

“Optimización de un Controlador ST-SMC para seguimiento de trayectoria de un QUAUV empleando el algoritmo metaheurístico HGS”

Autores:

Nadia Samantha Zúñiga Peña

Norberto Hernández Romero

Juan Carlos Seck Tuoh Mora

Joselito Medina Marín

Irvin Barragán Vite

*Desarrollo de la ingeniería y arquitectura para
el diseño y construcción de un futuro
sostenible*



CONTENIDO

- Introducción
- Planteamiento del problema
- Metodología
- Resultados
- Conclusiones
- Referencias

*Desarrollo de la ingeniería y arquitectura para
el diseño y construcción de un futuro
sostenible*



Introducción



Figura 1. Aplicaciones de los UAVs.

*Desarrollo de la ingeniería y arquitectura para
el diseño y construcción de un futuro
sostenible*

Planteamiento del problema



Perturbaciones externas y dinámicas no modeladas

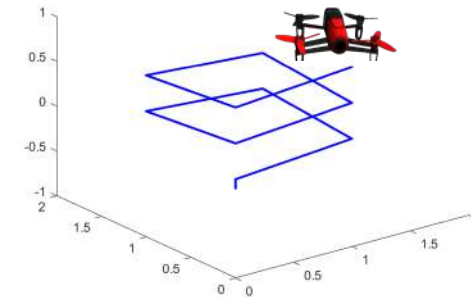


Figura 2. Objetivo: llevar al QUAUV a través de una trayectoria deseada.

*Desarrollo de la ingeniería y arquitectura para
el diseño y construcción de un futuro
sostenible*

Metodología

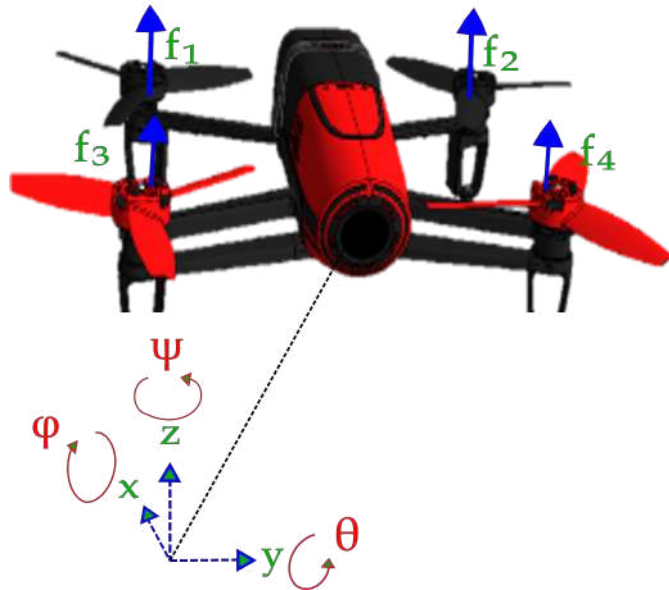


Figura 3. Sistemas de referencia inercial (W) y del cuerpo (B), para obtener el modelo matemático del UAV.

Las ecuaciones 1 y 2 relacionan el movimiento en el centro de gravedad del QUAV con las fuerzas, inercias y torques.

$$m\dot{v} = F + F_D + F_g$$

(1) Dinámicas traslacionales

$$I_B \dot{\omega}_B = M - M_a$$

(2) Dinámicas rotacionales

*Desarrollo de la ingeniería y arquitectura para
el diseño y construcción de un futuro
sostenible*

Metodología

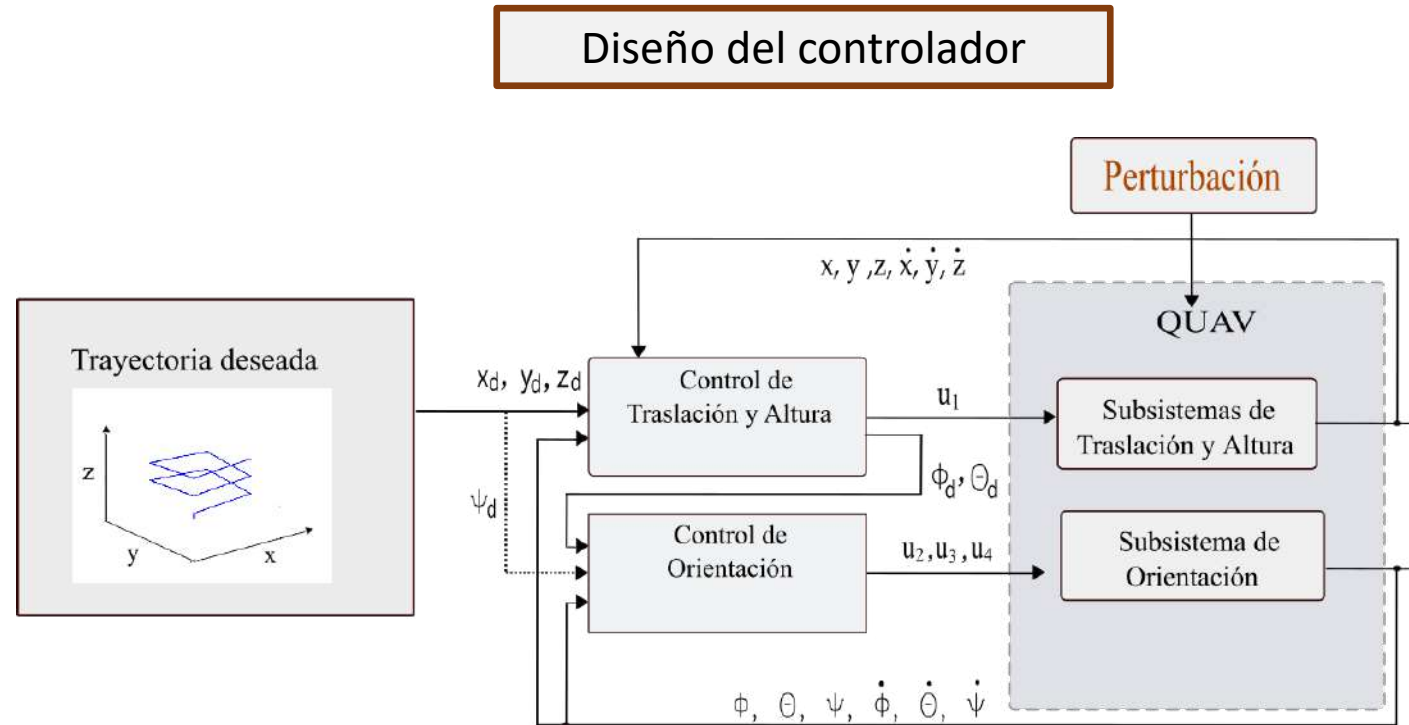


Figura 4. Estructura de control propuesta para seguimiento de trayectoria.

*Desarrollo de la ingeniería y arquitectura para
el diseño y construcción de un futuro
sostenible*

Metodología

Señales de Control por Modos Deslizantes

β , k_1 y k_2 , son los parámetros que se deben elegir para sintonizar la respuesta del controlador

$$u_1 = \frac{m}{\cos(\phi) \cos(\theta)} \left[\ddot{z}_d + \beta_z \dot{e} + k_1 \sqrt{|s_z|} \text{sign}(s_z) + k_2 \int \text{sign}(s_z) dt + \omega(t) \right] + g \quad (1)$$

Señal de control para dinámica en eje Z

$$\mu_x = \frac{m}{u_1} \left[\ddot{x}_d + \beta_x \dot{e} + k_1 \sqrt{|s_x|} \text{sign}(s_x) + k_2 \int \text{sign}(s_x) dt + \omega(t) \right] \quad (2)$$

Señal de **control virtual** para dinámica en eje X

$$\mu_y = \frac{m}{u_1} \left[\ddot{y}_d + \beta_y \dot{e} + k_1 \sqrt{|s_y|} \text{sign}(s_y) + k_2 \int \text{sign}(s_y) dt + \omega(t) \right] \quad (3)$$

Señal de **control virtual** para dinámica en eje Y

*Desarrollo de la ingeniería y arquitectura para
el diseño y construcción de un futuro
sostenible*

Metodología

β , k_1 y k_2 , son los parámetros que se deben elegir para sintonizar la respuesta del controlador

$$u_2 = I_x \left[\ddot{\phi}_d + \beta_{\phi} \dot{e} + k_1 \sqrt{|s_{\phi}|} \text{sign}(s_{\phi}) + k_2 \int \text{sign}(s_{\phi}) dt - \frac{(I_y - I_z)}{I_x} \dot{\theta} \dot{\psi} \right] \quad (4)$$

Señal de control para dinámica ϕ

$$u_3 = I_y \left[\ddot{\theta}_d + \beta_{\theta} \dot{e} + k_1 \sqrt{|s_{\theta}|} \text{sign}(s_{\theta}) + k_2 \int \text{sign}(s_{\theta}) dt - \frac{(I_z - I_x)}{I_y} \dot{\phi} \dot{\psi} \right] \quad (5)$$

Señal de control para dinámica θ

$$u_4 = I_z \left[\ddot{\psi}_d + \beta_{\psi} \dot{e} + k_1 \sqrt{|s_{\psi}|} \text{sign}(s_{\psi}) + k_2 \int \text{sign}(s_{\psi}) dt - \frac{(I_x - I_y)}{I_z} \dot{\phi} \dot{\psi} \right] \quad (6)$$

Señal de control para dinámica ψ

*Desarrollo de la ingeniería y arquitectura para
el diseño y construcción de un futuro
sostenible*



Metodología

Optimización del controlador SMC

Ganancias a optimizar:

población

$$P = \left\{ \beta_x k_{p_x} k_{d_x} \beta_y k_{p_y} k_{d_y} \beta_z k_{p_z} k_{d_z} \beta_\phi k_{p_\phi} k_{d_\phi} \beta_\theta k_{p_\theta} k_{d_\theta} \beta_\psi k_{p_\psi} k_{d_\psi} \right\}$$

$$S = [0 \ 10]$$

Espacio de búsqueda

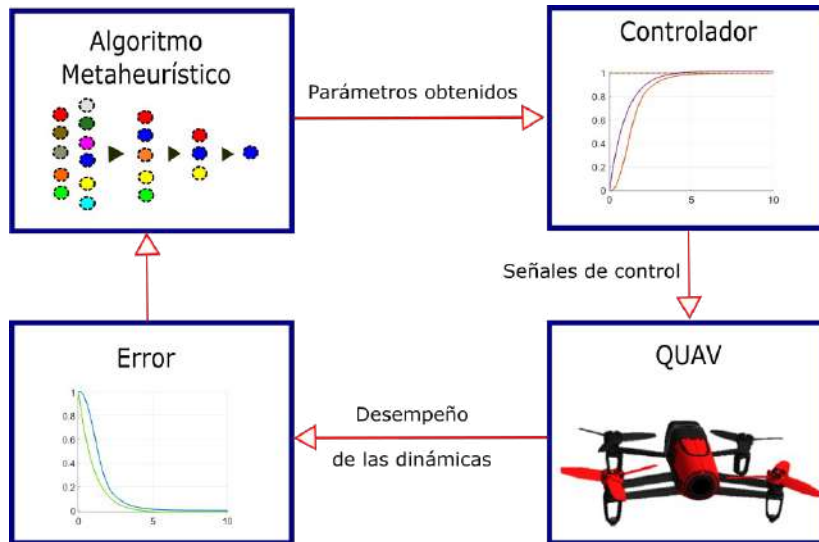


Figura 5. Esquema de sintonización de ganancias del controlador.

$$ff = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^G \sum_{k=0}^N (y_a^i(k) - y^i(k))^2}$$

función costo

*Desarrollo de la ingeniería y arquitectura para
el diseño y construcción de un futuro
sostenible*

Metodología

Elección del Algoritmo para Optimización del controlador SMC

Table 1. Experimental result of RMSE with 20 individuals, 20 evolutions and 30 repetitions.

Statistics	PSO	GWO	HGS	LSHADE	LSPACMA	MPA	SMA	WOA
Best	0.037396168112890	0.037362955856019	0.037263535506379	0.038978058766757	0.039741105315137	0.037284239891813	0.037835061121072	0.037370940741738
Mean	0.054376357228900	0.043954323277539	0.045379957656500	0.052582989549809	0.050922002950839	0.038978646154916	0.051468628827586	0.068998262466992
SD	0.018193244089308	0.018827354037126	0.012805236930367	0.014038286466383	0.008042296173043	0.001885601376063	0.017924632527572	0.103765679125065
Worst	0.074792336225780	0.140069824231860	0.074527071012758	0.091325532418241	0.079482210630274	0.044105573338656	0.107284349261279	0.615170818395657

Table 3. Experimental result of MSE with 30 individuals, 20 evolutions and 30 repetitions.

Statistics	PSO	GWO	HGS	LSHADE	LSPACMA	MPA	SMA	WOA
Best	0.037298689699719	0.037386364140826	0.037250937439961	0.038703382913285	0.039391601057574	0.037305699738380	0.037610074434848	0.037526810582112
Median	0.049292829641084	0.038231926452584	0.041468520773043	0.048098319555092	0.048447470240744	0.038439358577506	0.040600753887036	0.106439604511052
SD	0.016922702608194	0.000917745219989	0.480087752312157	0.008671308416183	0.007749711491518	0.001368117384585	0.006458484603516	0.164512311240661
Worst	0.074597379399439	0.040928476103477	1.972825126787748	0.077406765826570	0.078783202115148	0.043410168070117	0.066852769977100	0.608263592411619

Table 5. Experimental result of RMSE with 40 individuals, 20 evolutions and 30 repetitions.

Statistics	PSO	GWO	HGS	LSHADE	LSPACMA	MPA	SMA	WOA
Best	0.037255373533488	0.037266015064895	0.037247252379126	0.039394303548209	0.038830921234619	0.037256592611999	0.037632310844408	0.037353819712401
Mean	0.045525283051302	0.041601797209679	0.066221944130588	0.043549315402296	0.045455785193484	0.038150710592382	0.039375241940074	0.043928558596090
SD	0.012064390608393	0.010639844056084	0.154265972701073	0.003114729193649	0.005768092569169	0.001152641167111	0.002176578772137	0.005084363577577
Worst	0.074392122335153	0.0841544555562805	0.882938952672554	0.051704889477973	0.062767121112513	0.043218862736804	0.045909805573245	0.059239414200638

Figura 6. Comparativa de Algoritmos Metaheurísticos para aplicado a UAV para seguimiento de trayectoria (Zuñiga-Peña et al., 2022).

Desarrollo de la ingeniería y arquitectura para el diseño y construcción de un futuro sostenible

Metodología

Implementación del controlador SMC

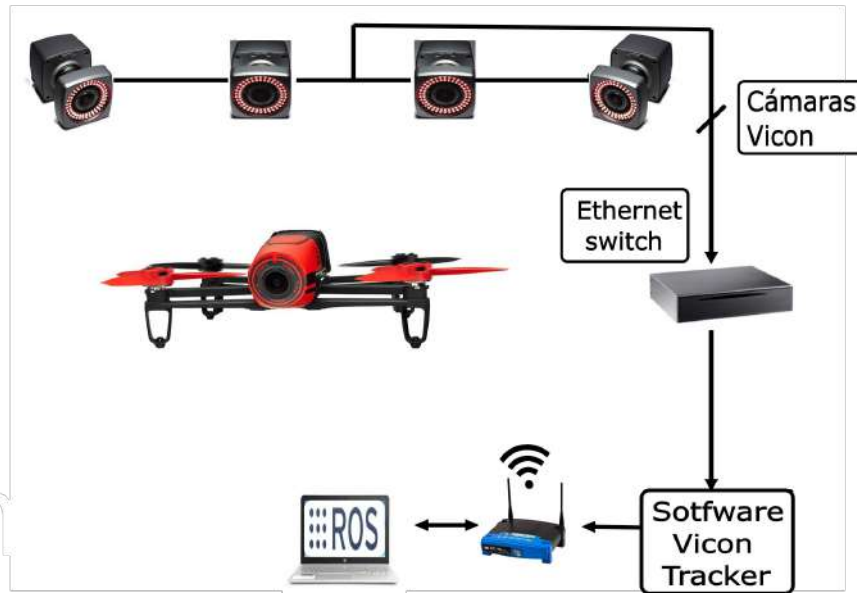


Figura 7. Plataforma experimental para implementación de controlador optimizado.

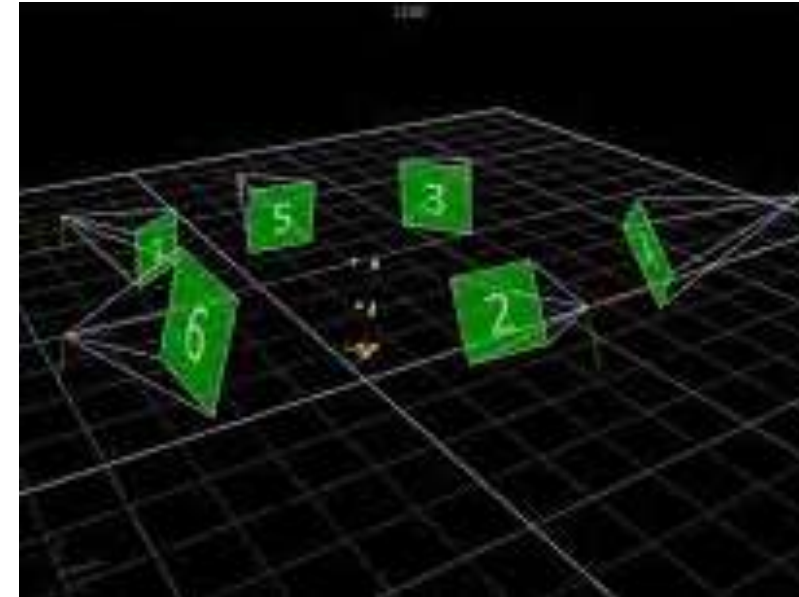


Figura 8. Sistema de captura de movimiento Vicon®.

*Desarrollo de la ingeniería y arquitectura para
el diseño y construcción de un futuro
sostenible*

Metodología

Implementación de los controladores PID y SMC

I
C
B
I

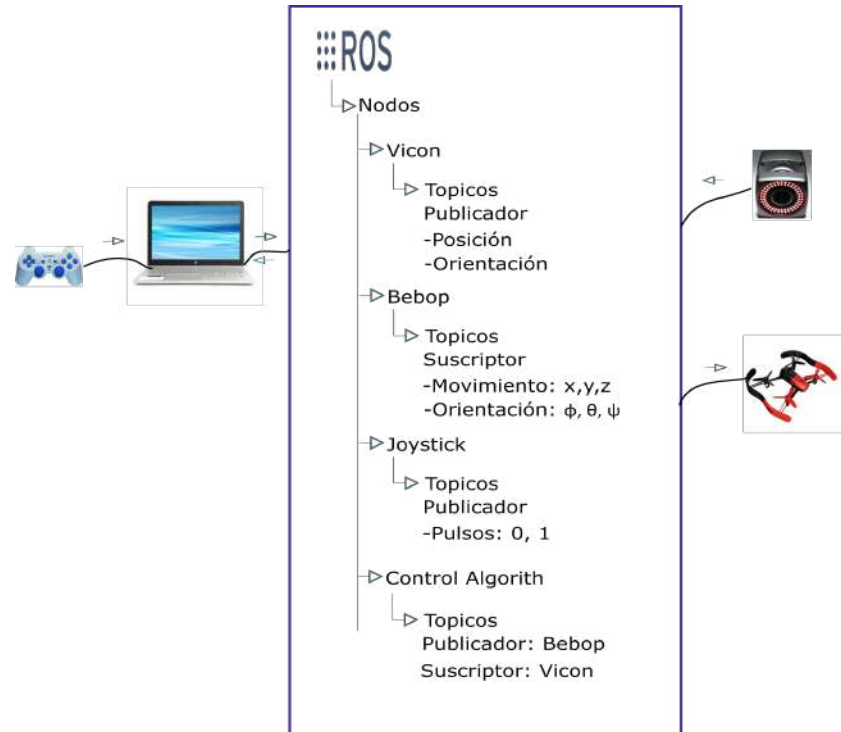


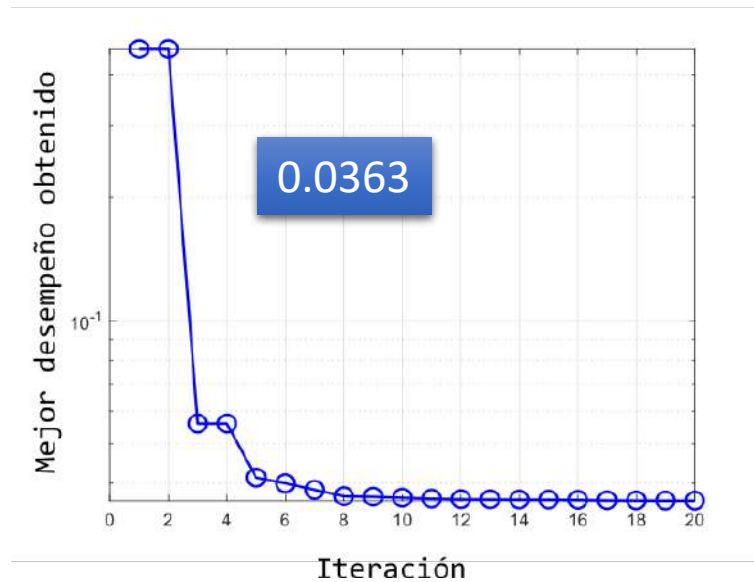
Figura 9. Plataforma experimental para implementación de controladores optimizados: ROS.

Desarrollo de la ingeniería y arquitectura para el diseño y construcción de un futuro sostenible

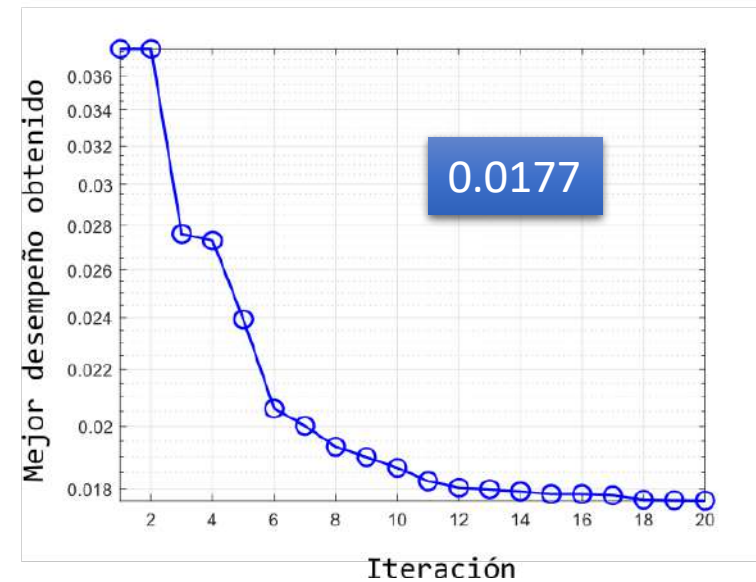
Resultados

- Curvas de convergencia de la búsqueda empleando el algoritmo HGS

Controlador PID



Controlador SMC



Iteraciones: 20
Individuos: 50
Repeticiones: 30

Figura 10. Curvas de convergencia de RMSE, para los algoritmos PID y SMC.

*Desarrollo de la ingeniería y arquitectura para
el diseño y construcción de un futuro
sostenible*

Resultados en simulaciones numéricas

- Desempeño dinámico del UAV en los ejes X, Y y Z, sin presencia de perturbaciones

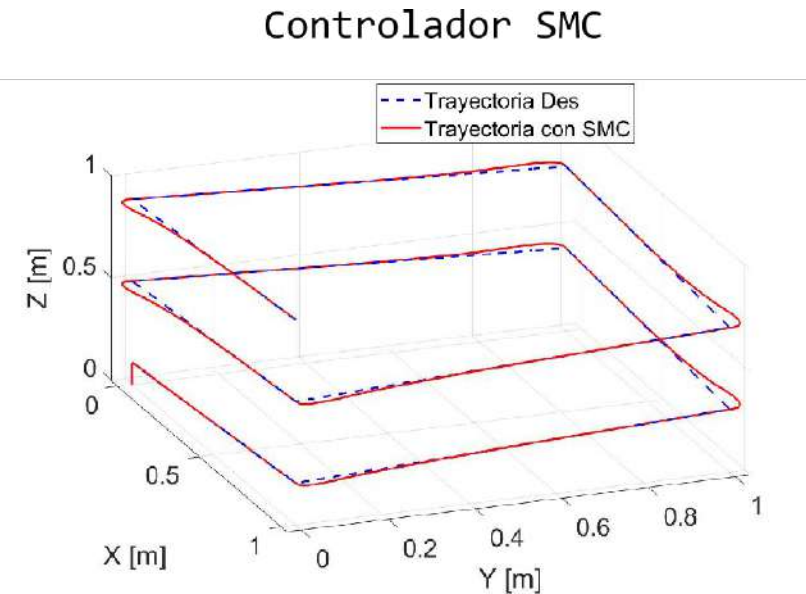
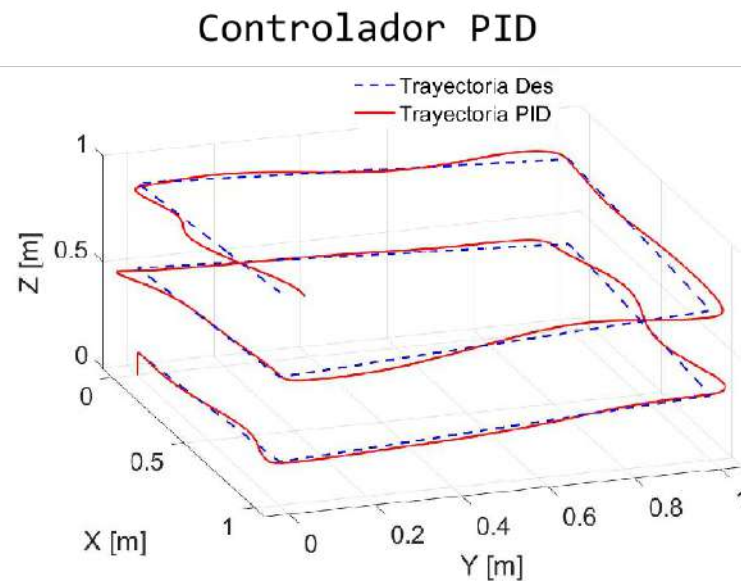


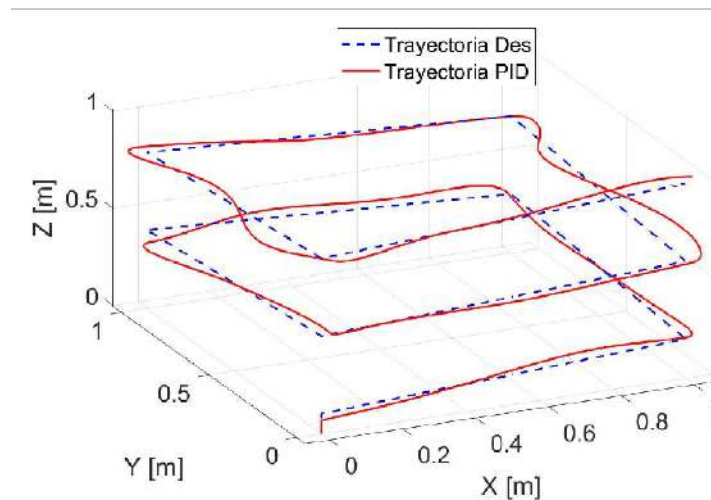
Figura 11. Comparación de desempeño de un QUAV cuando se implementan los algoritmos PID y SMC.

*Desarrollo de la ingeniería y arquitectura para
el diseño y construcción de un futuro
sostenible*

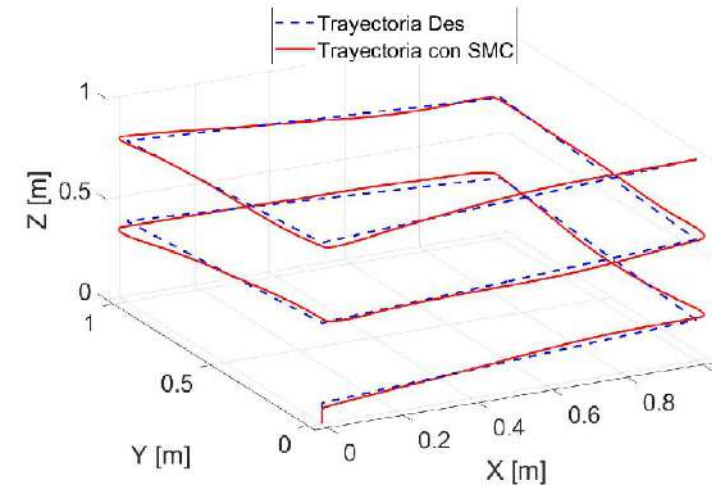
Resultados en simulaciones numéricas

Desempeño dinámico del UAV en los ejes X, Y y Z, en presencia de perturbaciones

Controlador PID



Controlador SMC



Perturbación:

$$\frac{1}{2} \cos t$$

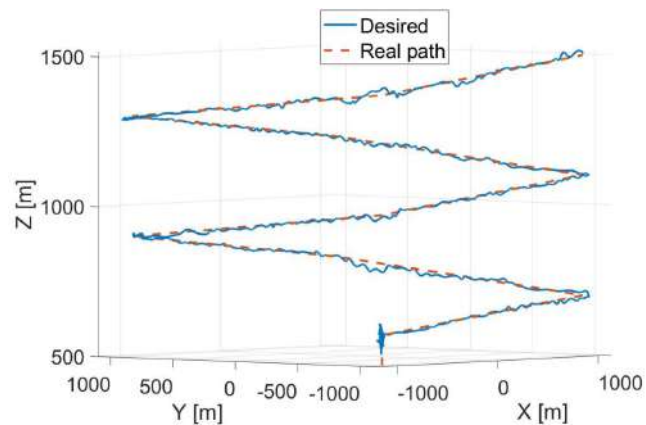
Figura 12. Comparación de desempeño de un QUAUV cuando se implementan los algoritmos PID y SMC, en presencia de perturbación externa.

*Desarrollo de la ingeniería y arquitectura para
el diseño y construcción de un futuro
sostenible*

Resultados en experimentos físicos

Desempeño dinámico del UAV en los ejes X, Y y Z, sin perturbaciones

Controlador PID



Controlador SMC

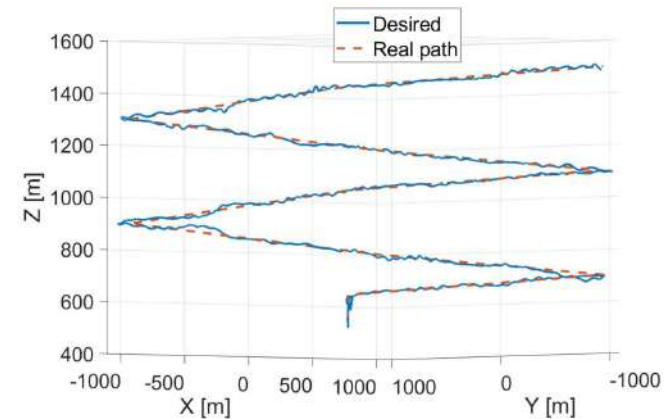


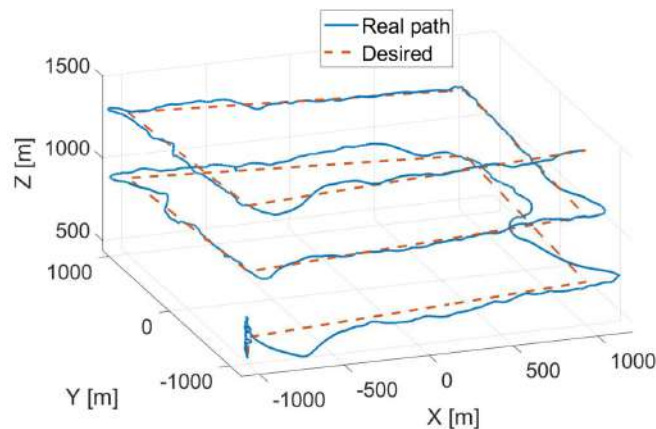
Figura 13. Comparación de desempeño de un QUAUV cuando se implementan los algoritmos PID y SMC.

*Desarrollo de la ingeniería y arquitectura para
el diseño y construcción de un futuro
sostenible*

Resultados en experimentos físicos

Desempeño dinámico del UAV en los ejes X, Y y Z, en presencia de perturbaciones

Controlador PID



Controlador SMC

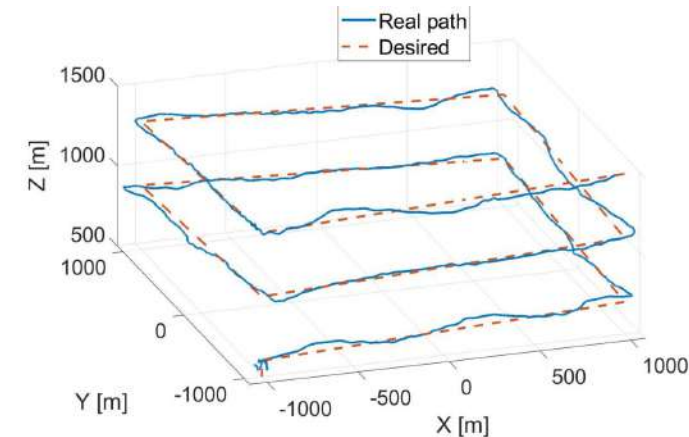


Figura 14. Comparación de desempeño de un QUAUV cuando se implementan los algoritmos PID y SMC, en presencia de perturbación externa.

*Desarrollo de la ingeniería y arquitectura para
el diseño y construcción de un futuro
sostenible*



Conclusiones preliminares

- El desempeño dinámico del QUAV mejora con el control SMC aún en presencia de perturbaciones.
- La plataforma experimental permite la validación de los resultados obtenidos en simulaciones.

*Desarrollo de la ingeniería y arquitectura para
el diseño y construcción de un futuro
sostenible*



Referencias

- Bi, H., Qi, G., & Hu, J. (2019). Modeling and Analysis of Chaos and Bifurcations for the Attitude System of a Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle. *Complexity*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/6313925>
- Costa, B. L. G., Graciola, C. L., Angélico, B. A., Goedel, A., & Castoldi, M. F. (2018). Metaheuristics optimization applied to PI controllers tuning of a DTC-SVM drive for three-phase induction motors. *Applied Soft Computing Journal*, 62, 776–788. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.09.007>
- Zuñiga-Peña, N. S., Hernández-Romero, N., Seck-Tuoh-mora, J. C., Medina-Marin, J., & Barragan-Vite, I. (2022). Improving 3d path tracking of unmanned aerial vehicles through optimization of compensated pd and pid controllers. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/app12010099>
- Ni, D., Yu, G., & Rathinam, S. (2017). Unmanned Aircraft System and Its Applications in Transportation. *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/7156153>
- Hamadi, H., Lussier, B., Fantoni, I., Francis, C., & Shraim, H. (2019). Observer-based super twisting controller robust to wind perturbation for multirotor UAV. *2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2019*, 397–405. <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2019.8798307>

*Desarrollo de la ingeniería y arquitectura para
el diseño y construcción de un futuro
sostenible*

