-5050.

Medeiros, F.; Silva, J. **Grafos de Visibilidade Aplicados à Representação Computacional de Ambientes de Navegação Aérea**. São José dos Campos. Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais, 2010.

Santos, A.; Torres, L.; Shiguemori, E.; Velho, H.; BRAGA, A. Controle e navegação de VANTs através de utilização de template matching. In: Computer on the beach, 2013, Florianópolis.

Shiguemori, E.; Martins, M.; Medeiros, F. **Reconhecimento de Pontos de Controle para Navegação Aérea utilizando Redes Neurais e Transformada de Gabor**. São José dos Campos: Instituto de Estudos Avançados. Caderno de Atividades de Pesquisa e Desenvolvimento do Instituto de Estudos Avançados 2008, v.1, p.46.

Shiguemori, E.; Martins, M.; Medeiros, F.; Dominiciano, M.; Monteiro, M. **Módulo de Visão Computacional do Projeto PITER: Aplicações à Navegação Aérea Autônoma por Imagens**. São José dos Campos: Instituto de Estudos Avançados. Simpósio de Sensoriamento Remoto das Forças Armadas – SERFA 2008, p.26 – 27.

Infraero Aeroportuários. Disponível em: <<http://www.infraero.gov.br/index.php/navegacao-aerea.html>>. Acesso em: 20.out.2014

Gomes, J. C. **Noções de Navegação Aérea**. Comando da Aeronáutica – Escola de Especialistas de Aeronáutica. Guaratinguetá – SP, 2014. Apostila da disciplina Noções de Navegação Aérea, da Especialidade Fotointeligência, do Curso de Formação de Sargentos.