

Plataforma propia de aprendizaje de dinámicas y variables para la autonomía del vehículo agrícola

Own platform for learning dynamics and variables for the autonomy of agricultural vehicles

Sergio Sandoval Pérez, Juan Miguel González López, Jesús Ezequiel Molinar Solís y Gilberto Barreto /
Instituto Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán / Universidad de Colima

Apéndice de desarrollo de control

A. Planta y sistema de referencia.

Sin embargo la PPADV, además del software que necesita, también contiene su hardware, donde de manera interna las y los estudiantes o ingenieros(as) pueden desarrollar las tarjetas electrónicas que simulan las dinámicas y variables del vehículo agrícola, mediante circuitos amplificadores operacionales (TL084) a partir de la señal δ_d .

Como se puede ver en la Figura 1, esta configuración de circuito monoestable LM555, simula en forma manual una señal escalón de amplitud de 5 volts (estado en alto) con un tiempo determinado por $T = 1.1 \cdot R \cdot C$, $R = R_2$, $C = C_1$ como entrada manual a la plataforma PPADV, donde los 5 volts de salida del LM555 representan los grados del volante en la barra de conducción del tractor, que se pueden acondicionar con el amplificador operacional inversor de la Figura 2a que ofrece a la salida $-\delta_d$ (-DELTAD 1 VOL) y $+\delta_d$ (+DELTAD 1 VOL) con una ganancia ajustable (RV1) o también mediante el Arduino o DAQ 6009, para una maniobra de un solo volanteo o de doble volanteo con el diagrama eléctrico de la Figura 2b, $-\delta_d$ (-DELTAD 2 VOL) y $+\delta_d$ (+DELTAD 2 VOL) y una amplificación de la señal por RV3 o por medio de la tarjeta de adquisición de datos 6009 o por Arduino uno.

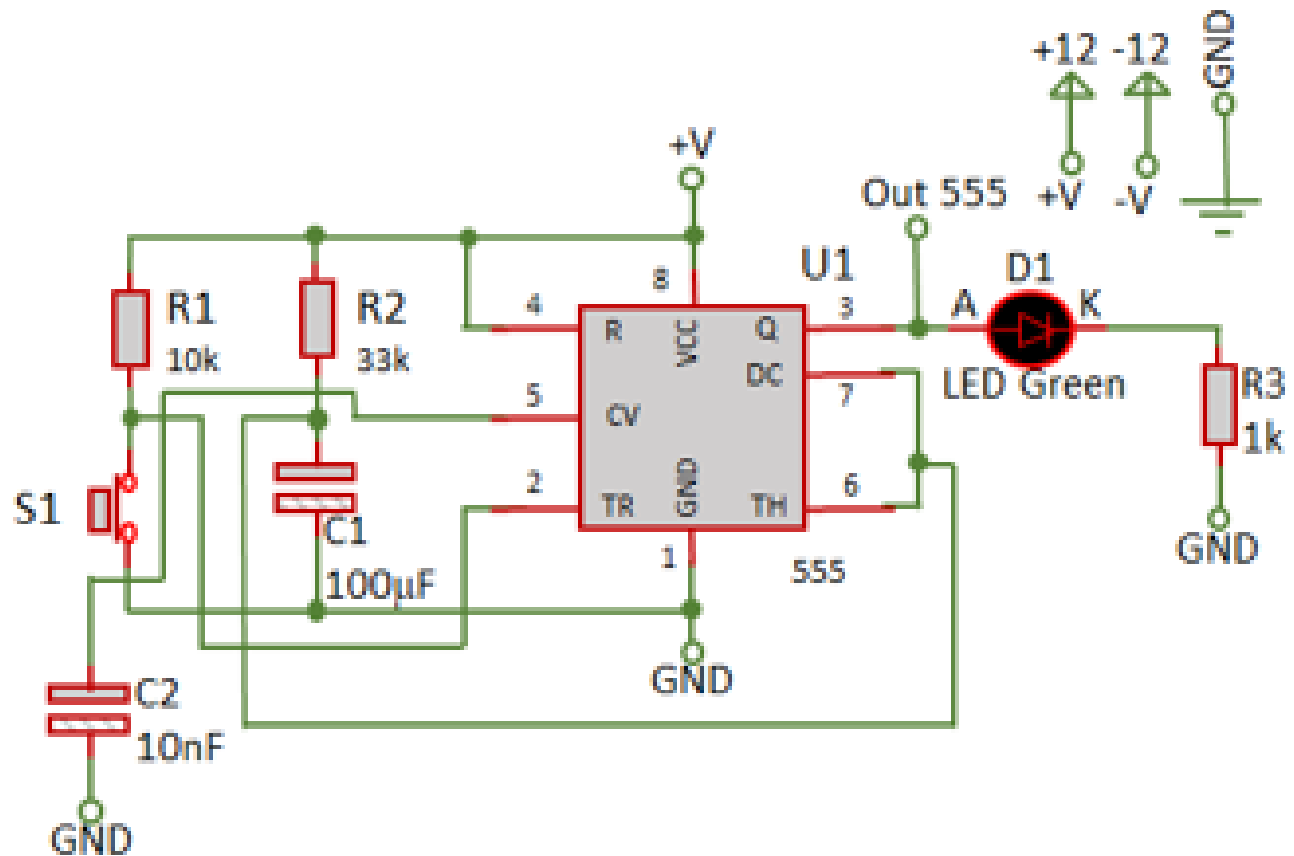


Figura 1. Circuito de señal para prueba manual en PPADV

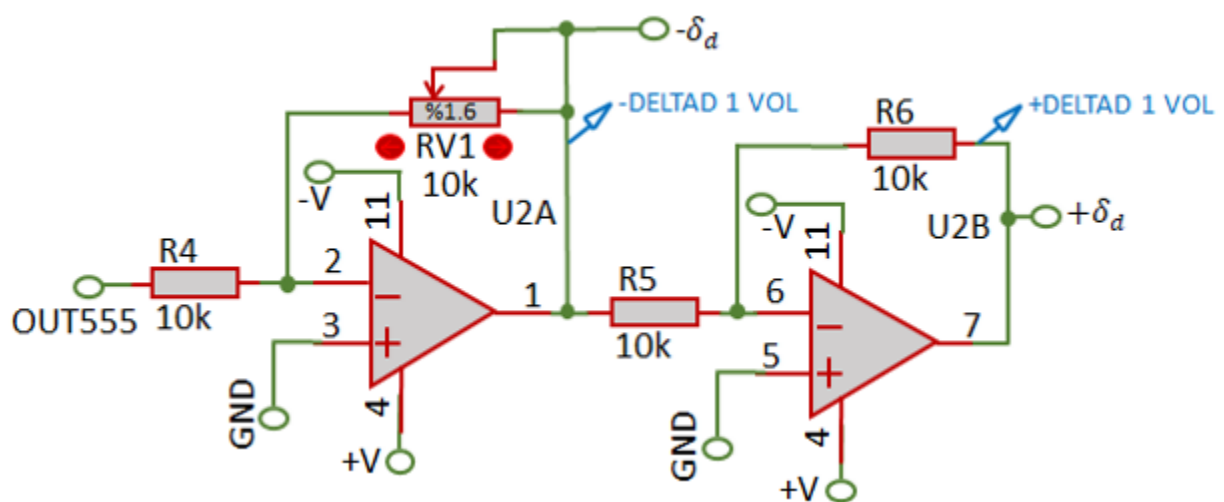


Figura 2a. Circuito para generar señal $-\delta_d$, $+\delta_d$ escalón en la PPADV

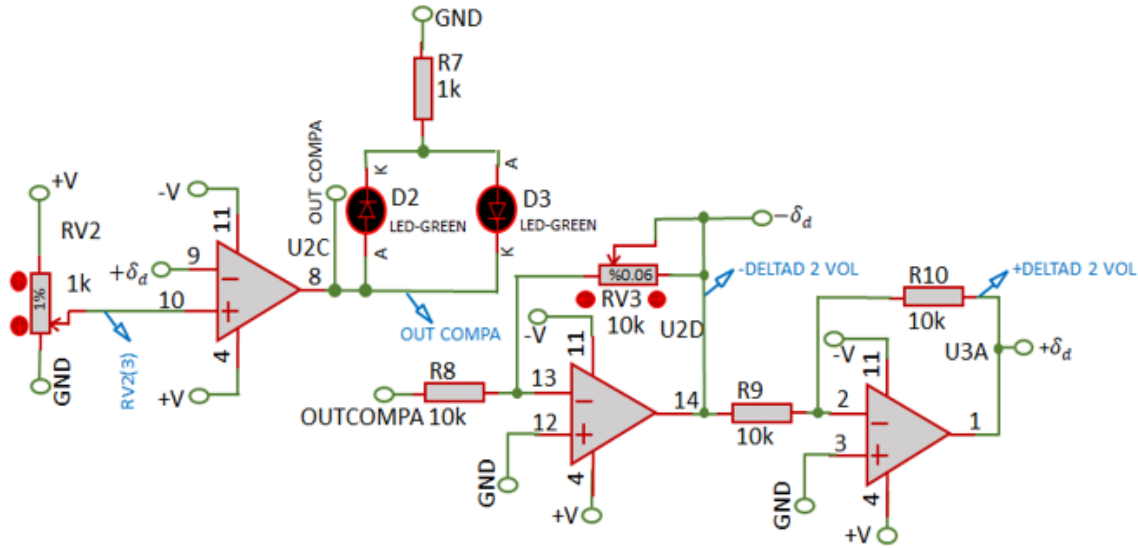
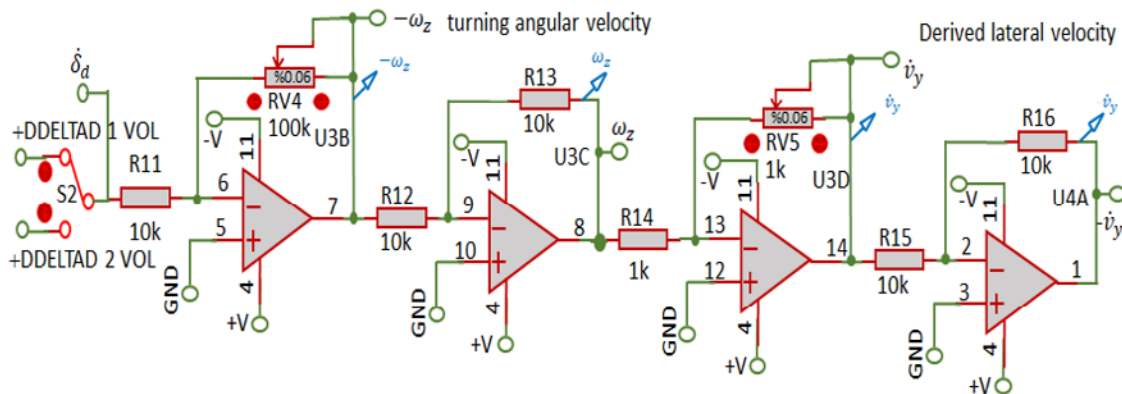
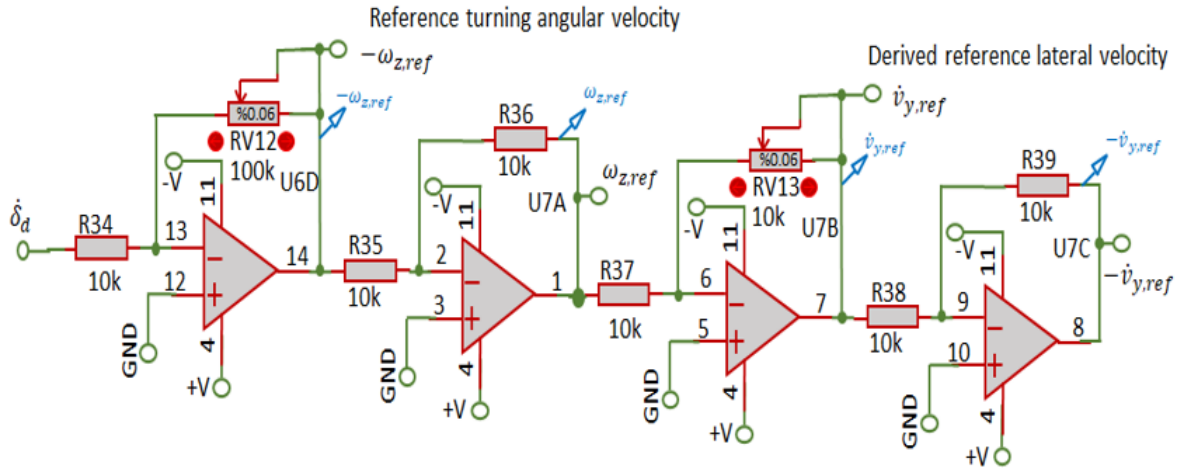


Figura 2b. Señal $-\delta_d$, $+\delta_d$ doble volante en la PPADV

Continuando con la PPADV, se analizan las dinámicas y variables en la Figura 3a, comenzando con $\omega_z \cong \dot{\delta}_d R$, donde, +DDELTAD 1 VOL, +DDELTAD 2 VOL, son derivadas para establecer $\dot{\delta}_d$ (ver Anexo A), además de R una ganancia definida por RV4/R11, dando como resultado la señal de velocidad de viraje $-\omega_z$ del primer amplificador operacional (U3B) multiplicándose después por una ganancia unitaria de R13/R12 en U3C generando a ω_z que multiplica a la velocidad constante v_x representada por RV5/R14 en U3D para obtener una parte del algoritmo de $-\dot{v}_y$ y su contraparte, resulta al multiplicarse $-\dot{v}_y \cdot R16/R15$ que genera a $\dot{v}_y$ en U4A. La $-v_y, v_y$, se obtienen al integrar $\dot{v}_y$ (ver Anexo B). Además, para la Figura 3b, se diseña en forma similar el sistema de referencia, como se describe para la Figura 3a y para analizar $-v_{y,ref}, v_{y,ref}$, resulta al integrar $\dot{v}_{y,ref}$ (ver Anexo C). Para obtener $\dot{\omega}_z$ y $\dot{\omega}_{z,ref}$, resultan al derivar $-\omega_z$ y $-\omega_{z,ref}$ (ver el Anexo D).



a) Velocidad angular y derivada de velocidad lateral de planta sin control.

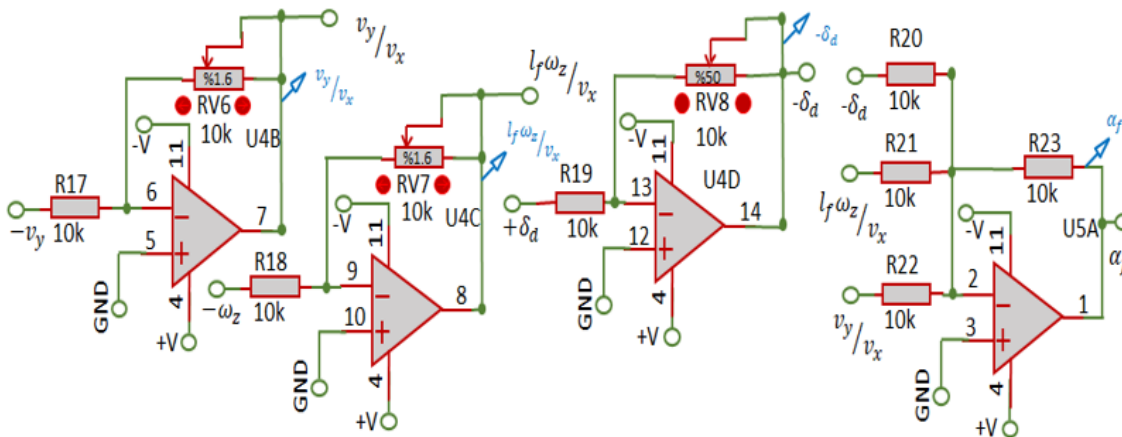


b) Velocidad angular y derivada de velocidad lateral del sistema de referencia.

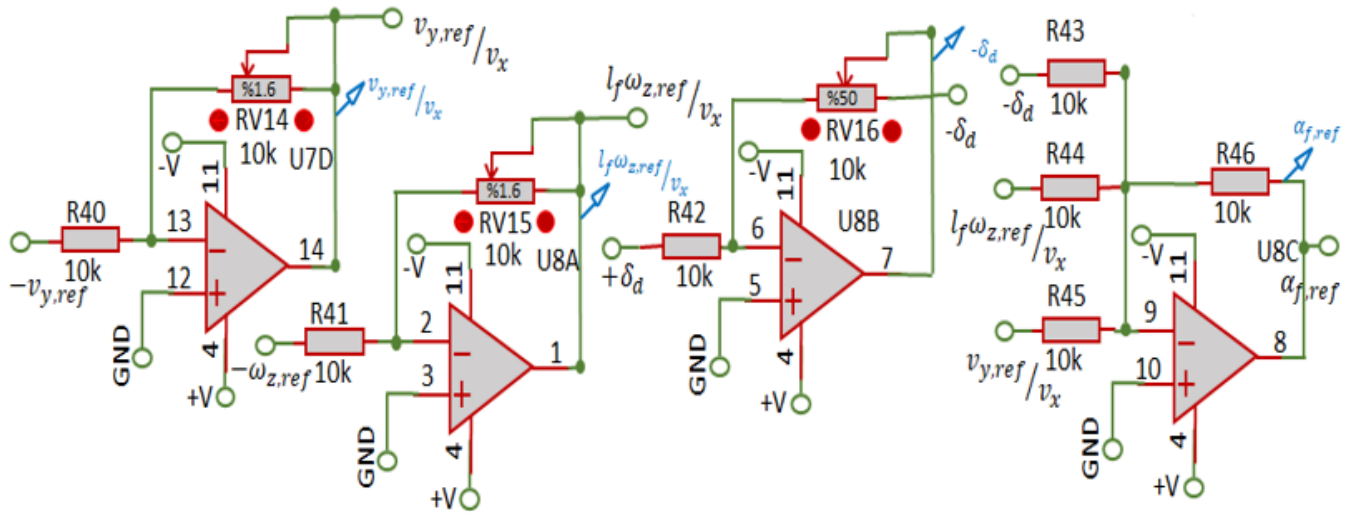
Figura 3. Circuito para generar señales en PPADV: a) $-\omega_z, \omega_z, \dot{v}_y = -v_x \omega_z, -\dot{v}_y = v_x \omega_z$

b) $-\omega_{z,ref}, \omega_{z,ref}, \dot{v}_{y,ref} = -\omega_{z,ref} \cdot v_x, -\dot{v}_{y,ref} = \omega_{z,ref} \cdot v_x$.

En el ángulo de deslizamiento frontal α_f sin control (ver Figura 4a), la entrada al U4B por $-v_y$ multiplica a la ganancia RV6/R17 que representa a $1/v_x$, dando como resultado v_y/v_x , en U4C el algoritmo de salida es $\omega_z \cdot RV7/R18$ (l_f/v_x), en U4D la salida es la inversión de la entrada +DELTA D 1 VOL por la ganancia RV8/R19 y para U5A es un amplificador sumador inversor de ganancia uno que ofrece la señal $\alpha_f = \delta_d - \frac{v_y + l_f \delta_d R}{v_x}$, con el componente del ángulo de la llanta impuesto por el controlador igual a cero (ver ecuación (4)). También para Figura 4b, se realiza con la misma filosofía anterior (estudiar ecuación (12)).



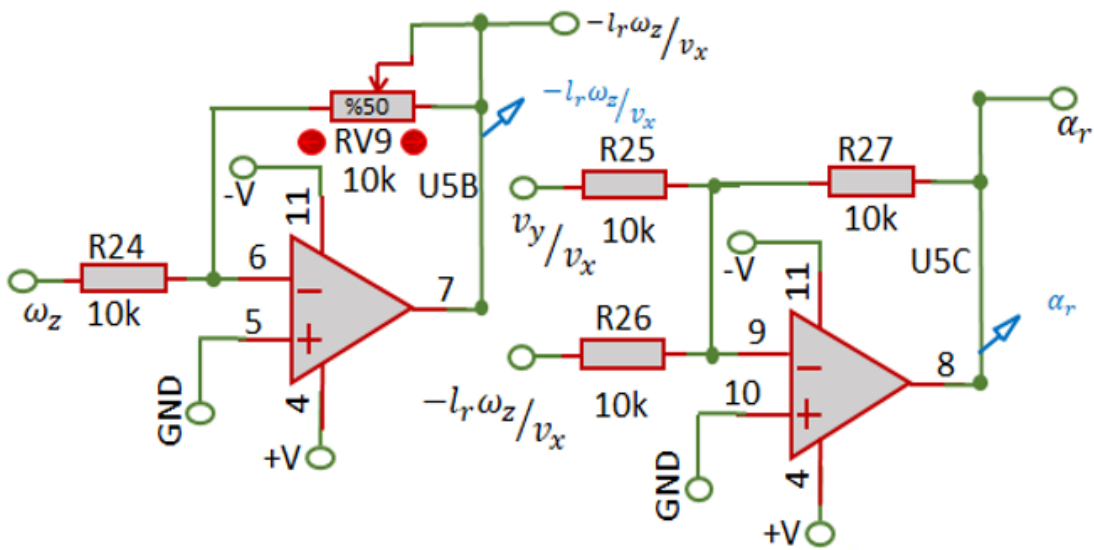
a) Ángulo de deslizamiento frontal de planta sin control



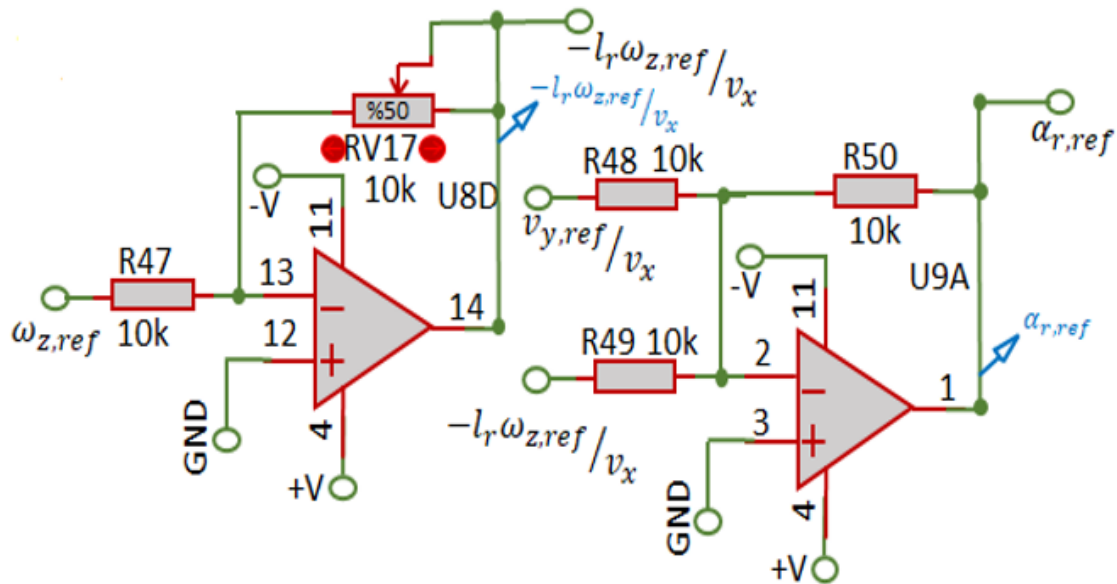
b) Ángulo de deslizamiento frontal del sistema de referencia

Figura 4. Señales: a) α_f ; b) $\alpha_{f,ref}$ en PPADV

En Figura 5a se muestra el ángulo de deslizamiento trasero α_r , donde para realizar el algoritmo correspondiente, en U5B tiene la entrada de ω_z que multiplica a la ganancia $RV9/R24 = l_r/v_x$, y recordando la Figura 4a en U4B, se tiene la salida de v_y/v_x , que multiplicara a la ganancia unitaria $R27/R25$, del U5C, y se sumara a la salida del U5B ($-\omega_z \cdot l_r/v_x$), para obtener $\alpha_r = -\frac{v_y - l_r \omega_z}{v_x}$, a la salida del amplificador sumador inversor U5C, vista en ecuación (5). De igual manera se analiza para Figura 5b (ver ecuación (13)).



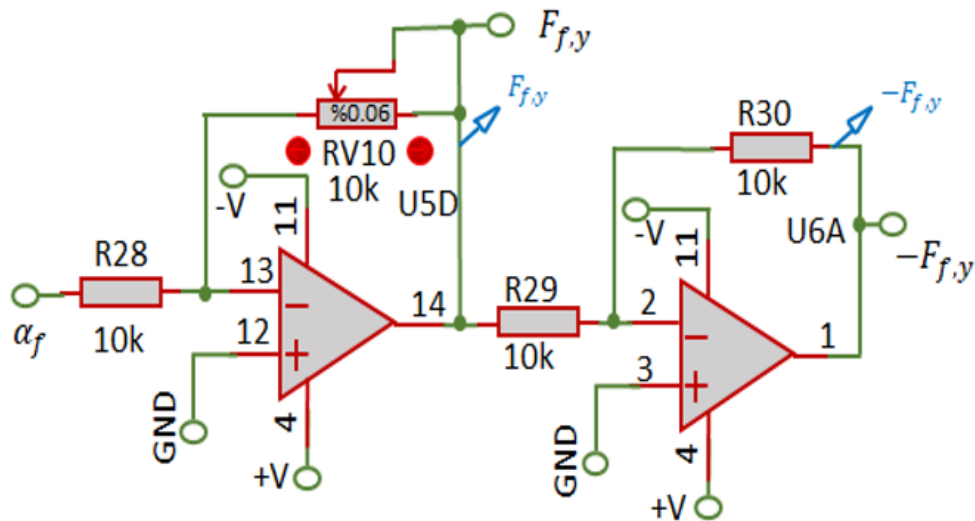
a) Ángulo de deslizamiento trasero de planta sin control



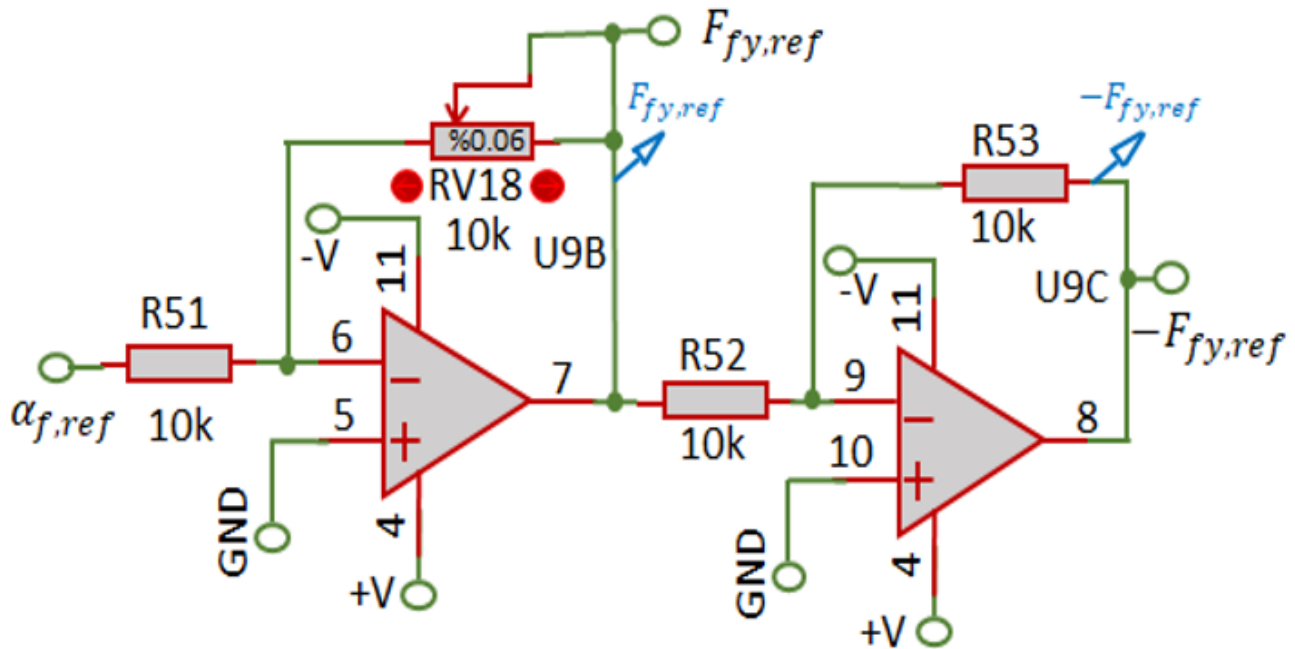
b) Ángulo de deslizamiento trasero del sistema de referencia

Figura 5. Señales: a) α_r ; b) $\alpha_{r,ref}$ en PPADV

Por lo tanto, continuando con el estudio de la plataforma PPADV, para desarrollar la fuerza frontal de las llantas $F_{f,y}$, en la Figura 6a, en el U5D, se tiene la entrada α_f sin control (salida del U5A, ver Figura 4a) multiplicada por la ganancia RV10/R28 que simulan el coeficiente C_f , para que a la salida del amplificador (U5D) se obtenga $F_{f,y}$, que al multiplicarla por la ganancia unitaria (R30/R29) del U6A, resulta la $-F_{f,y}$ (analizada en ecuación (9)), además de utilizar el mismo criterio anterior al diseñar la Figura 6b.



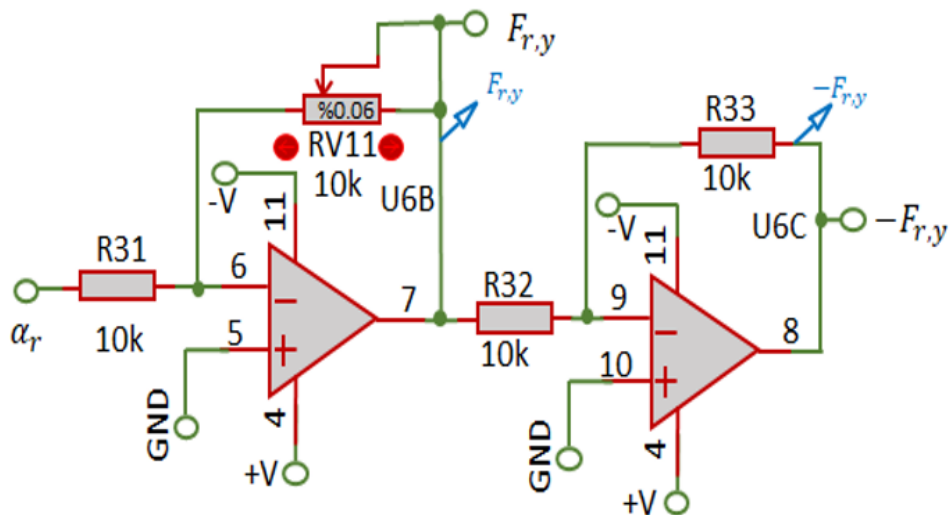
a) Fuerza frontal de planta sin control



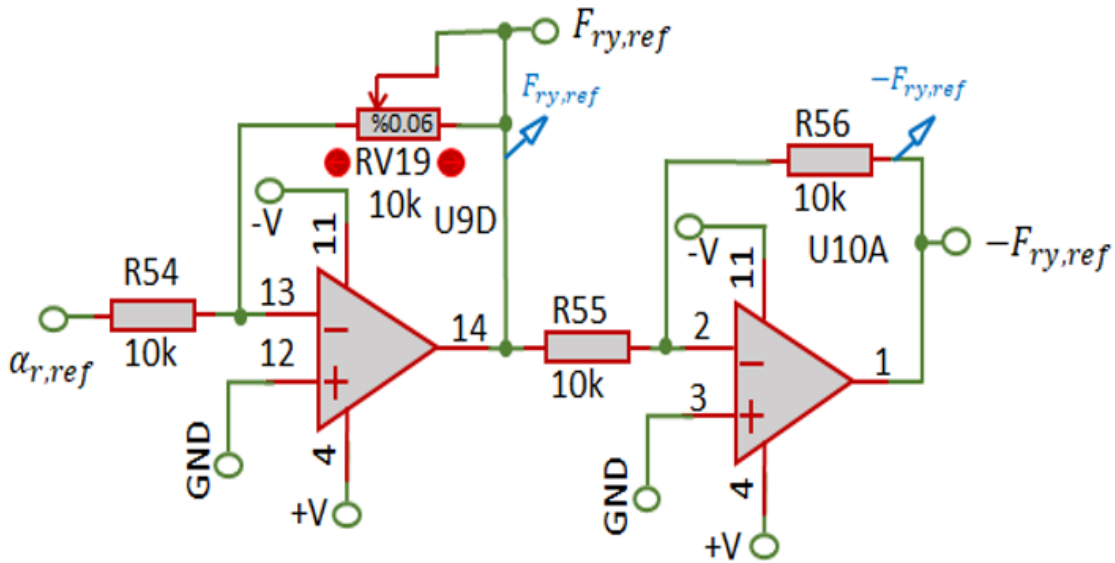
b) Fuerza frontal del sistema de referencia

Figura 6. Señales a) $F_{f,y}$, $-F_{f,y}$; b) $F_{fy,ref}$, $-F_{fy,ref}$ en PPADV

Para la Figura 7a, en el U6B, la ganancia $RV11/R31$ se denomina el coeficiente C_r que multiplica a la entrada del amplificador α_r , para desarrollar $F_{r,y}$ (a la salida del circuito (U6B)) que multiplica una ganancia unitaria de $R33/R32$ para tener a la salida de U6C a $-F_{r,y}$, estudiada en ecuación (9) y de igual forma se propone la Figura 7b.



a) Fuerza trasera de planta sin control



b) Fuerza trasera del sistema de referencia

Figura 7. Señales a) $F_{r,y}$; b) $F_{ry,ref}$ en PPADV.

Por lo tanto, entendidas las fuerzas anteriores, se establece que al diseñar dinámicas y variables:

$\dot{v}_y, \dot{v}_{y,ref}, v_y, v_{y,ref}, -\dot{v}_y, -\dot{v}_{y,ref}, -v_y, -v_{y,ref}, \dot{\omega}_z, \dot{\omega}_{z,ref}, \omega_z, \omega_{z,ref}, -\dot{\omega}_z, -\dot{\omega}_{z,ref}, -\omega_z, -\omega_{z,ref}$, no se consideran las fuerzas frontales $-F_{f,y}, -F_{fy,ref}$ y traseras $F_{r,y}, F_{ry,ref}, -F_{r,y}, -F_{ry,ref}$ porque es una aproximación de las velocidades lateral y angular de viraje, pero al considerar las fuerzas descritas en este párrafo, solamente se anexa un amplificador sumador inversor para la planta y otro para el sistema de referencia en la Figura 3 y se obtendrán dos nuevos circuitos (los incluye la PPADV), completando las ecuaciones (2), (3) sin entradas de control y (10), (11).

Para los errores (ver Anexo E), e_{vy} (ecuación (17)), se realiza utilizando un amplificador restador, con las entradas de v_y contra $v_{y,ref}$ y para e_{ω_z} , se tiene la resta de ω_z menos $\omega_{z,ref}$, mediante un amplificador operacional en modo restador (ecuación (18)).

B. Estructura del control

Por lo tanto, cuando se analiza la planta del vehículo agrícola y el sistema de referencia local, se tiene la posibilidad de establecer el diseño del controlador, iniciando con los componentes de la entrada de control δ_c , en Figura 8, definiendo la ganancia $G1 = RV20/$

R67 la cual representa al valor $1/v_x + C_r/C_f v_x$ que multiplica a la entrada de la velocidad lateral v_y , para obtener a la salida de U11B, el algoritmo $-(1/v_x + C_r/C_f v_x) \cdot v_y$. Además, para la velocidad angular de viraje controlada $\omega_z \cong \dot{\delta}_d R$ se multiplica por RV21/R68=G2= $l_f/v_x - C_r l_r/C_f v_x + m v_x/\mu C_f$, obteniendo a la salida de U11C, $-(l_f/v_x - C_r l_r/C_f v_x + m v_x/\mu C_f) \cdot \dot{\delta}_d R$, en cuanto a $\dot{v}_{y,ref}$ como entrada para U11D, se realiza el producto por la ganancia RV22/R69=G3= $m/\mu C_f$, que resulta a la salida del mismo amplificador (U11D), $-m/\mu C_f \cdot \dot{v}_{y,ref}$.

Para el error en velocidad lateral e_{vy} se multiplica por una ganancia de RV23/R70=-G4= $-k_1 \cdot m/\mu C_f$, donde en la salida de U12A, se tiene $-m/\mu C_f \cdot k_1 \cdot e_{vy}$ y a la salida de U12B con ganancia unitaria de R72/R71, con entrada $-m/\mu C_f \cdot k_1 \cdot e_{vy}$, resulta $-m/\mu C_f \cdot k_1 \cdot e_{vy}$. En U13A se aplica un sumador inversor de ganancia unitaria con las siguientes entradas:

$$-\left(1/v_x + C_r/C_f v_x\right) \cdot v_y - \left(l_f/v_x - C_r l_r/C_f v_x + m v_x/\mu C_f\right) \cdot \dot{\delta}_d R - m/\mu C_f \cdot \dot{v}_{y,ref} + m/\mu C_f \cdot k_1 \cdot e_{vy} + +\delta_d$$

(U12D) y a la salida (U13A) resultara;

$$\delta_c = \left(\frac{1}{v_x} + \frac{C_r}{C_f v_x}\right) v_y + \left(\frac{l_f R}{v_x} - \frac{C_r l_r R}{C_f v_x} + \frac{m v_x R}{\mu C_f}\right) \dot{\delta}_d - \delta_d + \left(\frac{m}{\mu C_f}\right) \dot{v}_{y,ref} - \left(\frac{m}{\mu C_f}\right) k_1 e_{vy},$$

propuesta en ecuación (25).

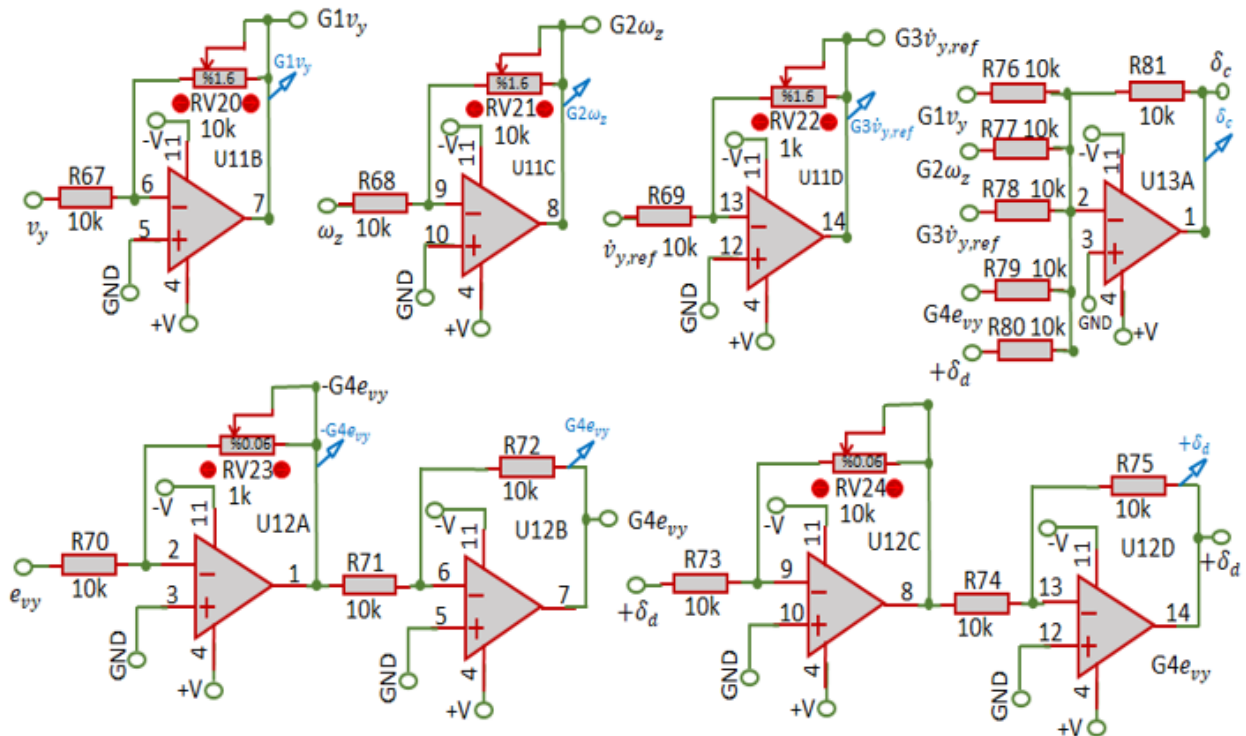


Figura 8. Entrada de control δ_c en PPADV

Siguiendo con las entradas de control, también se propone una entrada de controlador para el vehículo agrícola, cuando exista un eje trasero dinámico y no fijo, como una idea innovadora para M_z , vista en la Figura 9, donde en U13B, se tiene la entrada v_y , multiplicando la ganancia $RV25/R82=M1=\frac{\mu_{C_f}l_f - \mu_{C_r}l_r}{v_x}$, para a la salida resultar $-\left(\frac{\mu_{C_f}l_f - \mu_{C_r}l_r}{v_x}\right) \cdot v_y$. Para U13C, se multiplica $\omega_z \cong \dot{\delta}_d R$ por la ganancia $M2=RV26/R83=\frac{\mu_{C_f}l_f^2 + \mu_{C_r}l_r^2}{v_x}$, obteniendo a la salida, $-\left(\frac{\mu_{C_f}l_f^2 + \mu_{C_r}l_r^2}{v_x}\right) \cdot \dot{\delta}_d R$. En U13D, tiene la entrada $-\delta_d$ multiplicada por $RV27/R84=M3=-\mu_{C_f}l_f$, resultando $\mu_{C_f}l_f \cdot \delta_d$. Analizando U14A con entrada δ_c por $RV28/R85=-\mu_{C_f}l_f=-M4$, en salida se tendrá $-\mu_{C_f}l_f \cdot \delta_c$ que multiplicará en U14B a $R87/R86$ (ganancia unitaria), para obtener a la salida $\mu_{C_f}l_f \cdot \delta_c$. Continuando con U14C con la entrada $\dot{\omega}_{z,ref}$ por la ganancia $RV29/R88=-M5=-J$, resulta $-J \cdot \dot{\omega}_{z,ref}$. Además en U14D, se considera como entrada $e_{\omega z}$ multiplicando a la ganancia $RV30/R89=-M6=-J \cdot k_2$ donde resulta a la salida $-J \cdot k_2 \cdot e_{\omega z}$, que multiplica en U15A a la ganancia unitaria, $R91/R90$, para obtener a la salida $J \cdot k_2 \cdot e_{\omega z}$. Con esto en U15B, el cual es un sumador inversor que tiene como entradas

$$-\left(\frac{\mu_{C_f}l_f - \mu_{C_r}l_r}{v_x}\right) \cdot v_y, -\left(\frac{\mu_{C_f}l_f^2 + \mu_{C_r}l_r^2}{v_x}\right) \cdot \dot{\delta}_d R, \mu_{C_f}l_f \cdot \delta_d, \mu_{C_f}l_f \cdot \delta_c, -J \cdot \dot{\omega}_{z,ref},$$

$J \cdot k_2 \cdot e_{\omega z}$, resulta en su salida,

$$M_z = \left(\frac{\mu_{C_f}l_f - \mu_{C_r}l_r}{v_x}\right) v_y + \left(\frac{\mu_{C_f}l_f^2 R + \mu_{C_r}l_r^2 R}{v_x}\right) \dot{\delta}_d - (\mu_{C_f}l_f) \delta_d - (\mu_{C_f}l_f) \delta_c + J \dot{\omega}_{z,ref} - J k_2 e_{\omega z},$$

vista en la Ecuación (26).

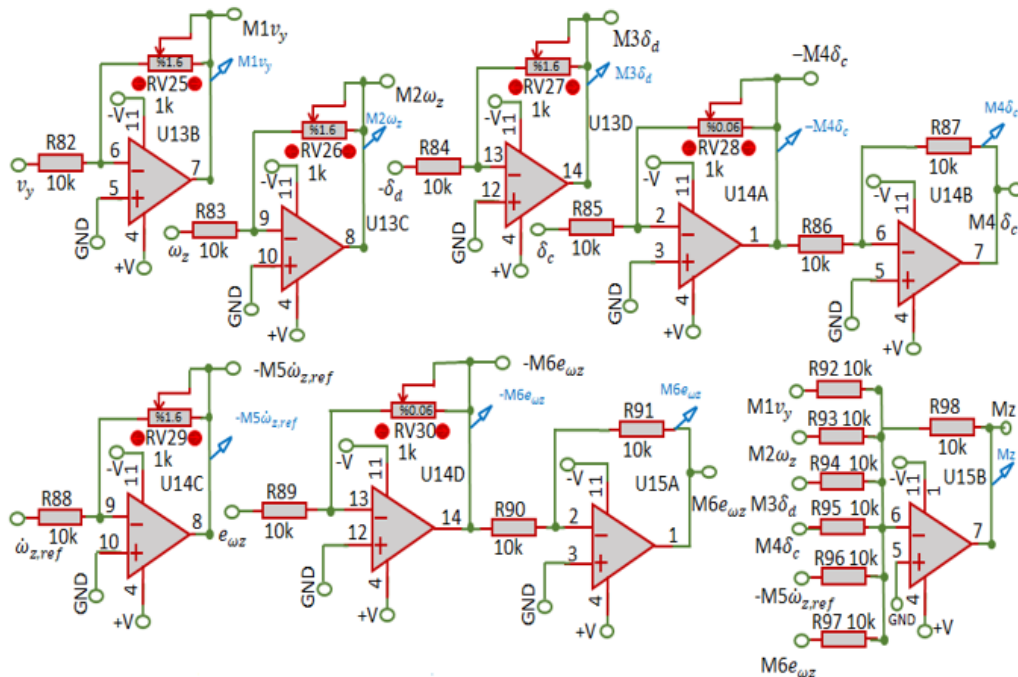


Figura 9. Entrada de control M_z en PPADV

Por último, para esta sección 3, existe un acondicionador de señal, donde este circuito (ver Anexo F), recibe la señal del actuador $a(\delta)$, $b(\delta)$, y la acondiciona para ingresarla a la PPADV.

DISEÑO DE HARDWARE

Después de haber probado la lógica del programa con la tarjeta Arduino uno o con la DAQ 6009 NI/USB, así como su implementación en el ambiente virtual del software Proteus, se procede primeramente a proporcionar una vista 3D del circuito (ver Figura 10) para obtener medidas y una vista preliminar del dispositivo a construir que será la plataforma PPADV.

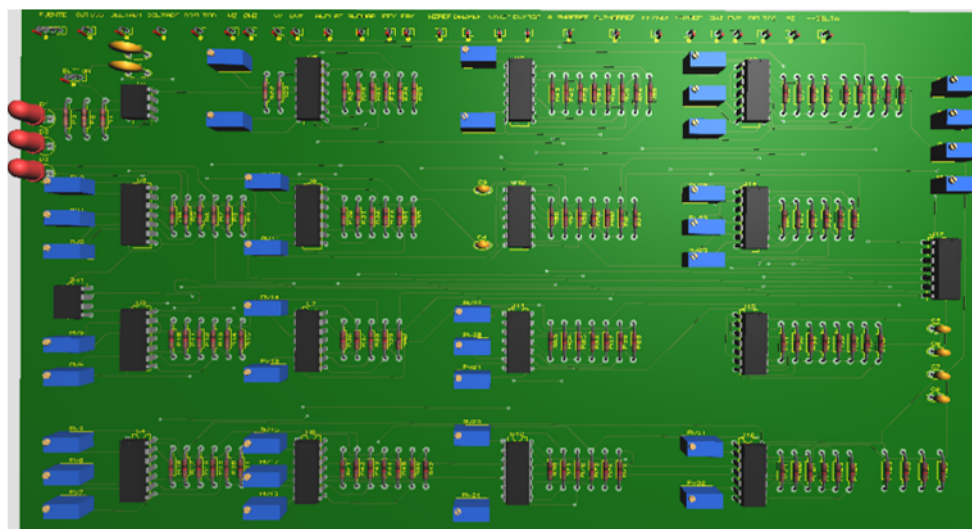


Figura 10. Vista 3D del circuito a implementar (PPADV)

Y enseguida se diseña el circuito electrónico impreso mostrado en la Figura 11 con el apoyo de la función Layout del software Proteus y se imprime para fabricarse por el método SMT o también se puede realizar con tarjetas prefabricadas PCBS tipo *protoboard* que se venden en tiendas de venta de componentes electrónicos a un bajo costo, para que cualquier estudiante las pueda adquirir y realizar el diseño completo de la PPADV.

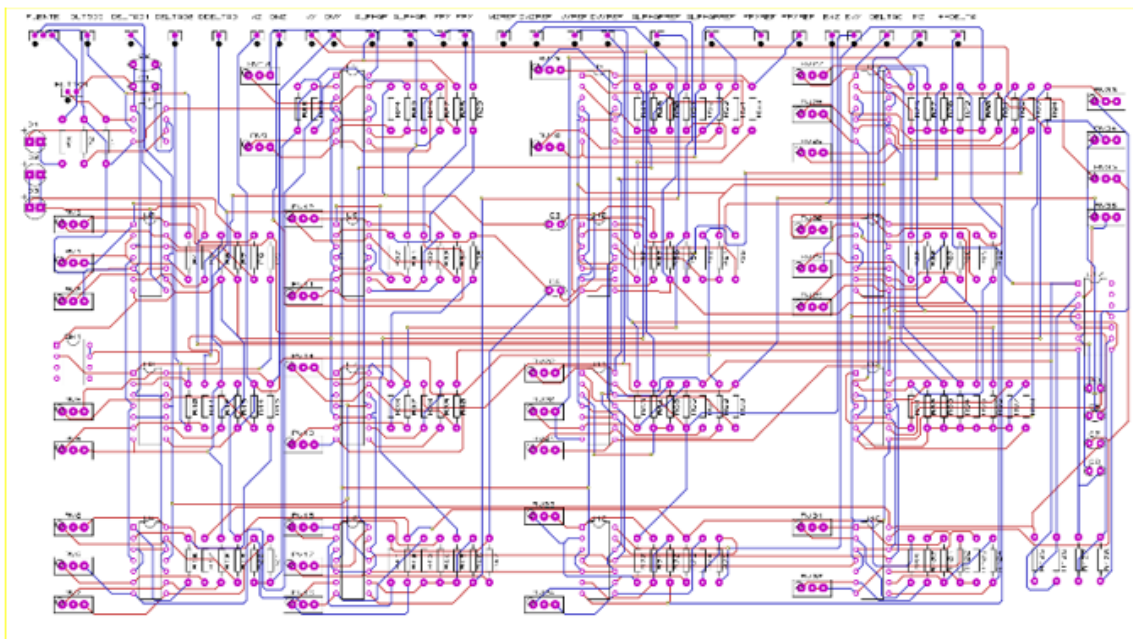


Figura 11. Diseño de las pistas del circuito electrónico impreso para PPADV en software Proteus

Una vista de la implementación final del circuito es mostrada en la Figura 12, con PCBS prefabricadas tipo *proto-board*.

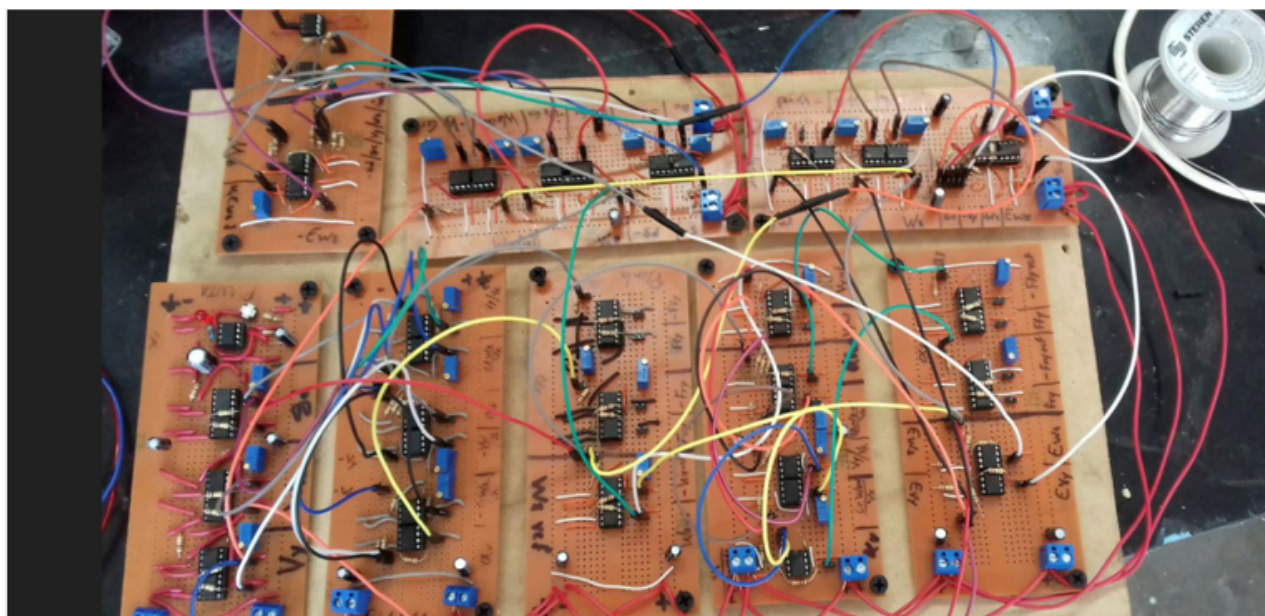
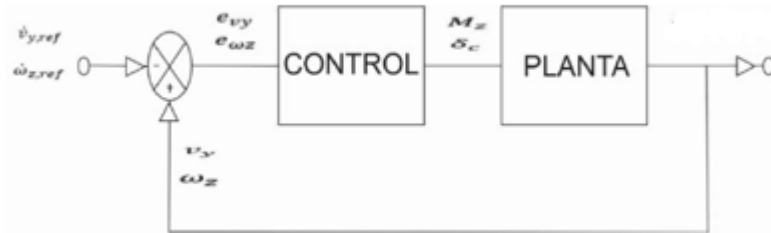
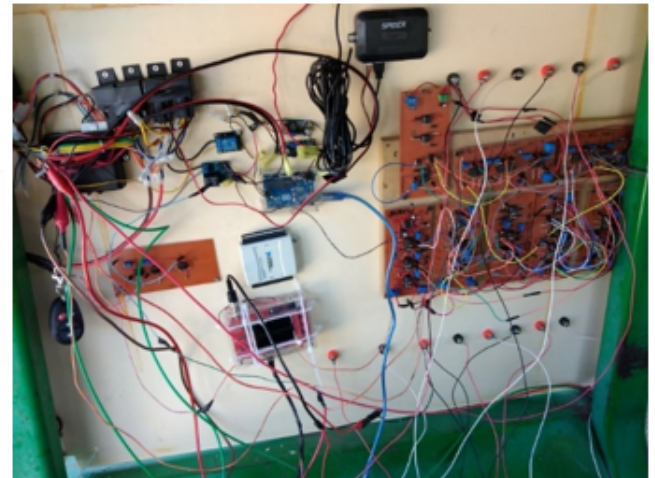


Figura 12. Prototipo para PPADV con PCBS comerciales

Por otro lado, se estudia el diagrama a bloques de la PPADV, tomando en consideración todos los elementos internos, esta etapa es crucial porque se implementa la teoría de control de la parte II sección C de este artículo de investigación, además de la implementación práctica de la PPADV. Todo lo anterior se presenta en la Figura 13.



a)

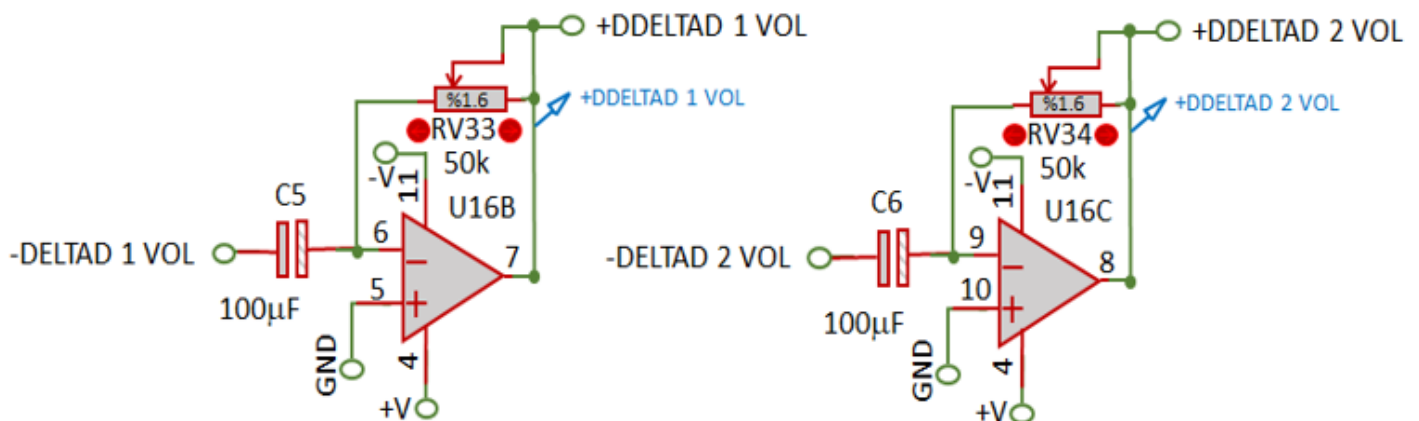


b)

Figura 13. a) Diagrama a bloques de la PPADV; b) Implementación del circuito impreso (PPADV) en el SPADV (vista trasera)

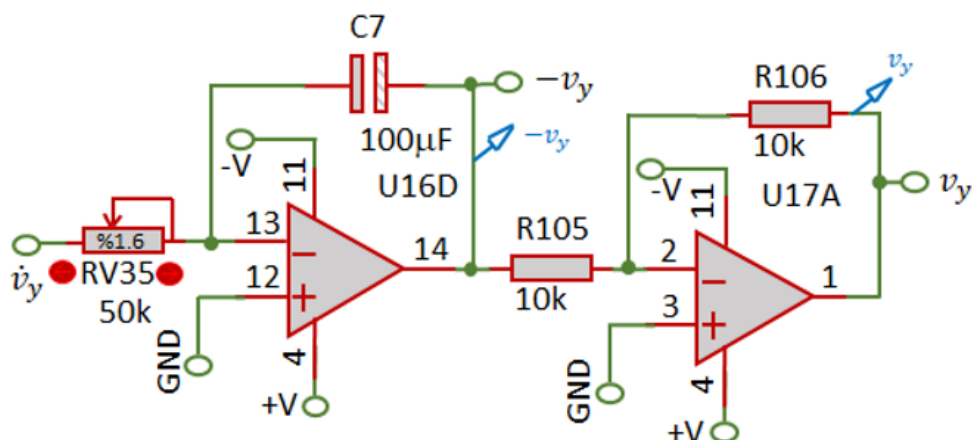
ANEXOS

ANEXO A

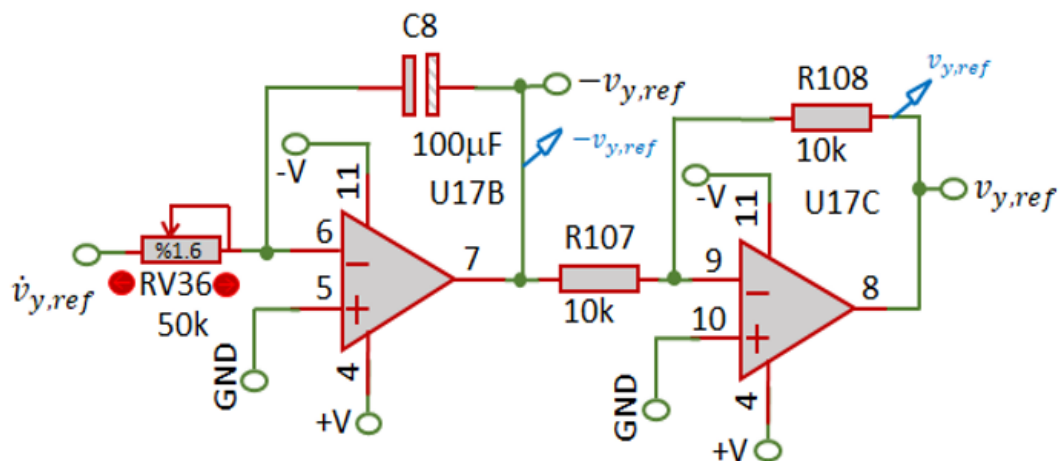




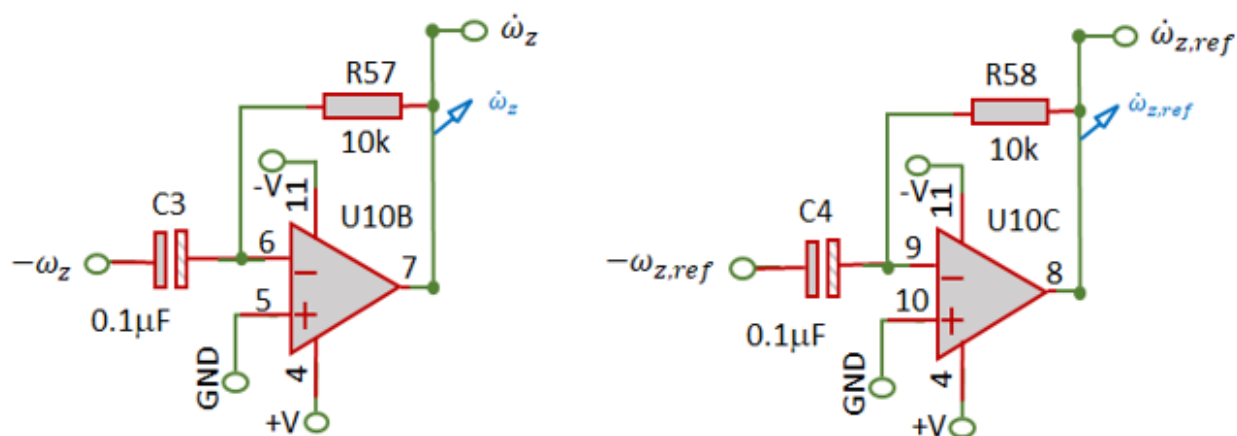
ANEXO B



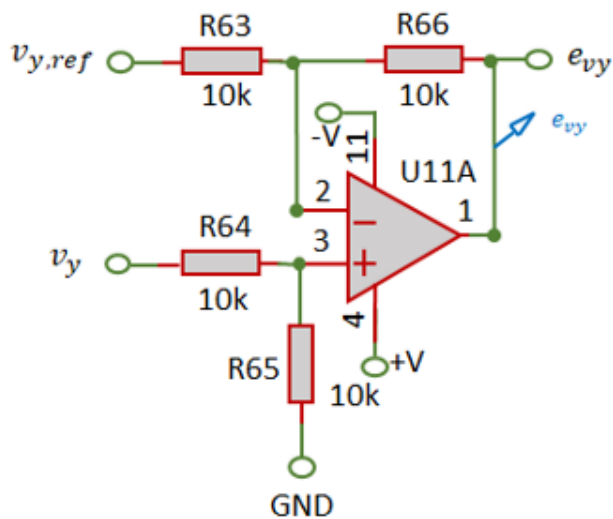
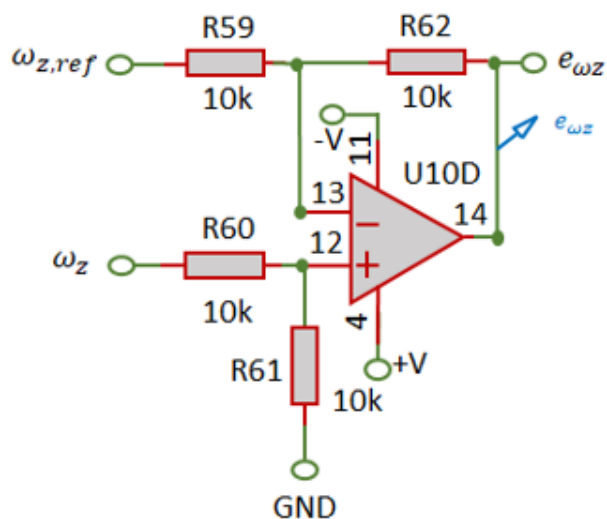
ANEXO C



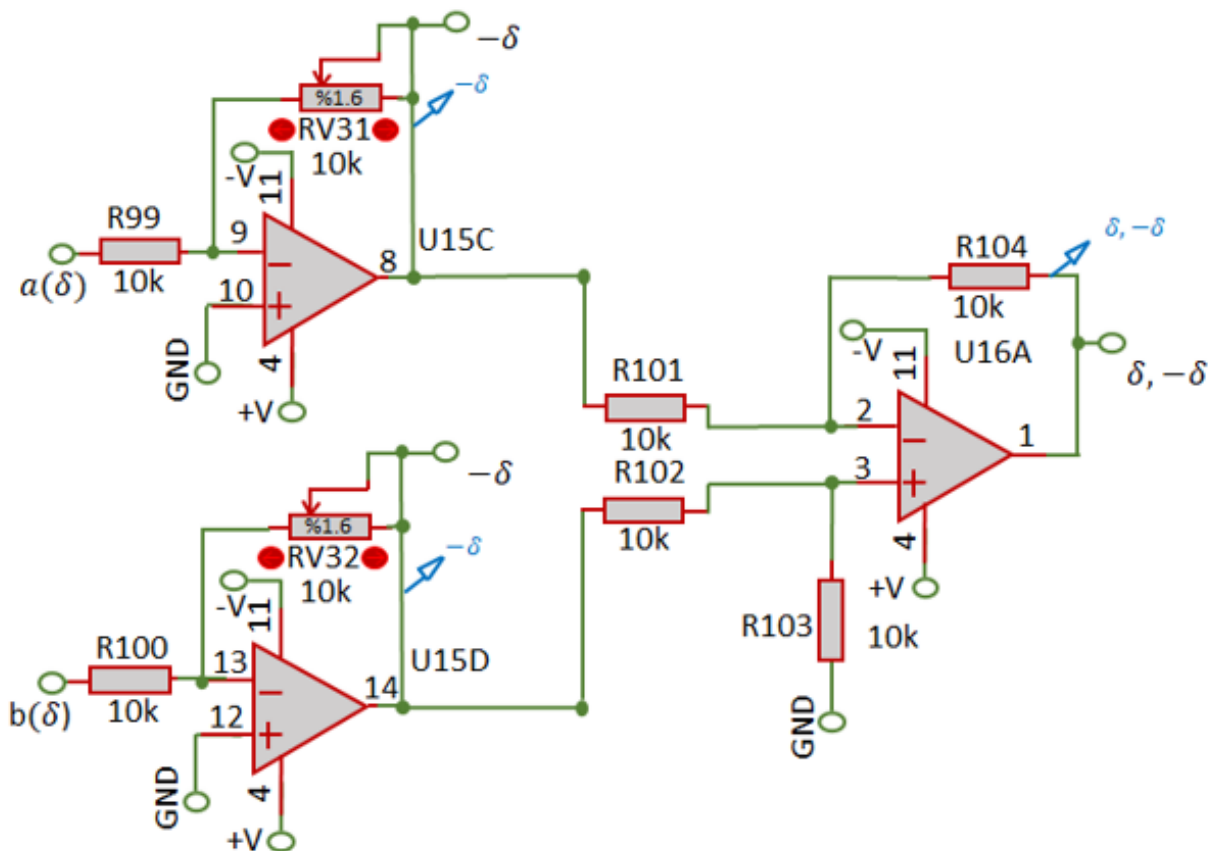
ANEXO D



ANEXO E



ANEXO F



ANEXO G

Tabla 1. Resultados de la plataforma en voltaje para la PPADV

<i>Mediciones</i>	ω_z	v_y	α_f	α_r	$F_{f,y}$
1	1	-0.97	0.49	-0.53	-0.4
2	2	-1.96	-0.03	-1.06	0.04
3	3	-2.92	-0.54	-1.57	0.50
4	4	-3.88	-1.05	-1.98	0.97
5	5	-4.85	-1.56	-2.49	1.45
6	6	-5.83	-2.08	-2.91	1.93
7	7	-6.80	-2.58	-3.41	2.40
8	8	-7.77	-3.08	-4.02	2.86
9	9	-8.73	-3.58	-4.35	3.33
10	10	-9.61	-4.07	-4.38	3.82
<i>Mediciones</i>	$F_{r,y}$	$\omega_{z,ref}$	$v_{y,ref}$	$\alpha_{f,ref}$	$\alpha_{r,ref}$
1	0.52	1	-1.05	0.53	-0.53
2	1.05	2	-2.09	0.07	-1.05
3	1.56	3	-3.11	-0.37	-1.57
4	1.96	4	-4.13	-0.82	-2.08
5	2.45	5	-5.17	-1.28	-2.60
6	2.88	6	-6.24	-1.75	-3.14
7	3.37	7	-7.27	-2.21	-3.65
8	4.02	8	-8.30	-2.65	-4.17
9	4.30	9	-9.37	-3.12	-4.74
10	4.77	10	-9.78	-3.30	-4.91
<i>Mediciones</i>	$F_{fy,ref}$	$F_{ry,ref}$	δ_c	M_z	e_{vy}
1	-0.51	0.55	0.67	0.59	0.09
2	-0.07	1.09	1.35	1.47	0.09
3	0.36	1.62	2.01	2.68	0.16
4	0.79	2.15	2.67	3.56	0.21
5	1.23	2.69	3.35	4.46	0.26
6	1.69	3.24	4.02	5.39	0.30
7	2.13	3.78	4.68	6.31	0.36
8	2.55	4.32	5.36	7.17	0.43
9	3.01	4.92	6.01	8.10	0.46
10	3.18	5.09	6.88	8.59	-0.1