

Sistema autônomo para supervisão de missão e segurança de voo em VANTs

Jesimar da Silva Arantes

Orientador: Claudio Fabiano Motta Toledo

Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação (ICMC)
Universidade de São Paulo (USP)
São Carlos - SP



Maio – 2019

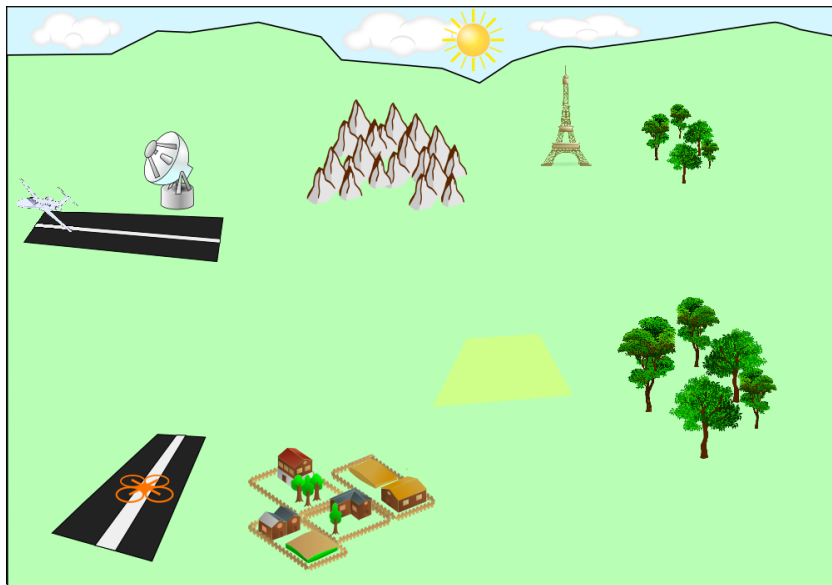


Estrutura da Apresentação

- 1 Introdução
- 2 Conceitos Fundamentais
- 3 Revisão Bibliográfica
- 4 Sistemas MOSA e IFA
- 5 Problema Abordado
- 6 Arquitetura de Hardware e Software
- 7 Metodologia
- 8 Resultados
- 9 Considerações Finais

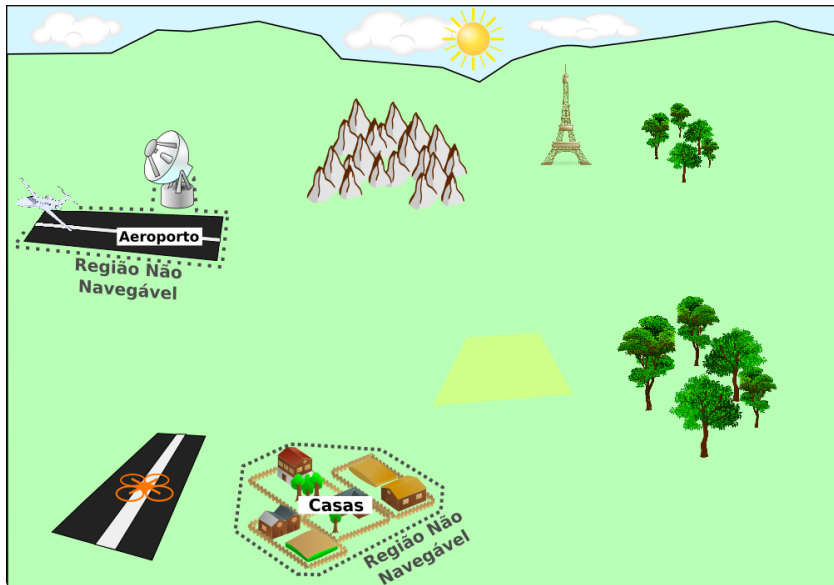
Introdução

Contextualização



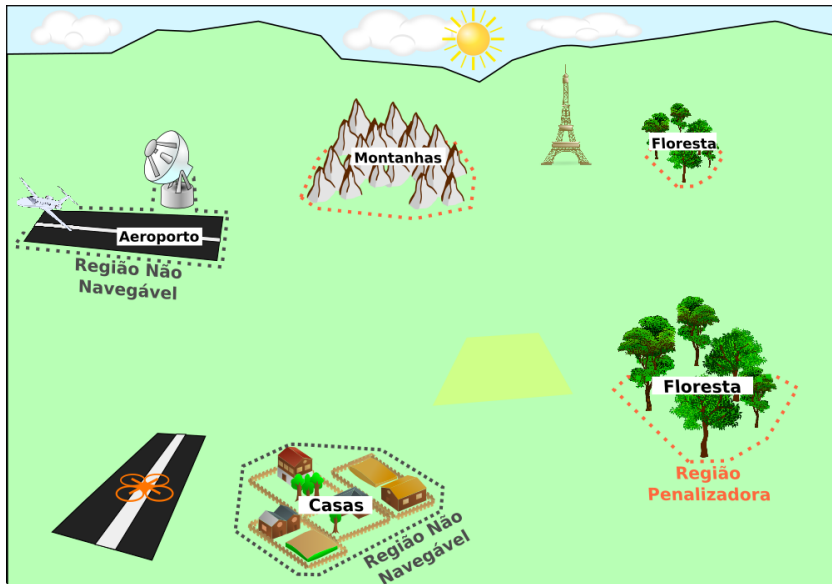
Introdução

Contextualização



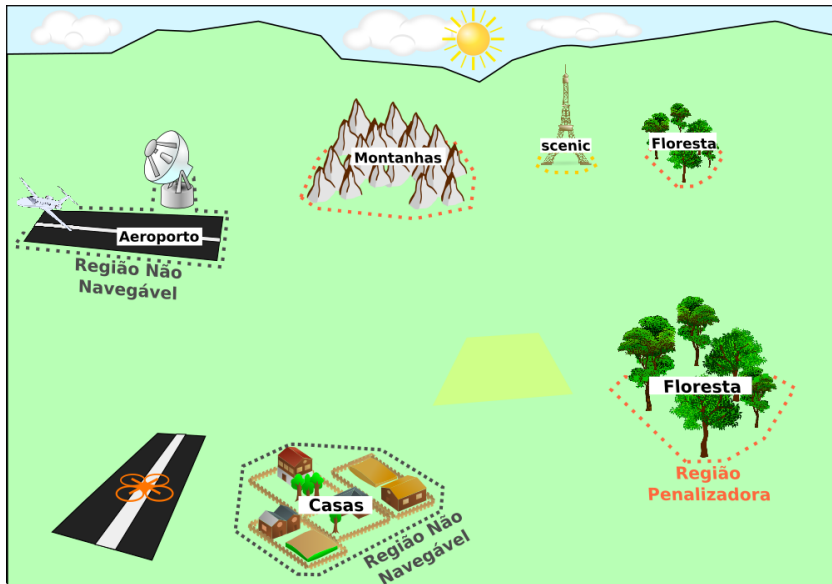
Introdução

Contextualização



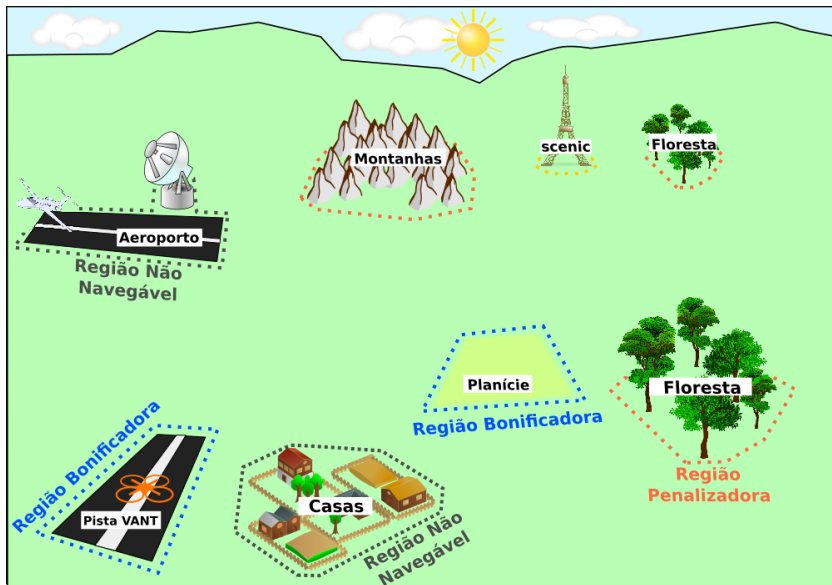
Introdução

Contextualização



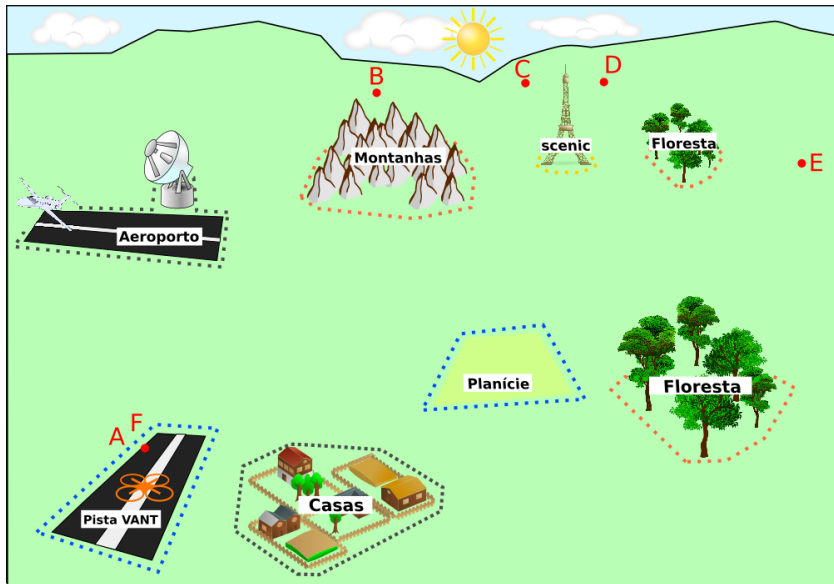
Introdução

Contextualização



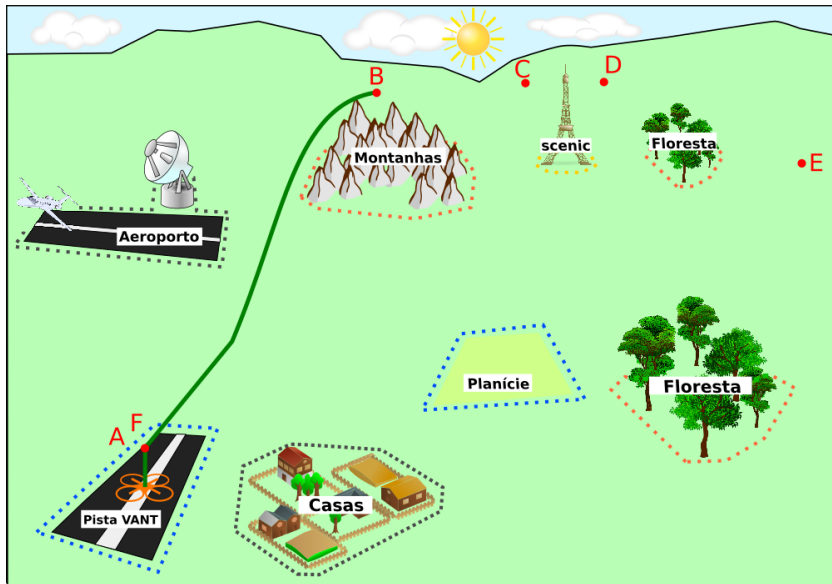
Introdução

Contextualização



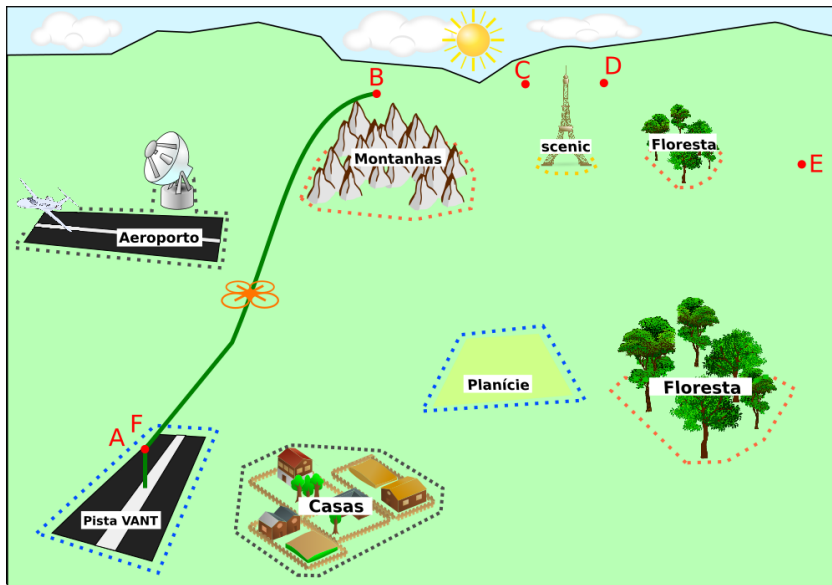
Introdução

Contextualização



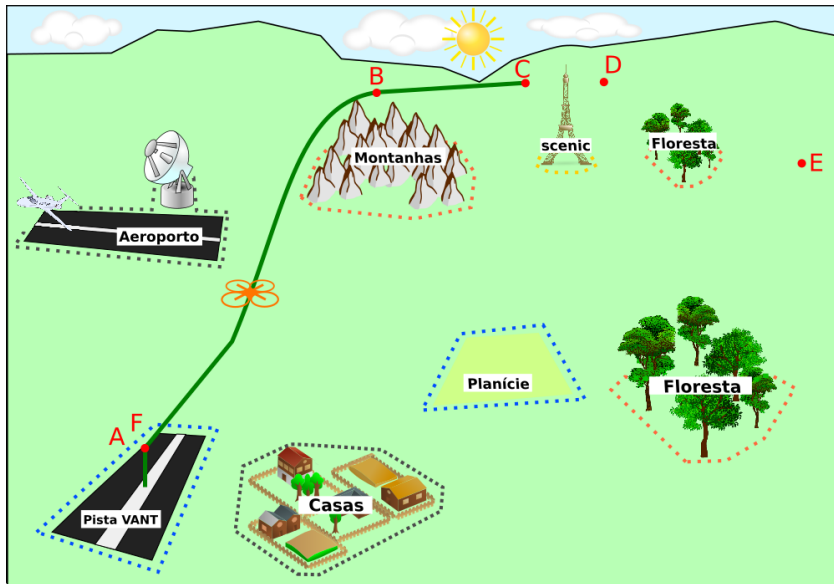
Introdução

Contextualização



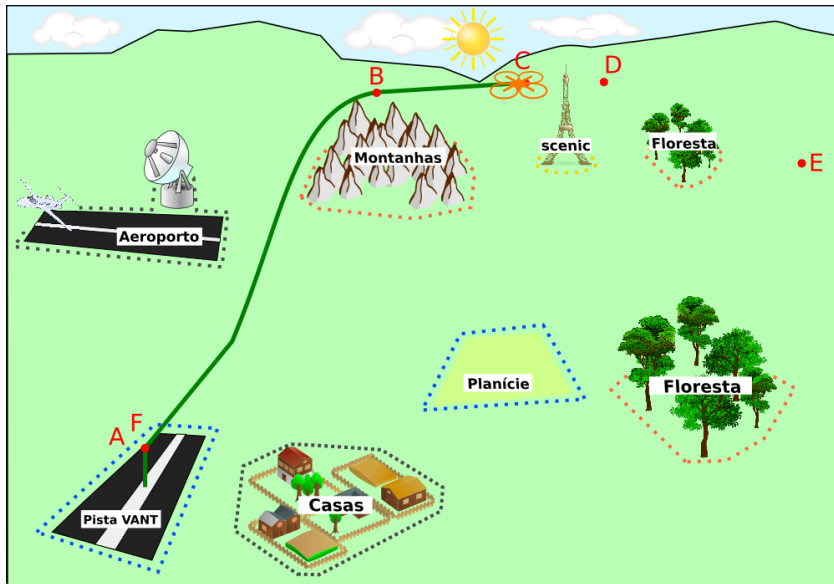
Introdução

Contextualização



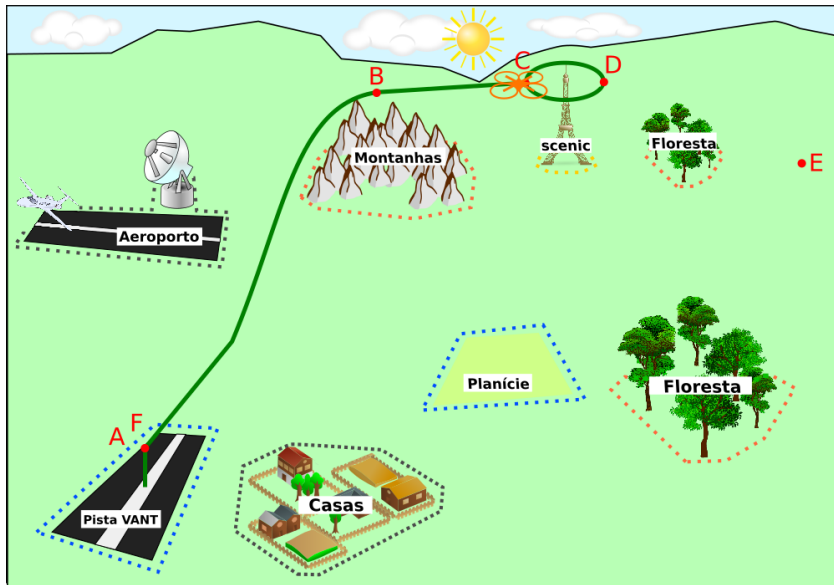
Introdução

Contextualização



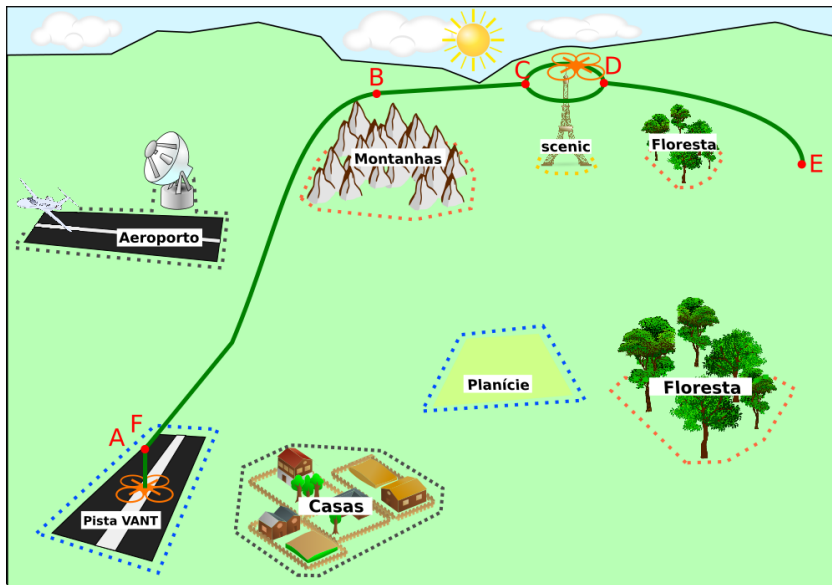
Introdução

Contextualização



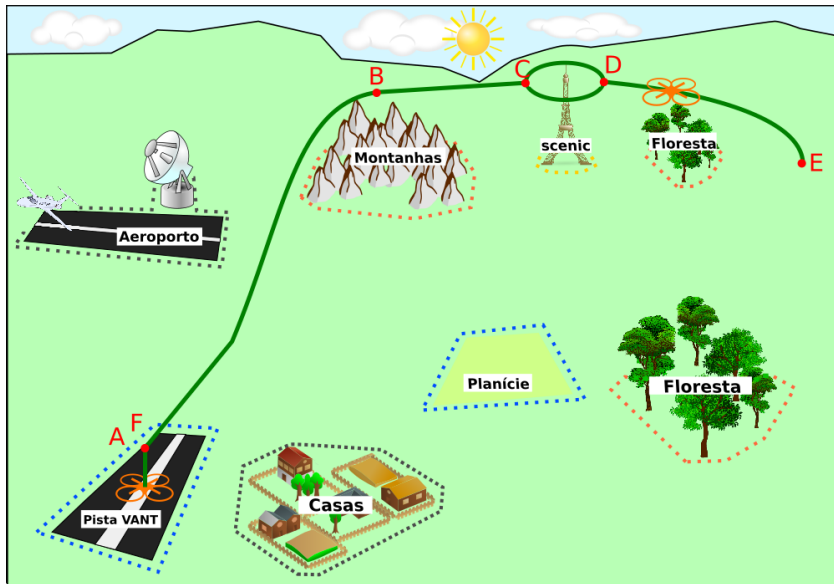
Introdução

Contextualização



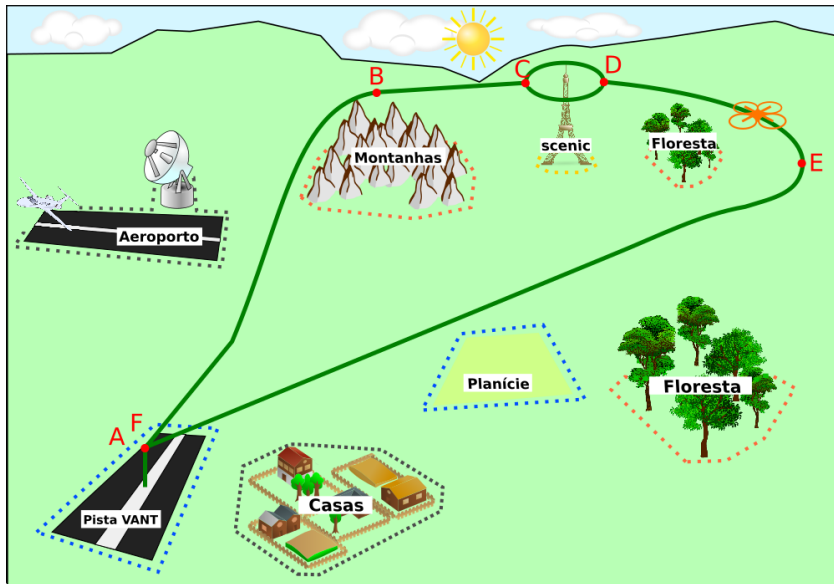
Introdução

Contextualização



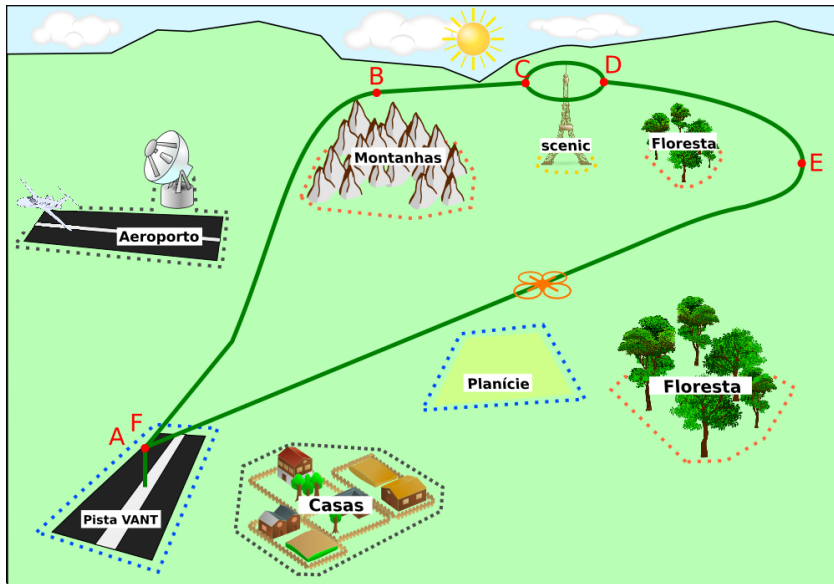
Introdução

Contextualização



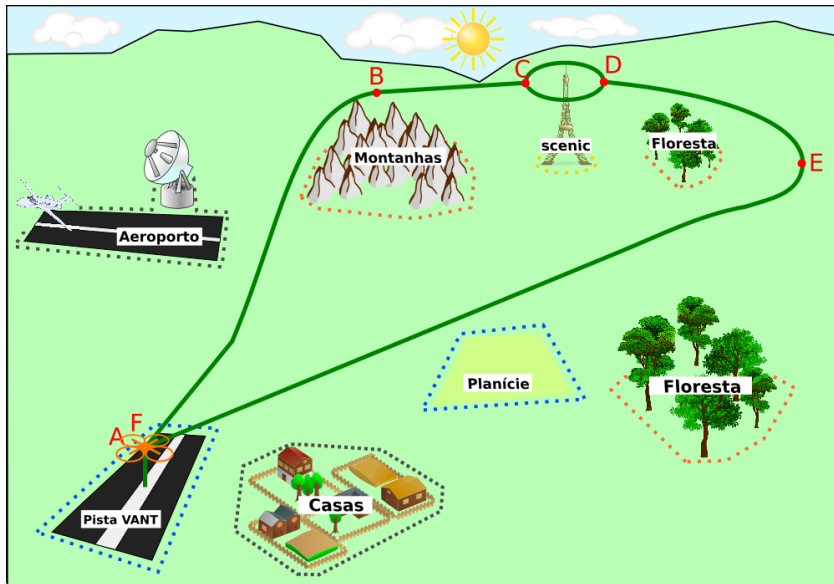
Introdução

Contextualização



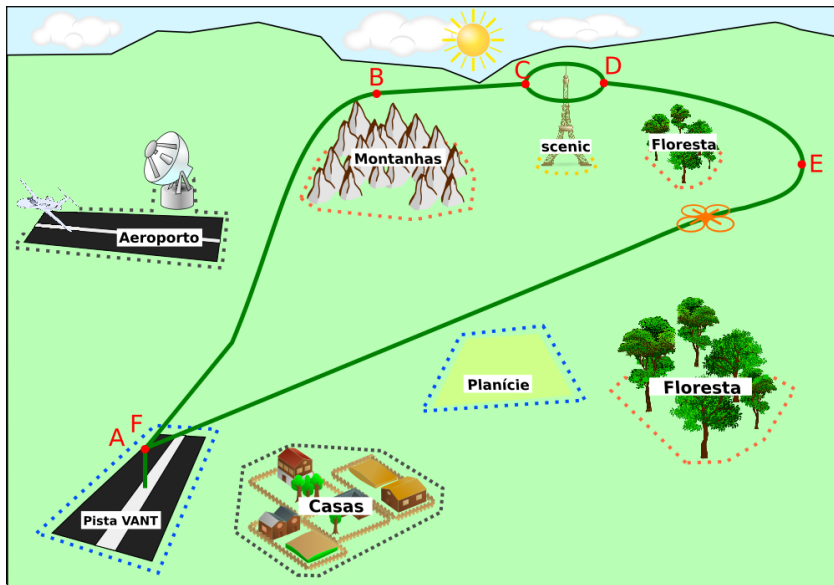
Introdução

Contextualização



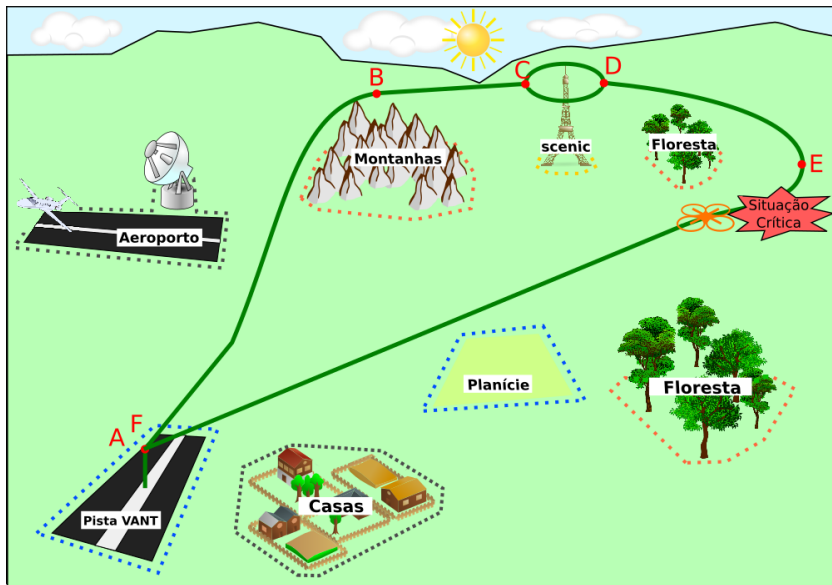
Introdução

Contextualização



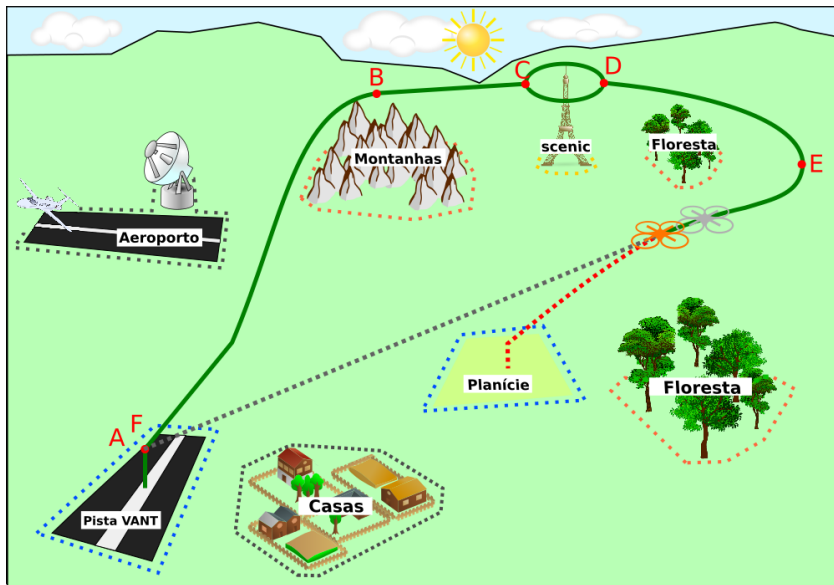
Introdução

Contextualização



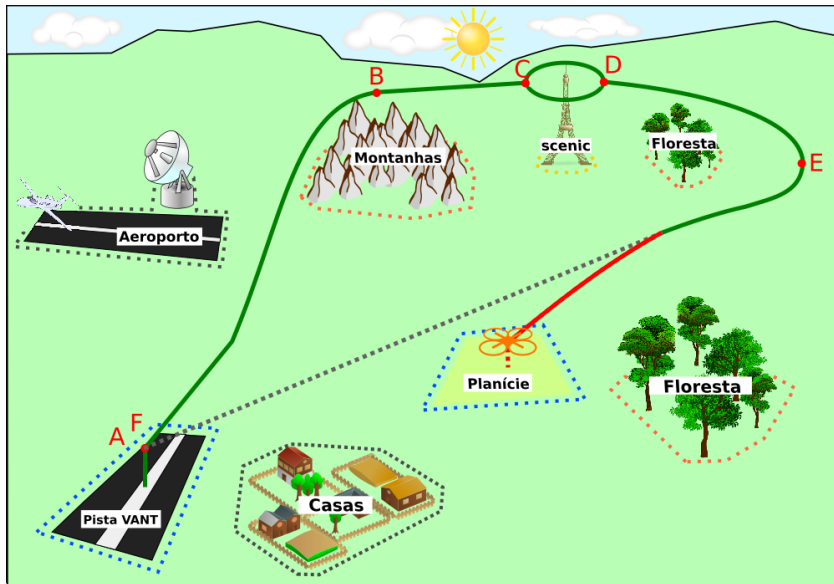
Introdução

Contextualização



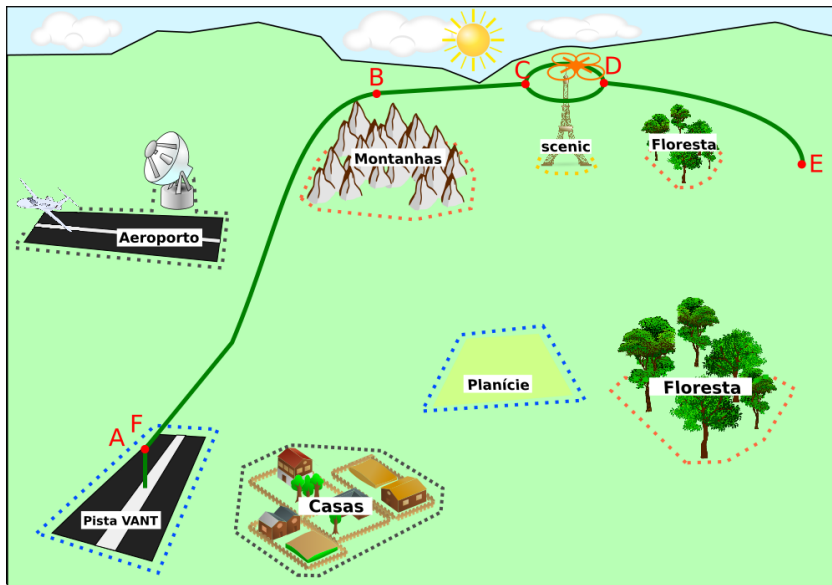
Introdução

Contextualização



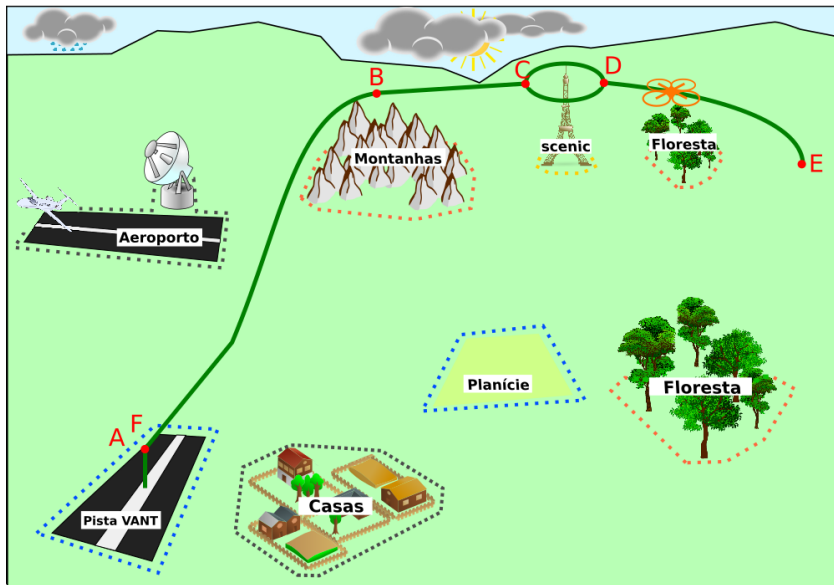
Introdução

Contextualização



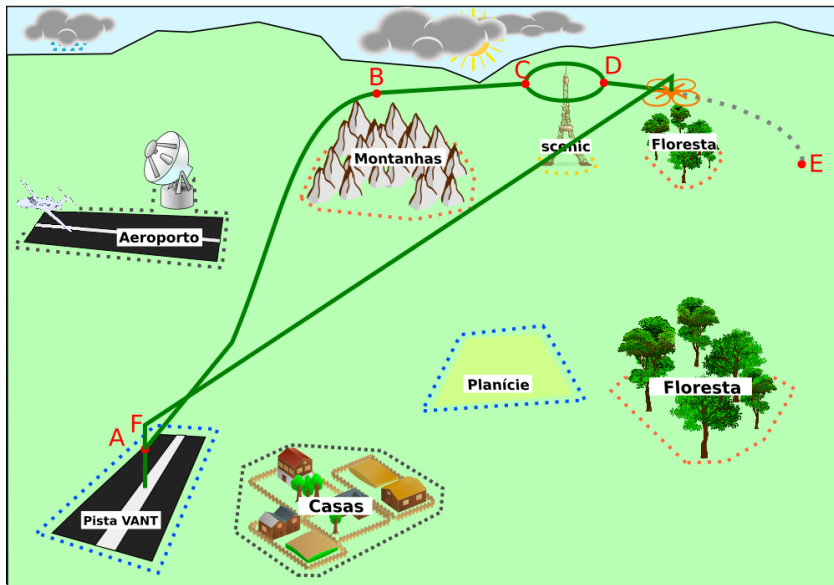
Introdução

Contextualização



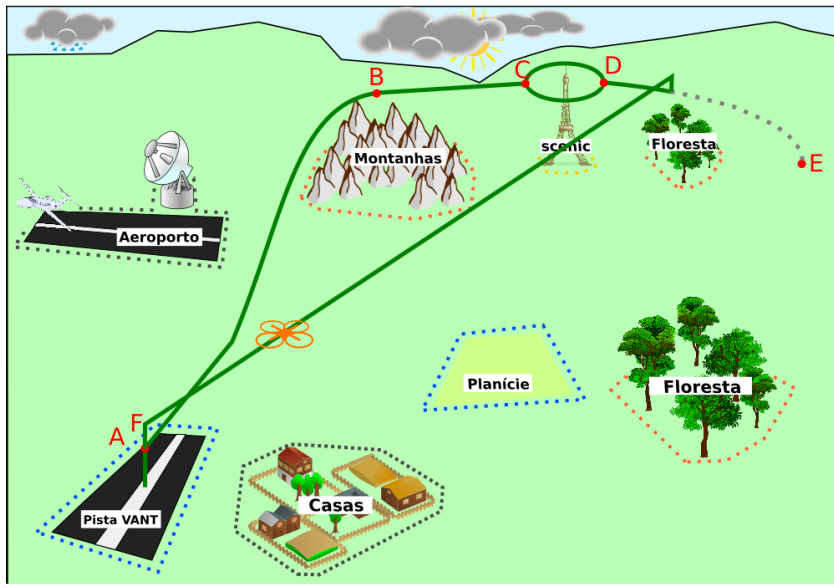
Introdução

Contextualização



Introdução

Contextualização



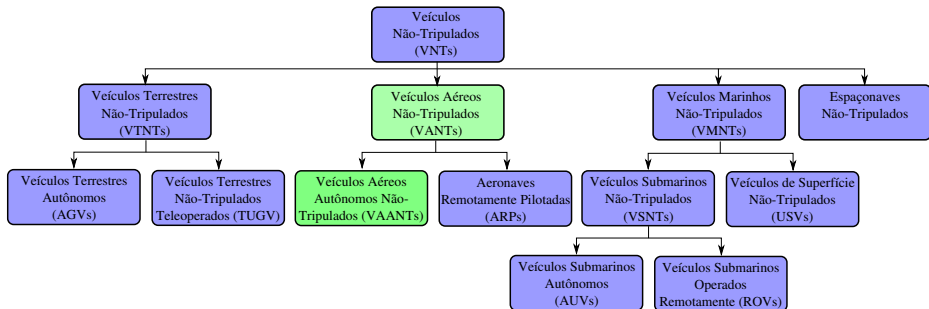
Objetivos

Propor uma arquitetura para VANTs de baixo custo com as seguintes características:

- **Propósito geral:** diferentes missões podem ser incorporadas sem grandes mudanças na arquitetura.
- **Resiliência:** os sistemas devem prevenir a propagação de erros visando o correto funcionamento da aeronave.
- **Autonomia:** os sistemas irão operar a aeronave com baixo nível de intervenção humana.

Conceitos Fundamentais

Veículos Aéreos Não-Tripulados



iDroneAlpha



iDroneBeta



Rascal 110



Ararinha

Conceitos Fundamentais

Pilotos Automáticos e *Companion Computers*

Pilotos Automáticos



APM
Companion Computers



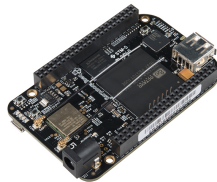
Pixhawk



Intel Edison



Raspberry Pi



BeagleBone Black

Conceitos Fundamentais

Simulação SITL e HITL

Simulação SITL:

- Simula todo o hardware em software;
- Hardware simulado em software:
 - Aeronave, AP, Sensores, Telemetria, RC e Receptor do RC.

Simulação HITL:

- Simula parte de hardware em software;
- Hardware simulado em software:
 - Aeronave, AP, Sensores, Telemetria, RC e Receptor do RC;
- Hardware real: CC.

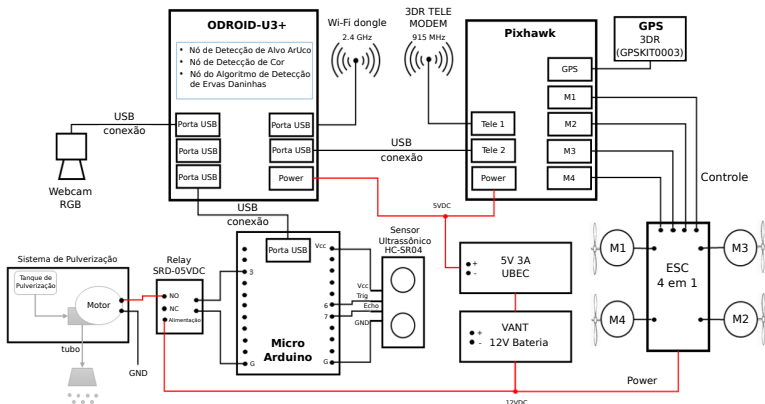
Dronekit

- Biblioteca *open source*;
- Faz a comunicação entre o computador de bordo e o AP;
- Abstração do protocolo MAVLink;
- Permite controlar a aeronave.

Revisão Bibliográfica

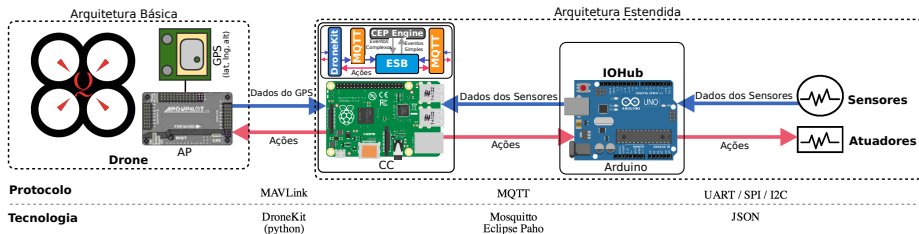
Arquitetura para Pulverização

- Sistema autônomo de tomada de decisão para pulverização;
- Arquitetura proposta em Alsalam *et al.* (2017);
- Aplicação em pulverização contra pragas agrícolas.



Arquitetura para Monitoramento

- Sistema autônomo para monitoramento de poluição sonora;
- Arquitetura proposta em Boubeta-Puig *et al.* (2018);
- Aplicação de monitoramento de poluição sonora produzida pela decolagem e aterrissagem de aeronaves.



Revisão Bibliográfica

Ano	Autores	Mis.	Seg.	Amb.	On.	Off.	P&P	BC
2011	Brown <i>et al.</i>	Sim	Não	R/V	Sim	Não	Não	Não
2013	Prodan <i>et el.</i>	Sim	Não	R/V	Não	Sim	Não	Não
2015	Mattei	Não	Sim	V	Não	Não	Sim	N/A
2016	Figueira	Sim	Não	V	Não	Não	Sim	N/A
2016	Ramasamy	Não	Sim	V	Não	Sim	Não	Não
2016	Xue <i>et al.</i>	Sim	Não	R	Não	Não	Não	Não
2017	Alsalam <i>et al.</i>	Sim	Não	R/V	Sim	Não	Não	Sim
2018	Boubeta <i>et al.</i>	Sim	Sim	R/V	Sim	Não	Não	Sim
2018	Chiaramonte	Não	Sim	R/V	Não	Sim	Não	Não
2019	Arantes, J. S.	Sim	Sim	R/V	Sim	Sim	Sim	Sim

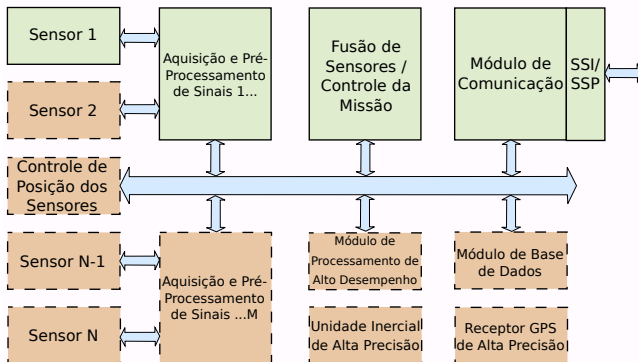
Tabela 1: Comparando contribuições baseadas em algumas características.

Abreviação	Descrição
V	Virtual
R	Real
BC	Baixo Custo

Sistemas MOSA e IFA

MOSA: *Mission Oriented Sensor Array*

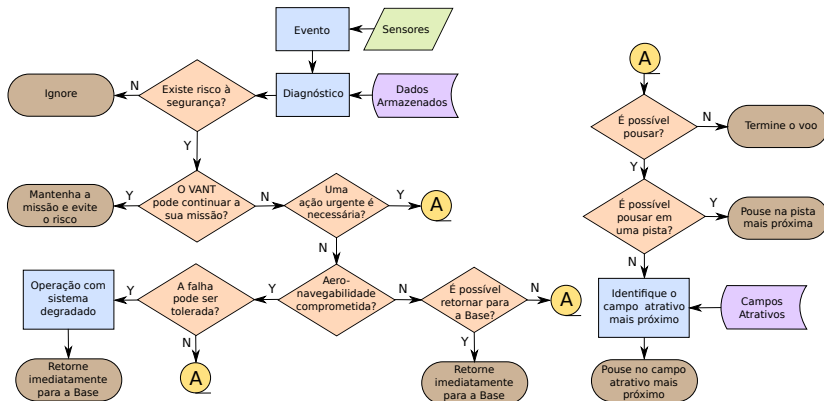
- Sistema responsável pelo cumprimento da missão;
- Arquitetura proposta em Figueira 2017;
- Sistema aplicado no geração automática de mapas temáticos;
- Sistema validado usando o Matlab Simulink.



Sistemas MOSA e IFA

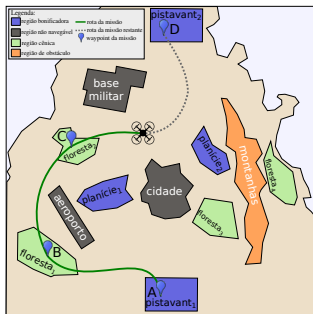
IFA: *In-Flight Awareness*

- Sistema responsável pela segurança em voo;
- Arquitetura proposta em Mattei 2015;
- Sistema validado usando o ambiente Labview junto com o X-Plane.

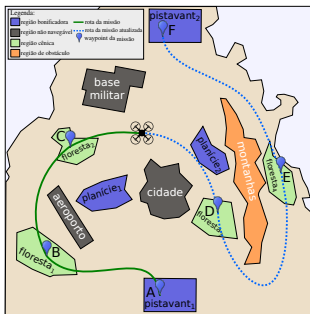


Problema Abordado

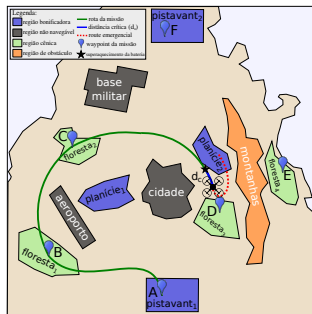
Problema de Planejamento de Missão e Segurança



(a) Sistema MOSA com planejador de rotas HGA4m.



(b) Sistema MOSA com atualização no plano de voo.



(c) Sistema MOSA com IFA com replanejador de rotas DE4s.

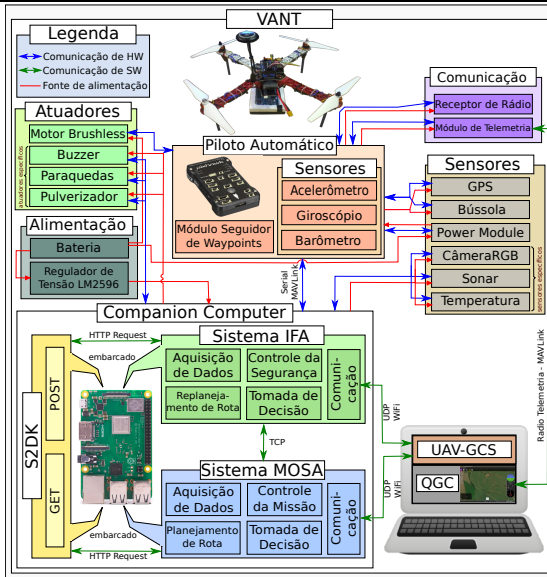
Problema Abordado

Modelagem do Problema

$$\text{Ex.1} \therefore \langle \mathcal{M}, \mathcal{H}, \mathcal{S} \rangle = \left\{ \begin{array}{l} \mathcal{M} = \left\{ \begin{array}{l} M_{map} = \langle \mathbf{r}, \mathbf{h}, \mathbf{c} \rangle = \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{r} = \{pistavant_1, pistavant_2, planicie_1, planicie_2, \\ \text{aeroporto}, cidade, basemilitar, montanhas, \\ floresta_1, floresta_2, floresta_3, floresta_4\} \\ \mathbf{h} = \{0, 0, 0, 0, \infty, \infty, \infty, 20, 10, 10, 10, 10\} \\ \mathbf{c} = \{\Phi^b, \Phi^b, \Phi^b, \Phi^b, \Phi^n, \Phi^n, \Phi^n, \Phi^o, \Phi^s, \Phi^s, \\ \Phi^s, \Phi^s\} \end{array} \right. \\ \\ M_{goal} = \{A, B, C, D\} \\ M_{alt} = 50.0 \end{array} \right. \\ \\ \mathcal{H} = \left\{ \begin{array}{l} H_{ap} = \text{Pixhawk} \\ H_{cc} = \text{RaspberryPi} \\ H_{sensor} = [\text{CameraRGB}] \\ H_{actuator} = [\text{Buzzer}] \end{array} \right. \\ \\ \mathcal{S} = \left\{ \begin{array}{l} S_{mosa} = \langle \mathcal{P}_P, \mathcal{L}_P, \mathcal{T}_{SC_P}, \Delta_P \rangle = \langle \text{HGA4m}, \text{offboard}, 10, 1.0\% \rangle \\ S_{ifa} = \langle \mathcal{P}_R, \mathcal{L}_R, \mathcal{T}_{SC_R}, \Delta_R, \mathcal{W}_R \rangle = \langle \text{GA4s}, \text{onboard}, 1.0, 1.0\%, 30 \rangle \end{array} \right. \end{array} \right.$$

Arquitetura de Hardware e Software

Arquitetura Geral



Arquitetura de Hardware e Software

Arquitetura de Hardware do VANT



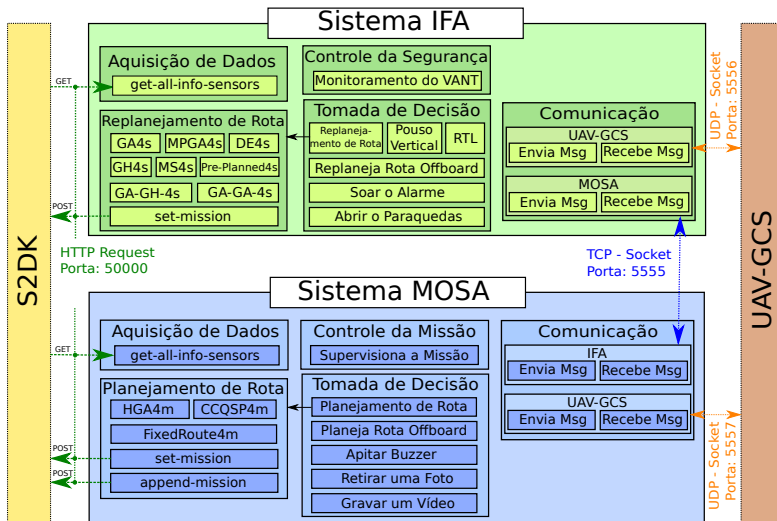
(a) iDroneAlpha.



(b) iDroneBeta.

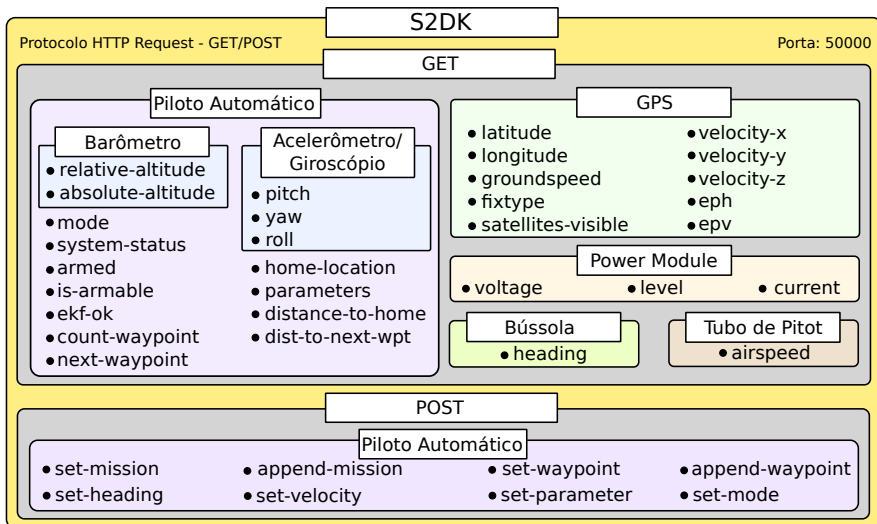
Arquitetura de Hardware e Software

Arquitetura de Software do VANT



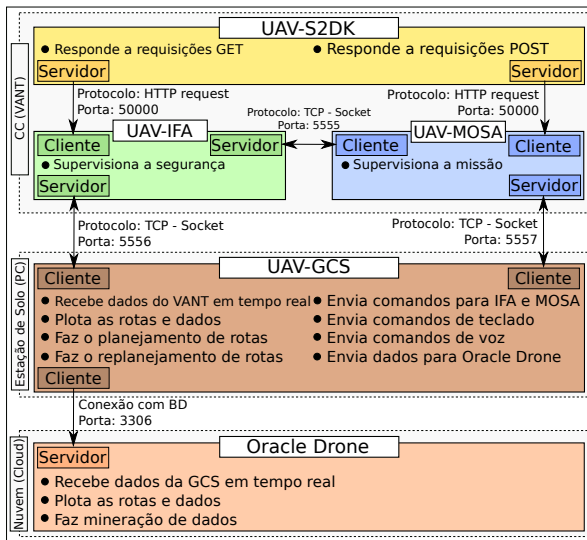
Arquitetura de Hardware e Software

Arquitetura de Software do VANT



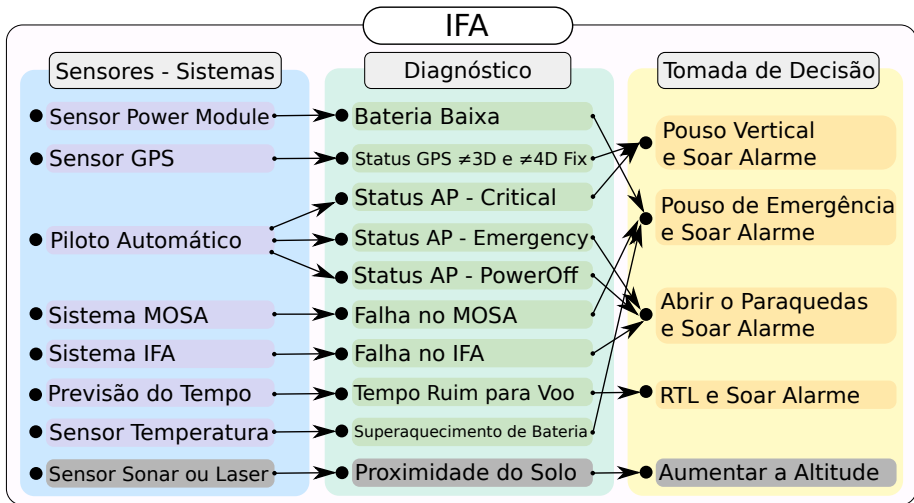
Arquitetura de Hardware e Software

Arquitetura de Software do VANT



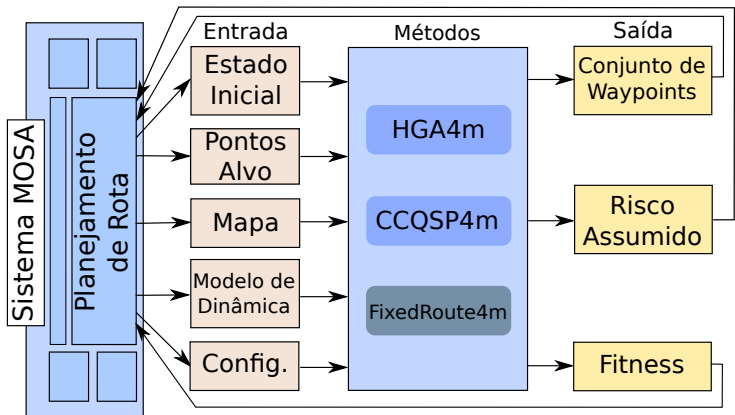
Arquitetura de Hardware e Software

Arquitetura de Software do VANT



Metodologia

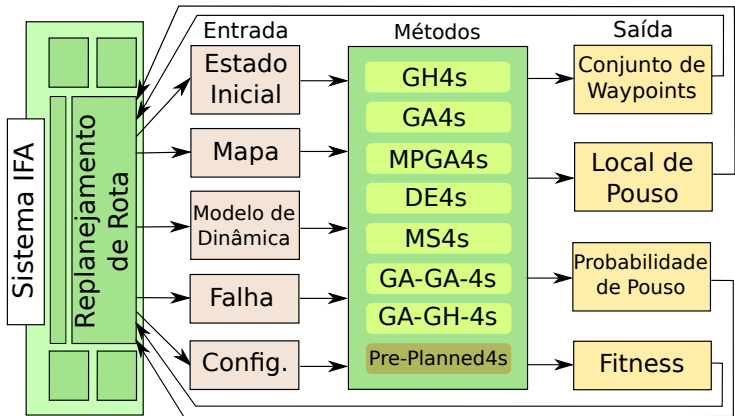
Planejamento de Rota do VANT



Arquitetura do sistema embarcado no módulo de planejamento de rotas.

Metodologia

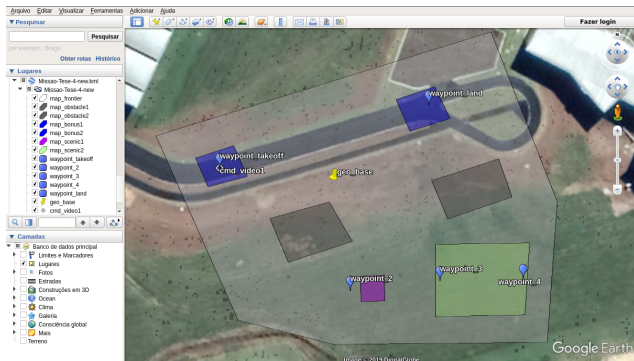
Replanejamento de Rota do VANT



Arquitetura do sistema embarcado no módulo de replanejamento de rotas.

Metodologia

Protocolo para Especificação do Mapa e da Missão



- *Tags para especificação regiões:*

- map_bonus
- map_obstacle
- map_scenic
- map_penalty
- ...

- *Tags para especificação missão:*

- waypoint
- cmd_picture
- cmd_video
- cmd_buzzer
- ...

Artigos

- Publicado no GECCO 2017
- Publicado no ICTAI 2017
- Submetido no ESWA 2019

Resultados

Artigo GECCO

- Desenvolvimento do sistema MOSA (simulado)
 - Integração do planejador: HGA4m
 - Instâncias artificiais avaliadas: 40 mapas;
 - Critério de parada (tempo): 10 segundos.
- Desenvolvimento do sistema IFA (simulado)
 - Integração do replanejador: MPGA4s
 - Instâncias artificiais avaliadas: 60 mapas;
 - Falhas críticas avaliadas: 4;
 - Critério de parada (tempo): 1 segundo.
- Aeronave: Rascal 110
- Plataformas avaliadas:

	PC i5	Intel Edison
Frequência	1.8 GHz	500 MHz
Memória RAM	4 GB	1 GB
Sistema Operacional	Linux - Ubuntu	Linux - Yocto

Método HGA4m

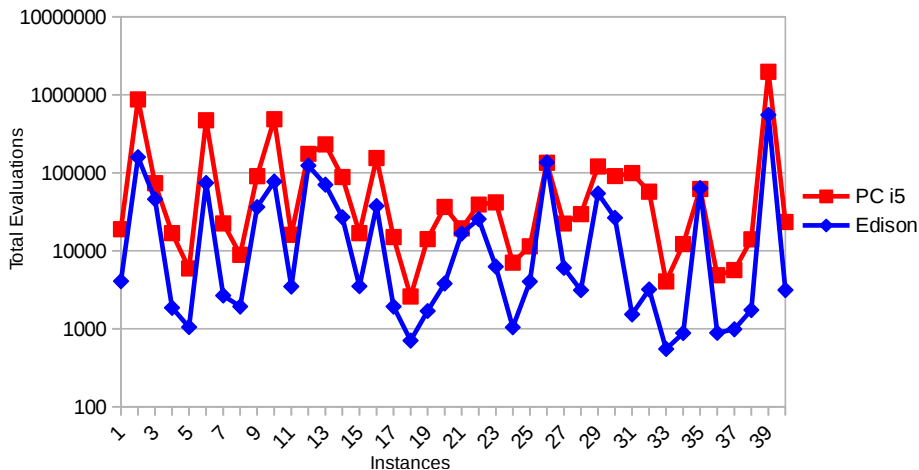


Figura 1: Número de avaliações por instância para o planejamento de rotas.

Método HGA4m

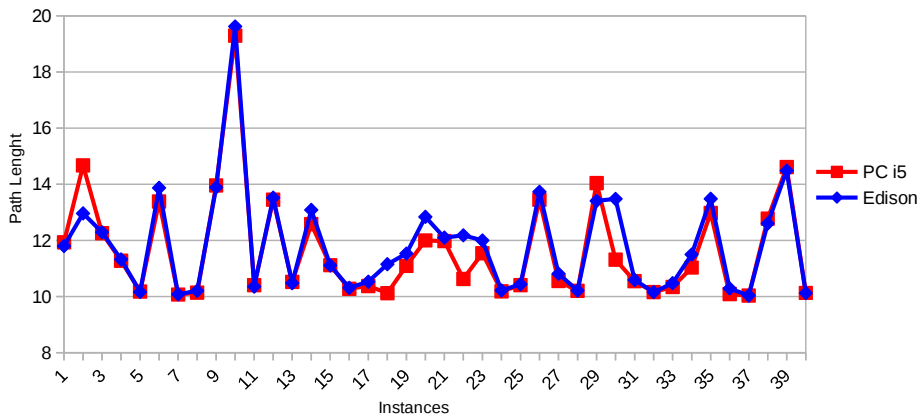


Figura 2: Comprimento do caminho por instância para o planejamento de rotas.

Método MPGA4s

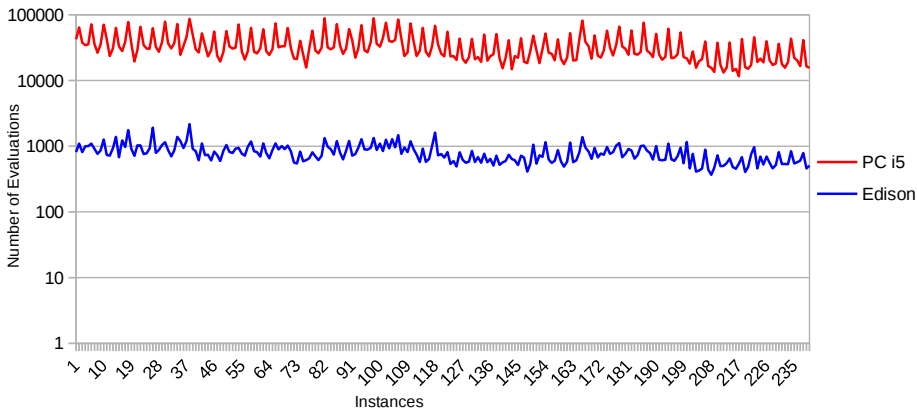


Figura 3: Número de avaliações por instância para o replanejamento de rotas.

Método MPGA4s

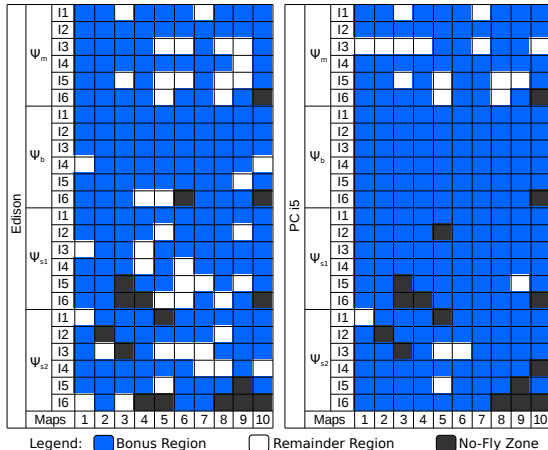


Figura 4: Locais de pouso em ambas arquiteturas para replanejamento.

Resultados

Artigo ICTAI

- Desenvolvimento do sistema IFA (simulado)
- Tipo de experimentos: SITL e HITL
- Plataformas avaliadas: Intel Edison e PC i5
- Replanejadores avaliados: HG4s, GA4s, GA-GH4s e GA-GA4s
- Falhas críticas avaliadas: 2
- Instâncias artificiais avaliadas: 30
- Instância real avaliada: 1
- Execução: 10 vezes para cada mapa
- Critério de parada (tempo): 250 ms, 500 ms, 1000 ms
- Aeronave: Rascal 110

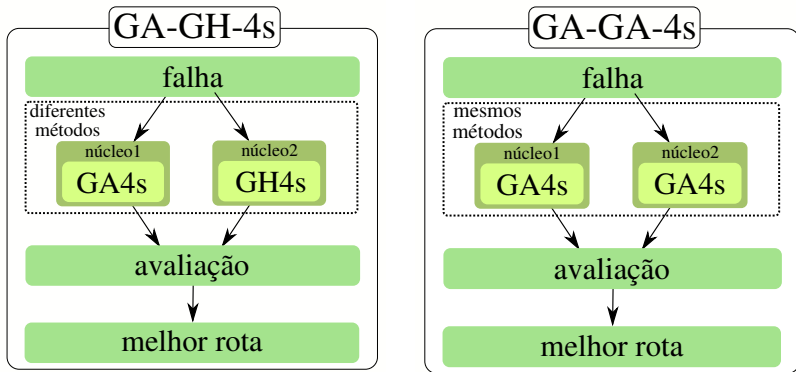


Figura 5: Estratégias implementadas executando os métodos em paralelo.

Resultados

Artigo ICTAI



Métodos	CP (ms)	Intel Edison			
		Ψ_b	Ψ_m	Média	Tempo
HG	-	86,7%	60,0%	73,3%	347
AG	250	72,3%	62,3%	67,3%	250
AG	500	84,7%	65,3%	75,0%	500
AG	1000	91,0%	68,0%	79,5%	1000
AG-HG	250	89,3%	62,7%	76,0%	309
AG-HG	500	90,3%	65,7%	78,0%	510
AG-HG	1000	92,3%	69,0%	80,7%	1000
AG-AG	250	81,0%	65,0%	73,0%	250
AG-AG	500	89,7%	68,3%	79,0%	500
AG-AG	1000	94,7%	70,0%	82,3%	1000
Média	-	87,2%	65,6%	76,4%	-

Figura 6: Resultado do estudo de caso em um cenário do mundo real usando GA-GA-4s.

- Desenvolvimento do sistema MOSA
 - Planejadores avaliados: HGA4m, CCQSP4m e FixedRoute4m
- Desenvolvimento do sistema IFA
 - Replanejadores avaliados: DE4s, GA4s e MPGA4s
 - Falhas críticas avaliadas: 4
 - Critério de parada (tempo): 1 segundo
- Experimentos HITL: 50
- Experimentos com voos reais: 8
- Plataformas avaliadas:
 - AP: APM e Pixhawk
 - CC: Intel Edison, Raspberry Pi 3, BeagleBone Black
 - Aeronaves: iDroneAlpha e iDroneBeta

Resultados

Artigo ESWA

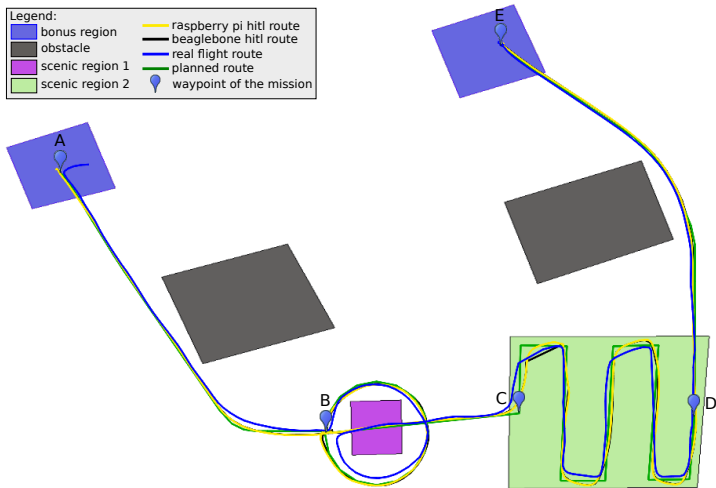


Figura 7: Resultado sem falha crítica.

Resultados

Artigo ESWA

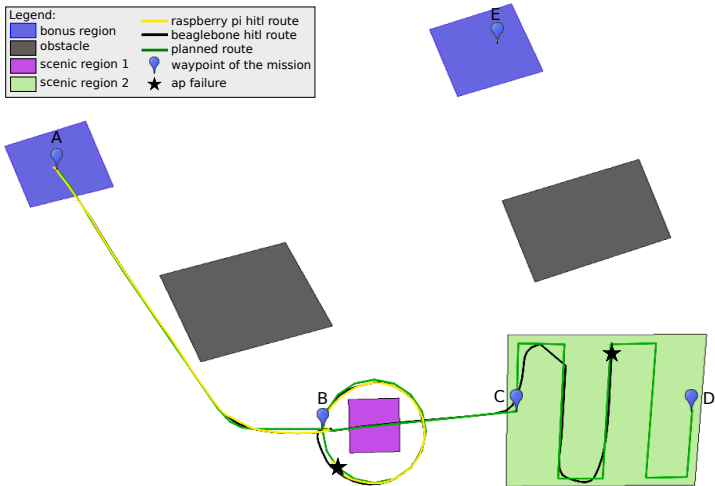


Figura 8: Resultado com falha no AP.

Resultados

Artigo ESWA

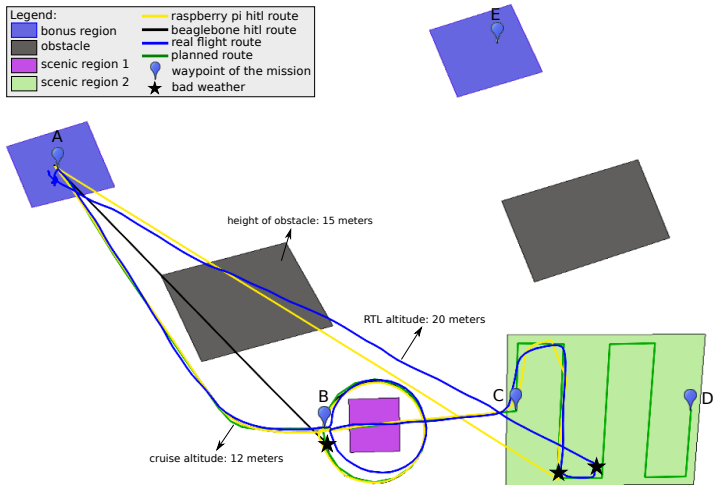
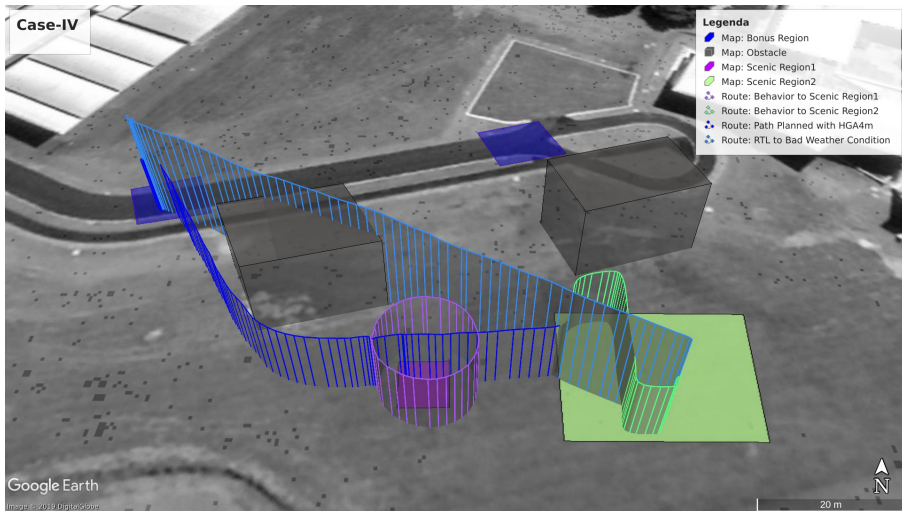


Figura 9: Resultado com tempo ruim.

Resultados

Artigo ESWA



Resultados

Planejador	Estratégia	Local de Execução	Desvio de Obstáculo	Nº Cores da CPU	Tempo de Proces.	Qualidade Solução
HGA4m	Combinada	<i>on/offboard</i>	Sim	1	Lento (≈ 10 a 100 s)	***
CCQSP4m	PLIM	<i>on/offboard</i>	Sim	1	Moderado (≈ 4 a 40 s)	***
FixedRoute4m	Clássica	<i>onboard</i>	Não	1	Super Ráp. ($\approx < 0,1$ s)	*
Replanejador	Estratégia	Local de Execução	Desvio de Obstáculo	Nº Cores da CPU	Tempo de Proces.	Qualidade Solução
GA4s	Metaheurística	<i>on/offboard</i>	Sim	1	Rápido ($\approx 0,5$ a 3 s)	***
MPGA4s	Metaheurística	<i>on/offboard</i>	Sim	1	Rápido ($\approx 0,5$ a 3 s)	***
DE4s	Metaheurística	<i>on/offboard</i>	Sim	1	Rápido ($\approx 0,5$ a 3 s)	***
GH4s	Heurística	<i>on/offboard</i>	Não	1	Muito Ráp. ($\approx < 0,5$ s)	**
MS4s	Heurística	<i>on/offboard</i>	Sim	1	Rápido ($\approx 0,5$ a 3 s)	**
GA-GA-4s	Combinada	<i>onboard</i>	Sim	2	Rápido ($\approx 0,5$ a 3 s)	***
GA-GH-4s	Combinada	<i>onboard</i>	Sim	2	Rápido ($\approx 0,5$ a 3 s)	***
Pre-Planned4s	Determinística	<i>onboard</i>	Depende	1	Muito Ráp. ($\approx < 0,5$ s)	*

Tabela 2: Comparação entre os planejadores e replanejadores utilizados.

Resultados

Categoria	Descrição	MOSA Figueira	MOSA Arantes
Características	Modelo de referência	✓	
	Implementação do MOSA	✓	✓
	Taxonomia blocos software	✓	
	Taxonomia blocos hardware	✓	
	Função proces. de imagens	✓	
	Função proces. de vídeo	✓	
	MOSA não adaptativo	✓	✓
	MOSA adaptativo		✓
	Integração do MOSA e IFA		✓
Integração do AP com CC		✓	
Planejadores	Estratégia FixedRoute4m		✓
	Algoritmo HGA4m		✓
	Algoritmo CCQSP4m		✓
Forma de experimento	Experimento VANT simulado	✓	✓
	Experimento VANT real	✓	✓
Computadores avaliados	PC - Computador Pessoal	✓	✓
	CC - Intel Edison		✓
	CC - Raspberry Pi		✓
	CC - BeagleBone Black		✓
AP avaliados	APM		✓
	Pixhawk		✓

Resultados

Categoria	Descrição	IFA Mattei	IFA Arantes
Características	Modelo de referência	✓	
	Implementação do IFA	✓	✓
	Detecta colisão com aeronaves no Ar	✓	
	Detecta colisão com solo	✓	
	Pouso emergencial em região atrativa	✓	✓
	Retorno à base	✓	✓
	Condições meteorológicas ruins	✓	✓
	Integração do IFA com MOSA		✓
Integração do AP com CC		✓	
Replanejadores	Algoritmo MPGA4s	✓	✓
	GA4s, GH4s, Pre-Planned4s		✓
	DE4s, MS4s GA-GA-4s, GA-GH-4s		✓
Forma de experimento	Experimento SITL	✓	✓
	Experimento HITL		✓
	Experimento voo real		✓
Computadores avaliados	PC - Computador Pessoal	✓	✓
	CC - Intel Edison		✓
	CC - Raspberry Pi		✓
	CC - BeagleBone Black		✓
AP avaliados	APM		✓
	Pixhawk		✓

Considerações Finais

Conclusão

- Este trabalho apresentou um proposta para automatização de VANTs para realização de missões com segurança;
- Uma arquitetura de hardware e software de baixo custo foi desenvolvida;
- Planejadores de missão e segurança foram adaptados ao contexto aqui proposto;
- Uma plataforma *plug and play* e que faz a separação de interesses foi desenvolvida.

Considerações Finais

Contribuições

Contribuições Alcançadas:

- Adaptar e unificar os sistemas MOSA, IFA e planejadores de rotas em um única arquitetura embarcada;
- Planejar e executar a missão de forma embarcada em tempo hábil, utilizando CC de baixo custo;
- Reagir de forma inteligente a algumas falhas críticas e tomadas de decisão autônoma para minimizar danos/acidentes;
- Implementar o sistema em código-fonte aberto e modular:
 - Sistema UAV-MOSA
 - Sistema UAV-IFA
 - Sistema UAV-S2DK
 - Sistema UAV-GCS
 - Sistema UAV-Mission-Creator

Objetivos Alcançados

Os seguintes objetivos foram alcançados:

- **Propósito geral:** diferentes missões podem ser incorporadas sem grandes mudanças na arquitetura.
- **Resiliência:** os sistemas devem prevenir a propagação de erros visando o correto funcionamento da aeronave.
- **Autonomia:** os sistemas irão operar a aeronave com baixo nível de intervenção humana.

Considerações Finais

Artigos Publicados

Conferências

- **GECCO 2017:** *An Embedded System Architecture based on Genetic Algorithms for Mission and Safety Planning with UAV.* Apêndice B.
- **ICTAI 2017:** *Evaluating Hardware Platforms and Path Re-Planning Strategies for the UAV Emergency Landing Problem.* Apêndice C.
- **ICAS 2018:** *Service-Oriented Architecture to Integrate Flight Safety and Mission Management Subsystems Into UAVs.* Apêndice D.






Periódico Submetido

- **ESWA 2019:** *Low-Cost Architecture for Autonomous Flight of UAVs Based on Mission Execution and Safety.* Apêndice E.

Considerações Finais

Trabalhos Futuros

- Fazer a Sdl entre os sistemas MOSA e IFA em nível físico;
- Desenvolver e validar a plataforma em VANTs de asa fixa (Ararinha);
- Incorporar o desvio de obstáculos dinâmicos, baseado em visão;
- Executar o IFA em um CC com Sistema Operacional de Tempo Real;
- Desenvolver novos algoritmos planejadores de missão que não utilizem modelos de PLIM e que tenham um baixo custo computacional.

-  B. H. Y. Alsalam and K. Morton and D. Campbell and F. Gonzalez. Autonomous UAV with vision based on-board decision making for remote sensing and precision agriculture, **2017 IEEE Aerospace Conference**, 2017.
-  Arantes, M. S. **Hybrid Qualitative State Plan Problem e o Planejamento de Missão com VANTs**, Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo (USP), 2017.
-  Arantes, J. S. **Planejamento de rota para VANTs em caso de situação crítica: Uma abordagem baseada em segurança**, Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo (USP), 2016.
-  Boubeta-Puig, Juan and Moguel, Enrique and Sánchez-Figueroa, Fernando and Hernández, Juan and Preciado, Juan Carlos. An Autonomous UAV Architecture for Remote Sensing and Intelligent Decision-making, **IEEE Internet Computing**, 2018.
-  Figueira, N. M. **Arranjos de sensores orientados à missão para a geração automática de mapas temáticos em VANTs**, Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo (USP), 2016.



Mattei, A. L. P. **Consciência situacional em voo de sistemas aéreos não tripulados**, Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo (USP), 2015.

Muito Obrigado!
Perguntas!



E-mail para contato:

jesimar.arantes@usp.br