



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
LICENCIADO EN INGENIERÍA
MECATRÓNICA**

**CONTROL A TRAVÉS DE INTERNET DE
UN SISTEMA PVTOL USANDO UNA
ESTRATEGIA DE CONTROL DISPARADA
POR EVENTOS**

Presenta:

Argel Vega Alonzo

Asesores:

Dr. José Fermi Guerrero Castellanos

Dra. Susasa Sánchez Urrieta

Puebla, Pue., Diciembre 2015

Agradecimiento

Le doy las gracias a mis Padres, por su cariño y apoyo que siempre me han dado.

A mis hermanos por la compañía y apoyo que me brindan.

A mis amigos por su confianza, apoyo y compañía, que en todo momento me han dedicado, así como los comentarios y palabras de apoyo que sirvieron siempre para mejorar el trabajo.

A mis asesores el Dr. José Fermi Guerrero Castellanos y a la Dra. Susana Sánchez Urrieta por su apoyo, paciencia, consejos y enseñanzas. Les doy las gracias por estar presentes desde el inicio hasta la culminación del trabajo.

Resumen

La estrategia de control disparada por eventos se caracteriza por actualizar la señal de control únicamente cuando en verdad es necesario, es decir, cuando ocurre un evento. Dicha estrategia permite la reducción del costo computacional, así como la disminución del tráfico de datos cuando el lazo de control se cierra mediante de una red de comunicaciones. En el presente trabajo se desarrolla un algoritmo de control disparado por eventos para la estabilización de un sistema PVTOL (por sus siglas en inglés *Planar Vertical Take-Off and Landing*), donde el lazo de control es cerrado a través una red Ethernet. La estrategia de control propuesta garantiza la estabilidad asintótica en la vecindad del punto de equilibrio deseado.

Con el propósito de comprobar la eficiencia de la estrategia de control, se realizó la implementación de un sistema PVTOL, compuesto de una estructura de fibra de carbono, dos motores sin escobillas y sensores para adquirir su estado (unidad de medición inercial y sensor infrarrojo). La adquisición, procesamiento y control del sistema se realizó mediante dos computadoras. La introducción de las computadoras permitió dividir en dos partes el sistema. Por un lado se tiene el PVTOL junto con una computadora (computadora local), la cual se encarga de adquirir y visualizar el estado del sistema, además de enviar dicho estado a través de la red Ethernet a la segunda computadora (computadora remota). Por otro lado en la computadora remota se recibe el estado para ser empleado en el cálculo de control. Una vez calculadas las señales de control, éstas son enviadas mediante la misma red hacia la computadora local, la cual será la encargada de enviar dichas señales a la tarjeta de adquisición de datos, que generará las señales de control PWM para los actuadores. Los resultados obtenidos demuestran que la estrategia de control propuesta disminuye el número de actualización de la señal de control, de igual manera que se reduce el tráfico en la red de comunicación, esto sin comprometer el desempeño del sistema. Además de presentar una robustez ante perturbaciones externas.

Índice general

Resumen	III
Lista de acrónimos	XI
Introducción	XII
Objetivos	XIV
Objetivo general	XIV
Objetivos específicos	XIV
1. Generalidades y estado del arte	1
1.1. Sistemas ciber-físicos	1
1.1.1. Antecedentes	1
1.1.2. Surgimiento de los sistemas ciber-físicos	2
1.1.3. Consideraciones de diseño de los CPS	4
1.1.4. Desafíos entorno a los CPS	5
1.2. Vehículos aéreos no tripulados	5
1.2.1. Clasificación de vehículos aéreos no tripulados	9
1.2.2. VANT de despegue y aterrizaje vertical	15
1.2.2.1. PVTOL fundamento del VTOL	20
2. Fundamentos teóricos	21
2.1. Sistemas de control automático	21
2.1.1. Sistemas de control basados en red	22
2.1.2. Sistemas de control síncronos y asíncronos	25
2.1.3. Sistemas de control disparados por eventos	27
2.2. Fórmula general del control disparado por eventos.	29
2.3. Modelo matemático	33
2.3.1. Modelo matemático del PVTOL	33
2.3.1.1. Ecuaciones del sistema	34
2.3.1.2. Aproximación lineal del sistema	35

3. Diseño e implementación del sistema PVTOL	37
3.1. Planteamiento del problema	37
3.2. Diseño de la estrategia de control	38
3.3. Interpretación de control LQR para el control disparado por eventos	40
3.4. Elementos del sistema	41
3.4.1. Estructura del PVTOL	41
3.4.2. Motores sin escobillas	43
3.4.3. Unidad de Medición Inercial (IMU)	44
3.4.4. Sensor infrarrojo	45
3.4.5. Tarjeta de adquisición de datos	46
3.4.6. Batería	47
3.5. Interfaz del sistema	49
3.5.1. Interfaz de monitoreo (local)	51
3.5.2. Interfaz de calculo y retroalimentación de control (remota)	52
3.6. Integración	53
3.6.1. Construcción del PVTOL	54
3.6.2. PVTOL incorporado con las interfaces	57
4. Resultados experimentales	62
4.1. Resultados experimentales en simulación y tiempo real	62
4.1.1. Resultado de simulaciones	63
4.1.2. Resultados en tiempo real	72
4.1.2.1. Comportamiento del PVTOL ante cambios de altura	72
4.1.2.2. Comportamiento del PVTOL ante cambios de altura y presencia de perturbaciones	76
Conclusiones	81
Bibliografía	84
A. Códigos fuentes de las interfaces	89
B. Estudio energético	98
C. Publicaciones en congresos	101

Índice de figuras

1.1. Áreas que integran los CPS.	3
1.2. Estructura general de un CPS.	3
1.3. Aplicaciones de los VANTs en los años 2012-2013.	8
1.4. Novedem (Francia).	10
1.5. Black Hornet (Alemania).	10
1.6. MH 2000 - MavTech.	11
1.7. Seeker - Fly-n-Sense.	11
1.8. Skorpion - EADS-DS.	11
1.9. GC-201 - Geocopter.	11
1.10. AGPlane Arara.	12
1.11. AGX Tecnologia.	12
1.12. Global Hawk A(Derecha) y B(Izquierda) - Northrop Grumman.	12
1.13. Clasificación en función de la configuración aerodinámica.	13
1.14. VANT de ala fija (Indiza - CSIR).	13
1.15. VANT de ala rotatoria.	14
1.16. VANT de ala batiente (AeroVironnet).	14
1.17. VANT dirigible (Fox - Virtual Robotics).	15
1.18. VTOL de rotor principal y de cola (AT200).	16
1.19. VTOL de rotores coaxiales (VT-UAV).	16
1.20. VTOL de rotores tándem (DP-6 Whisper).	17
1.21. VTOL multi-rotores (quadrirotor).	17
2.1. Alámbrico.	23
2.2. En red.	23
2.3. Estructura jerárquica.	24
2.4. Estructura directa.	25
2.5. Configuración de un sistema de control síncrono	25
2.6. Esquemas de sistemas de control (síncrono y asíncrono).	27
2.7. PVTOL	33
2.8. Diagrama del sistema PVTOL	34

3.1. Diagrama a bloques del sistema	41
3.2. Estructura del VANT	42
3.3. Estructura del PVTOL	42
3.4. Sistema para permitir el desplazamiento	42
3.5. Estructura de la plataforma	43
3.6. Motor sin escobillas	43
3.7. Motor y controlador	43
3.8. IMU 3DM-GX1	44
3.9. IMU y conector RS-232	44
3.10. Sensor 2Y0A02	46
3.11. Sensor infrarrojo con armazón	46
3.12. Tarjeta DAQ de National Instrument	46
3.13. Bateria Li-Po, Zippy.	48
3.14. Computadoras local y remota.	51
3.15. Interfaz de monitoreo.	52
3.16. Interfaz de calculo y retroalimentación de control.	53
3.17. Estructura con motores.	54
3.18. Acoplamiento de la IMU.	55
3.19. Movimiento angular.	55
3.20. Movimiento vertical.	55
3.21. Estructura y sensor.	56
3.22. Soporte para medición del sensor.	56
3.23. Bateria y tarjeta de adquisición.	56
3.24. Plataforma del PVTOL.	57
3.25. Diagrama a bloques de las conexiones	57
3.26. Interfaz de monitoreo y DataSocket	59
3.27. Interfaz de control y DataSocket	60
3.28. Vista fortal del sistema PVTOL	61
4.1. Archivo .m con los parámetros del sistema.	63
4.2. Modelo del PVTOL implementado en Matlab-Simulink.	64
4.3. Modelo del sistema con un control de retroalimentación en tiempo continuo.	64
4.4. Evolución del sistema con un control de retroalimentación de estado.	65
4.5. Modelo del sistema implementado en Función-S con control de retroalimentación.	65
4.6. Evolución de la altura del sistema con entrada dinámica.	66
4.7. Evolución del ángulo del sistema con entrada dinámica.	66
4.8. Animación empleada en Matlab-Simulink.	67
4.9. Matriz CFP1 descrita en el archivo .m.	67

4.10. Bloques para transformar las señales de control (fuerza y torque) a señales PWM.	68
4.11. Evolucion de las señales de control (fuerza y torque).	68
4.12. Evolución de las señales PWM aplicadas al sistema.	69
4.13. Modelo del PVTOL en conjunto con la estrategia de control disparado por eventos.	69
4.14. Función de evento.	70
4.15. Modelo del PVTOL.	70
4.16. Evolución del la altura del sistema (enfoque asintótico).	71
4.17. Evolución de las acciones de control (enfoque asíncrono).	71
4.18. Concurrencia de la bandera de eventos.	71
4.19. Caption for LOF	72
4.20. Altura del sistema	74
4.21. Velocidad lineal del sistema	74
4.22. Ángulo roll	74
4.23. Velocidad angular	75
4.24. Empuje calculado	75
4.25. Torque calculado	75
4.26. CLF	76
4.27. Función evento	76
4.28. Bandera de evento	76
4.29. Altura del sistema	78
4.30. Velocidad lineal del sistema	78
4.31. Ángulo de inclinación	78
4.32. Velocidad angular	79
4.33. Empuje calculado	79
4.34. Torque calculado	79
4.35. CLF	80
4.36. Función evento	80
4.37. Bandera de evento	80
A.1. Configuraciones para las señales de salida.	90
A.2. Sensor infrarrojo.	90
A.3. Paro de emergencia.	90
A.4. IMU.	90
A.5. Configuraciones e inicializaciones.	90
A.6. Configuraciones de las variables para comunicación.	91
A.7. Adquisición y procesamiento de la altura y velocidad lineal.	92
A.8. Bloques de salida para las señales de control.	93

A.9. Código fuente del bloque de la planta.	94
A.10. Configuraciones para las señales de entrada.	95
A.11. Configuraciones para las señales de salida.	95
A.12. Implementación de la función evento.	96
A.13. Configuraciones para las señales de salida.	96
A.14. Código fuente del bloque del controlador.	97
B.1. Analizador de la energía modelo 43B.	98
B.2. Elementos presentes en el estudio energético.	99
B.3. Analizador y monitor de computadora mostrando el consumo energético. .	100
B.4. Gráfica de consumo energético.	100
C.1. Acta de participación en el congreso (2014).	101
C.2. Acta de participación en el congreso (2015).	102

Índice de tablas

1.1. Clasificación de los sistemas VANT en función de su techo de vuelo.	10
1.2. Clasificación según la carga útil de los VANT	15
3.1. Especificaciones técnicas de la IMU 3DM-GX1.	45
3.2. Especificaciones técnicas del sensor 2Y0A02.	45
3.3. Características de la tarjeta de adquisición NI USB-6211.	47
3.4. Especificaciones de las computadoras.	51
4.1. Parámetros asociados al sistema PVTOL.	62

Lista de acrónimos

AHRS: Attitude and Heading Reference System.

CLF: Control Lyapunov Function.

CPS: Cyber-Physical System.

DAQ: Data Acquisition.

GPS: Global Positioning System.

IMU: Inertial Measure Unit.

ISS: Input-State-Stability.

LQR: Linear-quadratic regulator.

MEMS: Micro-Electro-Mechanical Systems.

MIT: Massachusetts Institute of Technology.

MPC: Model predictive control.

MSI: Minimal Sampling Interval.

PVTOL: Planar Vertical Take-Off and Landing.

RAM: Random Access Memory.

ROM: Read-Only Memory.

UAV: Unmanned aerial vehicle.

VANT: Vehículo Aéreo No Tripulado.

VLSI: Very Large Scale Integrate.

VTOL: Vertical Take-Off and Landing.

Introducción

La investigación y desarrollo de tecnología es un área que ha tenido un incremento exponencial en los últimos años. Avances tecnológicos tales como la minituarización de los componentes electrónicos, sistemas inalámbricos de comunicación, sistemas de control, tecnología MEMS (por sus siglas en inglés *Micro-Electro-Mechanical Systems*) entre otras; han permitido desarrollar sistemas que hasta hace unos años eran difíciles de implementar. Un claro ejemplo del empleo de los avances tecnológicos alcanzados son sistemas que interactúan de forma dinámica con su entorno a través del acoplamiento de componentes computacionales y físicos. Este tipo de sistemas son denominados sistemas ciber-físicos mejor conocidos como CPS (por sus siglas en inglés *Cyber-Physical System*). Estos sistemas son descritos como redes de elementos físicos y computacionales que funcionan en conjunto para controlar un proceso físico. Por ejemplo un grupo inalámbrico de sensores, en aplicaciones de gestión de tráfico o sistemas autónomos. Las posibilidades de innovación y propiedades que presentan los CPS han contribuido al creciente interés de la comunidad científica ante este tipo de sistemas. La integración entre elementos mecánicos, electrónicos y computacionales, es decir, los sistemas mecatrónicos son los antecedentes de los sistemas ciber-físicos, los cuales tienen una mayor relación con los sistemas embebidos. Estos últimos se manifestaron como la incorporación de procesos físicos e informáticos. La limitante que presentan los sistemas embebidos es no poder optimizar sus procesos, puesto que han dejado de lado vinculación e interacción [1, 2]. Dicho punto ha impulsado sistemas interconectados capaces de actuar manteniendo una relación entre el mundo cibernético y el físico. La importancia de realizar investigaciones al rededor de los sistemas ciber-físicos radica en estudiar métodos para elaborar sinergia entre los sistemas computacionales, de comunicación y de control.

Por otro lado, el control automático es un componente fundamental para el desarrollo de tecnología. Siendo que su aplicación en la mayoría de los sistemas actuales es esencial. El uso intensivo de la teoría de control se considera producto de la evolución del uso de las técnicas de medición y control [3]. Mientras que el interés por su estudio se debe al reconocimiento a nivel mundial de sus aportes [4–6]. El control automático actualmente es de los elementos más importantes en los procesos industriales y de fabricación. Puesto que ayuda al comportamiento de los sistemas dinámicos, mejorando la productividad

y simplificar el trabajo de operaciones manuales repetitivas. La función del control es mantener un valor deseado dentro de una cantidad o condición, midiendo el valor existente, comparándolo con el deseado y empleando la diferencia para modificar dicho valor. En consecuencia, el control automático necesita un lazo de acción y reacción que funcione sin intervención humana. Las leyes de control representan un elemento esencial para sistemas con cualidades de autonomía, de manera que los sistemas ciber-físicos no son la excepción. El estudio y desarrollo de las estrategias de control para los CPS es un área muy extensa. Por lo que es factible demostrar la relevancia del control enfocándose en un sistema, por esta razón se analizan los vehículos aéreos no tripulados (VANTs) más conocidos como UAV (por sus siglas en inglés Unmanned Aerial Vehicle). El termino VANT es empleado para describir las últimas generaciones de aeronaves autónomas controladas y monitoreadas desde tierra. Dichos sistemas han sido de gran interés para la investigación debido a los desafíos teóricos y experimentales que representan. Al igual que las aeronaves con piloto, los vehículos aéreos no tripulados se clasifican con base en diferentes aspectos tales como el tipo de misión, el tamaño, el tipo de vuelo entre otros. Dentro de la extensa clasificación se encuentran los VANT catalogados como VTOL (por sus siglas en inglés Vertical Take-Off and Landing), los cuales se refiere a sistemas con la habilidad para despegar y aterrizar de manera vertical. De manera más particular, se tienen los sistemas PVTOL correspondiente a una aeronave de despegue y aterrizaje vertical con la particularidad de moverse únicamente en dos ejes.

La búsqueda por estrategias de control de mayor eficiencia, ha causado que científicos e investigadores dirijan sus esfuerzos a desarrollar una amplia variedad de enfoques. El tipo de control que más crecimiento ha tenido es el basado en tiempo, que se caracteriza por emplear el avance del tiempo para ejecutar las acciones de control del sistema. En los últimos años se han incentivado la investigación por diferentes planteamientos para innovadoras estrategias de control, dentro de las que se encuentra los sistemas de control mediante red. Los cuales surgen de los desafíos que se hacen presentes al implementar un sistema, donde los elementos que lo conforman no pueden ser conectados mediante cables. La propuesta consiste en dividir los componentes del sistema enlazados por medio de redes de comunicación.

Por otro lado se tiene a los sistemas de control disparado por eventos. Esta estrategia es asíncrona, dado que el control se calcula cuando se produce evento. A diferencia del control basados en tiempo, en el que las acciones de control se calculan y aplican en periodos fijos de tiempo. Entre los beneficios del control disparado por evento se encuentra la reducción del trafico de datos en el sistema de comunicación, así como la disminución en el consumo de recursos computacionales, permitiendo realizar algún otro procesamiento mientras se garantiza la estabilidad del sistema [7].

En el presente trabajo de tesis se estudian los sistemas ciber-físicos, centrándose en los VANT; además se investiga y estudia acerca de los sistemas de control mediante red y los sistemas de control disparados por evento con el objetivo de diseñar e implementar una estrategia disparada por eventos para un plataforma PVTOL, donde el lazo de control sea cerrado mediante una red Ethernet. El trabajo se encuentra organizado de la siguiente manera: en el Capítulo I se presenta el estudio y revisión del estado del arte de los sistemas ciber-físicos y los vehículos aéreos no tripulados. En el Capítulo II se estudian los fundamentos teóricos de los sistemas de control basados en red y los sistemas de control disparados por eventos; además se describe el modelo matemático del PVTOL. En el Capítulo III se describen el diseño de la estrategia de control, así como la implementación de la plataforma PVTOL. En Capítulo IV se presentan y analizan las simulaciones y las pruebas experimentales realizados. En el último capítulo se encuentran las conclusiones y aportes de este trabajo de tesis.

Objetivos

Objetivo general

- Implementar una plataforma birotor con características PVTOL, con el fin estabilizar la altura y el ángulo del sistema mediante el monitoreando de su estado y aplicando una estrategia de control disparada por eventos, donde el lazo de control se cierre mediante una red Internet.

Objetivos específicos

- Implementar una plataforma de vuelo PVTOL, que contenga la interacción entre la electrónica y mecánica, además de su interfaz de comunicación.
- Obtener el modelo matemático del sistema para desarrollar una estrategia de control que permita realizar simulaciones en lazo abierto y cerrado.
- Mediante el uso de la red internet, implementar un servidor para monitorear el sistema y ejecutar la ley de control.
- Diseñar la interfaz que permita observar, analizar y controlar el comportamiento del sistema.
- Proponer un algoritmo que integre la estrategia de control disparada por eventos y a través de la red.

- Contribuir a que los alumnos de la Facultad de Ciencias de la Electrónica cuenten con un prototipo para realizar pruebas de control.
- Divulgar el trabajo y los resultados obtenidos en publicaciones y/o congresos.

Capítulo 1

Generalidades y estado del arte

En este primer capítulo se presentan definiciones y conceptos que se utilizarán a lo largo de la tesis. Se comienza con la descripción de los sistemas ciber-físicos, así como los antecedentes que han llevado a su surgimiento; además se mencionan las diferentes características y aplicaciones. Se continúa con los vehículos aéreos no tripulados, plasmando su importancia obtenida durante la última década. Nos centramos en los vehículos aéreos no tripulados de despegue y aterrizaje vertical, para culminar son los sistemas PVTOL, los cuales son considerados la base para el desarrollo de control de los VANT - VTOL.

1.1. Sistemas ciber-físicos

1.1.1. Antecedentes

Los sistemas embebidos se refiere a la combinación de software y hardware, sumados a piezas mecánicas. En sus comienzos, estaban conformados por un microprocesador y un software, pero ante la necesidad de que el software tuviera un lugar en que se guardara para luego ser ejecutado, se comenzó a emplear memorias RAM (por sus siglas en inglés *Random Access Memory*) o ROM (por sus siglas en inglés *Read-Only Memory*), además de integrar módulos entrada/salida que soportan la conexión de periféricos (sensores o/y actuadores) para atender los requerimientos de la aplicación [8].

Dentro de sus principales características son el bajo costo y consumo de potencia. Esto es un factor importante debido a que muchos son producidos en masa, por lo que el costo por unidad es un aspecto importante. También emplean periféricos controlados por interfases seriales; además se considera que reaccionan en tiempo real si la información después de la adquisición y tratamiento es todavía vigente, dependiendo

de los requerimientos específicos de la aplicación que se desee. Un ejemplo de un sistema de tiempo real es el control de tráfico aéreo. Al ser modulares, una de las ventajas que presentan estos sistemas es la flexibilidad, la cual permite realizar modificaciones de manera relativamente sencilla al poder anexar otros sistemas embebidos.

Por lo regular sistema embebido se considera un componente de un conjunto más grande (redes de sistemas embebidos), como es el caso de los enfriadores para motores o el proceso de inyección de combustible en un automóvil. El sistema de guía del Apolo I fue el primero en ser reconocido como un embebido, el cual fue elaborado por el laboratorio de desarrollo del MIT (*Massachusetts Institute of Technology*). Su función era manejar los módulos de excursión lunar. Durante su utilización fue considerado el elemento de más riesgo ya que era el primer sistema que utilizaba circuitos integrados y una memoria RAM magnética. El software fue escrito en un lenguaje ensamblador propio capaz de soportar hasta ocho tareas simultaneas. Por otro lado, el sistema de guiado de misiles Minuteman II fue el primer sistema embebido en ser producido en masa. Su principal característica fue permitir la reprogramación de los algoritmos de guiado de los misiles para la reducción de errores.

Los sistemas embebidos son integrados por recursos limitados, tales como: memoria, relojes relativamente lentos y tamaño reducido de palabras. En respuesta a estas limitaciones se han dado diferentes soluciones durante los últimos 30 años, tales como escribir en lenguajes de más bajo nivel, evitar sistemas operativos con un amplio conjunto de servicio y utilizar arquitecturas especializadas. Estos avances han dado paso a los sistemas ciber-físicos.

1.1.2. Surgimiento de los sistemas ciber-físicos

Las redes de sistemas embebidos funcionaban relativamente bien interactuando con los procesos físicos, sin embargo, al surgir aplicaciones como el control de misiles, satélites, etc., las cuales demandan mayores velocidades para realizar el control, se superaron sus capacidades. El problema principal al que se enfrentaron fue mejorar y realizar los procesos más rápidamente, dando prioridad a los vínculos y la interacción. Esta solución dio origen al surgimiento, desarrollo y estudio de los sistemas ciber-físicos (CPS).

Un CPS es la sinergia del mundo físico con el mundo cibernético. El objetivo final es lograr una mejor calidad de vida mediante el monitoreo y control, del mundo físico en el que se desarrolla un sistema, utilizando las capacidades del mundo cibernético [2]. Un esquemático de las áreas que integran un CPS se presenta en la figura 1.2, donde se

puede observar que el control, la computación y las comunicaciones se encuentran unidas mediante el flujo de información.

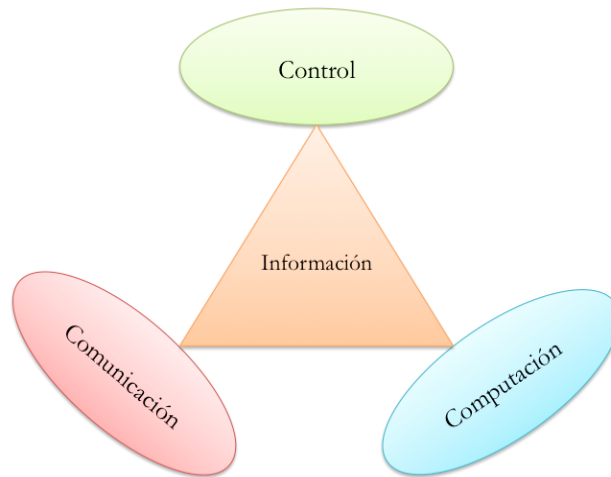


Figura 1.1: Áreas que integran los CPS.

Una frontera en expansión de los sistemas ciber-físicos se encuentra en la interacción de los ámbitos físicos y lógicos, por lo que los CPS tiene como objetivo el vigilar y actuar ante el comportamiento de los procesos físicos. Para mejorar los procesos de diseño de estos sistemas es necesario considerar los requerimientos informáticos, computaciones, de las redes de comunicación, de control y de los principios de las dinámicas físicas en cada aplicación. Por lo que en todo el mundo se están realizando grandes inversiones para desarrollar este tipo de tecnología.

Por lo general, los CPS se componen de sensores, actuadores, unidades de procesamiento de control y dispositivos de comunicación [1], además de estar conectados en red. En la figura 1.2 se muestra la estructura general de los CPS, en donde y representa las mediciones de los sensores y u las señales de control enviadas a los actuadores.

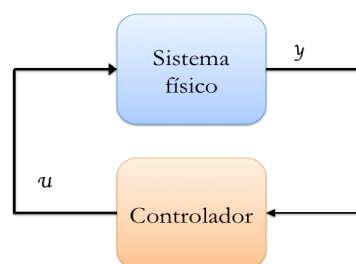


Figura 1.2: Estructura general de un CPS.

1.1.3. Consideraciones de diseño de los CPS

Los CPS se pueden observar en variadas y extensas áreas de aplicación como es el caso de sistemas avanzados de control, control de procesos, conservación de la energía, control ambiental, aeronáutica, instrumentación, robótica, sistemas de comunicación, sistemas de vehículos autónomos, entre otras. En sus aplicaciones se deben satisfacer requisitos de seguridad y tiempo de adaptación.

Algunos de los aspectos que se deben considerar al diseñar CPS son:

- **Funcionalidad:** Se refiere a la prestación de servicios en forma y tiempo específicos, donde la especificación del servicio es un acuerdo esperado.
- **Fiabilidad:** Es la propiedad de un sistema integrado que permite la dependencia justificada del servicio que ofrece.
- **Disponibilidad:** Es la capacidad de ofrecer servicios compartidos en determinadas condiciones para un tiempo dado.
- **Seguridad:** Se refiere a la capacidad de entregar servicios bajo las condiciones dadas, sin autorización de divulgación o alteración de información sensible. Incluye la intimidad, las garantías sobre la divulgación y la autenticidad de emisores y receptores.
- **Confiabilidad:** Abarca las medidas que consisten en la fiabilidad, disponibilidad y seguridad.

Otro factor importante en los sistemas ciber-físicos es el diseñar de algoritmos de estimación y control, en los cuales es importante satisfacer: la estabilidad en lazo cerrado, la seguridad, la robustez de la conexión y la optimización de una función de rendimiento. También se debe tener en cuenta que dichos sistemas deben ser resistentes a condiciones no predecibles.

1.1.4. Desafíos entorno a los CPS

Algunos los desafíos que se tienen al trabajar con los CPS son:

- **Tiempos de ejecución:**

Los avances en sistemas operativos, interfaces, lenguajes de programación, entre otros, han tenido mejoras significativas, sin embargo en estas, el tiempo de ejecución no ha sido un aspecto relevante. Al integrarse estos a los CPS, el factor tiempo se vuelve un punto importante ha considerar, ya que la respuesta de los actuadores puede ser requerida en un tiempo menor en el que se ejecutan los sistemas computacionales. Por lo que en el diseño de estos últimos, la consideración del tiempo de ejecución se vuelve importante al integrarse a los CPS.

- **Concurrencia:**

Los CPS deben reaccionar a múltiples entradas y controlar múltiples salidas (concurrentes). La unión entre estas se puede hacer por medio de conexiones guiadas o no guiadas, siendo estas ultimas implementadas a través de redes.

Actualmente, la red Internet una opción de conexión para los CPS, sin embargo esta red da servicio a múltiples usuarios y los retardo en el transporte de datos pueden causar problemas en el comportamiento de los CPS. Esta problemática ha motivado a investigar los retardos y perdida de datos en la red, con el objetivo de dar respuesta en el tiempo adecuado para la aplicación en especifico que cubre el CPS.

1.2. Vehículos aéreos no tripulados

Uno de los sistemas que más ha despertado el interés de científicos e investigadores son los vehículos aéreos no tripulados (VANTs) o mejor conocidos como UAV (por sus siglas en inglés Unmanned Aerial Vehicles). Dichas aeronaves están consideradas dentro de los CPS, debido a la interacción entre los actuadores y el procesamiento de las variables físicas captadas por los sensores. El manejo de los VANT se realiza de manera remota y se puede usar un dispositivo de radiofrecuencia, un dispositivo portátil que contenga un aplicación o de manera autónoma con rutas de vuelo preprogramadas. Los VANT son aeronaves con la característica de emprender el vuelo sin la necesidad de un piloto humano a bordo [9], por lo cual existen muchos campos de aplicación, entre las que se encuentran: inspección de

áreas geográficas, apoyo ante desastres naturales, tomas de fotografías aéreas, recolección de datos y seguridad.

Los grandes esfuerzos por tener un sistema aéreo totalmente autónomo se proponen con la finalidad de conservar la integridad y seguridad de las personas utilizando aeronaves que realicen las tareas que se requieran. Los primeros estudios y conceptos se realizaron durante el periodo de la segunda guerra mundial, con el fin de detener el deceso de pilotos. Aunque la idea de un dispositivo con la capacidad de realizar vuelos autónomos se remonta a finales de la segunda guerra mundial, fue hasta finales de los años 90 cuando se comenzó a materializar. Por lo que hoy se pueden encontrar sistemas de vuelo autónomos tanto especializados y costosos como sencillos y económicos.

Debido a restricciones impuestas tanto por hardware como software, hace algunos años el deseo de desarrollar un vehículo de escala reducida con la capacidad de volar y ser manejado de manera remota o autónoma era imposible de implementarse. No obstante con los avances en las tecnologías VLSI (por sus siglas en inglés *Very Large Scale Integrate*) y MEMS se ha hecho posible.

La tecnología VLSI, se refiere al proceso de fabricación de circuitos integrados mediante la combinación de más de 1000 compuertas en un único chip. Esta tecnología dio inicio a la era de la miniaturización de los equipos, haciendo cada vez mas común la manufactura y el uso de equipos portátiles, proporcionado ventajas como [10]:

- Incremento en la densidad de integración, con reducción de tamaño y peso de circuito.
- Reducción de la potencia consumida.
- Reducción de costos en los circuitos integrados.
- Formalización de proceso de diseño.

Por su parte, de acuerdo con [11] la tecnología MEMS se define como la integración de elementos mecánicos y electro-mecánicos miniaturizados que son realizados mediante técnicas de micro-fabricación. Los MEMS son aplicados en diversas áreas debido a la amplia variedad de dispositivos que pueden ser construidos. Dichos dispositivos pueden variar de estructuras simples hasta sistemas electromecánicos complejos con múltiples elementos móviles bajo el control de la microelectrónica integrada. Las características que presentan los dispositivos MEMS son:

- Procesos de fabricación de grandes lotes a bajo costo.
- Dispositivos mecánicos más pequeños, de bajo peso y consumos de energía reducidos.
- Los sensores MEMS utilizan las propiedades electro-mecánicas del silicio, teniendo cambios en las características eléctricas ante cambios de parámetros como: temperatura, presión, aceleración, humedad y radiación.

Los sensores y actuadores de escala reducida, en conjunto con los avances en el almacenamiento de energía y en el procesamiento de datos han propiciado el desarrollo de VANT. En el transcurso de la última década el interés por la investigación y desarrollo de vehículos aéreos no tripulados se ha incrementado. El auge de estos sistemas se debe a las ventajas que presentan ante plataformas tripuladas, tales como [9]:

- Realizar vuelos con la necesidad de permanecer por largos periodos de tiempo en el aire.
- Realizar vuelos en las que la vida del piloto estuviera expuesta.
- Realizar vuelos en ambientes hostiles.
- Realizar vuelos con escasa visibilidad.
- Realizar vuelos en condiciones climatológicas adversas.
- Mayor grado de maniobrabilidad.
- Costos inferiores.

El desarrollo de la idea de los vehículos aéreos no tripulados fue impulsada por motivos militares y es inevitable reconocer que el mayor impulso en la industria aeroespacial ha sido mediante conflictos bélicos, llegando a tener un interés grande por las aplicaciones militares. Sin embargo, con la aparición de científicos, investigadores y empresas interesados en los VANT, se están realizando aplicaciones y servicios civiles. El emplear los sistemas VANT en diversos campos de la ciencia y la industria tales como las energías renovables o la agricultura de precisión (áreas emergentes), ha hecho necesario

el perfeccionamiento de sus elementos tales como: guiado, navegación, control, sistemas de comunicación y sistemas de alimentación energética. En la figura 1.3 se muestran las aplicaciones de mayor empleo durante el periodo 2012-2013 [12].

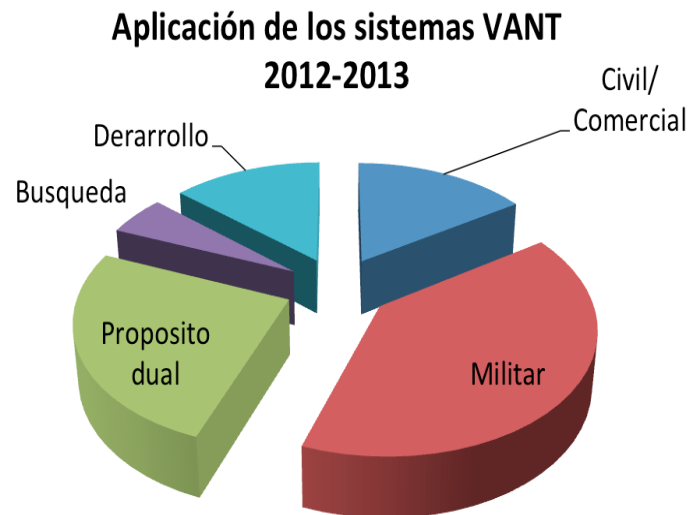


Figura 1.3: Aplicaciones de los VANTs en los años 2012-2013.

Por otra parte, las aplicaciones en las que se pueden emplear los vehículos aéreos no tripulados son muy diversas, sin embargo se pueden agrupar en civiles y militares, las cuales se enumeran a continuación [9]:

■ Aplicaciones civiles

- Topografía.
- Control de cosechas, agricultura y estudio de suelos.
- Control de tráfico de carreteras, vías y líneas de transporte en general.
- Investigación del entorno ecológico y meteorológico.
- Localización de accidentes en lugares de difícil acceso.
- Seguimiento de movimientos migratorios.
- Rápida detección de incendios y el seguimiento de su evolución.

- Inspección de líneas eléctricas.
- Cinematografía y fotografía aérea.

■ Aplicaciones militares

- Adquisición de objetivos.
- Misiones ofensivas.
- Supresión de defensa aérea enemiga.
- Apoyo aéreo.
- Bombarderos de precisión e iluminación de blancos en misiones de alto riesgo.
- Vigilancia.
- Reconocimiento.
- Inteligencia de imágenes y señales.

Aunque ya se cuenta con desarrollo y empleo de VANT en aplicaciones civiles, queda un camino por recorrer, puesto que dichas aplicaciones aún tienen importantes limitaciones que van desde aspectos técnicos hasta legales. No obstante, la variedad e importancia de las aplicaciones potenciales, sumado al incremento en los avances obtenidos hace latente el progreso y la importancia que tendrán los sistemas VANT en un futuro cercano.

1.2.1. Clasificación de vehículos aéreos no tripulados

Existen diversas formas de clasificar a los VANT. Una de las más utilizada en la literatura es la que considera aspectos como tamaño, techo de vuelo, alcance y autonomía. En la tabla 1.1, se presenta la clasificación en función de su techo de vuelo.

Categoría	Acrónimo	Techo de vuelo (m)
Nano	η	100
Micro	μ	250
Mini	Mini	150 a 300
Alcance cercano	CR	3000
Alcance corto	SR	3000
Alcance medio	MR	5000
Resistencia de alcance medio	MRE	8000
Altitud baja penetración profunda	LADP	50 a 9000
Altitud baja larga resistencia	LALE	3000
Altitud media larga resistencia	MALE	14000
Altitud alta larga resistencia	HALE	20000
Vehículo aéreo no tripulado de combate	UCAV	10000
Ofensivo	OFF	4000
Señuelo	DEC	5000
Estatosférico	STRATO	>20000 y <30000

Tabla 1.1: Clasificación de los sistemas VANT en función de su techo de vuelo.

De la tabla 1.1 el Nano , Micro, Mini y MALE son en los que más investigación se ha registrado, por lo que a continuación se hace una pequeña descripción de ellos.

1. **Nano:** Se refiere a sistemas VANT a muy pequeña escala y sus dimensiones van desde algunos centímetros hasta unos decímetros. Las características con la que cuenta son: carga útil menor de 0.025 *kg*, tiempo de vuelo menor a 1 hora y alcance de vuelo menor a 1 *km*. En las figuras 1.4 y 1.5 se muestran ejemplos de los sistemas Nano VANT desarrollados en Francia y Alemania respectivamente.



Figura 1.4: Novedem (Francia).



Figura 1.5: Black Hornet (Alemania).

2. **Micro:** Las figuras 1.10 y 1.11 muestran dos de estos VANT. Dentro de las cualidades que los caracteriza esta su techo de vuelo es de 250 *m* aproximadamente mientras que la carga útil es de menos de 1 *kg*; algunos de ellos obtienen su impulso utilizando motores eléctricos.



Figura 1.6: MH 2000 - MavTech.



Figura 1.7: Seeker - Fly-n-Sense.

3. **Mini:** Se refiere a vehículos aéreos no tripulados con dimensiones de alrededor de 4 *m*; se caracterizan en su mayoría por ser impulsados por motores de combustión interna; su carga útil es de hasta 3 *kg* alcanzando alturas de 150 a 300 *m* dentro de un rango menor a 10 *km* de distancia y con tiempos de vuelo menores a una hora. En las figura 1.8 y 1.9 se muestran unos ejemplos de VANT - Mini.



Figura 1.8: Skorpion - EADS-DS.



Figura 1.9: GC-201 - Geocopter.

4. **MALE:** Son sistemas impulsados por hélices acopladas a motores de combustión interna. Sus dimensiones son de hasta 15 *m*; pueden alcanzar hasta 14000 *m* de altura y mantenerse volando por 24 horas. Ver figuras 1.10 y 1.11.



Figura 1.10: AGPlane Arara.



Figura 1.11: AGX Technologia.

5. **HALE:** Se refiere a sistemas con dimensiones de hasta 35 *m*, en general su propulsión la adquieren de turbinas; alcanzan alturas máximas de alrededor 20 *km*, manteniéndose en vuelo por periodos de 24 hasta 48 horas. En la figura 1.12 se presenta un ejemplo.



Figura 1.12: Global Hawk A(Derecha) y B(Izquierda) - Northrop Grumman.

En la figura 1.13 se presenta la clasificación de los sistemas de vehículos no tripulados tomando en cuenta su configuración aerodinámica, la cual es de gran importancia, dado que describe la forma de sustentación en el aire, por lo que haremos una breve descripción de cada una de ellas.

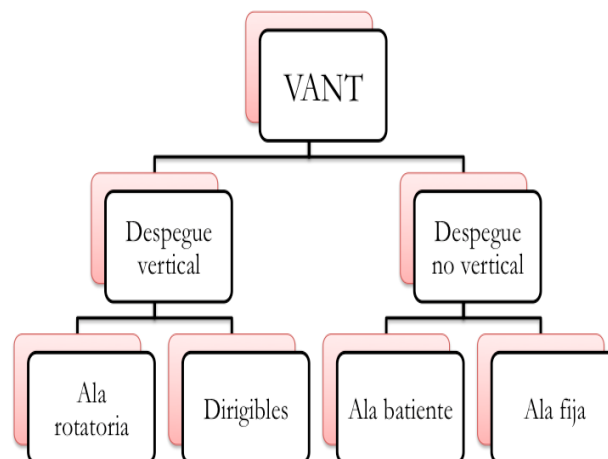


Figura 1.13: Clasificación en función de la configuración aerodinámica.

A continuación se describen los diferentes tipos de configuraciones aerodinámicas:

- **Ala fija:** Este tipo de sistemas VANT son muy similares a los vehículos aéreos tripulados (conocidos comúnmente como aviones) en su forma de despegue y algunos en su aspecto; en su mayoría son impulsados por motores eléctricos aunque también existen los que usan motores de combustión interna y requieren de una pista para despegar y aterrizar o en su defecto de un dispositivo que los lance. Se caracterizan por mantener vuelos largos (poner el tiempo máximo o intervalo) a velocidades de crucero (investigar las velocidades de crucero). En la figura 1.14 se muestra un ejemplo, el cual lleva el nombre de Indica perteneciente a la empresa CSIR.



Figura 1.14: VANT de ala fija (Indiza - CSIR).

- **Ala rotatoria:** Este tipo de sistemas VANT no necesitan una pista ni para despegar ni para aterrizar; la sustentación en el aire se realiza con motores que a su vez están acoplados a hélices. Estas aeronaves también son denominadas VANT - multi-rotores,

debido a que el número de motores empleados va de 3 hasta 8 [?]. En la figura 1.15 se muestran ejemplos de estos VANT con las que se a trabajo en la FCE - BUAP.



Figura 1.15: VANT de ala rotatoria.

- **Ala batiente:** Estos tratan reproducir el movimiento de las alas de algunas aves, como es el colibrí con el objetivo de obtener la sustentación en el aire. En algunos casos el movimiento se realiza con actuadores piezoléctricos. En la figura 1.16 se presenta un ejemplo de estos sistemas llamado AeroVironmet.

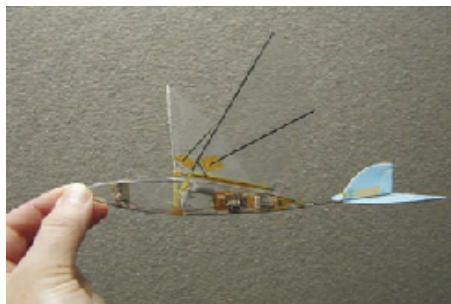


Figura 1.16: VANT de ala batiente (AeroVironmet).

- **Dirigibles:** Son globos con capacidades de vuelo autónomo, por lo que se han usado para aplicaciones de inteligencia, reconocimiento y de comunicación, debido a los largos periodos de tiempo (definir largos periodos de tiempo) que pueden mantenerse en vuelo. En la figura 1.17 se presenta un ejemplo de este tipo de sistema nombrada Fox producida por Virtual Robotics.



Figura 1.17: VANT dirigible (Fox - Virtual Robotics).

Una última clasificación para los sistemas VANT se encuentra en función de su carga útil, la cual se muestra en la tabla 1.2.

Clase	Carga maxima (kg)	Rango	Alcanze (km)
Clase 1	<25	Cercano	15
Clase 2	25 - 500	Corto	15 - 150
Clase 3	500 - 2000	Medio	150 - 1000
Clase 4	>2000	Largo	>1000

Tabla 1.2: Clasificación según la carga útil de los VANT

Un ejemplo de la clase 1 es la aeronave hale tanto de ala rotatoria como de ala batiente; de la clase 2 podemos mencionar MALE de ala fija; de la clase 3 el mini tipo dirigible y de la clase 4 el micro de ala rotatoria.

Con estos ejemplos podemos ver que un VANT puede pertenecer a distintas clasificaciones. Como nuestro trabajo de tesis esta enfocado al estudio de los VANT mutl-rotores, en la siguiente sección de profundiza en el estudio de estos.

1.2.2. VANT de despegue y aterrizaje vertical

Los sistemas VANT de ala rotatoria también son llamados VTOL por su capacidad de poder despegar y aterrizar de manera vertical. Entre sus características se encuentran: son de fácil manejo comparado con otras aeronaves y pueden realizar vuelos estacionarios

así como vuelo en interiores. Estas características son necesarias para algunas misiones como la detección de desastres naturales, el análisis de suelos, entre otras.

De acuerdo a la colocación de los rotores en los VTOL, estos se clasifican en:

- Rotor principal y de cola (Helicóptero convencional). En la figura 1.18 se presenta un VTOL de este tipo llamado AT200.



Figura 1.18: VTOL de rotor principal y de cola (AT200).

- Rotores coaxiales. En la figura 1.19 se presenta un VTOL de este tipo llamado VT-UAV.



Figura 1.19: VATOL de rotores coaxiales (VT-UAV).

- Rotores de tándem. En la figura 1.20 se presenta un VTOL de este tipo llamado DP-6 Whisper.



Figura 1.20: VTOL de rotores tándem (DP-6 Whisper).

- Multi-rotores. En la figura 1.21 se presenta un VTOL de este tipo.



Figura 1.21: VTOL multi-rotores (quadrirotor).

Gran parte de los sistemas VTOL multi-rotor se encuentran dentro de las categorías micro μ y mini η ; sin embargo, en los últimos años se han comenzado a desarrollar a escalas menores denominados nano. A pesar del tamaño reducido de estos VTOL las áreas de aplicación en los que se encuentran presentes son diversas, extensas y en constante crecimiento. El integrar una cámara con la capacidad de realizar adquisición y procesamiento de imagen, es uno de los recursos más frecuente, por lo que tareas como filmación, inspección, vigilancia o búsqueda son de las aplicaciones de mayor difusión.

Por otro lado los sistemas VANT cuentan con una estación aérea y una terrestre. La distribución de las funciones en cada estación depende de la aplicación o tarea en la que se empleará. Algunas funciones pueden ser ejecutadas en cualquier de las dos estaciones mientras, que otras deben ser realizadas en una en especial. Monitorear el sistema, definir y supervisar la misión pueden ser realizadas en tierra.;mientras que la adquisición de datos como altitud y posición corresponden a la estación aérea.

Para el control de la estación aérea, la cual esta sujeta a limitaciones impuestas por el vehículo, es necesario considerar:

- **Capacidad de carga:** De acuerdo a la estructura del VTOL, la capacidad de carga debe ser repartida entre el peso del sistema y el peso de los elementos necesarios para realizar la misión encomendada (carga útil). Dependiendo de la aplicación y el tamaño del VTOL, al peso del sistema (de 500 a 3 kg) se le añade la carga útil que puede variar entre 2 y 30 kg.
- **Robustez:** El control debe garantizar la estabilidad del sistema, debido a que en los VTOL la pérdida de control, aunque en periodos muy cortos puede provocar consecuencias irreversibles como la ruptura del vehículo, además de que su caída puede poner en riesgo a personas en caso de caer en una zona habitada. A diferencia de VANT, como aeroplanos y dirigibles que pueden mantener el vuelo aun sin control en periodos cortos de tiempo, en los VTOL es complicado recuperar el vuelo estable una vez que este se ha perdido
- **Autonomía de vuelo:** Se refiere al tiempo que el VANT puede permanecer en vuelo sin tener que regresar a tierra para recargar energía. La autonomía de vuelo esta en relación con la carga útil, puesto que al aumentar el peso en el vehículo se reduce el tiempo de vuelo, debido al aumento en el consumo de energía.
- **Comunicaciones:** Estas se dan entre la estación aérea y la estación terrestre. Se pueden utilizar para funciones desde supervisión de la nave hasta el control de la misma. Los VTOL pueden realizar vuelos con o sin contacto visual con la estación terrestre ayudándose de los sistemas de comunicación, por lo que es necesario definir los alcances de estos, incluso en sistemas con capacidades de vuelo autónomo.
- **Distribución de la carga:** Se debe llevar a cabo considerando el peso de los componentes de tal manera que se pueda lograr el equilibrio. Además, en la distribución de deben considerar las características de los subsistemas ya que algunos de ellos pueden ser afectados por el calor o perturbaciones magnéticas o eléctricas.

Por otra parte, la estación aérea debe tener los siguientes subsistemas:

- **Alimentación:** Esta compuesto por generadores o baterías, cuya evolución tecnológica ha originado cambios en la duración y peso de las mismas.

- **Instrumentación de vuelo:** Es la encargada de obtener las medidas que permiten conocer la posición y rumbo del VANT, para lo que se utilizan sensores inerciales (acelerómetros y giróscopos) y sistemas de posicionamiento global por satélite (GPS). Las variables medidas se agrupan en dos, el primero incluye a la orientación espacial con respecto a un sistema inercial y las velocidades y aceleraciones del VANT; y el segundo incluye la posición, velocidad y aceleración absoluta del multi-rotor. Los sistemas de instrumentación de vuelo son denominados AHRS (por sus siglas en inglés *Attitude and Heading Reference System*) o IMU (por sus siglas en inglés *Inertial Measure Unit*).
- **Instrumentación auxiliar:** Incluyen elementos que proporcionan avisos preventivos para tomar acciones pertinentes. Algunos de estos avisos pueden indicar valores bajos de alimentación o alarmas de temperatura entre otros.
- **Comunicaciones:** Entre las funciones del sistema de comunicación se encuentran las de monitoreo y telemetría, así como la de corrección de posición del VANT con ayuda de mediciones del GPS entre otras.

Para el monitoreo y telemetría se realiza una comunicación de datos entre la estación terrestre y aérea dependiendo de la misión del VTOL, la cual puede ser de manera autónoma o a través de ordenes de mando.

Para la corrección de posición se emplea la corrección diferencial, la cual transmitida de la estación terrestre a la aérea de acuerdo a estándares como RTCA, RTCM o CMR (referencia de los Estándares).

- **Procesamiento:** Entre sus tareas se encuentra la adquisición de las variables medidas por los sensores y el procesamiento de los mismos con el fin de guiar la navegación y el control para coordinar el movimiento del VTOL y cumplir la misión encomendada.
- **Actuación:** Es el encargado de dar sustentación en el aire a la aeronave mediante la variación de la velocidad a los rotores empleados, que a su vez están acoplados a las propelas.

Por otro lado, la estación terrestre a diferencia de la estación aérea no se encuentra limitada por el peso, sin embargo debe tener cualidades de fácil transportación y deseable, ser compacta. La estación terrestre en su mayoría están conformada por la unidad de

procesamiento central, la emisora de radio control, el mando para el control manual, la estación base del GPS para el caso que se utilicen correcciones diferenciales y los enlaces de comunicación con la estación aérea. La estación terrestre esta formada por los siguientes subsistemas:

- **Alimentación:** En el caso de que sea un sistema fijo, se puede energizar mediante instalaciones eléctricas convencionales; mientras que si son portátiles se pueden utilizar generadores o baterías.
- **Comunicaciones:** La estación terrestre debe tener el mismo sistema de comunicación que la estación aérea, con la diferencia de que no existen limitaciones de potencia derivadas de las restricciones de peso y espacio.

1.2.2.1. PVTOL fundamento del VTOL

Dada la complejidad de los VANT, es conveniente analizar y estudiar modelos simplificados que estén compuesto por un número reducido de variables, los cuales capturen los aspectos esenciales del sistema. Para el caso de los VTOL, es necesario estudiar una subcategoría, los llamados PVTOL, los cuales se refieren a aeronaves que se mueven únicamente en dos ejes y cuentan con tres grados de libertad (x, y, θ) , donde (x, y) corresponde a su posición y θ a el ángulo de inclinación respecto al plano. Entre los trabajos reportados referentes al PVTOL se encuentran [13–17]

La motivación por estudiar este tipo aeronaves es la necesidad de contar con plataformas en las que se desarrollen y validen estrategias para estabilizar VTOL, por lo que en el presente trabajo de tesis tiene la finalidad de implementar un PVTOL, el que sea estabilizado mediante una estrategia de control a través de Internet usando un enfoque disparado por eventos.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos

En el presente capítulo se estudian los fundamentos y antecedentes teóricos necesarios para entender este trabajo de tesis. Se inicia con la introducción a los sistemas de control automático, enfocándose a los basados en red, en los que sus elementos no se encuentran situados en el mismo lugar físico. También se estudian el tema de los sistemas de control asíncronos, en especial la estrategia de control disparada por eventos. Por último, se presenta el modelo matemático no lineal y lineal del PVTOL.

2.1. Sistemas de control automático

De acuerdo con [3], un sistema de control automático es una interconexión de elementos que forman una configuración a la cual se le denomina *sistema*, dicha configuración esta arreglada de tal manera que es capaz de controlarse por sí mismo.

Los grandes avances tecnológicos han aportado un creciente interés por las diferentes áreas de la ingeniería, tal como es el caso de la ingeniería de control, en la que científicos e investigadores han dedicado trabajos arduos en desarrollar algoritmos de control para el correcto funcionamiento de una gran variedad de sistemas, tales como lo son los vehículos terrestres y aéreos no tripulados, los satélites, robots, las plantas industriales, los aceleradores de partículas, teléfonos celulares así como sistemas electrodomésticos. En general, este tipo de sistemas se caracterizan por implementar los algoritmos de control en computadoras. La estructura de este tipo de sistema de control esta constituida por cuatro bloques que son: la planta del sistema (proceso), un convertidor analógico-digital (DAC), un convertidor digital-analógico y un bloque que contiene el algoritmo de control.

Los sistemas de control están regidos por tres procesos principales que son [6]:

- **Medición:** proceso en el que por medio de los sensores se adquiere el valor de la variable a controlar y se transmite al controlador.
- **Decisión:** etapa en la que el controlador calcula la acción de control con base en las variables medidas y una referencia.
- **Acción:** proceso en el que los actuadores modifican las variables del sistema con el fin que estas converjan a una referencia.

Los sistemas de control se pueden clasificar de las siguientes maneras:

- **Lazo abierto y lazo cerrado:** los primeros se caracterizan por que su acción de control es independiente de la salida y en general utilizan únicamente actuadores para obtener su respuesta, de manera que la capacidad de ejecutar tareas con exactitud depende de su calibración. Por otro lado, en los de lazo cerrado también llamados retroalimentados, la acción de control esta en función de la salida y emplean sensores para adquirir la respuesta para compararla con una referencia [18].
- **Síncronos y asíncronos:** en los sistemas síncronos, es el tiempo el que activa las acciones de control, mientras que en los asíncronos es la dinámica del sistema la que rige las acciones de control.
- **En red privada y publica:** en estos sistemas se ocupa una red para la transferencia de datos de estado y de control entre los sensores, controladores y actuadores. Dependiendo de la ubicación física de los componentes en algunas ocasiones se usaran redes privadas o publicas. Normalmente las privadas cuando los subsistemas se encuentran dentro de otro de grandes dimensiones como es el caso de un submarino o publicas cuando los componentes se encuentran en lugares remotos.

Como en este trabajo de tesis nos enfocamos a control asíncrono disparado por eventos mediante red, por lo que en las siguientes secciones se presentan estos tipos de control a mayor detalle.

2.1.1. Sistemas de control basados en red

En la actualidad, las redes de datos tienen gran presencia dentro de la vida cotidiana y en años recientes también se han empleado como sistemas en control, donde se utiliza la red como medio para transferir los datos referentes al control (estado del sistema y acciones de control). No obstante existen dificultades, como retardos, congestión y pérdida

de datos que deben ser consideradas y atendidas si se desea emplear un control basado en red [19]. Estas dificultades dependen de las características de la red, tales como la topología, esquemas de direccionamiento, tipo de conexión o la velocidad de transferencia y pueden afectar el rendimiento y la estabilidad del sistema. De manera que se considera importante invertir esfuerzos para el desarrollo de estrategias que permitan asegurar la estabilidad de los sistemas aun con la problemática existente al usar la red como medio de transporte de datos de control.

Este tipo de sistemas se clasifican en [20]:

- **Sistemas complejos de control:** Se encuentran en sistemas de grandes dimensiones como pueden ser aviones, autos entre otros, en los cuales los sensores, actuadores y controladores pueden estar localizados en distintos lugares físico, lo que hace necesario utilizar cables de grandes dimensiones para su conexión como lo muestra la figura 2.1, donde se puede observar que el sensor $S1$ debe conectarse con el controlador $C1$ y este a su vez con el actuador $A1$ formando el subsistema 1; además se observan los subsistemas 2 y 3 del sistema total. Las conexiones directas producen que el sistema sea difícil de instalar y su mantenimiento podría resultar complicado.

Como respuesta a esta problemática, surge la idea de emplear redes privadas para transmitir las mediciones de los sensores hacia los controladores y a su vez enviar las señales de control hacia los actuadores, reduciendo las dificultades provocadas por las las conexiones directas, como se puede observar en la figura 2.2, donde se muestra que todos los elementos (sensores, actuadores y controladores) se conectan directamente a la red. Al utilizar este tipo de configuración se logra tener sistemas flexibles, permitiendo intercambiar datos entre todos los elementos. La aplicación de esta estrategia de control ha abarcado sistemas como automóviles, aeronaves, plantas de fabricación, procesos químicos, entre otros.

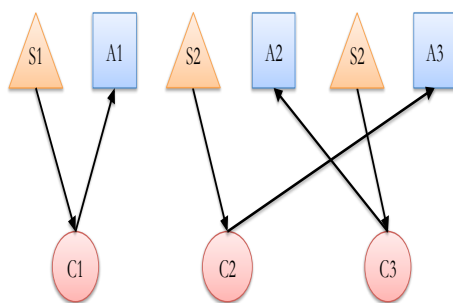


Figura 2.1: Alámbrico.

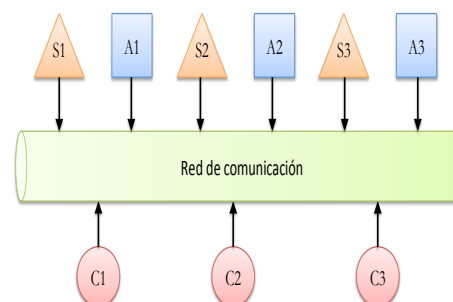


Figura 2.2: En red.

- **Sistemas de mando a distancia:** Se refiere a sistemas en los que la medición, la acción de control y la actuación no necesariamente tiene que situarse en el mismo lugar, puesto que también se incluyen sistemas de adquisición y monitoreo remotos [5, 21]. En estos, lo principal es precisar la comunicación que se utilizará, ya que si se desea emplear redes privadas, se puede tener limitaciones y dificultades desde su instalación hasta para su mantenimiento. Una manera para contrarrestar las dificultades mencionadas es conectar el sistema y su correspondiente controlador a través de una red pública.

Por otra parte, existen dos formas para el diseño de un sistema de control a través de una red.

- **Estructura jerárquica:** En esta se comienza definiendo los subsistemas que conforman el sistema. Cada subsistemas debe estar integrado por sensores, actuadores y su propio control. y estos a su vez comunicados a un controlador central a través de una red de comunicación como lo muestra la figura 2.3.

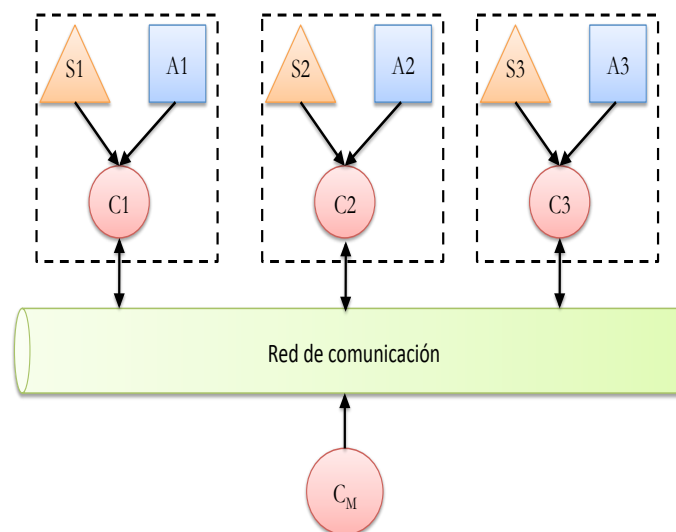


Figura 2.3: Estructura jerárquica.

- **Estructura directa:** En esta, cada elemento del sistema está conectado a la red; la diferencia principal con respecto a la estructura jerárquica es que los elementos se comunican directamente sin pasar por subsistemas. El proceso que se sigue es el siguiente: se obtienen las mediciones de los sensores y son enviadas mediante la red al controlador donde se aplica la ley de control para posteriormente enviar las acciones a los actuadores a través de la misma red, como se muestra en la figura 2.4.

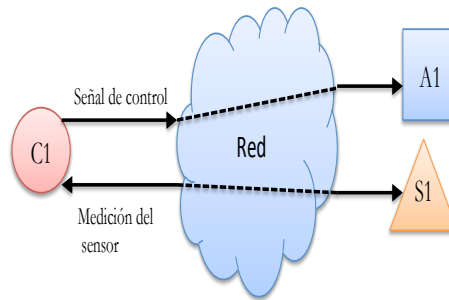


Figura 2.4: Estructura directa.

2.1.2. Sistemas de control síncronos y asíncronos

Comúnmente, los sistemas de control síncronos tienen una planta conectada a una computadora mediante un convertidor analógico-digital como dispositivo de muestreo y digital-analógico como dispositivo de retención, como se muestra en la figura 2.5, en la que se puede observar que el convertidor A/D produce las muestras $y(t_k)$ de la señal de salida de la planta $y(t)$ a los tiempos de muestreo t_k , y los envía al algoritmo de control que se encuentra en la computadora. El algoritmo de control procesa la secuencia $y(t_k)$ y produce una secuencia de señales de control $u(t_k)$, la cual es entrada del convertidor D/A y convertida en una señal continua a trozos $u(t)$ que es aplicada a la planta. En este proceso existe un reloj interno que “sincroniza” la operación del sistema y se asume que los instantes de muestreo t_k son equidistantes en el tiempo, es decir $t_k = kT$ con $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ y donde $T > 0$ es el periodo de muestreo.

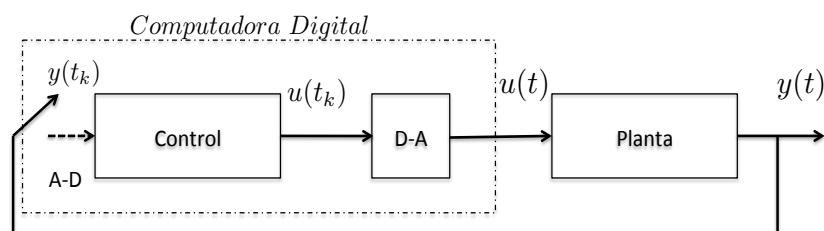


Figura 2.5: Configuración de un sistema de control síncrono

En la literatura [22] se puede encontrar que el sistema de control descrito anteriormente también es conocido como un *sistema de control muestreado*, ya que la tarea que realiza el muestreador tiene una importancia valiosa dentro de los sistemas que trabajan en tiempo continuo en la planta y una en tiempo discreto en el control. Los orígenes sobre el estudio y diseño de sistemas de control muestreados para *sistemas lineales* se remonta a los años 50, periodo marcado por la revolución digital. En los primeros trabajos se aborda el diseño de

control utilizando la transformada- z y su desarrollo fue paralelo a los desarrollos del diseño de controladores en tiempo continuo para sistemas lineales. Con los aportes y alcances logrados se puede considerar que la teoría para los sistemas de control muestreados *lineales* es una teoría bien establecida [18], [23] y forma una de las bases fundamentales para los ingenieros y teóricos en el área de control automático. Para el desarrollo de sistemas de control muestreado se han investigado distintos diseños para la implementación en tiempo real de los algoritmos de control, los cuales se presentan a continuación:

Diseño en tiempo continuo (Emulación): Consiste en diseñar una ley de control en tiempo continuo para el modelo de la planta y realizar una implementación digital. Esta técnica involucra una aproximación de la señal de control, la cual es válida solamente para determinados periodos de muestreo T , lo cual puede causar que se pierden la estabilidad de la planta en determinados momentos. Algunas técnicas avanzadas de emulación se han enfocado en relajar los periodos de muestreo sin comprometer la estabilidad.

Diseño en tiempo discreto: Consiste en diseñar un controlador en tiempo discreto usando una discretización del modelo de la planta. Este método usa una aproximación del modelo de la planta que ignora el comportamiento entre muestras. Debido a que este método no requiere un determinado tiempo de muestreo para mantener estabilidad, el desempeño del sistema muestreado no es garantizado.

Diseño de sistemas de control muestreados: En este se usa un modelo muestreado exacto de la planta y entonces permite diseñar leyes de control que garantizan la estabilidad en lazo cerrado y respetan requerimientos de desempeño específicos para el sistema muestreado.

Existe un gran número de aplicaciones donde los fenómenos no lineales no pueden ser ignorados, tales como el control de los vehículos aéreos no tripulados [24], los cuales se caracterizan por presentar una dinámica altamente no lineal, lo que ha motivado el estudio y desarrollo de controles no lineales en los últimos años; sin embargo estos controladores no siempre son fáciles de implementar en plataformas digitales. A pesar de que es posible utilizar la teoría para los sistemas de control muestreados lineales para resolver problemas de control no lineal, mediante la linealización, existen muchas situaciones donde las no linealidades no pueden ser despreciadas. Debido a su inherente simplicidad, la técnica de emulación es muy atractiva para la implementación de las leyes de control para VANTs sobre plataformas digitales como FPGAs, microcontroladores o computadoras. Desafortunadamente, emular controles hace propensa la inestabilidad puesto que son

sistemas altamente no lineales, lo que hace necesario utilizar algunos otros métodos que no sean la emulación, pero que también sean accesibles al momento de implementar. Por esta razón, el diseño de leyes de control lineales y no lineales para sistemas *no lineales* representa una problemática emergente, permitiendo a investigadores afrontarla desde diferentes puntos de vista, siendo uno de ellos el enfoque asíncrono. Es decir, mientras que en un sistema de control síncrono la actualización de la señal de control se realiza cada tiempo de muestreo t_k ; en los asíncronos se hace uso de *eventos* que no pueden ser planificados a priori ya que su activación está relacionada con el instante de tiempo en que se cumple una determinada condición entre las variables de estado del sistema.

La diferencia entre el síncrono y asíncrono se ejemplifica con la figura 2.6, donde se observa que el sistema a controlar es muestreado uniformemente en el tiempo en el síncrono en comparación con el asíncrono donde el sistema es muestreado en amplitud (momento en el que sucede un evento).. El muestreo síncrono es también conocido como de Riemann; mientras que el asíncrono también es conocido como de Lebesgue, esto por su analogía en el cálculo de la integral de Riemann y Lebesgue, respectivamente [25].

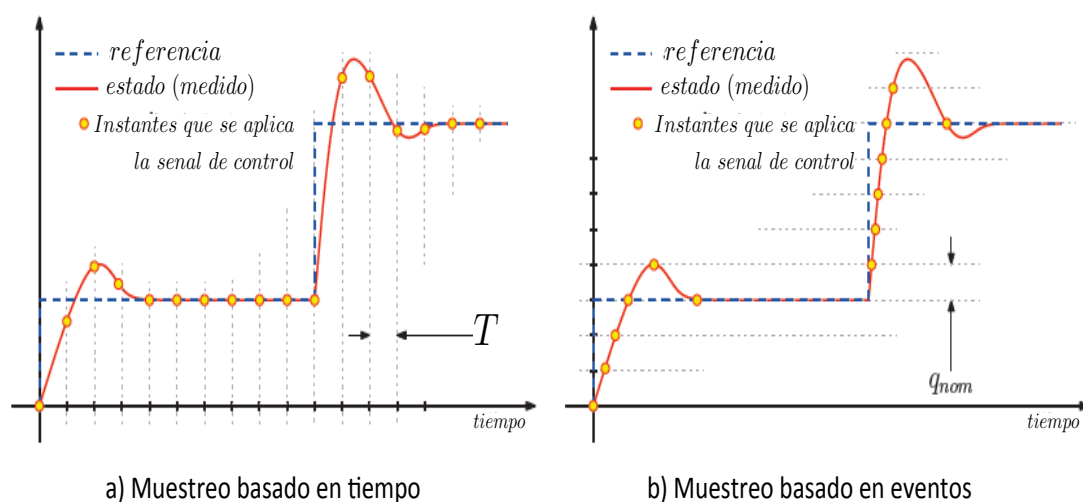


Figura 2.6: Esquemas de sistemas de control (síncrono y asíncrono).

2.1.3. Sistemas de control disparados por eventos

Los beneficios que presenta la estrategia de disparo por eventos es la reducción de la acción de control hacia el sistema mientras no se requiera, dando oportunidad a utilizar recursos en otro procesos como la comunicación o el uso del procesador.

El incremento en el desarrollo de sistemas asíncronos ha motivado el uso del control basado en eventos, impulsando a las compañías a desarrollar versiones asíncronas de

los componentes electrónicos que se utilizan en el control activado por tiempo, tal es el caso del Microcontrolador 80C51 de Philips Semiconductor el cual utiliza cuatro veces menos consumo de energía que su contraparte síncrona [26]. Además, se ha probado que la ausencia de sincronización reduce considerablemente el ruido y las emisiones electromagnéticas en dispositivos electrónicos cuando los eventos son asíncronos [27]. También, el muestreo por evento ha sido aplicado en el área de procesamiento de señales [28, 29]. En lo que a la comunidad de control automático respecta, cabe mencionar que hoy en día existen sensores y actuadores que trabajan mediante el cruce de nivel, provocando eventos, tales como los sensores codificadores para medir la posición angular de un motor o en los sistemas de transporte, donde la posición longitudinal de un vehículo se conoce solo cuando éste pasa determinadas marcas.

Una de las primeras aplicaciones del control basado en eventos fue reportada en [25], donde se prueba con una menor cantidad de muestras, el desempeño del sistema de control en lazo cerrado es el mismo. Posteriormente, se propusieron versiones asíncronas del controlador “PID” [30–34], donde la diferencia entre cada uno de las aplicaciones, estriba en la forma en que es definida la función que permite disparar el evento, es decir, la función de evento. A pesar que el control basado en eventos permite relajar la periodicidad de los cálculos del algoritmo de control y en [31, 34, 35] se reportan claras ventajas en la implementación sobre sistemas embebidos y distribuidos, solo pocos trabajos reportan resultados teóricos acerca de la estabilidad, convergencia y desempeño; tales el caso de [25, 36–38], donde algunas propiedades de estabilidad y robustez como la estabilidad-entrada-estado ISS y el desempeño $\mathcal{L}_\infty$ fueron estudiadas para la estabilización de sistemas lineales en tiempo continuo y discreto. El trabajo reportado en [39] propone un algoritmo de control predictivo en un contexto asíncrono.

Para el caso *no lineal*, algunas aportaciones han sido reportadas en [40–46], donde se enfatiza la forma en que se elige la función de evento, la cual se basa en la evolución de la función de Lyapunov correspondiente al sistema y el análisis de estabilidad es más intuitivo que formal. Una importante contribución en el análisis de la convergencia y estabilidad de sistemas no lineales bajo un esquema de control basado en eventos, es dada en [46–48], donde se determina la existencia de un intervalo de muestreo mínimo para condiciones iniciales acotadas, basado en una ley de control de estabilización Lipchitz y una ISS-CLF (por sus siglas en inglés Input-State-Stability Control-Lyapunov-Function).

Una vez presentado la teoría general de los sistemas que se trabajan en esta tesis, en la siguientes secciones presentamos la matemática que sustenta su funcionamiento.

2.2. Fórmula general del control disparado por eventos.

El presente trabajo de tesis se enfoca en el estudio de sistemas dinámicos de la forma:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (2.1)$$

donde $x \in \mathcal{X} \subset \mathbb{R}^n$, $u \in \mathcal{U} \subset \mathbb{R}^p$, f y g son funciones Lipschitz que tienden al origen. Se asume que el sistema admite un control por retroalimentación $k : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{U}$ que lo estabiliza asintóticamente, por lo que existe una Función de Control de Lyapunov (CLF), la cual es suave y definida positiva $V : \mathcal{X} \rightarrow \mathbb{R}$ tal que para cada $x \neq 0$ existe un control $u \in \mathcal{U}$, tal que lo siguiente se cumple:

$$\dot{V} = \frac{\partial V}{\partial x} f(x) + \frac{\partial V}{\partial x} g(x)k(x) \quad (2.2)$$

Para el desarrollo de la estrategia de control disparada por eventos se necesitan definir las siguientes dos funciones:

- **Función de evento** $e : \mathcal{X} \times \mathcal{X} \rightarrow \mathbb{R}$ que indica si es necesario (cuando $e \leq 0$) o no (cuando $e > 0$) recalcular y aplicar la señal de control al proceso. En su forma general, la función de evento e toma el valor del estado actual x como una entrada y una memoria m del valor que tomo el estado la última vez en la que e fue negativa. Una version *sin memoria* también es posible, en este caso tenemos una función de evento $e : \mathcal{X} \rightarrow \mathbb{R}$ que solo requiere el valor actual del estado.
- **Función de retroalimentación** k . La cual puede ser estática o dinámica, la primera de ellas cuando $k : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{U}$; y si se agrega el tiempo (entonces $k : \mathcal{X} \times \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathcal{U}$) o el índice de muestreo (entonces $k : \mathcal{X} \times \mathbb{N} \rightarrow \mathcal{U}$) esta sera dinámica.

y cumplir con las siguientes definiciones y propiedades:

Definición 1 (Control basado en eventos bien definido). *Un control basado en eventos se dirá bien definido si para una condición inicial x_0 en $t = 0$, la solución $t \rightarrow x(t; x_0)$ existe para todo $t \geq 0$*

Propiedad 1 (Mínimo intervalo de muestreo (MSI)). *Un control basado en eventos (e, k) se dirá que cumple con la propiedad MSI, si para alguna condición inicial x_0 en t_0 , existe un mínimo intervalo de muestreo diferente de cero*

$$\underline{\tau}(x_0) := \inf_{i \in \mathbf{N}, t_i \in \tau(x_0)} t_{i+1} - t_i > 0 \quad (2.3)$$

El objetivo de esta propiedad es evitar intervalos de muestreo de longitud cero que da lugar al fenómeno “Zeno” en un tiempo finito o en infinito. En el caso de que la propiedad MSI se satisfaga, el control es constante por tramos entre instantes de muestreo y

- $x_i, i \in \mathbf{I} \subset \mathbf{N}$ con $x_0 := x(t = 0)$ denotara la serie de valores sucesivos del estado en que e es negativo para una condición inicial dada x_0 .
- $t_i, i \in \mathbf{I} \subset \mathbf{N}$ con $t_i := 0$ como la correspondiente serie de instantes de tiempo.

Teorema 1 (Control basado en eventos MSI - bien definido). *Un control basado en eventos que cumple la propiedad MSI se dice ser bien definido. En lo que sigue nos referimos simplemente como “control basado en eventos MSI” al control basado en eventos que cumple con la propiedad MSI.*

Este periodo mínimo de muestreo es útil para propósitos de implementación, pero también para propósitos de robustez cuando la realimentación k es discontinua. No obstante, seria más adecuada tener dicha cota inferior, menos dependiente de la condición inicial.

Propiedad 2 (Control basado en eventos semi-uniformemente MSI). *Un control basado en eventos (e, k) se dirá semi-uniformemente MSI si para algún $\delta > 0$:*

$$\underline{\tau}(\delta) := \inf_{i \in \mathbf{N}, t_i \in \tau(x_0), x_0 \in \beta(\delta)} t_{i+1} - t_i > 0$$

Propiedad 3 (Control basado en eventos uniformemente MSI). *se dice un control basado en eventos uniformemente MSI si:*

$$\underline{\tau} := \inf_{i \in \mathbf{N}, t_i \in \tau(x_0), x_0 \in \mathbf{X}} t_{i+1} - t_i > 0$$

Definición 2 (Control por retroalimentación disparado por eventos). *Un control por retroalimentación disparado por eventos (k, e) se dice ser semi-uniforme MSI, si para todo $\delta > 0$ y todo x_0 en la esfera de radio δ con centro en el origen $(\beta(\delta))$, la duración de tiempo entre dos eventos consecutivos, puede ser acotado por debajo de algún $\tau > 0$ [?].*

Para un sistema no lineal de la forma 2.1 con un control disparado por eventos semi-uniformemente MSI (k, e) , la solución del sistema diferencial con condiciones iniciales $x_0 \in \mathcal{X}$ en el instante $t = 0$ es entonces definido como:

$$\dot{x} = f(x, k(m)) \quad (2.4)$$

$$m = \begin{cases} x & \text{si } e(x, m) \leq 0, x \neq 0 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2.5)$$

$$\text{con: } x(0) = x_0 \text{ y } m(0) = x(0) \quad (2.6)$$

Con lo anterior se obtienen las funciones de evento y de retroalimentación, de tal manera que:

Teorema 2 (Fórmula universal de disparo por evento). *Si existe una CLF para el sistema 2.1, entonces el control disparado por eventos (k, e) , definido anteriormente, es semi uniforme MSI y suave en $\mathcal{X} \setminus \{0\}$, tal que:*

$$\frac{\partial V}{\partial x} f(x) + \frac{\partial V}{\partial x} g(x) k(m) < 0, x \in \mathcal{X} \setminus \{0\} \quad (2.7)$$

donde m se define en (2.5); k y e son:

$$k_i := -b_i(x) \delta_i(x) \gamma(x) \quad (2.8)$$

$$e(x, m) := -a(x) - b(x)k(m) - \sigma \sqrt{a(x)^2 + \theta(x)b(x)\Delta(x)b(x)^T} \quad (2.9)$$

con

- $i \in \{1, 2, \dots, p\}$
- $a(x)$, $b(x)$ y $\delta(x)$
- $x \rightarrow \Delta(x) := \text{diag}(\delta_1(x), \delta_1(x), \dots, \delta_p(x))$ es una función suave de $\mathcal{X} \setminus \{0\}$ a $\mathbb{R}^{p \times p}$, definida positiva en $\mathbb{S} := \{x \in \mathcal{X} \setminus \{0\} \mid \|b(x)\| \neq 0\}$

- $x \rightarrow \theta(x)$ es una función suave positiva de $\mathcal{X}$ a $\mathbb{R}$, tal que $\theta(x) \|\Delta(x)\|$ desvanezca en el origen, y asegurando en $\mathbb{S} \setminus \{0\}$ la inecuación

$$a(x)^2 + \theta(x)b(x)\Delta(x)b(x)^T > 0$$

- σ es un parámetro de control en $[0,1]$

- $\gamma : \mathcal{X} \rightarrow \mathbb{R}$ se define por:

$$\gamma(x) := \begin{cases} \frac{a(x) + \sqrt{a(x)^2 + \theta(x)b(x)\Delta(x)b(x)^T}}{b(x)\Delta(x)b(x)^T} & \text{si } x \in \mathbb{S} \\ 0 & \text{si } x \notin \mathbb{S} \end{cases} \quad (2.10)$$

Si la CLF satisface la propiedad de control pequeño, entonces el control es continuo en el origen. Por lo tanto, si existe alguna función suave $\omega : \mathcal{X} \rightarrow \mathbb{R}^+$ tal que $\mathbb{S} \setminus 0$,

$$\omega(x)b(x)\Delta(x)b(x)^T - a(x) > 0 \quad (2.11)$$

entonces el control es suave en $\mathcal{X}$ tan pronto como $\theta(x) \|\Delta(x)\|$ se desvanezca en el origen con

$$\theta(x) := \omega(x)^2 b(x)\Delta(x)b(x)^T - 2\omega(x)a(x) \quad (2.12)$$

La prueba del teorema 2 se da en [46]. La idea del diseño de control (2.8) es la siguiente. En la función evento, $a(x) + b(x)k(m)$ es la derivada temporal de V utilizando el control la ultima vez que se actualizo mientras el termino $-\sqrt{a(x)^2 + \theta(x)b(x)\Delta(x)b(x)^T}$ es el valor de $\dot{V}$ si $k(x)$ se aplica en lugar de $k(m)$. Por lo tanto, justo después de un evento, $e(x, m)$ necesariamente toma un valor estrictamente positivo, para ser mas exactos, es igual a $(1 - \sigma)\sqrt{a(x)^2 + \theta(x)b(x)\Delta(x)b(x)^T}$ manteniéndose negativa siempre que $\dot{V} \leq -\sigma\sqrt{a(x)^2 + \theta(x)b(x)\Delta(x)b(x)^T}$. Los eventos serían más frecuentes con valores de σ cercanos a 1. Otro parámetro ajustable crucial de la ley de control es la elección de la función Δ que directamente afecta el rendimiento del control así como la frecuencia de eventos.

2.3. Modelo matemático

A continuación se describe el modelo matemático que caracteriza el comportamiento del sistema PVTOL, se comienza con la descripción de su funcionamiento, posteriormente se representa en espacio de estado considerando variables de desviación y finaliza con la linealización del sistema alrededor del origen.

2.3.1. Modelo matemático del PVTOL

El PVTOL es un sistema ciber-físico controlado mediante la variación de la fuerza de empuje, la que en este trabajo se controló con la velocidad angular de dos motores Brushless acoplados a propelas de polietileno, las cuales giran en sentido contrario, una respecto a otra, con la finalidad de eliminar el efecto giróscopo. La velocidad de giro de los motores se rigen por las señales de control de tal manera que cada uno de los motores produce una fuerza y un torque reactivo proporcional a la rotación del motor.

La figura 2.8 muestra los grados de libertad que pueden tener un PVTOL, los cuales son:

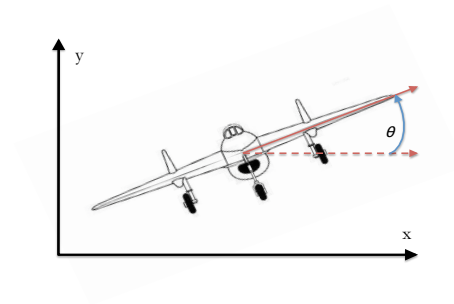


Figura 2.7: PVTOL

1. *Ángulo roll θ .*
2. *Desplazamiento en sobre el eje y .*
3. *Desplazamiento en sobre el eje x .*

En esta tesis se limitara el sistema a solo dos grados de libertad (θ, y) , donde el primero representa el ángulo inclinación del sistema con respecto al eje x ; y el segundo es la altura respecto al marco de referencia inercial. (θ, y) nos permiten realizar los siguientes movimientos:

- **Movimiento roll (θ):** Producido por la diferencia de la fuerza de empuje; para conseguirlo se incrementa o reduce la velocidad giro de los motores según lo requiera.
- **Movimiento de desplazamiento en el eje (y):** Se consigue con la velocidad de giro de los motores considerando la fuerza de empuje resultante.

2.3.1.1. Ecuaciones del sistema

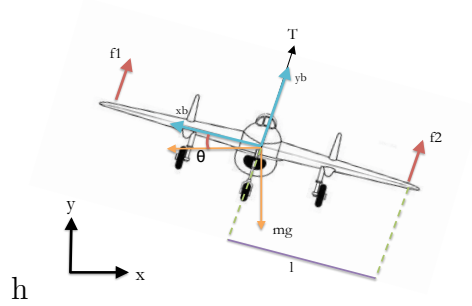


Figura 2.8: Diagrama del sistema PVTOL

El sistema PVTOL del presente trabajo tiene dos motores que producen una fuerza y un momento en el vehículo como se muestra en la figura 2.8, donde T es la suma de los empujes de cada motor y Γ es el momento el cual se obtiene de la diferencia de empujes de los motores, es decir:

$$T = (f_1 + f_2) \quad (2.13)$$

$$\Gamma = l(f_1 - f_2) \quad (2.14)$$

donde l es la distancia entre el eje de motor y el centro de masa del sistema.

El modelo dinámico del sistema aéreo no tripulado que se muestra en la figura 2.8 es:

$$\begin{aligned} m\ddot{y} &= T \cos \theta - mg - c\dot{y} \\ m\ddot{x} &= -T \sin \theta - c\dot{x} \\ J\ddot{\theta} &= \Gamma - c\dot{\theta} \end{aligned} \quad (2.15)$$

donde x es la posición horizontal, y es la posición vertical, θ es el ángulo roll o de inclinación, m es la masa total, g es la aceleración gravitacional, J es el momento inercial y c el coeficiente de amortiguamiento del sistema.

El modelo dinámico representado en el espacio de estados es:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= x_2 \\
 \dot{x}_2 &= \frac{T}{m} \cos x_5 - g - \frac{c}{m} x_2 \\
 \dot{x}_3 &= x_4 \\
 \dot{x}_4 &= -\frac{T}{m} \sin x_5 - \frac{c}{m} x_4 \\
 \dot{x}_5 &= x_6 \\
 \dot{x}_6 &= \frac{\Gamma}{J} - \frac{c}{J} x_6
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

donde se considero que $(x \ \dot{x} \ y \ \dot{y} \ \theta \ \dot{\theta})^T = (x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6)^T$.

2.3.1.2. Aproximación lineal del sistema

En las ecuaciones 2.16 se observa que $\dot{x}_2$ depende de una función cosenoidal y $\dot{x}_4$ de una senoidal, lo que hace que el sistema sea no lineal. Como en este trabajo se busca la estabilización del ángulo de inclinación y altura del PVTOL con un control lineal en el punto de equilibrio x_e , es conveniente redefinir los estados y entradas considerando $z = x - x_e$ y $u = T - mg$, de tal manera que el modelo queda:

$$\begin{aligned}
 \dot{z}_1 &= z_2 \\
 \dot{z}_2 &= \frac{u + mg}{m} \cos(z_5) - g - \frac{c}{m} z_2 \\
 \dot{z}_3 &= z_4 \\
 \dot{z}_4 &= -\frac{u + mg}{m} \sin(z_5) - \frac{c}{m} z_4 \\
 \dot{z}_5 &= z_6 \\
 \dot{z}_6 &= \frac{\Gamma}{J} - \frac{c}{J} z_6
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

que al linealizarlo al rededor del origen *i.e.* $z \approx 0$ ($x \approx x_e$) con $c = 0$, es de la forma:

$$\dot{z} = Az + Bv \tag{2.18}$$

donde z es el vector de estados del sistema, v es el vector de control y el par A, B son:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -g & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1/m & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1/J \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Aplicando las características de nuestro sistema ($m = 0.433$; $g = -9.8$ y $J = 0.007801$) A y B quedan:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -9.8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 2.309 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 128.188 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

y el vector de control:

$$v = (v_1 \ v_2)^T = (u \ \Gamma)^T \quad (2.21)$$

Capítulo 3

Diseño e implementación del sistema PVTOL

En este capítulo se describe el diseño e implementación del sistema propuesto; se inicia con el planteamiento del problema, posteriormente se trata la estrategia de control disparada por eventos; se presentan los elementos que conformar el sistema, tanto en hardware como software y se enfatiza el motivo de su elección. También se describe e ilustra la construcción de dos estructuras: una que se refiere a la del vehículo aéreo y la otra para la realización de pruebas. Por último se trata la integración de todos los componentes en el sistema final.

3.1. Planteamiento del problema

Debido a que es frecuente encontrar sistemas (tanto lineales como no-lineales) en los cuales ciertos elementos se encuentran en lugares remotos respecto a otros, lo que hace difícil conectarlos vía cable. Una solución que se ha dado a esta problemática es el uso de redes de datos como es el caso de la Internet, sin embargo si esta está muy saturada o se tiene ambientes hostiles para la transmisión de datos, se presentan pérdidas de los mismos, los cuales pueden causar problemas de inestabilidad al sistema, por lo que el propósito del presente trabajo de tesis es diseñar y probar un algoritmo de control que permita asegurar la estabilidad de un sistema PVTOL. Mientras se mantiene una altura deseada. La estrategia de control que se utilizo es la LQR (por sus siglas en inglés Lineal Quadratic Regulator) disparado por eventos; donde la acción de control esta regida por una función evento y retroalimentada mediante una red Internet. Además de asegurar la estabilidad del sistema, la propuesta debe garantizar la robustez ante perturbaciones externas y trafico de la red empleada.

3.2. Diseño de la estrategia de control

La estrategia de control se diseño tomando como base el modelo matemático del PVTOL expuesto en la sección 2.3. Como primer paso se verificó si el sistema representado en la ecuación (2.18) es controlable. Para lo que se obtuvo el rango de la matriz de controlabilidad, la que esta dada por $C = [B, AB, A^2B, A^3B, A^4B, A^5B]$. En este caso rango de C es igual a 6 ($rank(C) = 6$), por lo que se concluye que el sistema es controlable ya que es de rango completo y en consecuencia estabilizable, por lo que se propuso la siguiente funcion de Lyapunov:

$$V(x) := x^T P x \quad (3.1)$$

donde P es una matriz definida positiva y es la solución a la ecuación de Riccati (ARE), la cual se presenta a continuación:

$$A^T P + P A - \varepsilon P B B^T P - Q = 0 \quad (3.2)$$

Debido a que el par de matrices (A, B) de la ecuación (AB) es estabilizable, P siempre existe.(referencia control en el espacio de estado)

Para que la función (3.1) sea una CLF para el sistema (2.18) se propone que $u = -\frac{1}{2}\varepsilon B^T P x$.

Si $f(z) = Az$ y $g(z) = B$ la ecuación (sis no lineal), se puede escribir de la forma $\dot{z} = f(z) + g(z)v$, que al compararla con la ecuación (2.8) y (2.9) vemos son iguales, por lo que las consideraciones presentadas en la sección (2.2) se pueden usar directamente.

Aplicando la ecuación (2.7) a nuestro sistema, nos queda:

$$\frac{\partial V}{\partial z} A z + \frac{\partial V}{\partial z} B k(m) < 0 \quad z \in \mathbb{R} \setminus \{0\} \quad (3.3)$$

donde m esta definido en (2.5), k_i definida en (2.8) y e definida en (2.9), aplicadas a nuestro sistema quedan:

$$m = \begin{cases} z & \text{si } e(z, m) \leq 0, z \neq 0 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (3.4)$$

$$k_i := -b_i(z)\gamma(z) \quad (3.5)$$

$$e(z, m) := -a(z) - b(z)k(m) - \sigma\sqrt{a(z)^2 + \theta(z)b(z)b(z)^T} \quad (3.6)$$

donde

- $a(z) := z^T(PA + A^TP)z \in \mathbb{R}$
- $b(z) := 2z^TPB \in \mathbb{R}^{1 \times 4}$
- $z \rightarrow \theta(z)$ es una función positiva suave que va de $\mathbb{R}^6$ a $\mathbb{R}$ y se desvanece en el origen; lo que asegura que el subespacio $\mathbb{S}$ definido por $\mathbb{S} := \{z \in \mathbb{R}^6 \mid |b(z)|\} \neq 0$ y la desigualdad $a^2(z) + \theta(z)b(z)b(z)^T > 0$ se mantiene.
- σ es un parametro de control en $[0,1]$.
- y $\gamma(z) : \mathbb{R}^6 \rightarrow \mathbb{R}$ es definida por:

$$\gamma(z) := \begin{cases} \frac{a(z) + \sqrt{a(z)^2 + \theta(z)b(z)b(z)^T}}{b(z)b(z)^T} & \text{si } z \in \mathbb{S} \\ 0 & \text{si } z \notin \mathbb{S} \end{cases} \quad (3.7)$$

Con lo que el control disparado por eventos queda definido con (e, k) (3.5) y (3.6).

Considerando $\theta(z)$ definida como:

$$\theta(z) := \epsilon^2 b(z)b(z)^T - 2\epsilon a(z)^2 \quad (3.8)$$

Además, puesto que la CLF satisface la propiedad de control pequeño (small control property) el control es continuo en el origen.

En este caso $\omega(x) = \epsilon$ y puesto que $b = 2x^TPB$ el control esta dado por

$$k(x) = -2\epsilon B^TPx \quad (3.9)$$

y la función evento se escribirse de la siguiente manera

$$e(x, m) = (\sigma - 1)x^T(A^TP + PA)x - 4\epsilon x^TPBB^TP(\sigma x - m) \quad (3.10)$$

3.3. Interpretación de control LQR para el control disparado por eventos

Asumiendo que el estado del sistema (2.18) puede ser medido es bien sabido que es posible diseñar un control por retroalimentación de estado, que minimiza el valor de una función de coste cuadrática definida por:

$$J := \int_0^\infty \left(x^T Q x + \varepsilon^{-1} u^T u \right) dt \quad (3.11)$$

donde $Q \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ es una matriz definida positiva y ε es un parámetro positivo. Esta función de coste representa un compromiso entre la distancia del estado del origen y la magnitud de la señal de control. En consecuencia la matriz Q y el parámetro ε puede balancear la velocidad de convergencia de la solución y la magnitud de control.

La solución del problema LQR (por sus siglas en inglés Linear-quadratic regulator) es dado por una ley de control de la forma:

$$u = -\varepsilon B^T P x \quad (3.12)$$

donde P es una matriz definida positiva solución de la ecuación algebraica de Ricatti (ARE)

$$A^T P + P A - \varepsilon P B B^T P - Q = 0 \quad (3.13)$$

la cual siempre existe mientras el par (A, B) sea estabilizable.

Observación 1. *La ley de control (3.9) corresponde a 2 veces la ley de control dada por la solución del problema LQR. Esto nos indica que podemos influir en el desempeño del sistema en lazo cerrado de una similar a lo que se hace para un control LQR.*

3.4. Elementos del sistema

En esta sección se describen los componentes del sistema con el que se trabajó. En la figura 3.1 se muestra el diagrama a bloques del sistema, en el que se observa que esta integrado por el PVTOL, los sensores, las señales de control, las computadoras local y remota, la Internet y su interrelación entre los componentes.

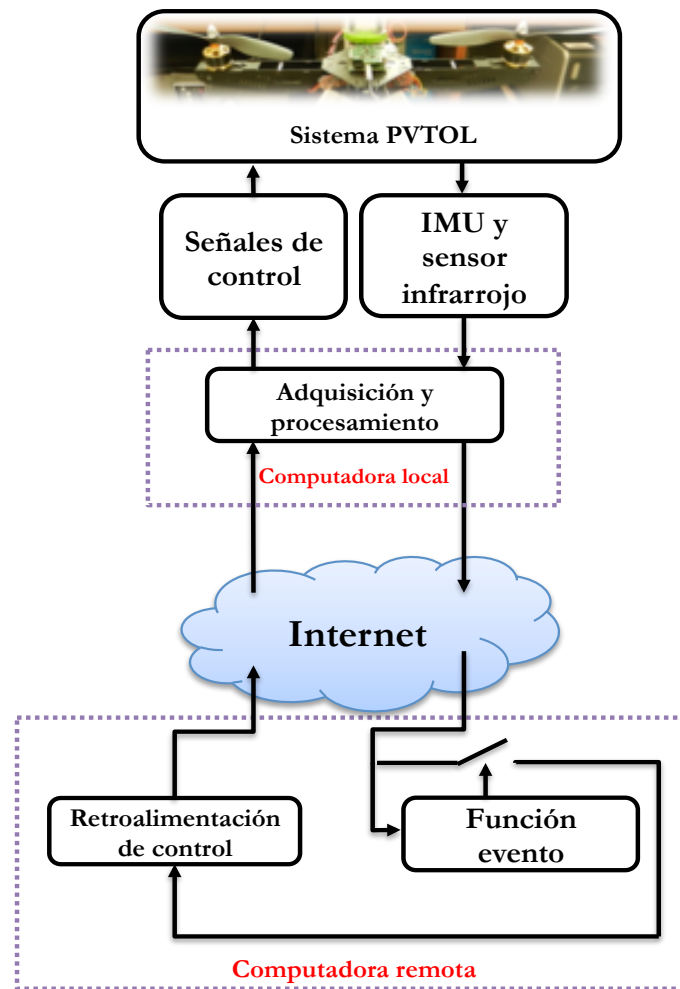


Figura 3.1: Diagrama a bloques del sistema

3.4.1. Estructura del PVTOL

Para este trabajo, el PVTOL se desarrolló a partir de un VANT - Quadritotor con estructura de fibra de carbono y con un peso 175 *gramos*. En la selección del VANT se consideró que fuera de fácil ensamble y con partes desmontables. El material de fibra de carbono nos ofrece las ventajas de ser altamente resistente y de bajo peso. En la figura

3.2 se muestra la estructura del VANT con el cual se hizo el PVTOL que se muestra en la figura 3.3, donde puede observar que se le desmontaron dos brazos al VANT.



Figura 3.2: Estructura del VANT

El movimiento del PVTOL en el eje y se limitó de 0 a 80 cm, por lo que fue necesario contar con una estructura la cual se muestra en la figura 3.5. Esta se realizó con perfiles rectangulares de aluminio, acrílico y dos varillas de acero inoxidable de 113 cm de alto, acopladas a una pieza de nylamid (figura 3.4), maquinada en el torno de la FCE. En esta última figura se indicó con una flecha un orificio, el cual se utilizó para colocar una flecha metálica cuyo fin es controlar el ángulo de inclinación, el cual se limitó de -30 a 30 grados tomando la vertical como 0.

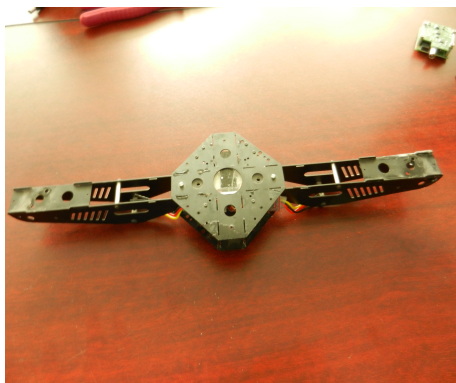


Figura 3.3: Estructura del PVTOL



Figura 3.4: Sistema para permitir el desplazamiento



Figura 3.5: Estructura de la plataforma

3.4.2. Motores sin escobillas

El tipo de motores empleados en el PVTOL son Brushless como el que se muestra en la figura 3.6, el cual se alimenta con una señal trifásica. En nuestro caso, ésta se obtuvo a partir de una señal PWM, obtenida de una tarjeta de adquisición de datos, la cual fue entrada del controlador mostrado en la figura 3.7, cuya salida es la señal trifásica. El empleo de éstos motores se debe a la forma de trabajo en la que sus imanes son atraídos por un campo magnético, provocando que la velocidad de giro este relacionada con frecuencia de los pulsos PWM ingresados al controlador.



Figura 3.6: Motor sin escobillas



Figura 3.7: Motor y controlador

3.4.3. Unidad de Medición Inercial (IMU)

Los sistemas de navegación de barcos, aviones, helicópteros o cualquier móvil son algunos de los sistemas que tienen como uno de sus componente esenciales una unidad de medición inercial (IMU). Se utiliza para adquirir mediciones de velocidad, rotación y fuerza; es un dispositivo que se compone principalmente de acelerómetros y giroscopios. Los acelerómetros se emplean para realizar una medida de aceleración o vibración, al detectar la variación de velocidad proporciona una señal eléctrica dependiendo de la variación. Por su parte, el funcionamiento de los giroscopios está basado en la conservación del momento angular; por ello se utilizan para detectar variaciones de ángulo en un eje determinado [4].

Para esta tesis se eligió la IMU 3DM-GX1 (figura 3.8) del fabricante MicroStrain [?], cuyas características se encuentran resumidas en la tabla 3.1. Dicha IMU cuenta con tres giroscopios para medir velocidad angular; tres acelerómetros; tres magnetómetros y un convertidor A/D de 16 bits. La elección del dispositivo se debe tanto a la comunicación RS-232 como la velocidad de respuesta de sus sensores. La IMU brinda la posibilidad de acceder a los datos, a través del protocolo RS-232, tanto en ángulos de Euler como en cuaterniones gracias a la ejecución de un algoritmo de filtro programable, el cual fusiona la respuesta estática y dinámica en tiempo real. En la figura 3.9 se muestra la IMU junto con su conector para la comunicación RS-232.



Figura 3.8: IMU 3DM-GX1



Figura 3.9: IMU y conector RS-232

IMU 3DM-GX1	
Características	Descripcion
Ejes	Pitch, Roll & Yaw
Rango de medición	$\pm 90^\circ$, $\pm 180^\circ$ & $\pm 180^\circ$
Rango de giroscopio	$\pm 300^\circ/\text{sec}$
Rango de acelerómetro	$\pm 5 \text{ g}$
Rango de magnetometro	$\pm 1.2 \text{ Gauss}$
Resolución del A/D	16 bit
Salida digital	RS- 232 & RS-485
Consumo de energía	65 mA
Voltaje de alimentación	5.2 V - 12 V

Tabla 3.1: Especificaciones técnicas de la IMU 3DM-GX1.

3.4.4. Sensor infrarrojo

Para medir la altura del sistema, se eligió el sensor infrarrojo SHARP 2Y0A02 mostrado en la figura 3.10; cuyas especificaciones se resumen en la tabla 3.2.

Sensor 2Y0A02	
Características	Descripcion
Rango de medición	20 - 150 cm
Salida	Analógica
Rango de salida	0.4 a 3.12 V
Voltaje de alimentación	4.5 - 5.5 V
Consumo de energía	33 mA

Tabla 3.2: Especificaciones técnicas del sensor 2Y0A02.

Se selecciono este sensor debido a la capacidad de reflejar una señal infrarroja sobre casi cualquier material y brindar una salida analógica. El sensor infrarrojo produce un cambio de tension en la salida que varia de forma no-lineal con la distancia en la que detecte un objeto en un rango de 20 *cm* a 150 *cm*, teniendo una actualización de la información cada 32 *ms*. El sensor elegido es sensible a la luz del ambiente, por lo cual se construyo una cubierta que redujera la cantidad del luz proveniente del exterior, ver figura 3.11.



Figura 3.10: Sensor 2Y0A02

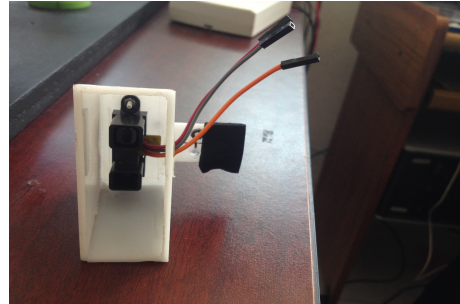


Figura 3.11: Sensor infrarrojo con armazón

3.4.5. Tarjeta de adquisición de datos

Con el fin de captar la señal del sensor infrarrojo, fue necesario introducir un DAQ (por sus siglas en inglés Data Acquisition). El elemento seleccionado fue la DAQ NI 6211 del fabricante National Instrument presentada en la figura 3.12 y cuyas especificaciones se enlistan en la tabla 3.3. Esta tarjeta cuenta con entradas y salidas tanto digitales como analógicas; además de conectarse mediante el protocolo USB. La interfaz que emplea es a través del software Labview proveniente de la misma compañía, el cuenta con una librería para poder manejar las diferentes funciones de la DAQ.



Figura 3.12: Tarjeta DAQ de National Instrument

NI USB-6211	
Características	Descripcion
Entradas analógicas	16 de 16 bits a 250 kS/s
Salidas analógicas	2 de 16 bits a 250 kS/s
Conexión	USB
Tipo de transferencia de datos	NI signal streaming bidireccional a alta velocidad
Compatibilidad	Labview, LabWindonws/CVI, Measurement Studio

Tabla 3.3: Características de la tarjeta de adquisición NI USB-6211.

3.4.6. Batería

Para la alimentación eléctrica del PVTOL, se consideró la demanda de corriente de los motores, ya que consumen la mayor cantidad de energía. Nosotros seleccionamos una batería de Li-Po, la cual debe su nombre al efecto electro-químico que se basa en la reacción del polímero de litio generando una diferencia de potencia eléctrico. Tanto las características que presentan y la relación entre capacidad, volumen, peso y potencial es lo que hace de las baterías de polímero de litio un elemento de acumulación de energía con las mejores propiedades para ser aplicados en los sistemas con gran consumo de corriente, como en nuestro caso los vehículos aéreos no tripulados. Las características de estas baterías son:

- **Densidad de energía:** Nos permite saber cuánta energía es posible almacenar por kg de batería.
- **Capacidad de un batería:** Es la cantidad de carga eléctrica medida en Coulomb (C), que es posible almacenar en la batería.

$$1 \text{ Coulomb} = (1 \text{ Amperio})(\text{segundo}) \quad (3.14)$$

- **Velocidad de descarga:** Es la intensidad máxima que puede proporcionar la batería y se medirse con la unidad C.

- **Diferencia de potencial de una celda:** Varía en función de la reacción química, en una batería de Li-Po dicho potencial es de 3.7 volts por celda. Para no dañar la batería, no se debe cargar más de 4.2 volts ni menos de 3 volts por celda. Para conocer el potencial de una batería, en el caso de que las celdas tengan una conexión serial, solo se necesita multiplicar el número de celdas por el potencial.

y las recomendaciones para cuidar y prolongar la vida útil de las mismas batería son:

- No mezclar baterías de diferente amperaje o capacidad.
- Nunca descargar una celda por debajo 3 volts.
- No cargar una batería Li-Po a mayor amperaje nominal.
- Dejar tiempo de reposo entre carga y descarga.
- Utilizar conectores de alta capacidad.
- Desechar en un lugar adecuado, si ésta esta hinchada o inflada, lo que se debe a que fue descargada y cargada de manera incorrecta y puede ser peligrosa e inestable.
- Utilizar un cargador especial para el tipo de batería, conectar siempre el balanceador y estar al pendiente durante el tiempo de carga de cualquier cambio evitando daños en la batería.

La batería que se utilizó para propiciar de energía al sistema fue una batería de Li-Po de 3 celdas y 5000 *mAh* como la que se muestra en la figura 3.13. Este tipo de baterías requieren de un cargador especial, cuyo amperaje debe coincidir con el de la batería, además de contar con un balanceador que se encarga de que todas las celdas tengan el amperaje y potencial específico.



Figura 3.13: Batería Li-Po, Zippy.

3.5. Interfaz del sistema

Para poder interactuar con los datos recolectados provenientes de los diferentes sensores del sistema es necesario contar con una interfaz, que se define como el medio que permite comunicar varios sistemas ???. En un software, se considera parte de un programa que permite el flujo de información entre el usuario y la aplicación. Estos medios de interacción están contruidos a través de conjuntos de comandos y métodos para crear las intercomunicaciones. Por otro lado, una interfaz también puede hacer interactuar a un usuario y una computadora, a través de líneas de comandos o en base al hardware como el teclado o el monitor. Desde el punto de vista de la electrónica, una interfaz es considerada el puerto mediante el que se envían y reciben señales dirigidas de un sistema a hacia otros. Las características de una interfaz son:

- Representación fija y permanente de un determinado contexto de acción.
- Diseño ergonómico y de fácil acceso.
- Facilidad de comprensión, aprendizaje y uso.
- Operaciones rápidas, incrementales y reversibles, con efectos inmediatos.

En esté proyecto, la interfaz tiene el propósito de proporcionar al usuario del PVTOL la capacidad de monitoreo, en la parte local, además de control en la remota. El software seleccionado en el que se realizaron las interfaces es Labview (Laboratory Virtual Instrument Engineerig Workbench), que es un entorno gráfico para el diseño de aplicaciones de adquisición y presentación de datos y análisis de medidas. Labview es considerado un eficiente sistema de diseño gracias a su sistema de programación gráfica (*lenguaje G*) que se enfocan en las aplicaciones relacionadas con el control, análisis y procesamiento de datos. Este cuenta con un lenguaje de programación a base de bloques, el cual favorece la creación de instrumentos virtuales; además de contar con una gran variedad librerías lo que permite el manejo de diferentes tipos de datos y herramientas. La versión del software que aquí se ocupó es la 8.0, y los requerimientos de los sistema computacionales para su instalación son los siguientes:

- Sistema operativo (XP SP3, Vista SP1, Windows 7)
- Plataforma 32 bits ó 64 bits
- Espacio libre en el disco duro de 5 GB

- Memoria RAM mínima de 1 GB

Algunos de las utilidades que presenta Labview son:

- Reducción de tiempo durante el desarrollo de las aplicaciones, debido a su fácil e intuitivo manejo.
- Flexibilidad para realizar cambios tanto de hardware como de software.
- Proporciona la posibilidad de realizar soluciones a sistemas tanto complejos como simples.
- Un sencillo y práctico entendimiento del sistema de desarrollo gracias a la integración de la adquisición, análisis y procesamiento de datos.
- Gran velocidad de ejecución debido a su compilador gráfico incorporado.
- Accesible a aplicaciones realizadas en otro lenguaje.

Los programas desarrollados en Labview son denominados *Instrumentos Virtuales* mejor conocidos como VI, los cuales están conformados por una parte interactiva con el usuario denominada *panel frontal* y otra donde se desarrolla el código fuente llamado *diagrama de bloques*. Cada una cuenta con sus propiedades y *menus* que contienen las opciones para crear y modificar los atributos de las aplicaciones.

Para lograr el objetivo de implementar una estrategia de control disparada por eventos a través de Internet, se crearon dos instrumentos virtuales. El primero, nombrado *interfaz de monitoreo*, se desarrolló en una computadora denominada *computadora local*. La función de este primer VI es el adquirir y mostrar cada uno de los datos provenientes de la IMU y la DAQ del PVTOL. El segundo VI se desarrolló en una segunda computadora identificada como *computadora remota* y se nombro *interfaz de calculo y retroalimentación de control*. Este VI se desarrolló para recibir el estado del sistema proveniente de la interfaz de monitoreo y ejecutar la estrategia de control disparada por eventos con lo que se obtiene las acciones de control, las que son retroalimentadas a la computadora local para ser aplicadas al PVTOL.

Los equipos computacionales que se emplearon, es decir la computadora local y la remota (figura 3.15), cuentan con las especificaciones técnicas presentadas en la tabla

3.4, las cuales fueron adecuadas para cumplir con los requerimientos del software y del sistema.

Computadoras		
Características	PC 1	PC 2
RAM	4 GB	2
Sistema operativo	Windons 7 Ultimate	Windons 7 Ultimate
Tipo de sistema	64 bits	64 bits
Procesador	Intel Core Quad 2.66 GHz	Intel Core Quad 2.66 GHz
Disco duro	500 GB	300

Tabla 3.4: Especificaciones de las computadoras.

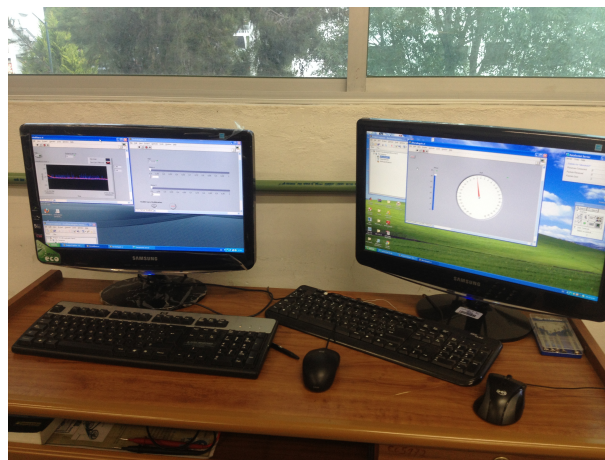


Figura 3.14: Computadoras local y remota.

3.5.1. Interfaz de monitoreo (local)

El objetivo de la interfaz de monitoreo radica en obtener los datos provenientes tanto del sensor infrarrojo como de la unidad de medición inercial, es decir, la altura y ángulo de inclinación del sistema. La interacción entre el sensor infrarrojo y la computadora local se realizo mediante la tarjeta de adquisición, la cual es empleada para aplicar las señales de control a los actuadores del sistema que en el presente trabajo son dos motores sin escobillas.

En la figura 3.15 se muestra la interfaz de monitoreo, la que esta diseñada con el fin de visualizar, tanto gráfica como numéricamente, el estado y las acciones de control. La interfaz cuenta con elementos gráficos para mostrar el ángulo, la altura del sistema y la deseada; y numéricos para el ángulo, la velocidad angular, las alturas y los valores de las señales control provenientes de la interfaz remota, que en este caso son el ancho de pulso para cada uno de los motores.

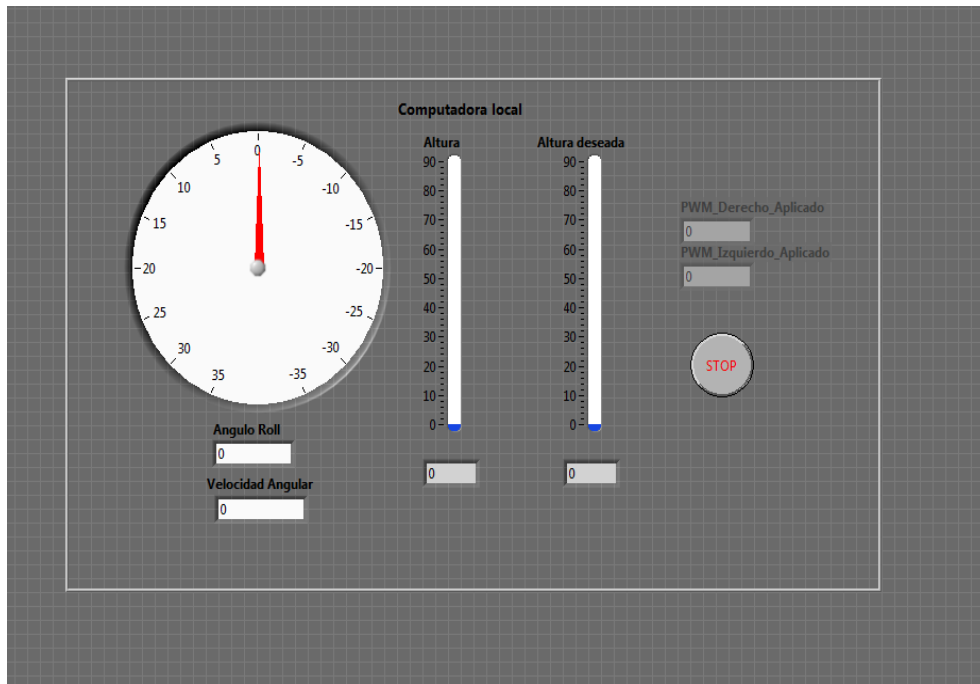


Figura 3.15: Interfaz de monitoreo.

3.5.2. Interfaz de calculo y retroalimentación de control (remota)

El propósito de la interfaz de calculo y retroalimentación de control es el procesar el estado del sistema, originario de la interfaz de monitoreo y transportado por medio de Internet. Después de recibir el estado, se ejecuta la estrategia de control disparada por eventos, la cual decidirá si recalcular las acciones de control o no, basándose en la presencia de eventos. Luego de ejecutar la ley de control, las acciones de control son transmitidas a la interfaz de monitoreo, la cual se encargará de aplicarlo mediante la tarjeta de adquisición a los actuadores del sistema (motores) y a su vez modificando el estado del PVTOL.

En el instrumento virtual (figura 3.16) se pueden visualizar el estado del sistema, las señales de control y un indicador gráfico para mostrar la concurrencia del evento. Cada

ocasión en que se actualice el control, el indicador se pondrá en 1; mientras se mantenga un control previamente calculado se mostrará un 0. También cuenta con elementos que se pueden modificar como los coeficientes del sistema, las constantes de la matriz de control y la altura deseada. La altura se puede modificar aun cuando el sistema este en funcionamiento, sin embargo, debido a que los coeficientes del sistema y la matriz de control están estrechamente relacionados con la estrategia de control aplicada, se recomienda que estos solo se modifiquen cuando se tenga un nuevo sistema o se aplique una nueva estrategia de control.

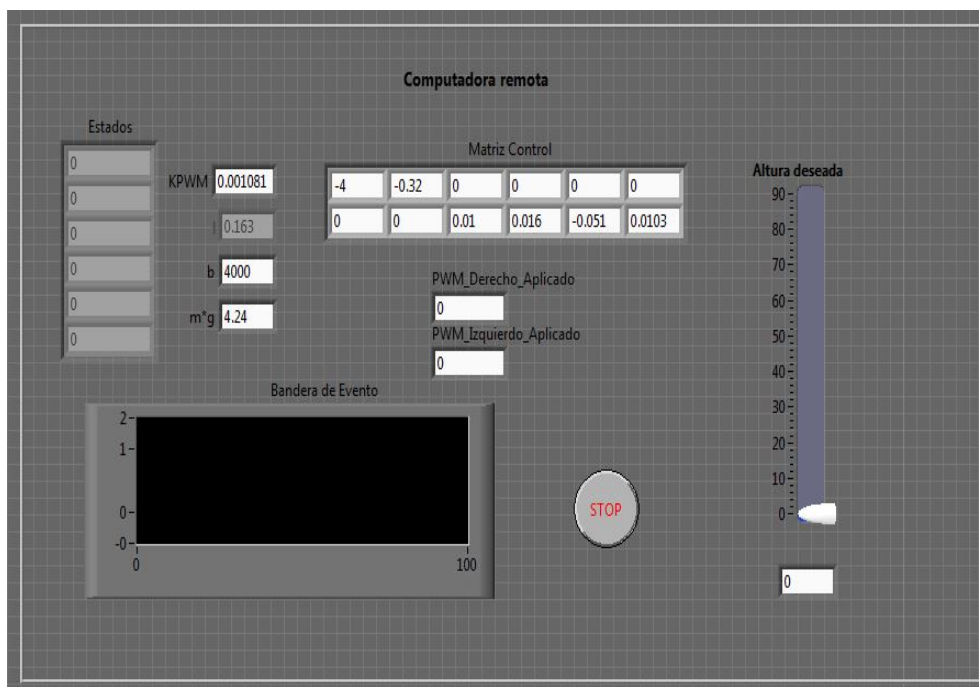


Figura 3.16: Interfaz de calculo y retroalimentación de control.

3.6. Integración

El proceso de integración se dividió en dos apartados; el primero se centra en la metodología que se empleó para acoplar las estructuras (PVTOL y estructura), los sensores (IMU y sensor infrarrojo), los motores, la batería y la tarjeta de adquisición (NI USB - 6211). El segundo se enfoca a las conexiones y el tipo de comunicación que requiere cada elemento, además de mencionar el proceso de configuración, adquisición y procesamiento de las señales de salida de los sensores empleando el software Labview. Dichas señales deben de tratarse con cautela, debido a que conforman el estado del sistema y como tal son necesarios para calcular las acciones de control que se encargan de mantener

al sistema estable. De igual manera se aborda el procedimiento para enviar el estado del sistema a la computadora remota y su posterior transmisión de las acciones de control de la computadora remota hacia la local.

3.6.1. Construcción del PVTOL

Para la construcción de la plataforma del PVTOL se comenzó acoplando los motores sin escobillas (con su respectivo controlador) a la estructura de fibra de carbono. Situando cada motor en un extremo, como se muestra en la figura 3.17. Es importante mencionar que la elección de las propelas se realizó en base al tamaño de la estructura y la fuerza de empuje de cada motor. Por otro lado, la dirección de giro de cada motor es distinto, puesto que el motor de la derecha gira en sentido horario mientras que el motor de la izquierda gira en sentido anti-horario, esta configuración es utilizada para contrarrestar el efecto giróscopo.



Figura 3.17: Estructura con motores.

Al tener cada motor y propela en cada extremo de la estructura de carbono, se realizaron las mediciones para determinar el centro de masa de la estructura con la finalidad de colocar la unidad de medición inercial, la que necesita estar posicionada en el centro de la estructura para poder medir la inclinación que tiene el PVTOL al rededor del ángulo *roll* (figura 3.18).

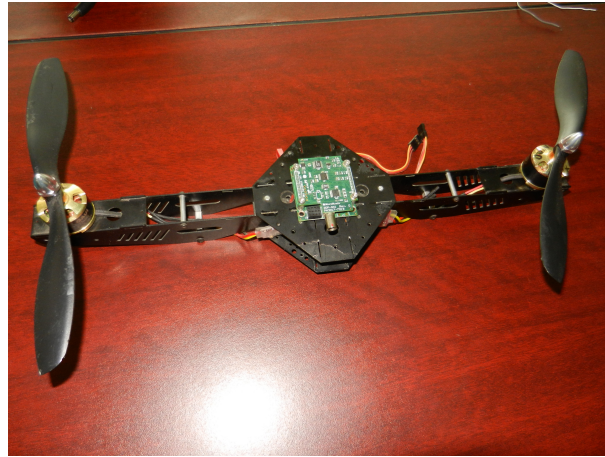


Figura 3.18: Acoplamiento de la IMU.

Para permitir el movimiento angular se empleó un *buje* adaptado a una flecha de aluminio como se muestra en la figura 3.19, el cual, posteriormente se ensambló a la estructura como se muestra en la figura 3.20.

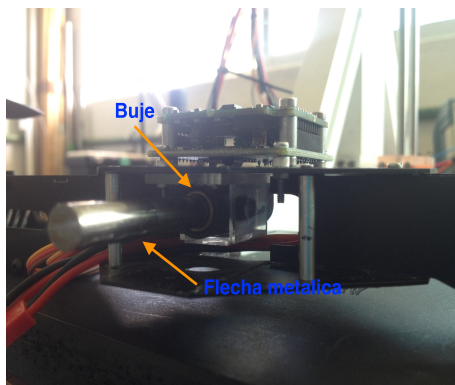


Figura 3.19: Movimiento angular.

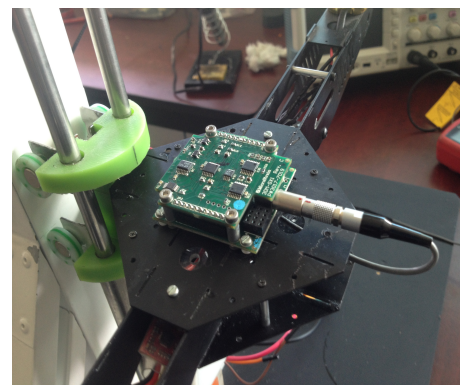


Figura 3.20: Movimiento vertical.

El siguiente paso fue la incorporación del sensor infrarrojo ya protegido con una cubierta de acrílico para reducir la incidencia de luz del exterior (ver figura 3.21). Dicho sensor se colocó en la parte inferior del PVTOL de manera fija, con el fin de que el movimiento angular no alterara la medición de la altura. Debido a que el sensor infrarrojo empleado tiene un rango de medición de 20 a 150 *cm*, se utilizaron dos cilindros de acero inoxidable para que el estado de reposo del sistema se encontrara a los 20 *cm* como se muestra en la figura 3.22.

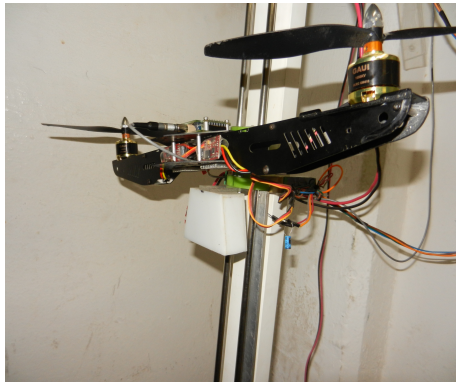


Figura 3.21: Estructura y sensor.

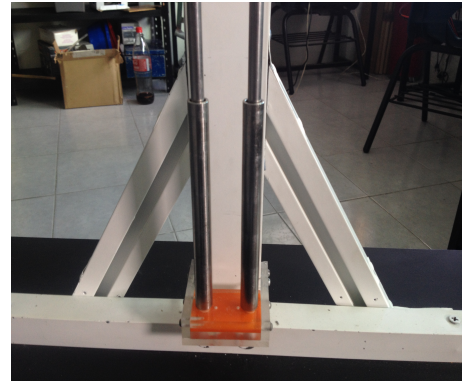


Figura 3.22: Soporte para medición del sensor.

En la parte superior de la estructura se adaptó una plataforma para colocar la batería como la tarjeta de adquisición, quedando como se muestra en la figura 3.23.



Figura 3.23: Batería y tarjeta de adquisición.

Una vez realizado los pasos anteriores, se logra obtener la plataforma del PVTOL completa como se muestra en la figura 3.24, donde se observa que ésta también contiene un botón de paro de emergencia situado en la parte inferior derecha, que por seguridad desactiva las señales de los motores en caso de ser necesario.

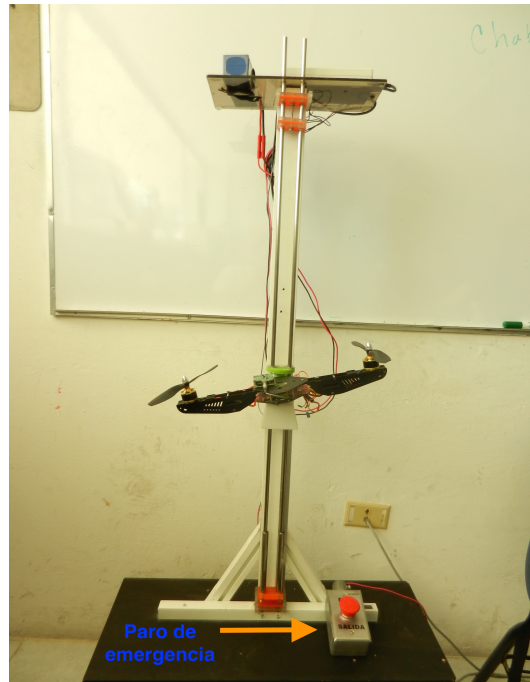


Figura 3.24: Plataforma del PVTOL.

3.6.2. PVTOL incorporado con las interfaces

Una vez teniendo la estructura del PVTOL completa, el siguiente paso fue la interconexión entre ellos, para lo cual se desarrollo el diagrama mostrado en la figura 3.25, donde se muestra mediante bloques la integración del sistema, así como la dirección del flujo de información entre ellos.

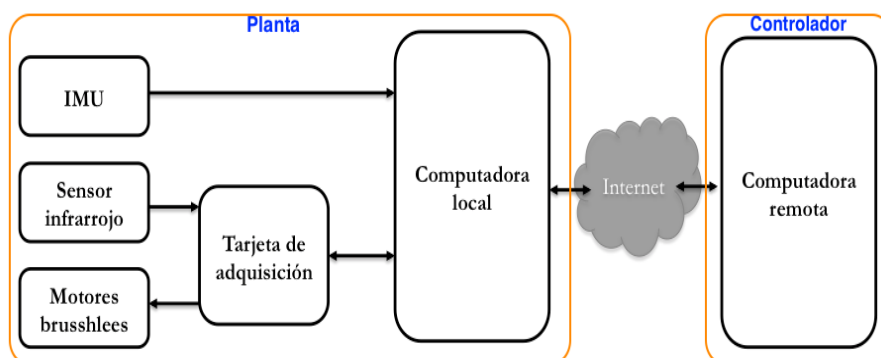


Figura 3.25: Diagrama a bloques de las conexiones

En el diagrama anterior se observa que el sistema esta compuesto por dos conjuntos: planta y controlador comunicados mediante Internet. De acuerdo al diagrama, en el bloque

de la planta se encuentran: la unidad de medición inercial, el sensor infrarrojo, la tarjeta de adquisición y la computadora local; mientras que en el bloque del controlador se encuentra la computadora remota. A continuación se describe, de manera general, cada bloque remarcando puntos como tipo de conexión, parámetros de configuración y tipo de procesamiento.

■ Bloque de la planta del sistema

El bloque de la planta está constituido por la estructura del PVTOL completa y la interfaz de monitoreo.

El conjunto de sensores y actuadores fueron los primeros en ser conectados siguiendo el diagrama de conexiones (figura 3.25). La unidad de medición inercial se conectó a la computadora local mediante comunicación serial con protocolo RS-232 y en el instrumento virtual se configuró usando los bloques del fabricante de la IMU, donde se especificó el puerto COM y la velocidad de transmisión en baudios. Por otro lado, el sensor infrarrojo y los dos motores brushless son conectados a la tarjeta de adquisición que a su vez se conectó a la computadora local mediante USB. Debido a la presencia de la tarjeta de adquisición (NI USB 6122), en la interfaz se emplearon los bloques de la librería de propósito especial de las tarjetas de National Instrument. La velocidad de los motores es controlada con una señal PWM, por lo que las señales de salida para los motores fueron configuradas como pulsos a frecuencias constantes. Para el sensor infrarrojo se empleó un bloque de lectura de entrada analógica, definiendo el pin de la tarjeta al cual se encuentra asociado. También se establecen los valores límites de voltaje de entrada, siendo 0 el mínimo y 5 volts el máximo.

Para aplicar el algoritmo de control propuesto es necesario disponer del estado del sistema el que esta compuesto de: altura, velocidad lineal, ángulo, velocidad angular. El ángulo de inclinación y la velocidad angular son adquiridos de la IMU; mediante el empleo de un bloque que entrega en formato numérico de ocho bits. Por otro lado, la señal procedente del sensor infrarrojo es captada con un bloque para la lectura de señales analógicas, de donde se obtiene la altura del sistema para lo que se introdujo la ecuación 3.15 en el instrumento virtual con la señal del sensor como entrada.

$$y = -34.159x^5 + 298.19x^4 - 1004.3x^3 + 1638.3x^2 - 1333.7x + 479.2 \quad (3.15)$$

Después de tener el valor numérico de la altura, hace falta contar con la velocidad de desplazamiento, cual representa un reto mayor debido a que no se cuenta con

un dispositivo para obtenerla. La manera en que se afrontó la problemática fue con la implementación de una estrategia denominada *derivada filtrada*, la que permite estimar la velocidad de desplazamiento a partir de la posición mediante la implementación de las siguientes ecuaciones:

$$F_k = F - D_t(aV) \quad (3.16)$$

$$V_K = F_k + bP \quad (3.17)$$

donde a y b son constantes, P es la posición y F es una variable auxiliar al igual que F_k , que es una auxiliar en un tiempo $k + 1$. De igual manera V y V_k representan la velocidad y velocidad en un tiempo $k + 1$ respectivamente. La implementación de la derivada filtrada se realizó en un bloque *Formule Node* donde se ingresaron las ecuaciones 3.17 y 3.17. Además se emplearon dos bloques de memoria para F_k y V_k . El resultado fue la estimación de la velocidad de desplazamiento del sistema.

Una vez teniendo el estado completo, este se puede enviar a la computadora remota, por lo que el proceso a seguir es la transmisión del mismo. El sistema de comunicación que se empleó fue una red Ethernet y la herramienta que llevo a cabo la transmisión entre los bloques fue un aditamento contenido en Labview llamado *DataSocket*, el cual permite enlazar computadoras mediante sus IPs. En la figura 3.26 se presenta la interfaz local con la ventana del software DataSocket en la que se indican el número de variables que se encuentran enlazadas así como los paquete de datos enviados y recibidos.

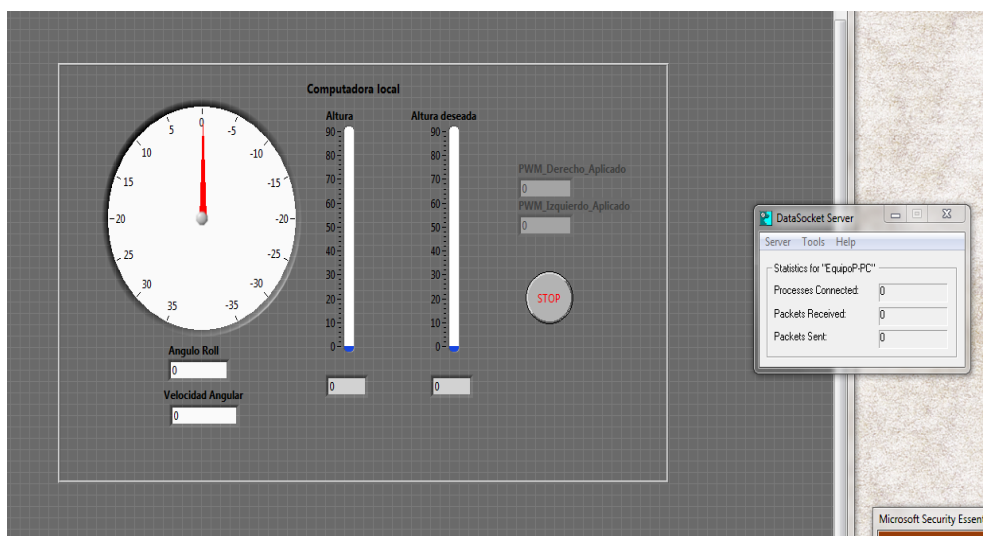


Figura 3.26: Interfaz de monitoreo y DataSocket

Dentro de los datos recibidos se encuentran las señales que se utilizan para controlar la velocidad de giro de los motores. Las señales de salida controlan la velocidad de giro de los motores. Los motores sin escobillas funcionan en base a señales de modulación de pulsos, por lo que en la interfaz se emplearon bloques de escritura denominados contadores. La forma en que se manejan los bloques de salida fue con la modificación de los tiempos en alto y bajo de los pulsos, dichos tiempos son controlados con las señales resultantes del bloque del controlador.

■ Bloque del controlador

Este bloque esta constituido únicamente por la computadora remota, la cual recibe los dados de la local mediante el *DataSocket*. El instrumento virtual tiene la tarea de recibir el estado del sistema, aplicar el algoritmo de control y enviar las señales de control al bloque de la planta. Para realizar la comunicación se requiere de cuatro entradas (altura, velocidad lineal, ángulo de inclinación y velocidad angular) y tres salidas (acciones de control para cada motor y altura deseada). En las entradas se emplearon bloques de lectura para recibir el estado del sistema, configurándolas con la respectiva dirección IP de la computadora local y el nombre de la variable; mientras que para las salidas se manejaron bloques de escritura con la IP de la computadora remota, debido a que se escribirá en el servidor de dicha computadora para poder ser leído por los bloques de lectura de la computadora local.

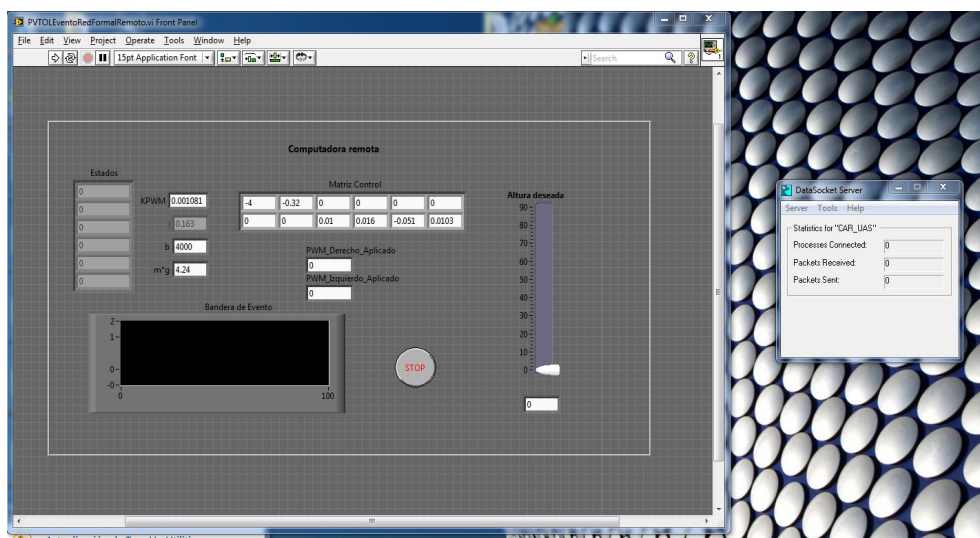


Figura 3.27: Interfaz de control y DataSocket

Teniendo el vector de estado se procede a realizar las operaciones requeridas para aplicar las ecuaciones definidas durante el diseño de la estrategia de control como

la función de evento y de retroalimentación. La primera de ellas descrita en la ecuación (3.9) requirió de bloques *array* para las matrices y bloques específicos para las operaciones entre matrices. Por su parte, la función retroalimentación se implementó de acuerdo a la ecuación 3.10. Los bloques para dicha función fueron: una estructura *case*, un matriz para ingresar las constantes de control LQR y bloques para las operaciones matemáticas. Por último se realizó el procedimiento de convertir las acciones de control en señales para los motores. El proceso que se siguió fue mediante una transformación implementada con bloques de operaciones y constantes. En la figura 3.27 se muestra la interfaz de control diseñada en la computadora remota en conjunto con la ventana del servidor DataShoket.

En el anexo A se presentan los código fuente, tanto del bloque de la planta como del controlador.

En la figura 3.28 se presenta el sistema en su totalidad con los elementos físicos (sensores, estructuras, computadoras) y computacionales (las dos interfaces) que lo integran. Al tener los dispositivos, procesos e interfaces enlazados, el sistema se encuentra listo para realizar las pruebas experimentales, las que se presentan en el siguiente capítulo.



Figura 3.28: Vista frontal del sistema PVTOL

Capítulo 4

Resultados experimentales

En esta sección se reportan las pruebas realizadas, tanto en simulación como de manera experimental, a la estabilidad y robustez de la estrategia de control mediante red empleando un enfoque disparado por eventos. Dichas pruebas fueron realizadas sobre el sistema PVTOL implementado en el Laboratorio de Control Avanzado de la FCE.

4.1. Resultados experimentales en simulación y tiempo real

Con el objetivo de realizar tanto los experimentos en simulación como en tiempo real, se tomó en cuenta las especificaciones de los parámetros de cada fabricante, así como como las características del sistema completo, por lo que en la tabla 4.1 se presentan el listado de parámetros asociados al sistema PVTOL que se utilizaron.

PVTOL		
Símbolo	Descripción	Valor
b	Constante para la señal PWM	4000
m	Masa del sistema	0.433 kg
l	Distancia entre el motor y centro de masa	0.163 m
J_y	Momento de inercia de "roll"	0.0552 $Kg \cdot m^2$

Tabla 4.1: Parámetros asociados al sistema PVTOL.

4.1.1. Resultado de simulaciones

Con el fin de verificar el comportamiento de la estrategia de control propuesto en el PVTOL ante cambios de la referencia de altura y presencia de perturbaciones, se empleó el software Matlab/Simulink para simular tanto la planta del sistema como la estrategia de control diseñado. Como primer paso se escribió un archivo con extensión .m, en el que se introdujeron las matrices del sistema, las constantes por utilizar, además de calcular el LQR, el archivo se estructuró como se muestra en la figura 4.1.

```
%%PVTOL%%
%%Sistema birotor: Parametros para el sistema y el control

ma=.433;          %%Masa
g=9.8;           %%Gravedad
l=0.163;         %%Distancia al centro de masa
c=0.3;           %%Coeficiente de fricción
J=0.007801;      %%Inercia

b = 4000;        %%Constante de proporcionalidad de fuerza (PWM)
gpwm = 0.001081;

%%%%%%%% Calculo del LQR %%%%%%%%%
A= [0 1 0 0 0 0; 0 0 0 0 0 0; 0 0 0 1 0 0; 0 0 0 0 -g 0; 0 0 0 0 0 1; 0 0 0 0 0 0];

B=[0 0; 1/ma 0; 0 0; 0 0; 0 0; 0 1/J];

%%LQR%%

Q4=diag([16, .01, 0.0001, .00002, 0.0012, 0.0001]); %%Propuesta para ser aplicado
%[16, .01, 0.001, .005, 0.0001, 0.001]
Q=eye(6);

R4=diag([1, 1]);          %%Propuesta para ser aplicado
R=eye(2);

N=0;

[K,P,E]=lqr(A,B,Q,R,N)%%Lqr para xl como posicion en "y"
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%Multiplicar Q y R diferentes por ganancias para sintonizar el sistema
[k4,P2,e4]=lqr(A,B,Q4,R4,N);

%%%%%%%% Calculo de CFP(Convertir Fuerzas a PWM)

CFP = [b b; 1*b -1*b];
CFP1 = inv(CFP);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%% Constantes para ecuacion evento %%%%%%%%%
AA = A';
BB = B';
sigma = 0.9;
e = .96;
mag= ma*g;

AB=[1 2 3 4; 5 6 7 8];
```

Figura 4.1: Archivo .m con los parámetros del sistema.

El paso a seguir fue la introducción del modelo del sistema en mediante Simulink como se muestra en la figura 4.2, el cual fue encapsulado en un bloque denominado PVTOL, para luego realizar la retroalimentación de estado utilizando las constante de control k , ver 4.3.

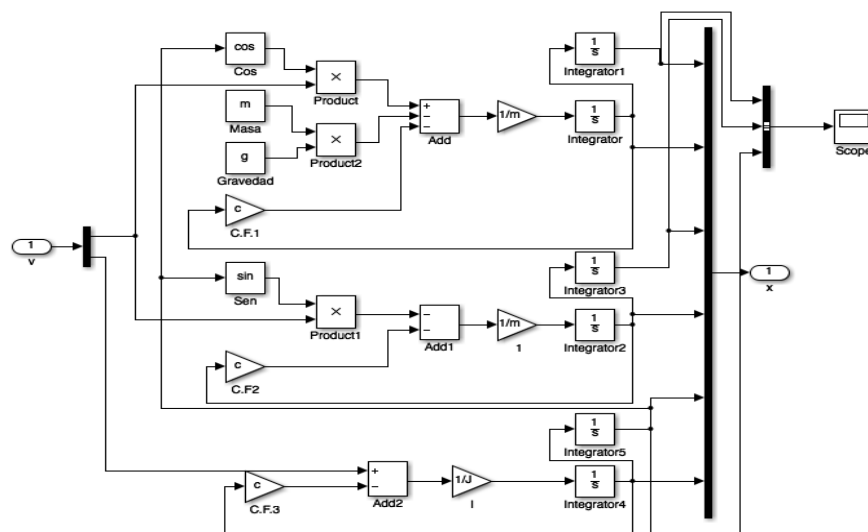


Figura 4.2: Modelo del PVTOL implementado en Matlab-Simulink.

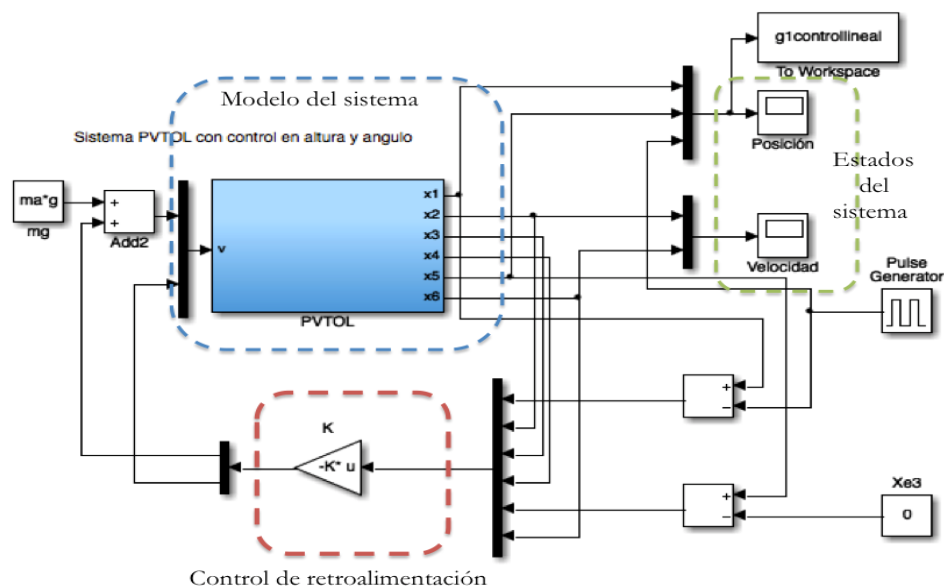


Figura 4.3: Modelo del sistema con un control de retroalimentación en tiempo continuo.

Para la primera simulación se dieron condiciones iniciales diferente de cero para el ángulo de inclinación y una señal cuadrada de amplitud 5 para la altura. Los resultados son los presentados en la figura 4.4, donde se observa que el ángulo de inclinación (x_5) se estabiliza en 0 antes de 3 segundos, apesar de que este sea diferente de cero al inicio de la simulación. Con respecto a la altura (x_1) se observa que se trata de ajustar a la forma de la referencia.

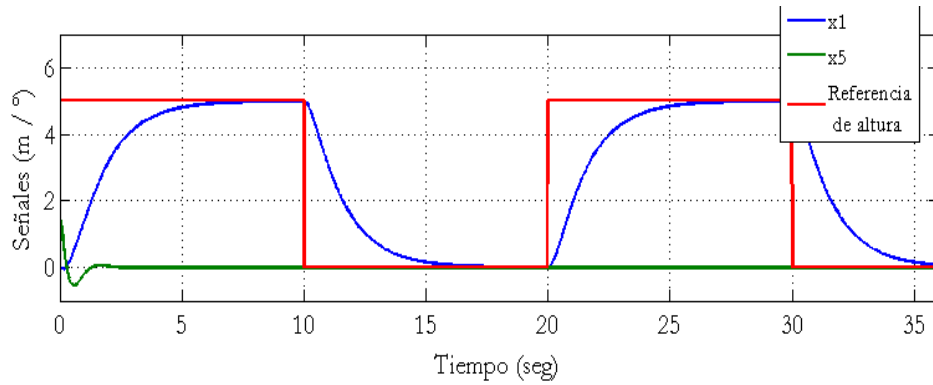


Figura 4.4: Evolución del sistema con un control de retroalimentación de estado.

Para hacer que el bloque del modelo PVTOL (figura 4.2) sea transferible de manera transparente a otros lenguajes de programación, se optó por realizarlo en una *Función-S*, la cual fue programada en lenguaje C. En la figura 4.5, se muestra que existe un nuevo bloque llamado *FunS1PVTOL* el cual representa el modelo matemático del PVTOL. Además se incorporó un bloque de animación (*VR(PVTOL)*) para poder observar el comportamiento del sistema simulado de manera gráfica.

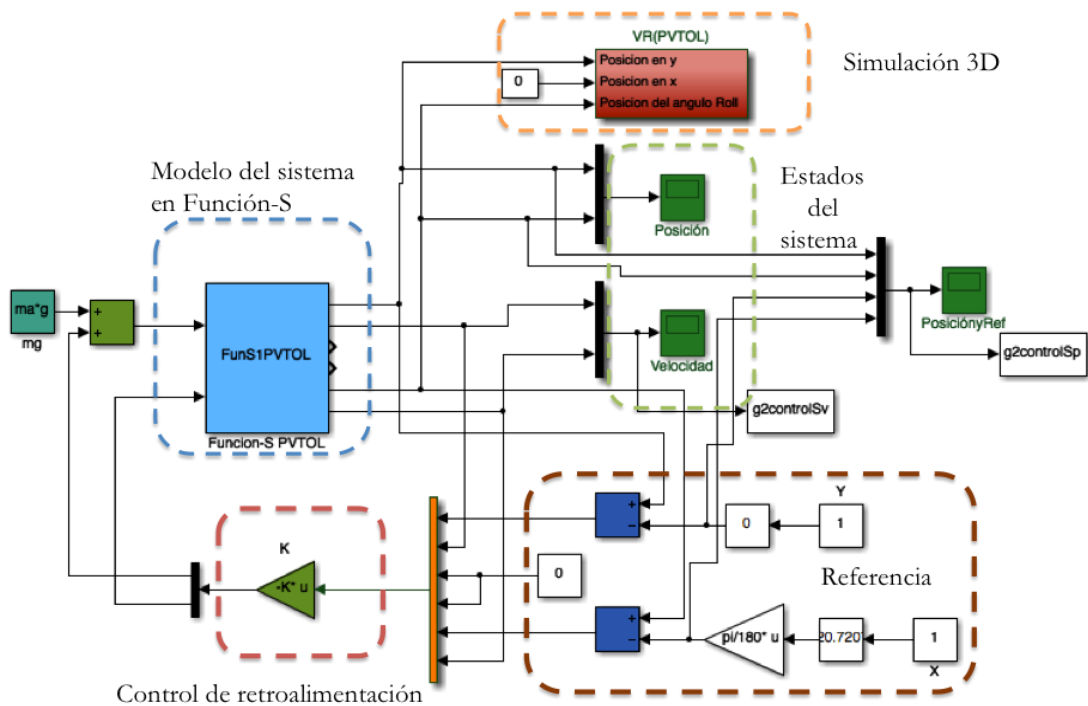


Figura 4.5: Modelo del sistema implementado en Función-S con control de retroalimentación.

Los resultados de las simulaciones en las que se fue variando tanto la referencia de la

altura como la del ángulo de inclinación se muestran en las figuras 4.6 y 4.7. En la primera de ellas se observa la salida de la altura del sistema x_1 y la altura deseada; mientras que en la segunda se muestra el ángulo deseado y el ángulo de salida del sistema x_5 . Es preciso mencionar que los estados x_3 y x_4 son puestos a cero, ya que como se planteo en el desarrollo de la plataforma, el sistema estará limitado a poder variar el ángulo de inclinación y la altura.

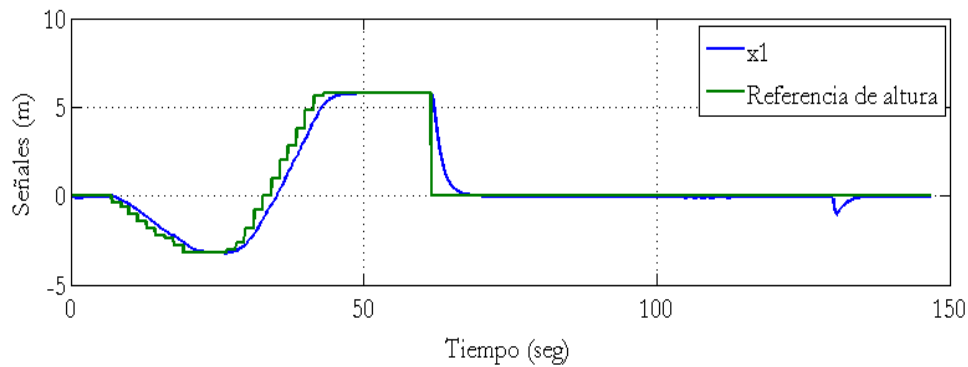


Figura 4.6: Evolución de la altura del sistema con entrada dinámica.

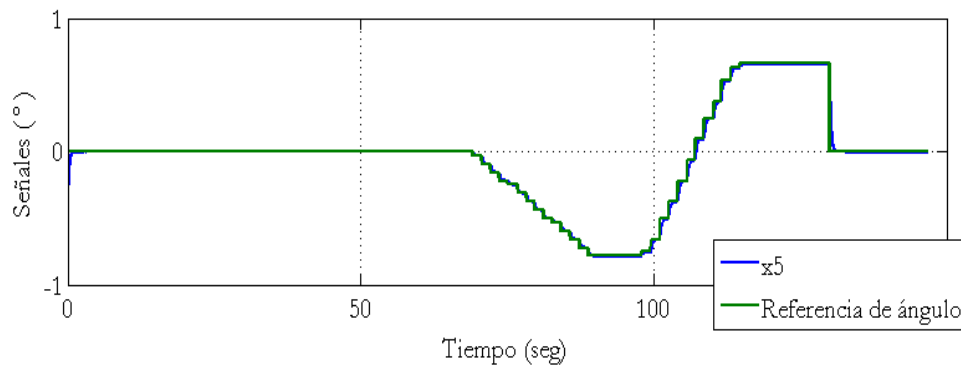


Figura 4.7: Evolución del ángulo del sistema con entrada dinámica.

En la figura 4.8, se puede observar de manera gráfica la respuesta del sistema PVTOL con el algoritmo de control. Las ventanas de *Slider Gain* se utilizaron para ir cambiando tanto el ángulo como altura de referencia del sistema y poder observar el comportamiento.

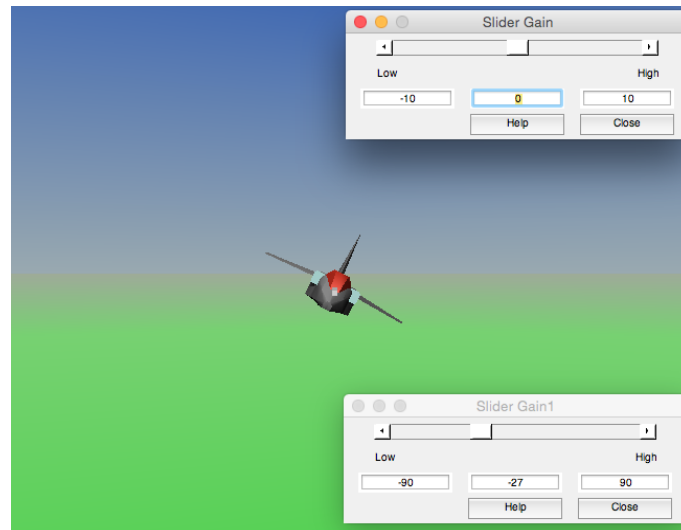


Figura 4.8: Animación empleada en Matlab-Simulink.

Como se puede observar en las figuras 4.3 y 4.5, las señales de salida del bloque de control de retroalimentación son de la forma kx , donde x es el estados del sistema y k es la matriz de control, las cuales representan las magnitudes de la fuerza y el torque. En nuestro sistema real, esta señal se inyecta a los motores Brushless, por lo que es necesario un bloque con una matriz de transformación que convierta las señales de salida kx en señales PWM, para lo cual se diseñó un algoritmo que se muestra en la figura 4.10.

```
CFP1 =
    1.0e-03 *
    0.1250    0.7669
    0.1250   -0.7669
```

Figura 4.9: Matriz CFP1 descrita en el archivo .m.

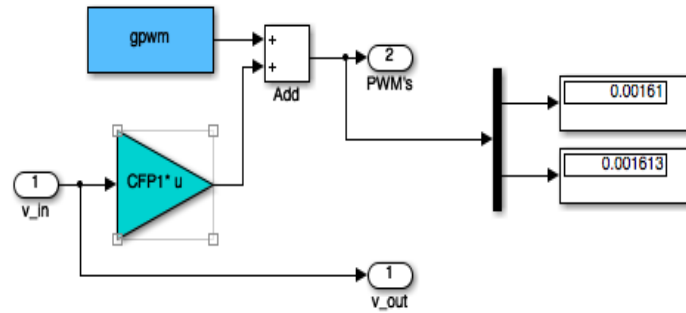


Figura 4.10: Bloques para transformar las señales de control (fuerza y torque) a señales PWM.

Para probar la función de transformación se realizaron varias simulaciones con diferentes entradas de referencia, con lo que se pudo observar el comportamiento de la conversión. La figura 4.11 muestra las señales de empuje y torque; mientras que la figura 4.12 muestra las señales PWM necesarias para ser aplicadas a cada motor, con el fin de llevar al PVTOL a una referencia de altura y ángulo de inclinación.

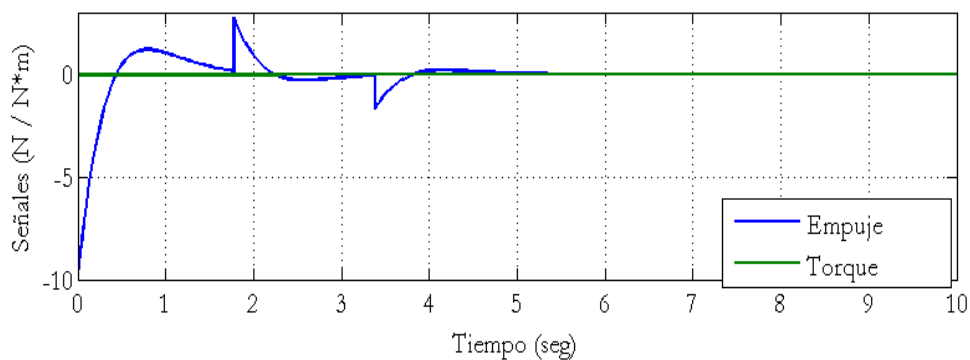


Figura 4.11: Evolucion de las señales de control (fuerza y torque).

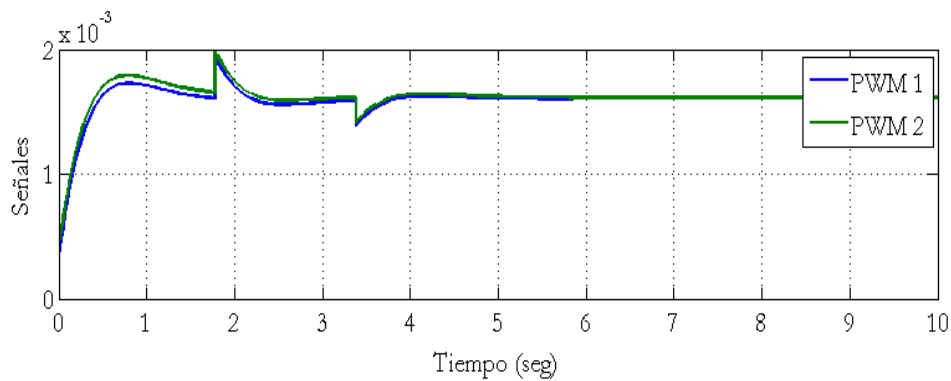


Figura 4.12: Evolución de las señales PWM aplicadas al sistema.

Por último, se tiene la simulación en la que se introduce la función evento. La estructura se encuentra dividida en tres bloques principales, como se muestra en la figura 4.13, donde el primero de ellos es la referencia que se le da al sistema en el eje y , mientras el ángulo debe ser mantenido a 0. En el segundo se tiene la función evento, la cual fue implantada en lenguaje C dentro de una función-S; las entradas a dicho bloque son el estado del sistema y la referencia. En el último bloque se encuentra el modelo matemático del PVTOL.

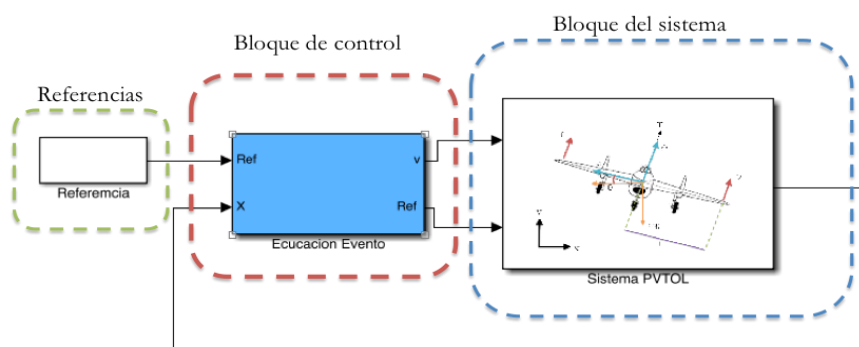


Figura 4.13: Modelo del PVTOL en conjunto con la estrategia de control disparado por eventos.

En el bloque de control se tienen incluidas dos memorias, una para el estado y una para el control, además de una bandera de evento como se muestra en la figura 4.14.

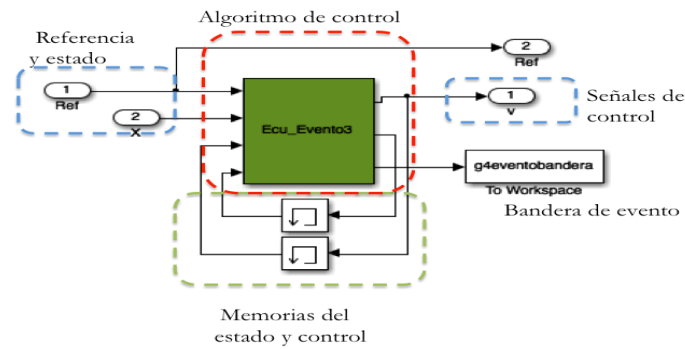


Figura 4.14: Función de evento.

En el bloque del sistema se encuentran incluidos el modelo del PVTOL así como la matriz de transformación como se muestra en la figura 4.15

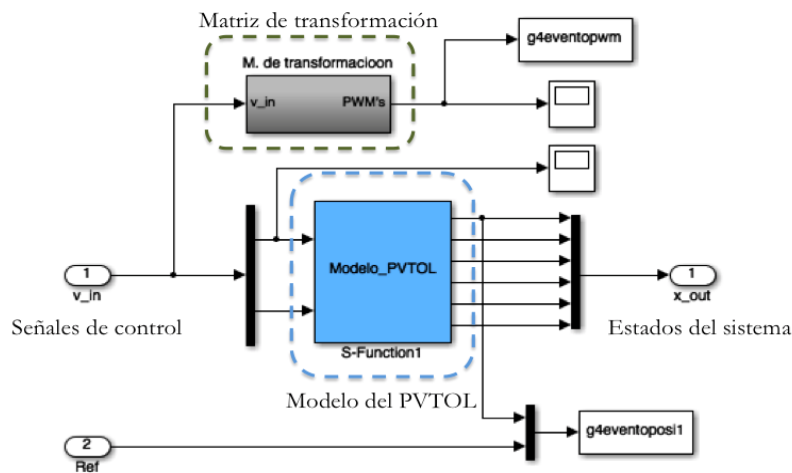


Figura 4.15: Modelo del PVTOL.

Una vez teniendo el diagrama completo del PVTOL, se ingresó una señal de referencia para el control de la altura y el ángulo de inclinación se mantuvo en 0 y se realizó una simulación en un tiempo de 10 segundos. La respuesta obtenida se muestra en la figura 4.16, donde se observa que el sistema comienza con condiciones iniciales diferentes a la referencia y el algoritmo trata de seguirla. Por otro lado, en la figura 4.17 se muestra como las señales de control (PWM) tienen un comportamiento asemejado a una señal discreta debido a que la señal de control no es actualizada en todo momento, es decir, solo se calculó una nueva señal de control cuando ocurriera un evento, como se planteó durante el diseño de la estrategia de control. En la figura 4.18, se graficó la concurrencia del muestreo de control, en la que se asignó el valor de 1 en cada ocasión que ocurrió un

evento y en consecuencia se calculó una nueva señal de control, mientras que el periodo que se mantuvo en 0 indica el tiempo que no fue necesario recalcular el control.

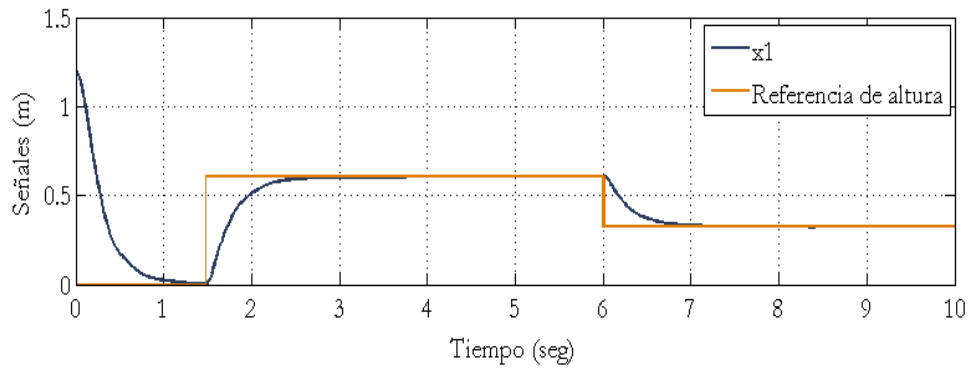


Figura 4.16: Evolución de la altura del sistema (enfoco asintótico).

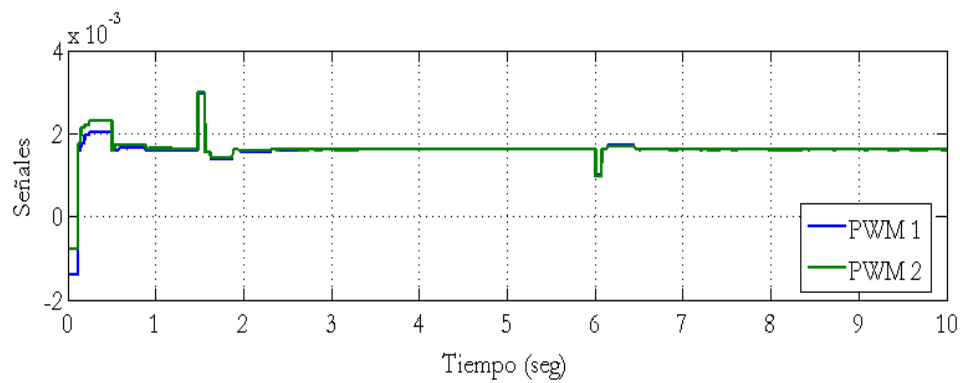


Figura 4.17: Evolución de las acciones de control (enfoco asíncrono).

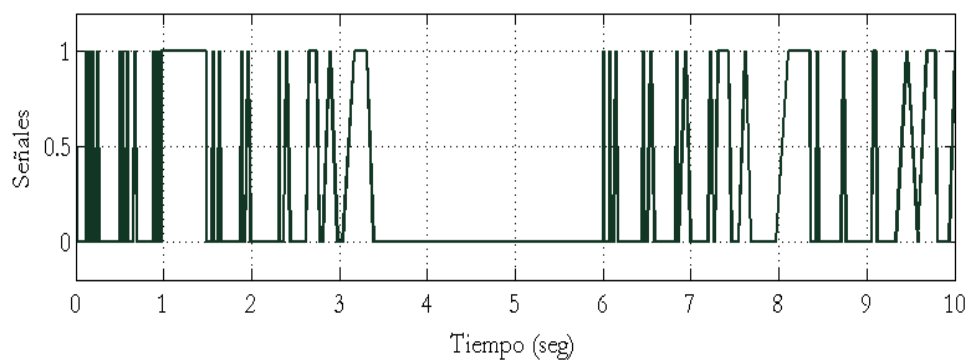


Figura 4.18: Concurrencia de la bandera de eventos.

4.1.2. Resultados en tiempo real

El prototipo del PVTOL con el que se trabajó se muestra en la figura 4.19, donde se puede observar que este se conectó a una computadora local, la que adquiere el estado y aplica señales de control a los motores, estos datos se envían a través de la red a una computadora remota, que calcula y retroalimenta las señales de control.

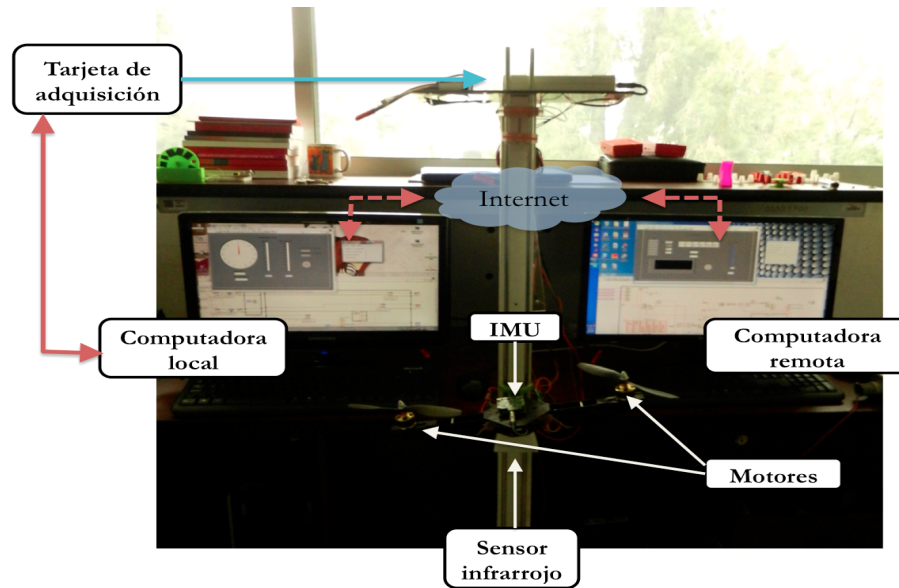


Figura 4.19: Sistema PVTOL implementado en la FCE

Con el fin de ilustrar el funcionamiento del control propuesto, se realizaron dos experimentos. En el primero se modifica la altura de referencia manteniendo el ángulo de inclinación en 0 ($\theta = 0$) y los valores de σ y ε de la función de evento fueron 0.89 y 1 respectivamente. El valor σ determina la frecuencia de eventos y el valor ε , la velocidad de respuesta del algoritmo. En el segundo, se mantiene las condiciones del experimento anterior y se agregan perturbaciones en las diferentes alturas. De estos experimentos se realizaron varios ensayos, de los cuales se reportan dos, con los que se mide la estabilidad y robustez del sistema.

4.1.2.1. Comportamiento del PVTOL ante cambios de altura

En el primer experimento se le dio al PVTOL una referencia en altura de 0.35 m durante los primeros 4 segundos y posteriormente se le cambió a 0.58 m. Los resultados se muestran en la figura 4.20, donde se puede observar que durante el primer segundo el PVTOL alcanza la referencia y se mantiene hasta cuarto. Durante el segundo 4 y 5

el algoritmo trabaja en alcanzar la nueva referencia y se mantiene en ella. También se reporta el comportamiento de la velocidad lineal (figura 4.21), donde se puede observar que el algoritmo trata de mantenerla en 0, sin embargo durante el primer y cuarto segundo esta presenta cambios debido al cambio en la referencia de altura.

Con respecto al ángulo de inclinación, el cual para este experimento fue de 0 grados, la figura 4.22 muestra como se mantiene alrededor de cero prácticamente durante todo el tiempo, con excepción del primer segundo donde se observa el proceso de estabilización. Este comportamiento se corrobora con la velocidad angular (figura 4.23), cuyo comportamiento es similar al del ángulo de inclinación, es decir, alrededor de cero prácticamente durante todo el tiempo, con excepción del primer segundo.

En la figura 4.24, se presenta el comportamiento del empuje calculado, donde se puede observar que durante el primer y cuarto segundos, este presenta cambios significativos que es donde se hacen los cambios de altura; en el resto del tiempo este, se mantiene estable alrededor de 4.2 N para la primera altura y de 4.4 N para la segunda.

Por su parte, el comportamiento del torque calculado se muestra en la figura 4.25, el cual es similar al del ángulo de inclinación y la velocidad angular.

La respuesta de la función de control de Lyapunov (CLF) se presenta en la figura 4.26, donde se observa que esta decrece en el primer y cuarto segundo que es donde se tiene cambio en la referencia de altura. Como la función de evento depende de la CLF, en la figura 4.27, se observa que esta corresponde con los cambios mostrados en la figura 4.26, es decir, en los segundos uno y cuatro se presentan mayores cambios y en los segundos restantes oscila alrededor de cero. Finalmente, la figura 4.28 muestra el comportamiento de la bandera de eventos, la que es uno cuando se recalcularon las acciones de control y cero cuando no. Si el control se hiciera en tiempo continuo, la bandera se hubiera activado 420 veces debido a que el tiempo de muestreo fue de 0.015 segundos y el experimento duro 6.3. En nuestro caso se contabilizaron 260 actualizaciones, lo que representa el 62 % comparado con un control continuo.

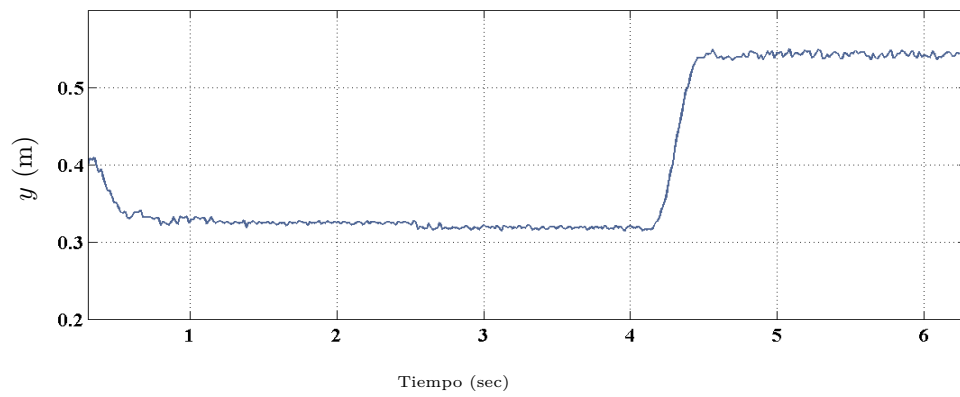


Figura 4.20: Altura del sistema

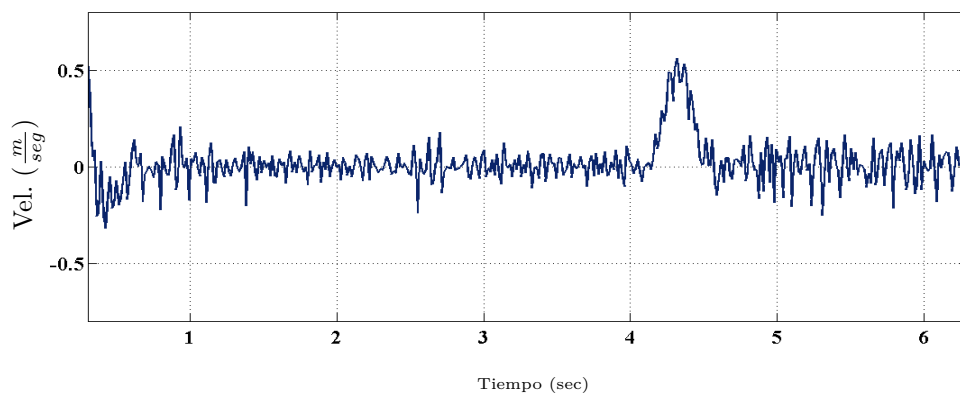


Figura 4.21: Velocidad lineal del sistema

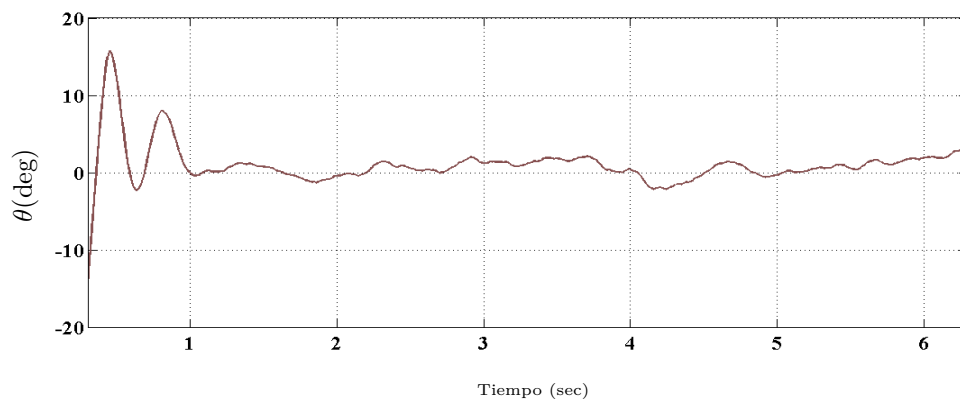


Figura 4.22: Ángulo roll

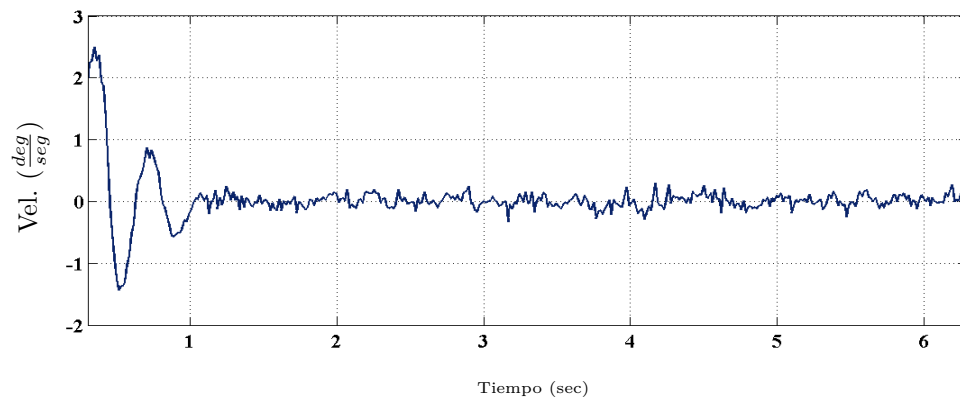


Figura 4.23: Velocidad angular

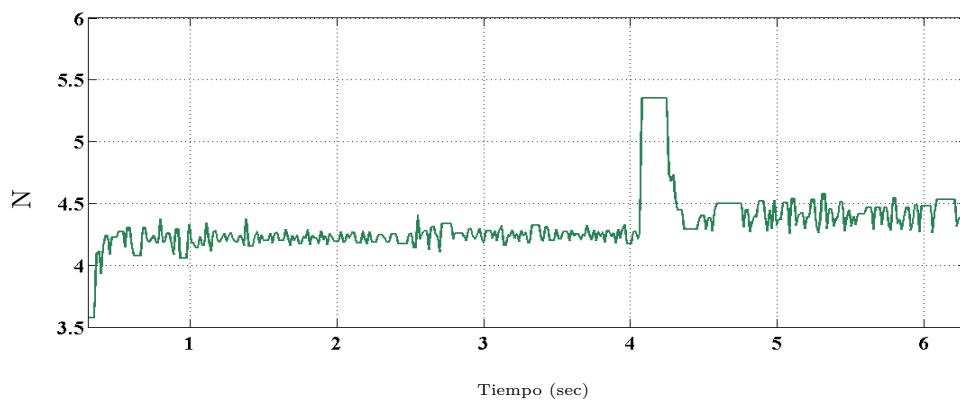


Figura 4.24: Empuje calculado

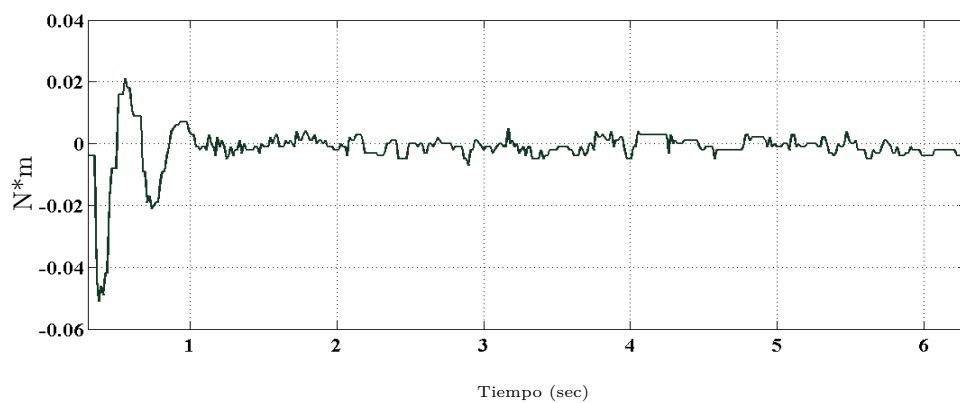


Figura 4.25: Torque calculado

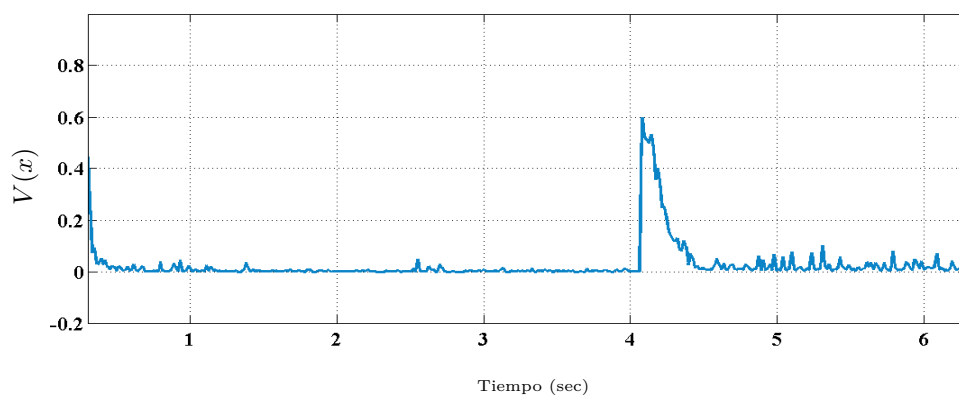


Figura 4.26: CLF

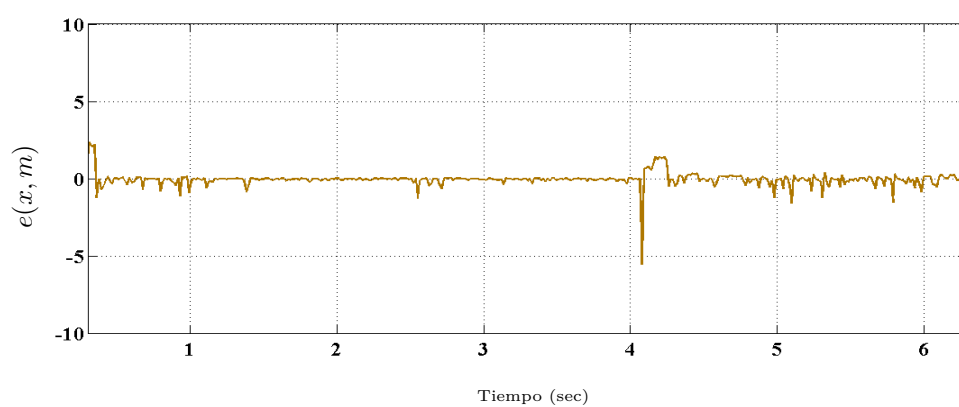


Figura 4.27: Función evento

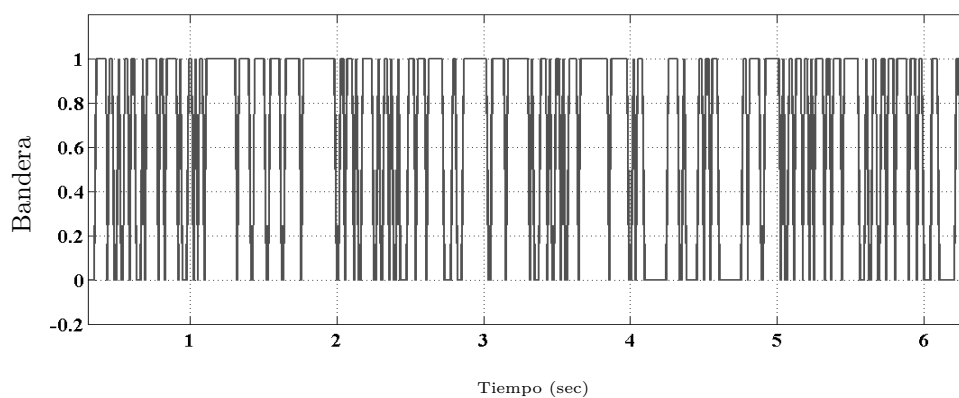


Figura 4.28: Bandera de evento

4.1.2.2. Comportamiento del PVTOL ante cambios de altura y presencia de perturbaciones

Para este segundo experimento, se trabajó con tres referencias de altura, la primera de 0.35 m los primeros cuatro segundos; la segunda de 0.58 m los siguientes cuatro y la última

de 0.4 m los últimos 4 segundos. En cada una de las alturas se aplicaron perturbaciones.

En la figura 4.29, se presenta el comportamiento de la altura del sistema, donde se puede observar que los primeros cuatro segundos esta se mantiene estable alrededor de 0.35 m, lo que nos indica que durante este intervalo pudo haber perturbaciones pero estas no afectaron la altura del sistema. En el intervalo de cuatro a ocho segundos se observa que el sistema trata de estabilizarse alrededor de 0.58 m, sin embargo se puede observar la presencia de dos perturbaciones al parámetro de la altura alrededor de los segundos 5 y 7. Los últimos cuatro segundos tienen un comportamiento similar a los primeros cuatro, estabilizándose alrededor de 0.4 m, es decir, en este periodo no se nota la presencia de perturbaciones en la altura. El comportamiento de la velocidad lineal (figura 4.30), es congruente con el de la altura, ya que éste se mantiene alrededor de cero cuando no existen cambios o perturbaciones.

Por otro lado, la figura 4.31 muestra el comportamiento del ángulo de inclinación con respecto al tiempo, donde se puede observar que en los primeros cuatro segundos se presentan dos cambios significativos en este parámetro, lo que indica que hubo dos perturbaciones. Cabe resaltar que estas perturbaciones no se notaron en la gráfica de la altura, lo que nos indica que las perturbaciones solo afectaron el ángulo y la altura se mantuvo relativamente constante. En el periodo entre cuatro y ocho segundos se presentan otras dos perturbaciones, que a diferencia de las anteriores, éstas también tuvieron afectación en la altura como se observo en la figura 4.29. En los últimos cuatro segundos se observan dos perturbaciones, las cuales tiene un comportamiento similar a las presentes en los primeros cuatro segundos. El comportamiento de la velocidad angular mostrado en la figura 4.32, corrobora el del ángulo, ya que presenta mayor variación alrededor de los instantes en donde ocurren perturbaciones que afectan el ángulo de inclinación.

La figura 4.33 presenta el comportamiento del empuje calculado, donde se pueden observar cambios significativos alrededor de los instantes cuando se perturba la altura o cuando se hace un cambio en la referencia de altura deseada.

Por su parte, el comportamiento del torque calculado (figura 4.34) es acorde a la presencia de perturbaciones en el ángulo de inclinación, es decir, éste presenta variaciones significativas al rededor de los instantes donde aparecen perturbaciones.

Las observaciones realizadas al comportamiento de las funciones de control de Lyapunov, función y bandera de evento del experimento anterior se aplican directamente a las figuras 4.35, 4.36 y 4.37. Para este caso se contabilizaron 480 actualizaciones en 12 segundos que corresponden al 60 % respecto a un control continuo donde se debieron contar 800 considerando un tiempo de muestreo de 0.015 segundos.

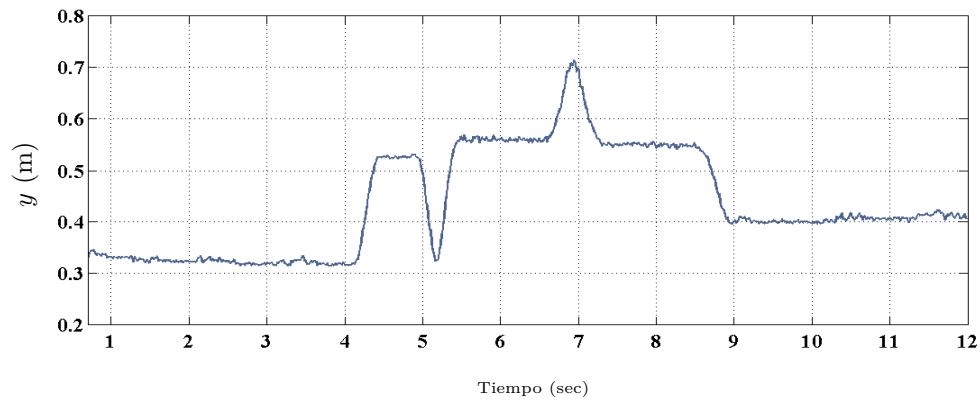


Figura 4.29: Altura del sistema

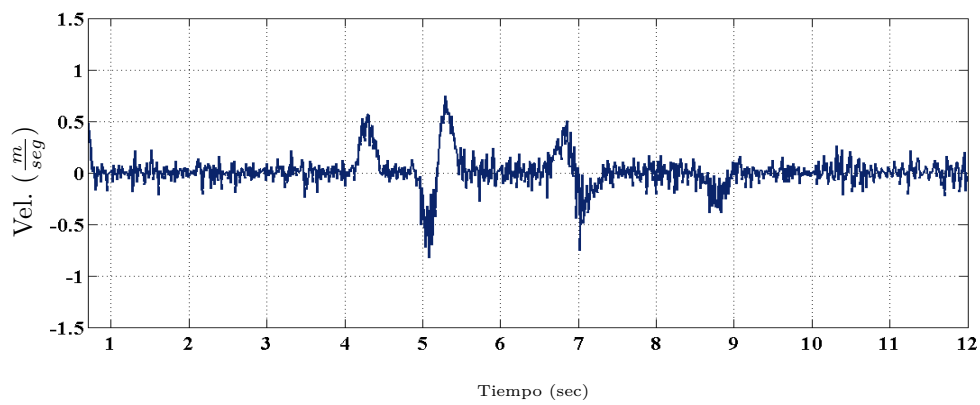


Figura 4.30: Velocidad lineal del sistema

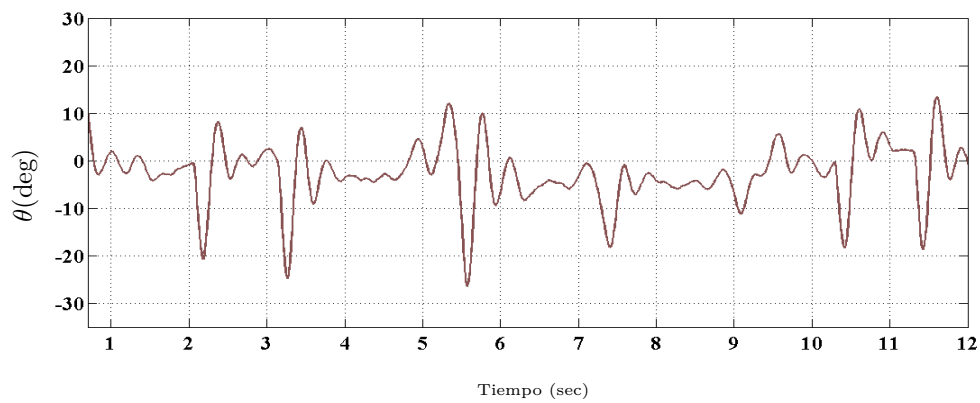


Figura 4.31: Ángulo de inclinación

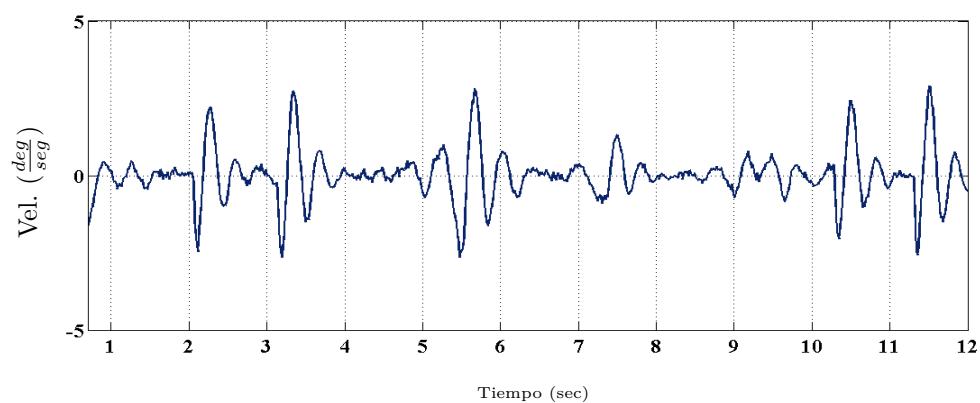


Figura 4.32: Velocidad angular

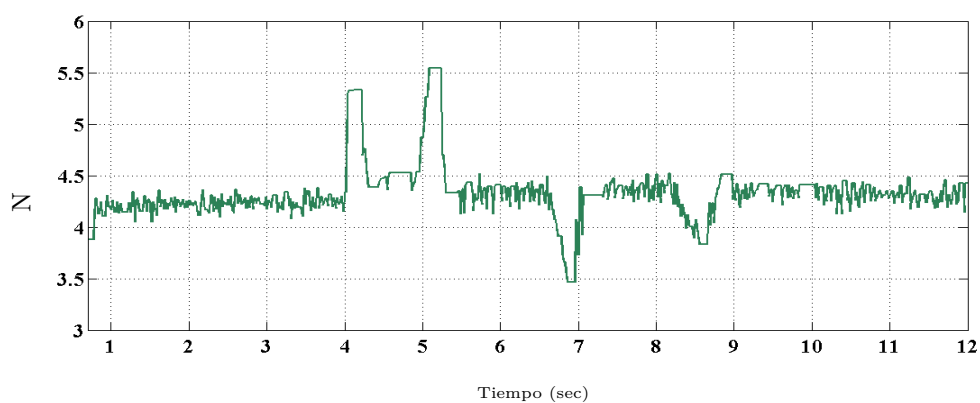


Figura 4.33: Empuje calculado

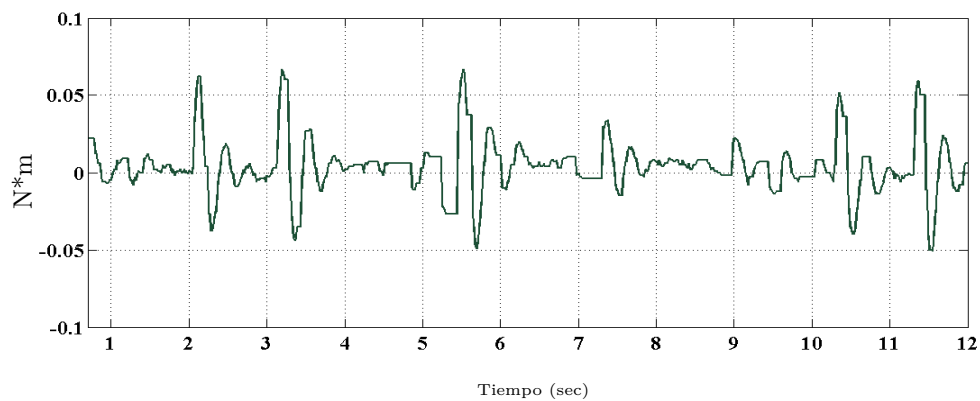


Figura 4.34: Torque calculado

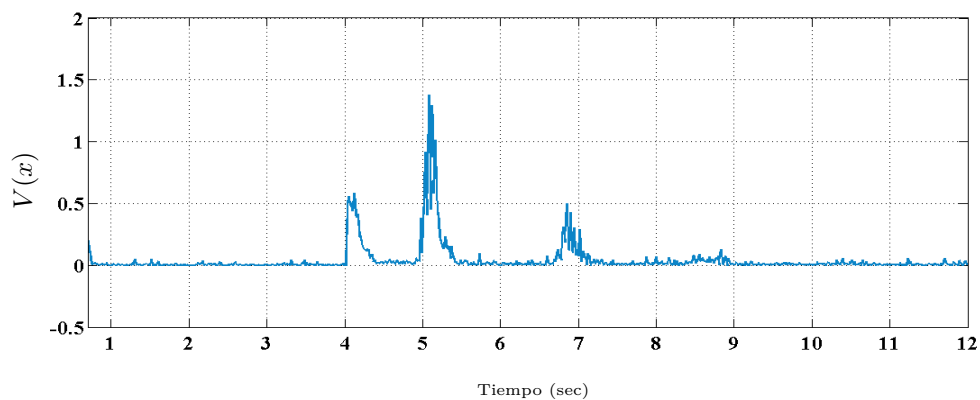


Figura 4.35: CLF

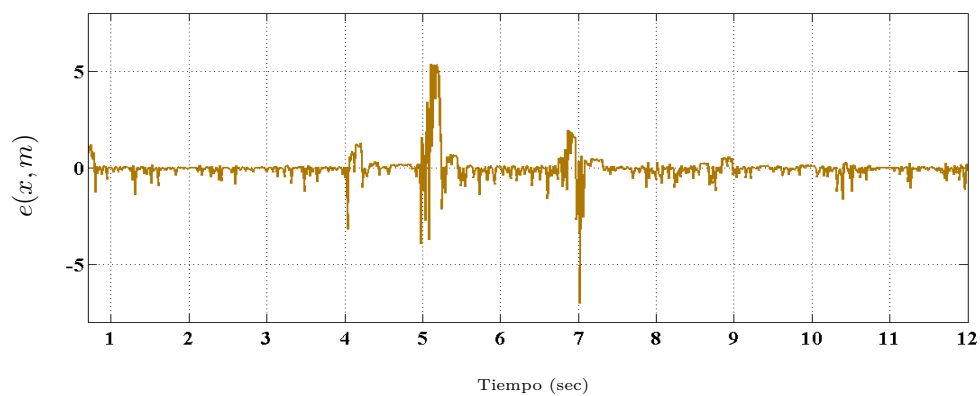


Figura 4.36: Función evento

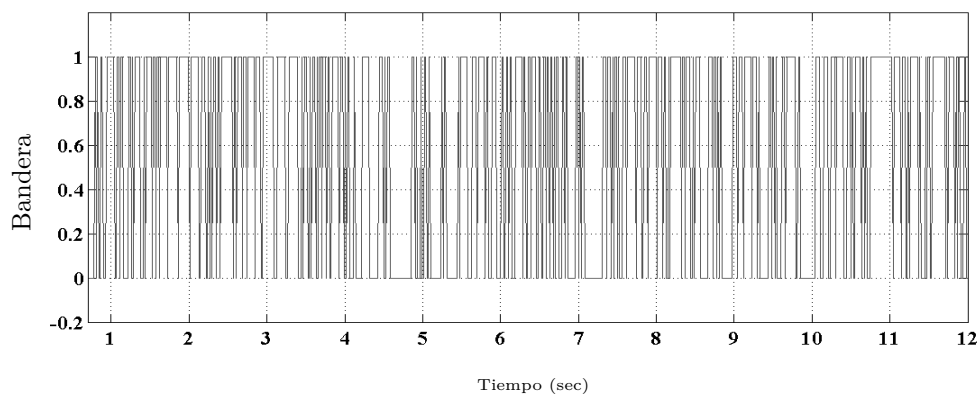


Figura 4.37: Bandera de evento

Conclusiones

Tomando en cuenta los objetivos planteados para esta tesis (sección), en este capítulo se presentan los resultados obtenidos en el trabajo realizado. Primeramente se enlistan las conclusiones respecto al diseño de la estrategia de control; posteriormente las correspondientes a la implementación del PVTOL; enseguida se presentan las ponencias y publicaciones resultado de este trabajo para finalmente culminar con el trabajo futuro.

Con respecto al diseño de la estrategia de control se obtuvo:

- El modelo matemático del PVTOL.
- El modelo linealizado del PVTOL.
- La función de evento y la de retroalimentación para la estrategia de control disparada por eventos.

Con respecto a la implementación se realizó:

- Se adecuó un VANT - Quadrirotor para que funcionara como PVTOL.
- Se diseñó y construyó la estructura para el PVTOL, la cual permitió limitar el desplazamiento en altura de 20 a 80 cm y un movimiento angular de -30 a 30 grados.
- Se diseñaron e implementaron las interfaces visuales tanto para la estación local como para la remota.
- Se implementó la estrategia de control disparada por eventos en la estación remota.
- Se realizó la transferencia de datos entre la computadora local y la remota por medio de Internet.

Con respecto a los experimentos realizados, tanto en simulación como en tiempo real se obtuvo:

- La estrategia de control logra que el PVTOL alcance y mantenga una referencia de altura, lo que se pudo observar en el comportamiento de la altura, velocidad lineal, empuje calculado, función de control de Lyapunov y función de evento del sistema, todos ellos respecto al tiempo.
- La estrategia de control logra que el PVTOL mantenga un ángulo de inclinación alrededor de cero grados, lo que se pudo observar en el comportamiento del ángulo de inclinación, velocidad angular, torque calculado, función de control de Lyapunov y función de evento del sistema, todos ellos respecto al tiempo.
- La estrategia de control logra que el PVTOL alcance y mantenga la altura deseada, así como el ángulo de inclinación aun en presencia de perturbaciones.
- La estrategia de control propuesta permitió reducir hasta en un 40 %, el número de actualizaciones de las señales de control aplicadas al PVTOL, cantidad obtenida mediante el comportamiento de la bandera de evento respecto al tiempo.

Con respecto a las ponencias y publicaciones se tiene:

- A. Vega-Alonzo, J. M. Sanzon-Parra, J. J. Téllez-Guzmán, J. F. Guerrero-Castellanos y S. Sánchez-Urrieta, *Network Control of a PVTOL system by means of an event-triggered approach*, 10th International Congresses Technological Trends in Computing, Octubre 2014, Ciudad de México, *Ponente*
- Argel Vega-Alonzo, Jair E. Sierra-Estanislao, J. Fermi Guerrero-Castellanos, Gerardo Mino-Aguilar y Victor R. González-Díaz, *Estabilización a través de red de un sistema PVTOL mediante un control LQR disparado por eventos*, Congreso Nacional de Control Automático, Octubre 2015, Cuernavaca, Morelos, *Ponente*

Con respecto al trabajo a futuro se tiene:

- Comparar el desempeño del sistema cuando la transmisión de datos entre la computadora local y remota, se hace por medio de Internet respecto a un sistema cableado.

- Analizar el comportamiento del sistema ante perturbaciones en la red.
- Analizar el efecto del trafico de la red en el desempeño del sistema.
- Aplicar la estrategia de control propuesta a un VANT.
- Aplicar otra estrategia de control a la estructura PVTOL con la que se trabajo.

De acuerdo a los objetivos establecidos al inicio de éste trabajo de tesis y con los resultados obtenidos durante el proceso, se puede decir que se han cumplido satisfactoriamente los objetivos planteados.

Bibliografía

- [1] C Pillajo and Sierre J. E. *Importance of control study for cyber-physucal system*. PhD thesis, 2011.
- [2] Edward Ashford Lee and Sanjit Arunkumar Seshia. *Introduction to embedded systems: A cyber-physical systems approach*. Lee & Seshia, 2011.
- [3] R. Hernández. *Introduccion a los sistemas de control*. Pearson, 2010.
- [4] H. Madrigal. *Implementación de un sistema AHRS basado en un Observador No Lineal*. PhD thesis, 2011.
- [5] V. Casanova Calvo. *Sistema de control basado en red. Modelado y diseño de estructuras de control*. PhD thesis, 2005.
- [6] Christian G Quintero and José Oñate López. *Control automático aplicado. Prácticas de laboratorio*. Universidad del Norte.
- [7] JJ Téllez-Guzmán, Fermi Guerrero Castellanos, Sylvain Durand, Nicolas Marchand, and R Lucio-Maya. Event-based lqr control for attitude stabilization of a quadrotor. In *15th IFAC Latinamerican Control Conference (CLCA'12)*, pages n–c, 2012.
- [8] John C Chandy. Challenges in the design of cyber-physical systems desafíos en el diseño de sistemas cyber-físicos. *Revista Ingenierias USBmed*, 1(1):6–14, 2015.
- [9] Kenzo Nonami, Farid Kendoul, Satoshi Suzuki, Wei Wang, and Daisuke Nakazawa. *Autonomous Flying Robots: Unmanned Aerial Vehicles and Micro Aerial Vehicles*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [10] Neil HE Weste and Kamran Eshraghian. Principles of cmos vlsi design: a systems perspective. *NASA STI/Recon Technical Report A*, 85:47028, 1985.
- [11] Gabriel M Rebeiz. *RF MEMS: theory, design, and technology*. John Wiley & Sons, 2004.
- [12] VB Peter. Rpas (remotely piloted aircraft systems) yearbook 2013: The global perspective, 2013.

- [13] Feng Lin, William Zhang, and Robert D Brandt. Robust hovering control of a pvtol aircraft. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 7(3):343–351, 1999.
- [14] Lorenzo Marconi, Alberto Isidori, and Andrea Serrani. Autonomous vertical landing on an oscillating platform: an internal-model based approach. *Automatica*, 38(1):21–32, 2002.
- [15] Rogelio Lozano, Pedro Castillo, and Alejandro Dzul. Global stabilization of the pvtol: real-time application to a mini-aircraft. *International Journal of Control*, 77(8):735–740, 2004.
- [16] Rohin Wood and Ben Cazzolato. An alternative nonlinear control law for the global stabilization of the pvtol vehicle. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 52(7):1282–1287, 2007.
- [17] Huawen Ye, Hong Wang, and Haibo Wang. Stabilization of a pvtol aircraft and an inertia wheel pendulum using saturation technique. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 15(6):1143–1150, 2007.
- [18] Karl Johan Åström and Richard M. Murray. *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*. Princeton University Press, Princeton, NJ, USA, 2008.
- [19] Dong Yue, Qing-Long Han, and Chen Peng. State feedback controller design of networked control systems. In *Control Applications, 2004. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on*, volume 1, pages 242–247 Vol.1, Sept 2004.
- [20] Mo-Yuen Chow and Yodyium Tipsuwan. Network-based control systems: a tutorial. In *Industrial Electronics Society, 2001. IECON'01. The 27th Annual Conference of the IEEE*, volume 3, pages 1593–1602. IEEE, 2001.
- [21] Kang B Lee and Richard D Schneeman. Internet-based distributed measurement and control applications. *Instrumentation & Measurement Magazine, IEEE*, 2(2):23–27, 1999.
- [22] Salvatore Monaco and Dorothée Normand-Cyrot. Advanced tools for nonlinear sampled-data systems analysis and control. *European Journal of Control*, 13(2):221–241, 2007.
- [23] Karl J. Åström and Björn Wittenmark. *Computer-controlled Systems (3rd Ed.)*. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA, 1997.
- [24] J. Fermi Guerrero-Castellanos, Nicolas Marchand, Ahmad Hably, Suzanne Lesecq, and Jérôme Delamare. Bounded attitude control of rigid bodies: Real-time

- experimentation to a quadrotor mini-helicopter. *Control Engineering Practice*, 19(8):790–797, 2011.
- [25] Karl Johan Åström and Bo Bernhardsson. Comparison of riemann and lebesgue sampling for first order stochastic systems. In *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, 2002*, volume 2, pages 2011–2016. IEEE, 2002.
- [26] Hans Van Gageldonk, Kees Van Berkel, Ad Peeters, Daniel Baumann, Daniel Gloor, and Gerhard Stegmann. An asynchronous low-power 80c51 microcontroller. In *Advanced Research in Asynchronous Circuits and Systems, 1998. Proceedings. 1998 Fourth International Symposium on*, pages 96–107. IEEE, 1998.
- [27] Kees Van Berkel, Ronan Burgess, Joep Kessels, Marly Roncken, Frits Schalijs, and Ad Peeters. Asynchronous circuits for low power: a dcc error corrector. *IEEE Design & Test of Computers*, (2):22–32, 1994.
- [28] Fabien Aeschlimann, Emmanuel Allier, Laurent Fesquet, and Marc Renaudin. Asynchronous fir filters: towards a new digital processing chain. In *Asynchronous Circuits and Systems, 2004. Proceedings. 10th International Symposium on*, pages 198–206. IEEE, 2004.
- [29] Brigitte Bidégaray-Fesquet and Laurent Fesquet. A fully nonuniform approach to fir filtering. In *SAMPTA'09-International Conference on Sampling Theory and Applications*, pages 129–1, 2009.
- [30] Karl-Erik Årzén. A simple event-based PID controller. In *Preprints 14th World Congress of IFAC*, Beijing, P.R. China, January 1999.
- [31] J.H. Sandee, W. P. M. H. Heemels, and PPJ Van den Bosch. Event-driven control as an opportunity in the multidisciplinary development of embedded controllers. In *American Control Conference, 2005. Proceedings of the 2005*, pages 1776–1781. IEEE, 2005.
- [32] S. Durand and N. Marchand. Further results on event-based pid controller. In *Control Conference (ECC), 2009 European*, pages 1979–1984, Aug 2009.
- [33] J Sánchez, M Guarnes, S Dormido, and A Visioli. Comparative study of event-based control strategies: An experimental approach on a simple tank. In *Control Conference (ECC), 2009 European*, pages 1973–1978. IEEE, 2009.
- [34] José Sánchez, Miguel Ángel Guarnes, and Sebastián Dormido. On the application of different event-based sampling strategies to the control of a simple industrial process. *Sensors*, 9(9):6795–6818, 2009.

- [35] Carlos Canudas De Wit, Jonathan Jaglin, and Cyrille Siclet. Energy-aware 3-level coding and control co-design for sensor network systems. In *16th IEEE International Conference on Control Applications, CCA*, pages [http–www](http://www), 2007.
- [36] WPMH Heemels, JH Sandee, and PPJ Van Den Bosch. Analysis of event-driven controllers for linear systems. *International journal of control*, 81(4):571–590, 2008.
- [37] Jan Lunze and Daniel Lehmann. A state-feedback approach to event-based control. *Automatica*, 46(1):211–215, 2010.
- [38] MCF Donkers and WPMH Heemels. Output-based event-triggered control with guaranteed $\mathcal{L}_\infty$ -gain and improved event-triggering. In *Decision and Control (CDC), 2010 49th IEEE Conference on*, pages 3246–3251. IEEE, 2010.
- [39] Alina Eqtami, Dimos V Dimarogonas, and Kostas J Kyriakopoulos. Event-triggered control for discrete-time systems. In *American Control Conference (ACC), 2010*, pages 4719–4724. IEEE, 2010.
- [40] Manuel Mazo Jr, Adolfo Anta, and Paulo Tabuada. On self-triggered control for linear systems: Guarantees and complexity. In *Control Conference (ECC), 2009 European*, pages 3767–3772. IEEE, 2009.
- [41] Manel Velasco, Pau Martí, and Enrico Bini. On lyapunov sampling for event-driven controllers. In *Decision and Control, 2009 held jointly with the 2009 28th Chinese Control Conference. CDC/CCC 2009. Proceedings of the 48th IEEE Conference on*, pages 6238–6243. IEEE, 2009.
- [42] Sylvain Durand, Nicolas Marchand, and Jose Fermi Guerrero Castellanos. Simple Lyapunov Sampling for Event-Driven Control. In *18th IFAC World Congress (IFAC WC 2011)*, page 7 p., Milan, Italy, August 2011.
- [43] Nicolas Marchand, Sylvain Durand, and Jose Fermi Guerrero Castellanos. A general formula for the stabilization of event-based controlled systems. In *Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC), 2011 50th IEEE Conference on*, pages 8199–8204. IEEE, 2011.
- [44] JF Guerrero-Castellanos, JJ Téllez-Guzmán, Sylvain Durand, Nicolas Marchand, JU Alvarez-Muñoz, and Victor R Gonzalez-Diaz. Attitude stabilization of a quadrotor by means of event-triggered nonlinear control. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 73(1-4):123–135, 2014.
- [45] JF Guerrero-Castellanos, JJ Téllez-Guzmán, S Durand, N Marchand, and JU Alvarez-Munoz. Event-triggered nonlinear control for attitude stabilization of a

- quadrotor. In *Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2013 International Conference on*, pages 584–591. IEEE, 2013.
- [46] Nicolas Marchand, Sylvain Durand, and J. F. Guerrero-Castellanos. A general formula for event-based stabilization of nonlinear systems. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 58(5):1332–1337, 2013.
- [47] Paulo Tabuada. Event-triggered real-time scheduling of stabilizing control tasks. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 52(9):1680–1685, 2007.
- [48] Adolfo Anta and Paulo Tabuada. To sample or not to sample: Self-triggered control for nonlinear systems. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 55(9):2030–2042, 2010.

Apéndice A

Códigos fuentes de las interfaces

A continuación se describen los códigos fuentes de las interfaces implementadas. Por códigos fuente nos referimos al conjunto de instrucciones escritas en un lenguaje de programación hechas para ejecutar procesos específico mediante algún software. Para este trabajo en particular se utilizó Labview. De manera que los códigos se refieren a los diagramas a bloques, donde son programados a través de bloques.

Los diagramas a bloques que se describen son los implementados en la computadora local y computadora remota respectivamente. Se comienza con el código fuente de la computadora local que contiene la parte de la planta del sistema. La interfaz perteneciente al bloque de la planta tiene como propósito realizar la adquisición, procesamiento y envío del estado del sistema. La computadora local es la que tiene interacción directa con el sistema, puesto que las mediciones de los sensores son adquiridas por dicha interfaz; así como las señales de control que son aplicadas mediante la misma. Las primeras preparaciones que se realizan son las configuraciones e inicializaciones para conseguir los datos provenientes de los sensores y habilitar las salidas para transmitir las señales de control a los motores. Para el caso del control y la recepción del sensor infrarrojo se utilizó como intermediario la tarjeta de adquisición NI- 6211, de manera que los bloques usados pertenecen a la librería de la tarjeta.

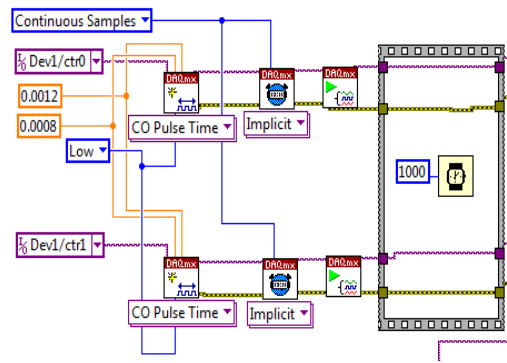


Figura A.1: Configuraciones para las señales de salida.

En la figura A.1, se muestra la configuración empleada para definir señales de salida, a las que se modifica el ancho de pulso, el que esta relacionado con la velocidad del motor, por lo que se fijan sus limites tomando el rango del motor dando como resultado de un mínimo de 0.0008 y un máximo de 0.0012. De la misma manera se emplean bloques pertenecientes a la tarjeta para el sensor infrarrojo. Debido a que la señal que proporciona el sensor es analógica, se usa una entrada del mismo tipo en la tarjeta. Su configuración requiere del pin asociado a la entrada y establecer su rango, en nuestro caso de 0 a 5 volts (figura A.2).

Otro elemento que se inicializó fue un paro de emergencia, dicho componentes no es mencionado durante el diseño ni la implementación, pero fue incluido para mantener un nivel de seguridad tanto para el usuario como para el sistema. El paro de emergencia se refiere a un dispositivo de la que se obtiene una señal digital, por lo tanto se uso bloques para definir la entrada como digital como se muestra en la figura A.3. Por otro lado, la unidad de medición inercial se conecto mediante un cable serial empleando el protocolo RS-232, en consecuencia su inicialización difiere en cuanto al tipo de bloques empleados. Labview cuenta con un bloques específico para la lectura del modelo de IMU con la que se trabajó. Dentro de las configuraciones requeridas esta la designación del puerto COM asignado y los baudios como se muestra en la figura A.4.

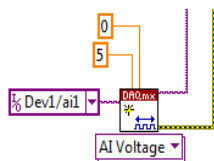


Figura A.2: Sensor infrarrojo.

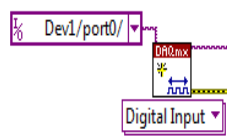


Figura A.3: Paro de emergencia.

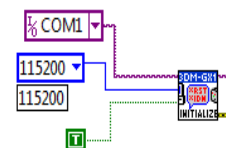


Figura A.4: IMU.

Figura A.5: Configuraciones e inicializaciones.

Además de realizar las configuraciones para los sensores y actuadores, es necesario hacer otro tipo de configuraciones, sin embargo estas no están orientadas a un dispositivo sino a la comunicación que se empleó para transmitir tanto el estado como las señales de control. La herramienta *DataSocket* fue empleada para permitir la comunicación entre el bloque de la planta y el del controlador. DataSocket es definida como una tecnología de programación de Internet basada en TCP/IP, el cual simplifica el intercambio de datos entre computadoras y/o aplicaciones. Su creación también pretende eliminar las complejidades para realizar intercambios de datos en un red en tiempo real, para aplicaciones de medición y automatización.

La manera en que fue utilizado el DataSocket, fue declarando unas variables con la capacidad leer o escribir según sea el caso en cada interfaz. En la interfaz local se manda el estado, de modo que se declaran las variables x_1 , x_2 , x_5 y x_6 , que representan altura, velocidad lineal, ángulo roll y velocidad angular respectivamente. Dichas variables deben ser enviadas, por ello se relacionan con bloques de escritura pertenecientes a comunicación. Dado que se quiere recibir las señales de control de la interfaz remota, se declaran las variables De(Motor derecho), Iz(Motor Izquierdo), también se obtiene la referencia de altura manipulada por el usuario. Estas últimas variables son recibidas, por lo tanto se emplean bloques de lectura. En la figura A.6 se presenta la declaración de las variables tanto para el envío como la recepción, las cuatro primeras son el estado, mientras que las otras tres son la altura y las señales de control.

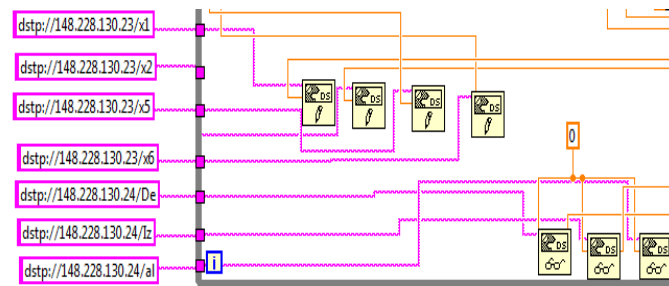


Figura A.6: Configuraciones de las variables para comunicación.

Luego de las configuraciones y declaraciones tanto para salidas como entradas, nos centramos en la manera de adquirir y procesar cada dato. Para obtener el ángulo y la velocidad angular del PVTOL se empleó el bloque de lectura 3DM-GX1, mientras que para el paro de emergencia se aplicó el bloque de lectura digital de la tarjeta. El caso del sensor infrarrojo fue diferente, debido a que se trata de una señal analógica.

El proceso que se siguió para medir la altura del sistema fue a través de la linealización de la curva característica del voltaje de salida del sensor, dicha curva fue proporcionada por

el fabricante del sensor. La linealización se realizó mediante una ecuación, como resultado se obtuvo una aproximación de la altura. El reto siguiente fue estimar la velocidad lineal a falta de un sensor que midiera. En la sección 3.6.2 se explica que tanto la linealización para obtener la altura como la estimación de la velocidad lineal se realizaron de manera matemática. Por su parte, el método para la velocidad lineal fue la implementación de una derivada filtrada. Tanto la ecuación como la derivada filtrada se implementaron en bloques *Formule Node* como se indica en la figura A.7.

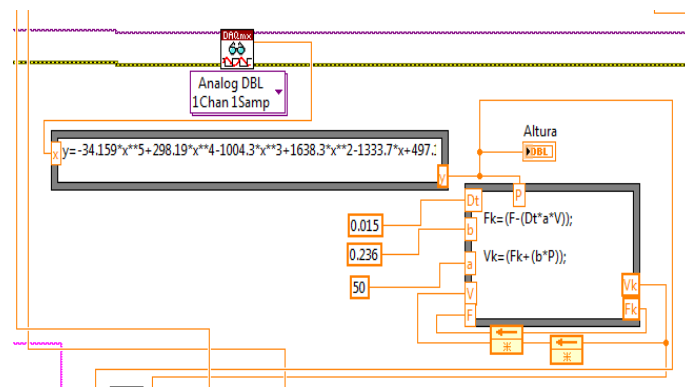


Figura A.7: Adquisición y procesamiento de la altura y velocidad lineal.

Al adquirir los cuatro estados del sistema que se requieren, se procede a enviarlos a través de Internet mediante los bloques de escritura del *DataSocket*. El bloque del controlador contiene la interfaz remota, siendo esta la que recibe el estado para la aplicación de la estrategia de control disparada por eventos. De la computadora remota se envían las señales de control, por ello se emplean tres bloques de lectura: dos para las señales de control y una para la altura deseada, ver figura A.6. Recibiendo las señales de control en la interfaz local, pasan por una función de saturación implementada en un bloque *Case Structure*, el mismo bloque es empleado para realizar la tarea del *interruptor*, puesto que esta regido por la entrada del paro de emergencia. Por último, las señales de control son aplicadas a través de la tarjeta de adquisición usando bloques que modifican el ancho del pulso, creando la señal PWM que requieren los actuadores. En la figura A.8, se muestran los bloques que aplican las señales de control al sistema.

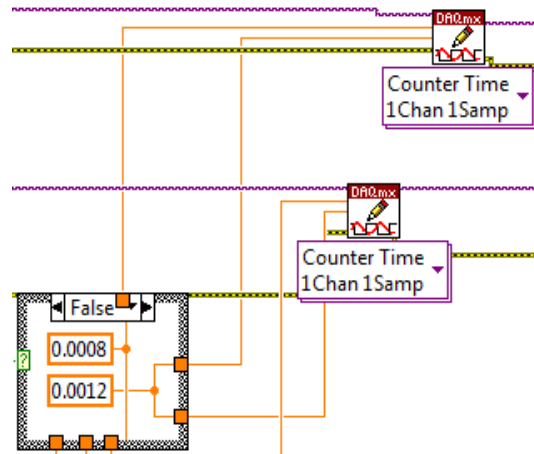


Figura A.8: Bloques de salida para las señales de control.

En la figura A.9 se presentan todas las partes descritas de la computadora local. Como se puede observar la implementación se realizó de manera ordenada para que se tuviera la opción de analizarlo y entenderlo. Por otro lado se tiene el bloque del controlador, el que tiene como principal diferencia que no incorpora ningún dispositivo de entrada ni salida. El bloque está conformado por la implementación del algoritmo de control disparado por eventos, así como de la matriz de transformación para adecuar las acciones de control. Para comenzar se describirán las configuraciones que se realizaron. Como la computadora remota no contiene dispositivos de ningún tipo, las entradas que se tienen provienen del bloque de la planta enviados mediante Internet. La manera de recibir el estado del sistema es igual que en la interfaz local, se inicializan las variables tanto de lectura como escritura como se muestra en las A.10 y A.11.

El cambio en el empleo de las variables y los bloques del DataShocket de las dos interfaces radica en que mientras en la interfaz local se utilizan bloques para escribir y enviar el estado; en la interfaz remota se usan bloques de lectura para recibir y obtener el estado del sistema.

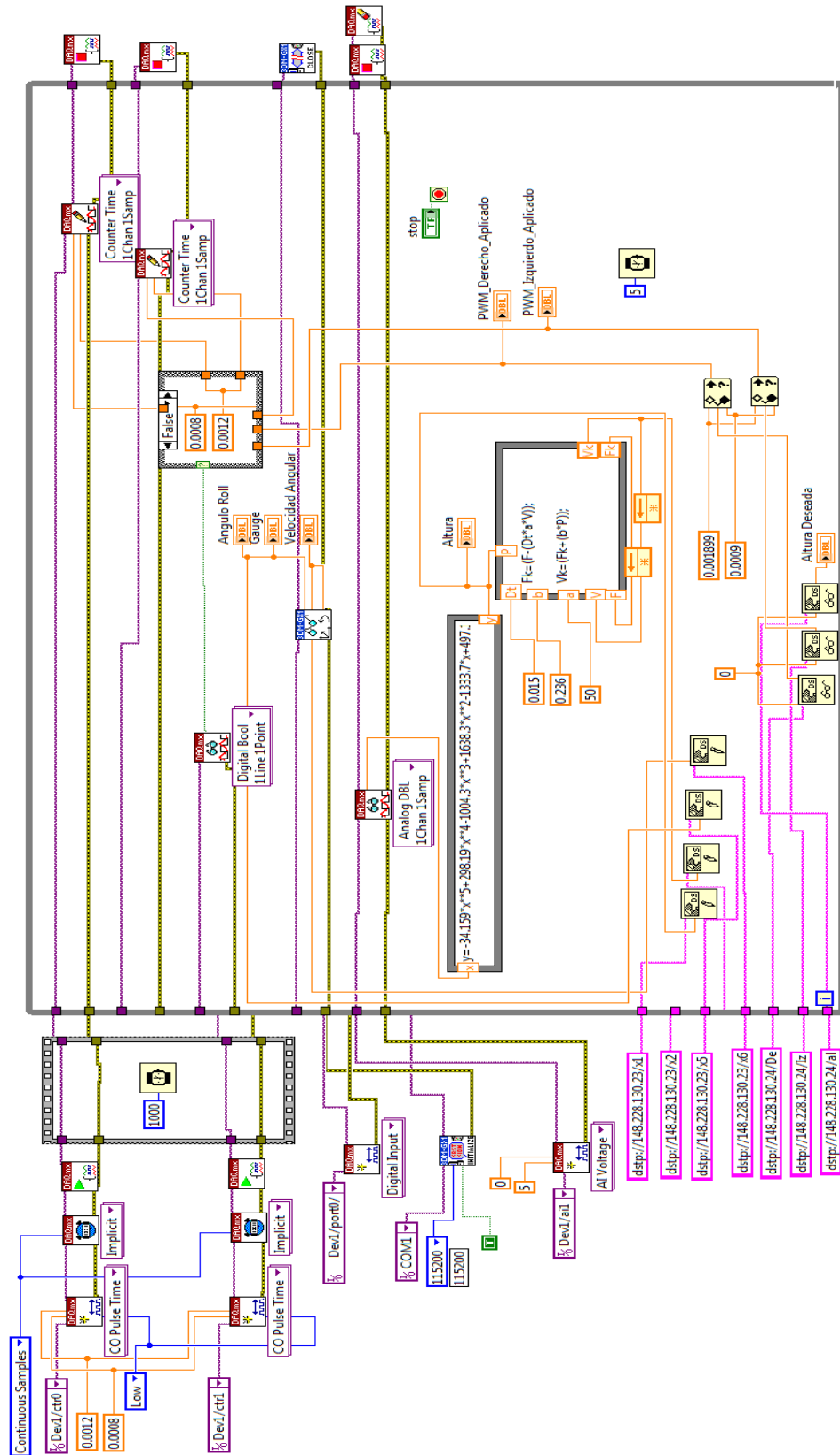


Figura A.9: Código fuente del bloque de la planta.

En la figura A.10 se muestran los bloques de lectura para obtener el estado del sistema.

Con la recepción del estado se procesa la información. El diseño de la estrategia de control se realizó para estabilizar el PVTOL a cualquier altura, al igual de poder definir un ángulo de referencia, sin embargo solo se realizaron experimentos variando la altura y manteniendo la estabilidad del ángulo a 0. Por lo cual se requiere del cálculo del error $altura\ medida - altura\ deseada$, como se muestra en la figura A.10. En la misma figura se observa que al recibir los datos y calcular el error de la altura se agrupa el estado para realizar operaciones en forma de matriz. Cabe recordar que los estados x_3, x_4 no se consideran, ya que el PVTOL esta restringido a un eje y un ángulo

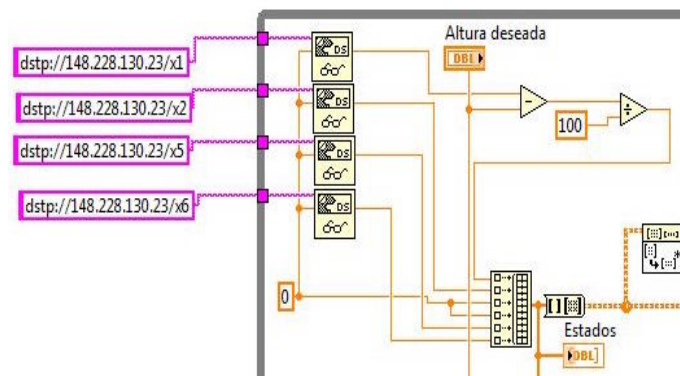


Figura A.10: Configuraciones para las señales de entrada.

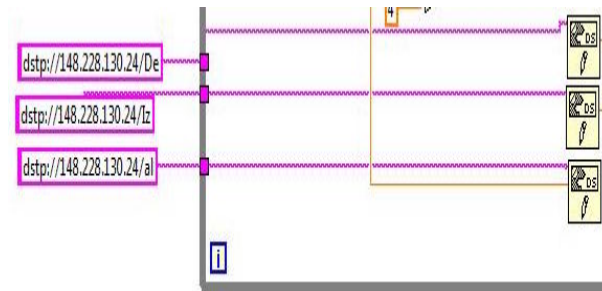


Figura A.11: Configuraciones para las señales de salida.

Teniendo el estado del PVTOL, se ejecuta la función evento diseñada en la sección 3.2, donde se aborda la estabilidad de sistemas no lineales bajo el enfoque de control asíncrono. Debido a que la función evento requiere de operaciones entre matrices, éstas se realizaron previamente y se introdujeron los valores como constantes con la finalidad de reducir consumos y retardos provocados por los elementos computacionales. En la figura A.12 se muestra que la implementación de la función evento se realizó con bloques y operaciones matemáticas entre matices y propiedades de los *Array*.

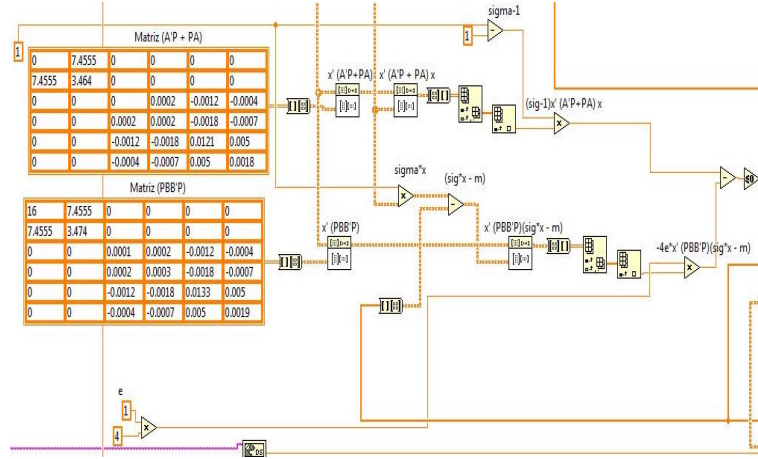


Figura A.12: Implementación de la función evento.

Como se define, el resultado de la función de evento es la encargada de indicar si el control se re-calcula o se aplica un control previamente calculado. Dicho proceso de selección se implementó con un *Case Structure*. En caso de tener un resultado mayor a 0, se aplica el control anterior; de lo contrario, si resulta ser menor o igual a 0, se calcula un nuevo control empleando las consideraciones del diseño, es decir dos veces la matriz de control k (Matriz de control LQR) por los estados del sistema, ver la figura A.13. Para mantener los estados y un cálculo del control anterior se emplean bloques de memoria que se retroalimentan.

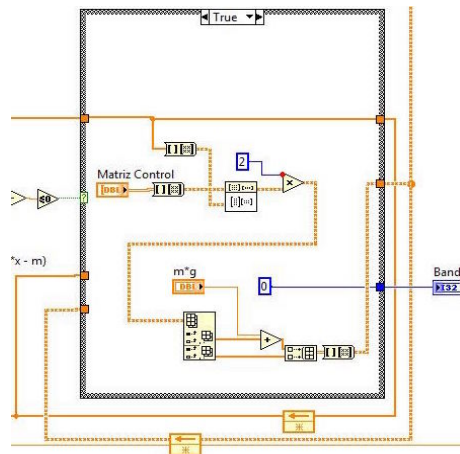


Figura A.13: Configuraciones para las señales de salida.

A la salida, las acciones de control son procesadas por unas matrices de transformación para convertir las acciones de control en su correspondiente valor de ancho de pulso, las que son regresados mediante las variables De y Iz y sus respectivos bloques de escritura, estando a la espera que la interfaz local los reciba mediante bloques de lectura. En la figura

A.14 se presenta el diagrama general a bloques, con el que se observan las conexiones desde su adquisición y procesamiento hasta la ejecución de la estrategia de control.

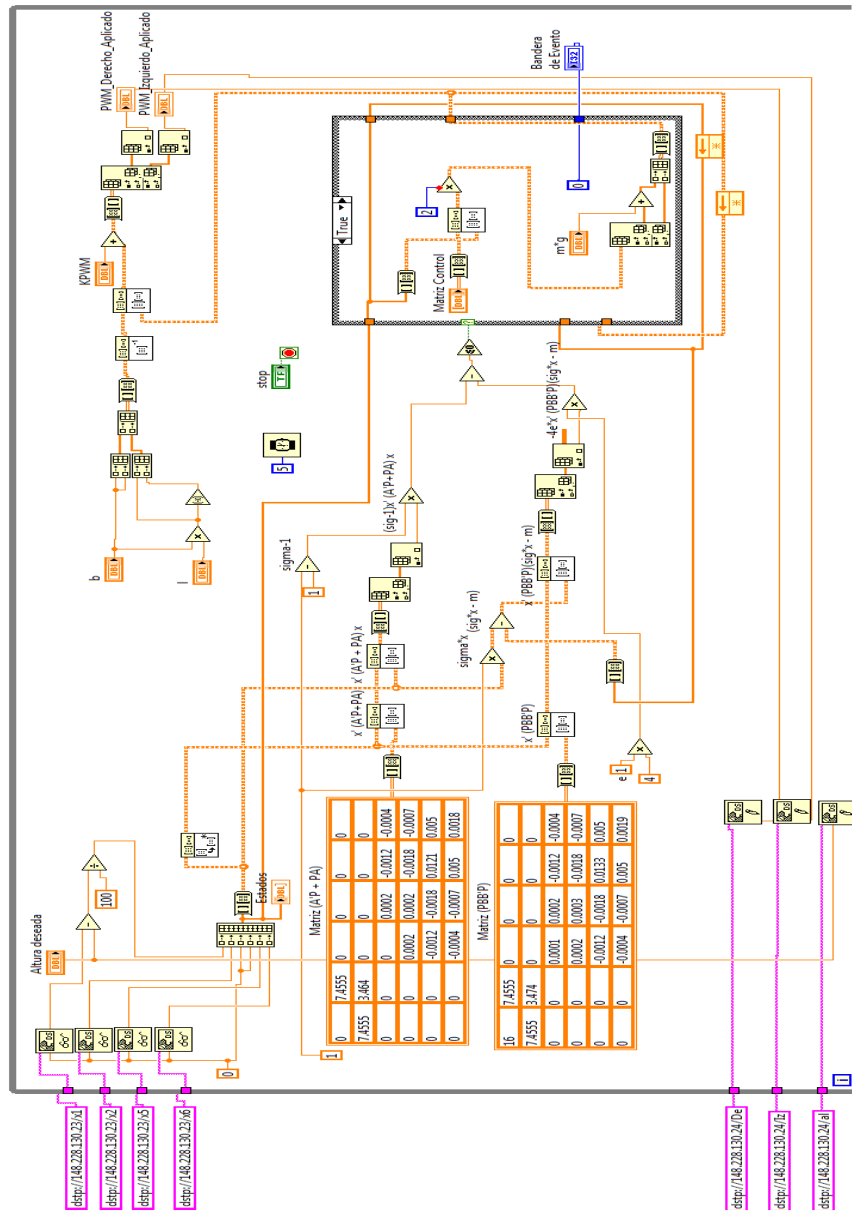


Figura A.14: Código fuente del bloque del controlador.

Apéndice B

Estudio energético

El estudio consiste en la realización de un análisis de nivel básico, ya que se obtiene un diagnóstico generalizado acerca de los consumos más relevantes y que supone un importante porcentaje en el costo energético. En el marco de la presente tesis se realizó un estudio con la finalidad de obtener y cuantificar la información de consumo energético del sistema PVTOL. El análisis se llevó a cabo con la plataforma PVTOL descrita en el *Capítulo 3*. El dispositivo empleado para adquirir las mediciones fue un analizador de la calidad de la energía modelo 43B de la marca Fluke, ver figura B.1. El estudio tiene una gran relevancia, puesto que la información obtenida brinda los parámetros necesarios para conocer factores como el tiempo de descarga y picos máximos de corriente.



Figura B.1: Analizador de la energía modelo 43B.

Como lo muestra la figura B.2, los elementos utilizados durante la realización del estudio energético fueron tres: la plataforma PVTOL, una computadora y el analizador 43B. La metodología a seguir para el experimento fue conectar el analizador a la batería que energiza al sistema. De esta manera se adquirieron mediciones mediante el aditamento del analizador para medir corriente eléctrica y voltaje. El experimento se elaboró en un tiempo de 3.28 minutos, en los que se adquirieron y almacenaron las mediciones para su

posterior análisis. En la figura B.3, se muestra el proceso de adquisición de las mediciones tanto en el analizador como en la computadora de forma simultanea.

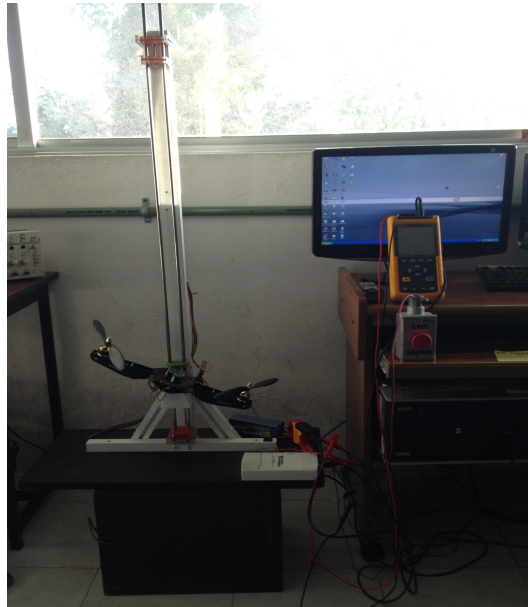


Figura B.2: Elementos presentes en el estudio energético.

Para la ejecución del experimento, la plataforma PVTOL fue regido por el control disparado por eventos diseñado en la presente tesis, con la única diferencia de procesar el estado del sistema y control del mismo en una computadora. El experimento se empezó con la inicialización del PVTOL junto con el instrumento virtual para su control. La altura de referencia para el sistema fue constante y de 35 cm. Luego de los primeros instantes de tiempo, los motores aumentaron la velocidad de giro hasta llegar a la altura deseada, durante ese periodo el consumo de corriente fue en incremento de 7 a 16 mAh. La altura y la corriente se mantuvieron constantes a 35 cm y 16 mAh respectivamente; mientras que el voltaje fue en decremento. Después de observar el consumo constante se le aplicaron perturbaciones a la plataforma.

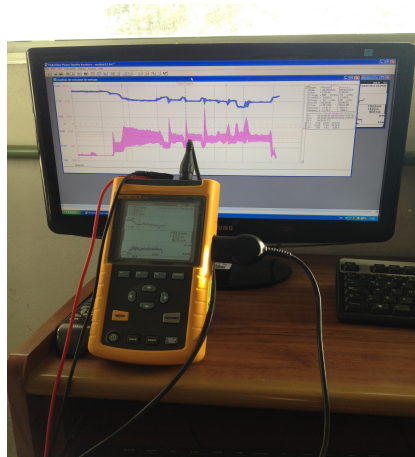


Figura B.3: Analizador y monitor de computadora mostrando el consumo energético.

Las perturbaciones se produjeron en tres ocasiones y consistieron en bajar manualmente el PVTOL con la intención de que el control lo compensara y ocasionando mayor consumo. Después se indujeron tres perturbaciones más en sentido contrario a las anteriores; terminado con el sistema con un consumo constante de 16 mAh. En la figura C.1 se presenta de manera gráfica el experimento, además se observan mejor los cambios que tiene el consumo de corriente durante las perturbaciones. En la imagen se muestran las tres partes primordiales del estudio: la inicialización, consumo constante y picos debido a perturbaciones. En las primeras perturbaciones se tienen picos de corriente de entre 16 a 22 mAh, mientras que en las segundas fueron de 15 a 18 mAh. Por otro lado, también se observa la relación que se tiene con el voltaje, puesto que se tiene un decremento durante todo el estudio.

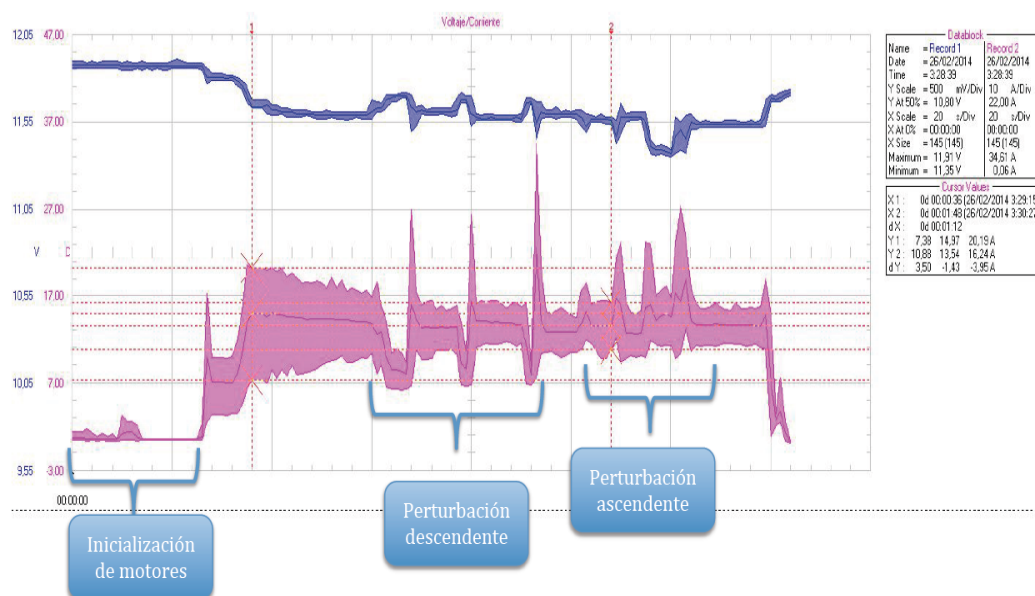


Figura B.4: Gráfica de consumo energético.

Apéndice C

Publicaciones en congresos

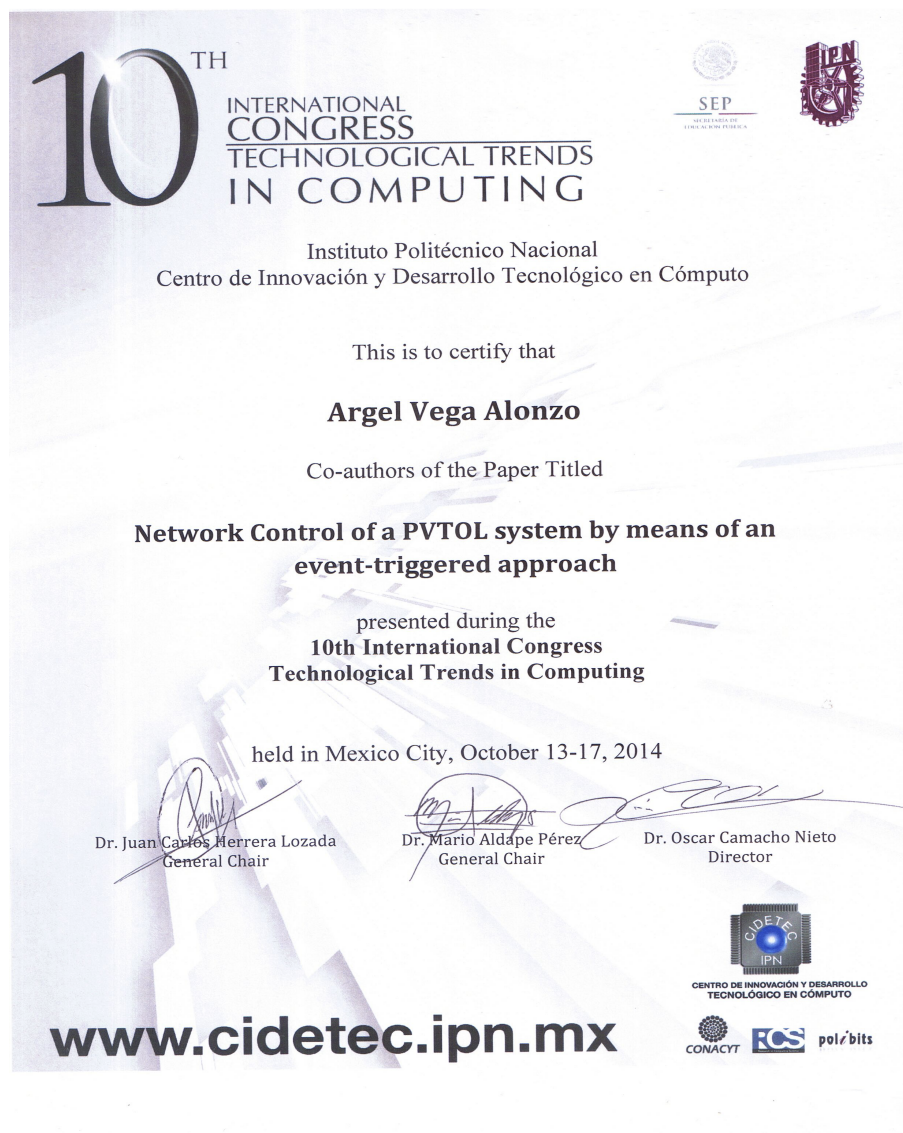


Figura C.1: Acta de participación en el congreso (2014).



Figura C.2: Acta de participación en el congreso (2015).