



**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE**

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

**Artículo Académico Previo a la Obtención del Título de Ingeniero en Electrónica e Instrumentación**

**“CONTROL DE UN ROBOT OMNIDIRECCIONAL BASADO EN EL MODELO CINEMÁTICO Y DINÁMICO ”**

**Autores:**

Gallo Jiménez, Luis Vinicio  
Paste Guanoluisa, Byron David

Ing. Víctor H., Andaluz, Ph.D. *Tutor*





Congreso Internacional de Tecnologías Aplicadas  
ICAT 2020 : [Tecnologías aplicadas](#) págs. 444-457 | [Citar como](#)

## Control de un robot omnidireccional basado en el modelo cinemático y dinámico

Autores [Autores y afiliaciones](#)

Luis V. Gallo , Byron D. Paste , Jessica S. Ortiz , Víctor H. Andaluz 

Documento de sesión  
Primero en línea: 01 de abril de 2021

115

Descargas

Primero en línea  
01 de abril de 2021

DOI  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-71503-8\\_34](https://doi.org/10.1007/978-3-030-71503-8_34)

Nombre del editor  
Springer, Cham

Imprimir ISBN  
978-3-030-71502-1

ISBN en línea  
978-3-030-71503-8

Paquetes de libros electrónicos  
[Ciencias de la Computación](#)  
[Ciencias de la Computación \(RO\)](#)

### Control of an Omnidirectional Robot Based on the Kinematic and Dynamic Model

Luis V. Gallo , Byron D. Paste , Jessica S. Ortiz , and Víctor H. Andaluz 

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador  
(lvgallo, bdpaste, jsortiz4, vhandaluz1)@espe.edu.ec

**Abstract.** This work focuses on the proposal for the implementation and evaluation of control algorithms for the monitoring of autonomous trajectories based on the kinematic and dynamic model of an omnidirectional robotic platform in four wheel configuration type meccanum also built for the process of identification and validation of the dynamic parameters obtained from the mathematical model by means of an identification algorithm, the evaluation of these control algorithms is carried out experimentally on the Robotic Platform in real four-wheel omnidirectional configuration with which it also allows to evaluate the operation of the Hardware in the Loop control scheme (HIL), a technique that constitutes the untimely connection of external hardware with computer equipment allowing to simulate in real time the behavior of the robotic system with omnidirectional traction in four-wheel configuration type meccanum. Subsequently the data resulting from the Hardware in the Loop (HIL) control scheme will be compared to the data obtained in the experimental test for corresponding validation.

**Keywords:** Omnidirectional robot · Mecanum wheel · Hardware-in-the-Loop

#### 1 Introduction

In recent years, the robotics industry has developed rapidly. A lot of technologies are implemented in various applications [1, 2], e.g., mobile robots have the ability to perform specific tasks in an industrial work environment, homes, hospitals, among others [3]. Some representative mobile robots include household cleaning robots, military surveillance drones, warehouse robots and autonomous robots [4, 5]. The latter have become indispensable components in many applications, including research, warehouse management, surveillance and safety, and autonomous vehicles [6, 7].

Currently there are different types of platforms that are characterized by the type of wheels or by the mechanical structure that makes up it among the main ones can be detailed: *i) Unicycle robots*, they are formed of a mechanical structure with three degrees of freedom consisting of two conventional fixed wheels and a stable partial wheel that is independently controlled on the same axle, so it can automatically navigate in a specific work environment. This type of robot is the most commonly used in security, surveillance, transport, education and research applications [8]; *ii) robots car-like*, it has its kinematic model based on Ackerman's mobility system with its linear

© Springer Nature Switzerland AG 2021  
M. Botta-Tobae et al. (Eds.): ICAT 2020, CCTS 1388, pp. 1–14, 2021.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-71503-8\\_34](https://doi.org/10.1007/978-3-030-71503-8_34)

# II International Conference on Applied Technologies



## INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED TECHNOLOGIES - ICAT 2020

### CONTROL OF AN OMNIDIRECTIONAL ROBOT BASED ON THE KINEMATIC AND DYNAMIC MODEL

Luis V. Gallo, Byron D. Paste, Jessica S. Ortiz, and Víctor H. Andaluz  
lvgallo@espe.edu.ec







## Tareas útiles para los humanos



## En un entorno laboral externo

### INDUSTRIA



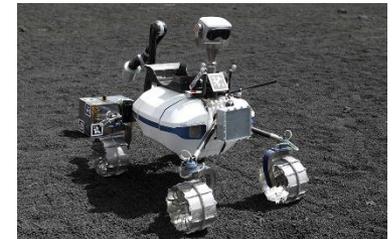
### HOGAR



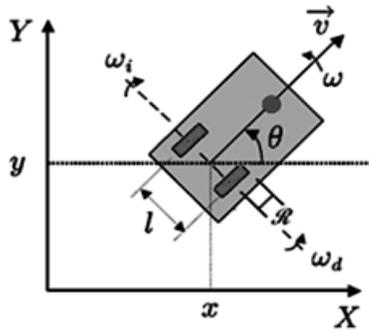
### HOSPITALES



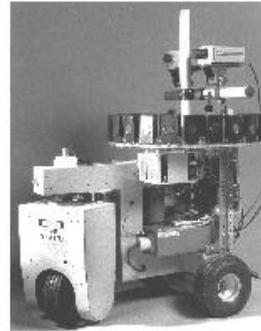
### INVESTIGACIÓN



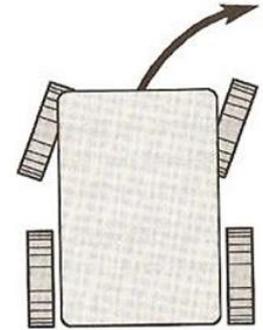
## Uniciclo



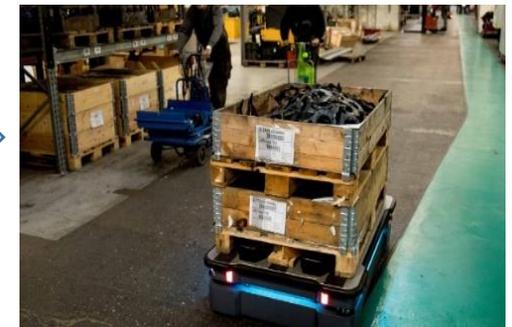
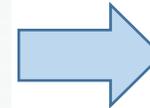
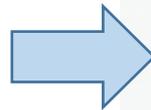
## Triciclo



## Cuadriciclo



- Realiza movimientos traslacionales y rotacionales simultáneamente optimizando la trayectoria de la plataforma al poder moverse en todas las direcciones.

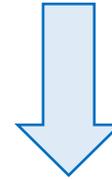
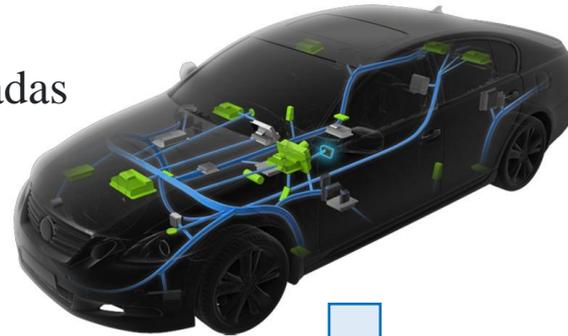
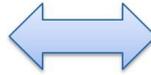


Una técnica en la que las señales reales de un controlador

```
1 -- @brief Receives input control signals and
2 -- sets the output by using a function f(x)
3 --
4 --
5 -- This file was generated by MATLAB/Simulink.
6 --
7 -- This MATLAB code was generated by Simulink.
8 --
9 -- This code was generated by MATLAB/Simulink.
10 --
11 -- This code was generated by MATLAB/Simulink.
12 --
13 --
14 --
15 --
16 --
17 --
18 --
19 --
20 --
21 --
22 --
23 --
24 --
25 --
26 --
27 --
28 --
29 --
30 --
31 --
32 --
33 --
34 --
35 --
36 --
37 --
38 --
39 --
40 --
41 --
42 --
43 --
44 --
45 --
46 --
47 --
48 --
49 --
50 --
51 --
52 --
53 --
54 --
55 --
56 --
57 --
58 --
59 --
60 --
61 --
62 --
63 --
64 --
65 --
66 --
67 --
68 --
69 --
70 --
71 --
72 --
73 --
74 --
75 --
76 --
77 --
78 --
79 --
80 --
81 --
82 --
83 --
84 --
85 --
86 --
87 --
88 --
89 --
90 --
91 --
92 --
93 --
94 --
95 --
96 --
97 --
98 --
99 --
100 --
```



Son conectadas



Sistema de pruebas que simula la realidad

```
1 -- @brief Receives input control signals and
2 -- sets the output by using a function f(x)
3 --
4 --
5 -- This file was generated by MATLAB/Simulink.
6 --
7 -- This MATLAB code was generated by Simulink.
8 --
9 -- This code was generated by MATLAB/Simulink.
10 --
11 -- This code was generated by MATLAB/Simulink.
12 --
13 --
14 --
15 --
16 --
17 --
18 --
19 --
20 --
21 --
22 --
23 --
24 --
25 --
26 --
27 --
28 --
29 --
30 --
31 --
32 --
33 --
34 --
35 --
36 --
37 --
38 --
39 --
40 --
41 --
42 --
43 --
44 --
45 --
46 --
47 --
48 --
49 --
50 --
51 --
52 --
53 --
54 --
55 --
56 --
57 --
58 --
59 --
60 --
61 --
62 --
63 --
64 --
65 --
66 --
67 --
68 --
69 --
70 --
71 --
72 --
73 --
74 --
75 --
76 --
77 --
78 --
79 --
80 --
81 --
82 --
83 --
84 --
85 --
86 --
87 --
88 --
89 --
90 --
91 --
92 --
93 --
94 --
95 --
96 --
97 --
98 --
99 --
100 --
```



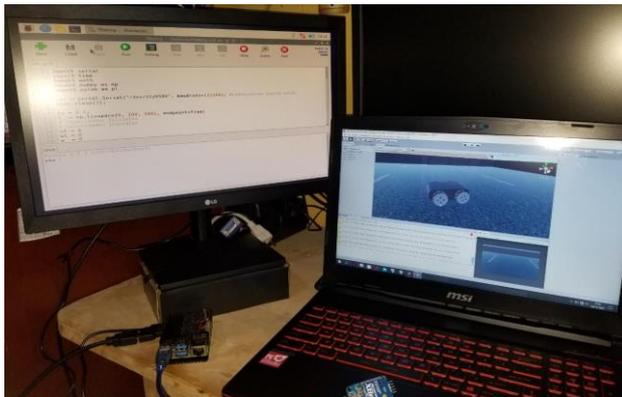
En el área de investigación, la implementación de un algoritmo de control tiene diferentes desventajas:



Indisponibilidad porque es caro



Limitado para la implementación



La solución es utilizar la técnica HIL

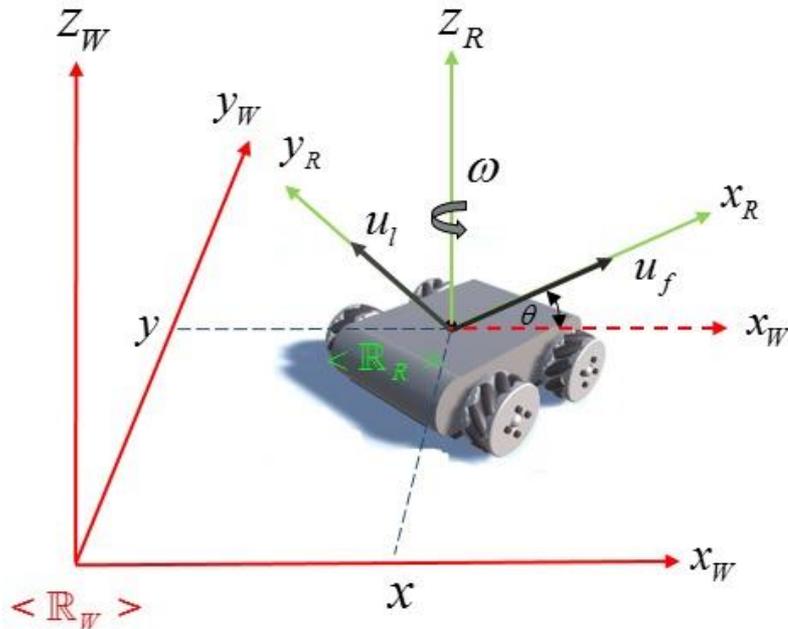


Implementar un **entorno Hardware-in-the-Loop, HIL**, que considere los modelos cinemáticos y dinámicos de un robot omnidireccional, a fin de evaluar algoritmos autónomos para el seguimiento de trayectorias. La validación del HIL se deberá realizar a través de pruebas experimentales sobre un robot móvil construido.

- **Investigar en las diferentes bases de datos científicos** acerca de la construcción, modelación, y control de robots omnidireccionales, con el propósito de ejecutar tareas de control autónomo.
- **Construir una plataforma robótica omnidireccional con dispositivos de bajo costo**, a fin de implementar algoritmos de control avanzado en lazo cerrado.
- **Modelar las características cinemáticas** y restricciones de movimiento de una plataforma robótica con tracción omnidireccional, con el propósito de implementar algoritmos de control avanzados.
- **Modelar las características dinámicas** de la plataforma robótica omnidireccional, con el fin obtener un modelo dinámico que considere como señales de **entradas las velocidades del robot**; además, el modelo dinámico deberá estar expresado en una estructura matricial adecuada para ser utilizados en esquemas de control avanzado.

- **Validar experimentalmente con el robot construido los modelos matemáticos** que representan la cinemática y dinámica de la plataforma robótica omnidireccional.
- **Proponer un esquema de control en lazo cerrado basado en los modelos del robot omnidireccional**, a fin de ejecutar tareas autónomas de seguimiento de trayectoria. Además, se deberá analizar la estabilidad del esquema de control propuesto con la finalidad de evaluar el comportamiento de los errores de control.
- **Implementar el esquema de control propuesto en un entorno “hardware in the loop”** considerando los modelos cinemáticos y dinámicos obtenidos del robot omnidireccional.
- **Implementar experimentalmente el esquema de control propuesto en la plataforma robótica construida**, con el propósito de validar los resultados obtenidos en el entorno “hardware in the loop”.





La posición del robot omnidireccional :

$$\xi = [x \ y \ \theta]^T$$

Donde las velocidades son representadas por:

$$\eta = [u_f \ u_l \ \omega]^T$$

$u_f$  Velocidad lineal frontal

$u_l$  Velocidad lineal lateral

$\omega$  Velocidad angular

$$\begin{cases} \dot{x} = u_f \cos(\theta) - u_l \sin(\theta) \\ \dot{y} = u_f \sin(\theta) + u_l \cos(\theta) \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases}$$

$$\dot{\xi}(t) = \mathbf{R}_R^W(\theta) \eta \quad (1)$$

El método utilizado se basa en el equilibrio de energías

$$L = E_C - E_P$$

La energía cinética se compone de la parte traslacional y rotacional

$$\mathbf{E}_C = \dot{\boldsymbol{\xi}}^T \mathbf{M}_{R1} \dot{\boldsymbol{\xi}} + \mathbf{W}^T \mathbf{I}_1 \mathbf{W}$$

Dónde,

$$\mathbf{M}_{R1} = \frac{1}{2} \text{diag}\{m_R, m_R, I_R\} \quad \text{and} \quad \mathbf{I}_1 = \frac{1}{2} \text{diag}\{I_W, I_W, I_W, I_W\}$$

$m_R$  : Masa total de la plataforma robótica

$I_R$  : Inercia total de la plataforma robótica

$I_W$  : Inercia de las ruedas

Luego, con la formulación de Euler-Lagrange

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q}$$

Se obtiene

$$\mathbf{M}_{R2} \ddot{\boldsymbol{\xi}} + \mathbf{E}^T \mathbf{I}_2 \dot{\mathbf{W}} = \mathbf{E}^T \boldsymbol{\tau}_i \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\tau}_i = \frac{k_{pa}}{R_{pa}} \left( v_i - k_{pb} \mathbf{W}_i \right), \quad \mathbf{v}_v = \mathbf{K}_P \left( \boldsymbol{\eta}_{ref} - \boldsymbol{\eta} \right) - \dot{\boldsymbol{\eta}} \mathbf{K}_D$$

$$u_{fref} = \left( \frac{m_R + \frac{4I}{r^2} + \frac{4K_{pa} K_{DTf}}{R_{pa} r}}{4K_{pa} K_{PTf} l^2} R_{pa} r \right) \dot{u}_f + \left( \frac{\frac{K_{pa} K_{PTf}}{R_{pa} r} + \frac{K_{pb}}{r^2}}{K_{pa} K_{PTf} l^2} R_{pa} r \right) u_f - \left( \frac{m_R}{4K_{pa} K_{PTf} l^2} R_{pa} r \right) \omega u_l$$

$$u_{lref} = \left( \frac{m_R + \frac{4I}{r^2} + \frac{4K_{pa} K_{DTl}}{R_{pa} r}}{4K_{pa} K_{PTl} l^2} R_{pa} r \right) \dot{u}_l + \left( \frac{m_R}{4K_{pa} K_{PTl} l^2} R_{pa} r \right) \omega u_f + \left( \frac{\frac{K_{pa} K_{PTl}}{R_{pa} r} + \frac{K_{pb}}{r^2}}{K_{pa} K_{PTl} l^2} R_{pa} r \right) u_l$$

$$\omega_{ref} = \left( \frac{I_R + \frac{4l^2 I}{r^2} + \frac{4K_{pa} K_{DR} l}{R_{pa} r}}{4K_{pa} K_{PR} l^2} R_{pa} r \right) \dot{\omega} + \left( \frac{\frac{K_{pa} K_{PR} l^2}{R_{pa} r} + \frac{K_{pb} l^2}{r^2}}{K_{pa} K_{PR} l^2} R_{pa} r \right) \omega$$

El modelo dinámico del robot omnidireccional obtenido está representado por

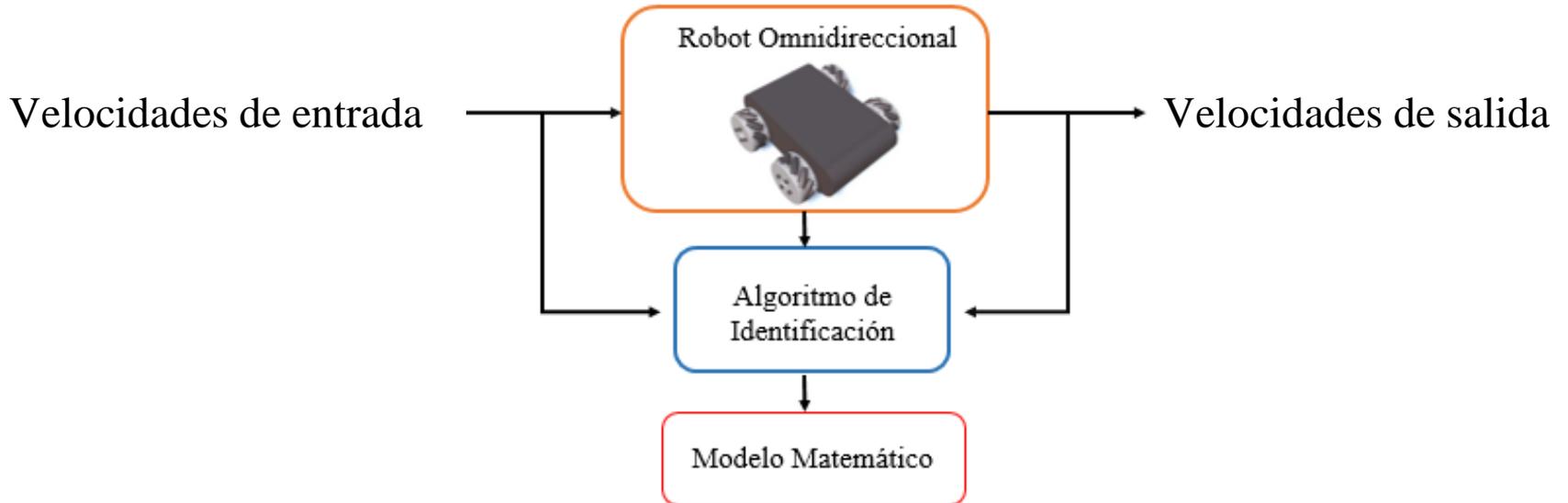
$$\begin{bmatrix} u_{fref} \\ u_{lref} \\ \omega_{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \zeta_1 & 0 & 0 \\ 0 & \zeta_2 & 0 \\ 0 & 0 & \zeta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_f \\ \dot{u}_l \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \zeta_4 & -\omega\zeta_5 & 0 \\ \omega\zeta_6 & \zeta_7 & 0 \\ 0 & 0 & \zeta_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_f \\ u_l \\ \omega \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{\eta}_{ref}(t) = \mathbf{M}(\boldsymbol{\zeta})\dot{\boldsymbol{\eta}}(t) + \mathbf{C}(\boldsymbol{\zeta}, \boldsymbol{\eta})\boldsymbol{\eta}(t)$$

Dónde,

$\mathbf{M}(\boldsymbol{\zeta})$  Representa la matriz de masa

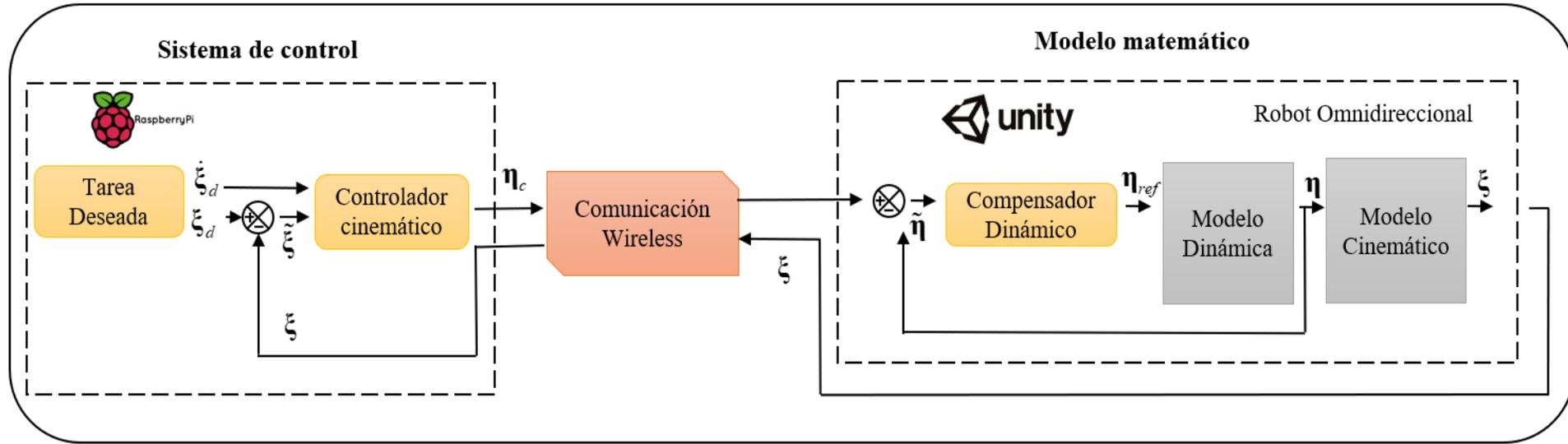
$\mathbf{C}(\boldsymbol{\zeta}, \boldsymbol{\eta})$  Representa la matriz de fuerzas centrífugas



a) Diagrama de bloque de identificación







a) Esquema de control de Hardware In The Loop propuesto

El controlador propuesto está destinado a lograr el seguimiento de la trayectoria del robot omnidireccional:

## *Controlador cinemático*

$$\boldsymbol{\eta}_c = \mathbf{J}^{-1} \left( \dot{\boldsymbol{\xi}}_d + \mathbf{G} \tanh(\tilde{\boldsymbol{\xi}}) \right)$$

$\mathbf{J}$  = Matriz jacobiana

$\dot{\boldsymbol{\xi}}_d$  = Derivada de las posiciones deseadas

$\mathbf{G}$  = Matriz de ganancia

$\tilde{\boldsymbol{\xi}}$  = Errores de posición

## *Compensación dinámica*

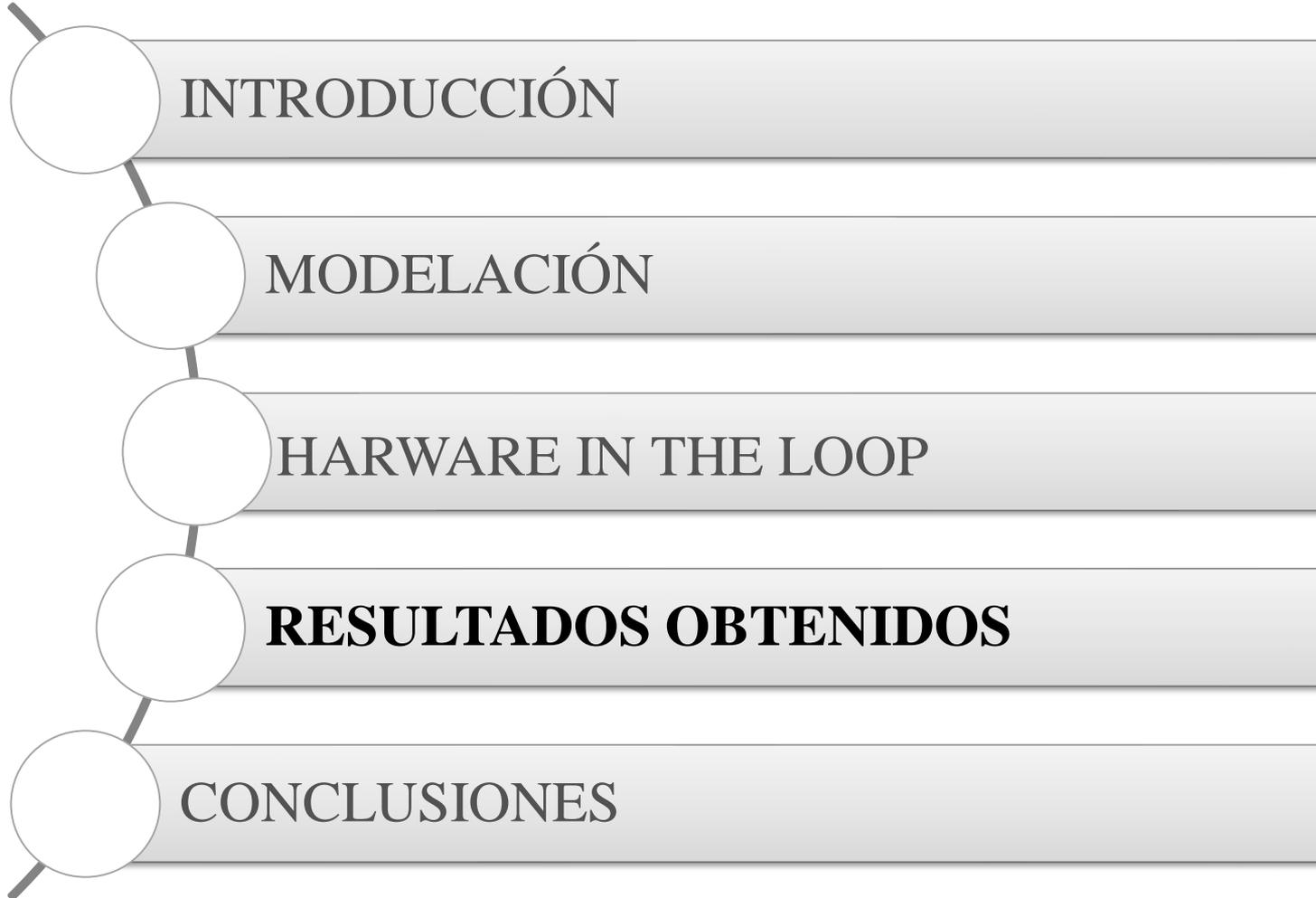
$$\boldsymbol{\eta}_{ref} = \mathbf{M} \left( \dot{\boldsymbol{\eta}}_{cp} + \mathbf{K} \tanh(\tilde{\boldsymbol{\eta}}) \right) + \mathbf{C}\boldsymbol{\eta}$$

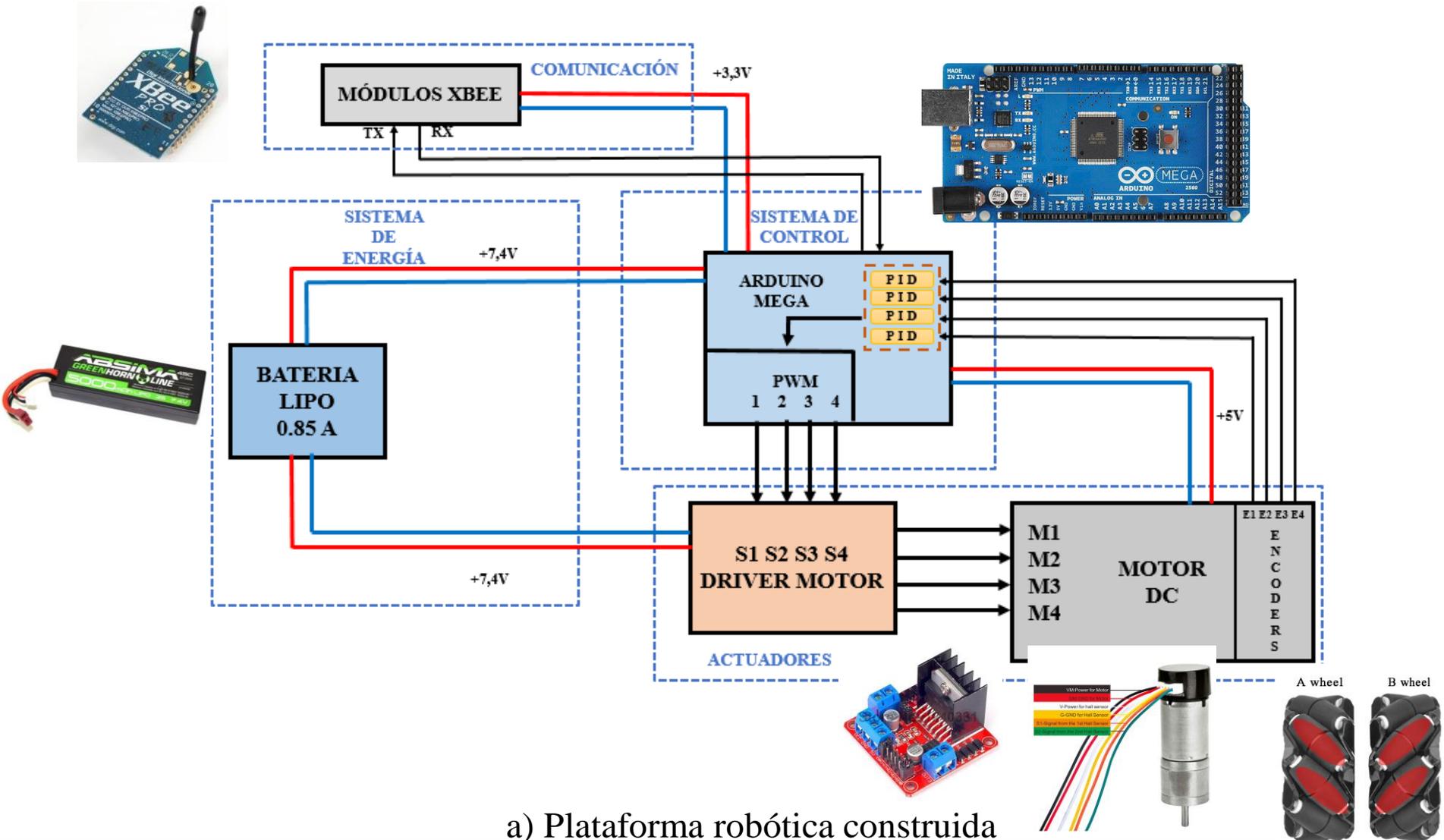
$\dot{\boldsymbol{\eta}}_{cp}$  = Derivada de las velocidades a la salida del control cinemático

$\boldsymbol{\eta}$  = Velocidades de la plataforma robótica

$\mathbf{K}$  = Matriz de ganancia

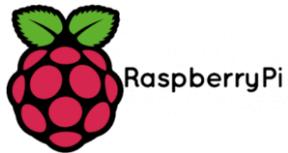
$\tilde{\boldsymbol{\eta}}$  = Errores de velocidad



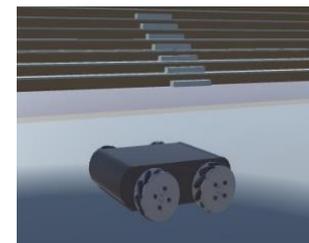
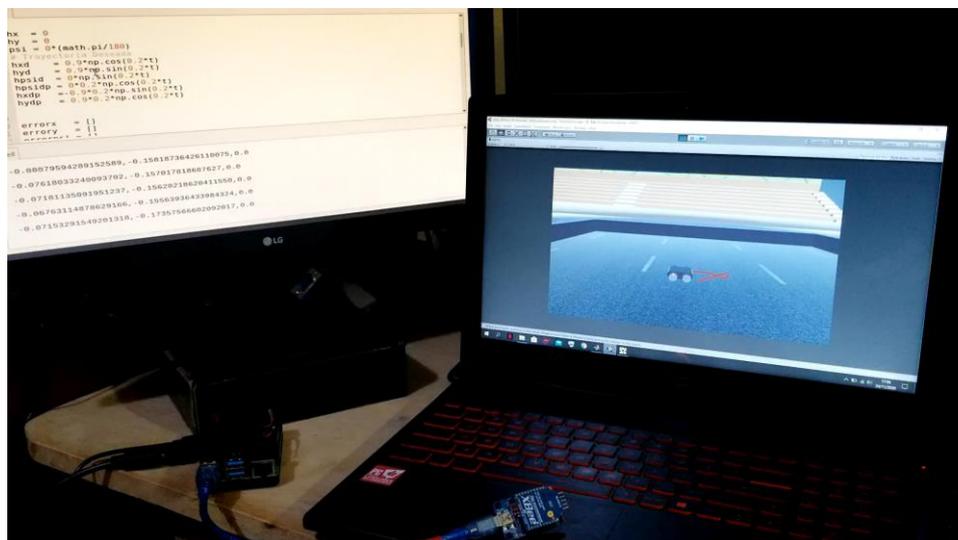


a) Plataforma robótica construida

# HARDWARE IN THE LOOP



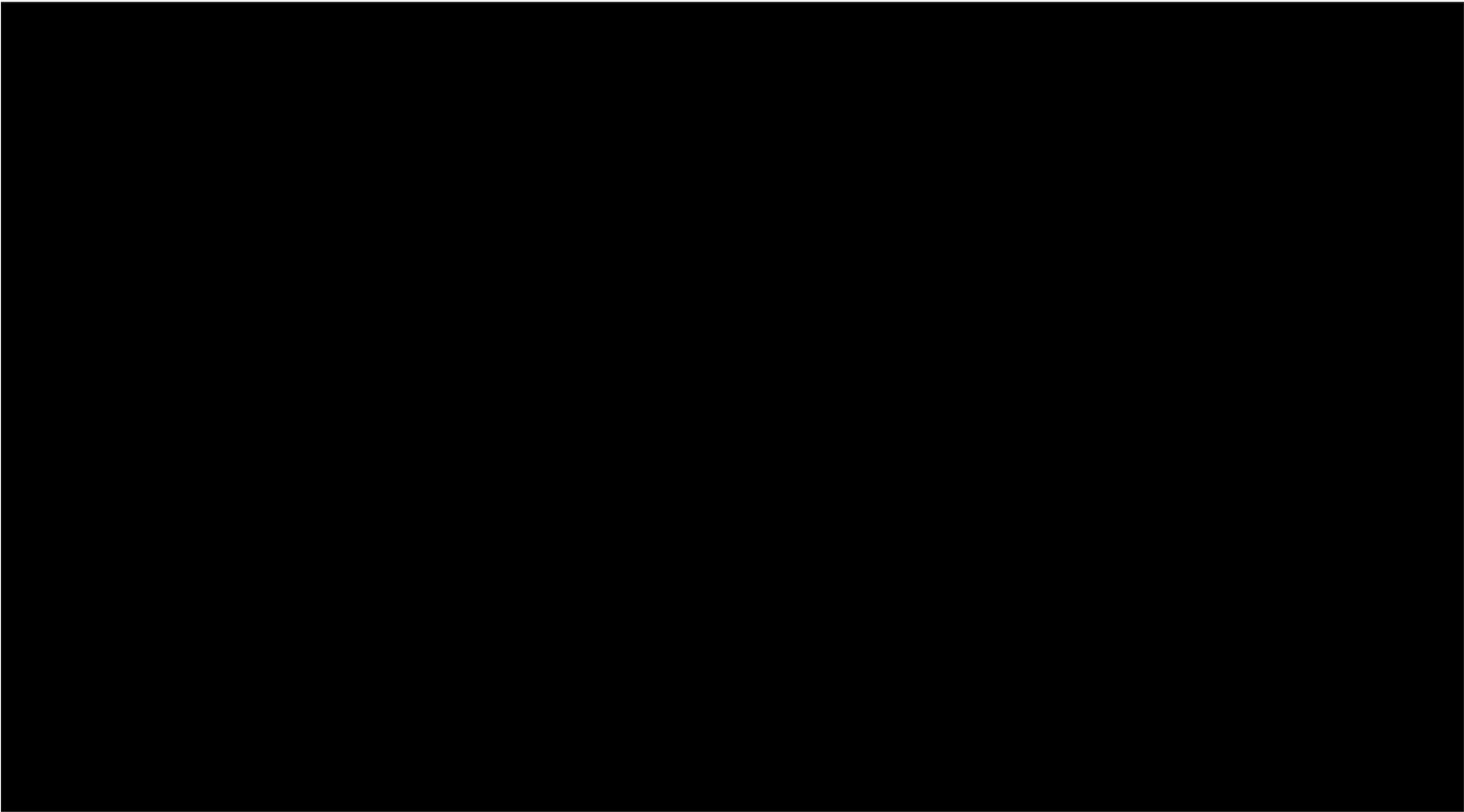
```
67 # Ley de control
68 vd1 = np.array([[hxdp[k], hydp[k], hpsidp[k]]])
69 vd = np.transpose(vd1)
70 vc = np.dot(np.linalg.inv(J),vd + np.dot(W,he))
71
72 # Valores del controlador cinematico
73 urc1 = vc[0]
74 urc1 = float(urc1)
75 ulc1 = vc[1]
76 ulc1 = float(ulc1)
77 wcl = vc[2]
78 wc = float(wcl)
79
80 #Envio de valores del controlador cinematico a Matlab-Unity
81 cadena = str(urc1) + "," + str(ulc1) + "," + str(wc) + "\n"
82 print(cadena)
83 ser.write(cadena.encode('ASCII'))
84
85 #Recibo Velocidades De Matlab-Unity
86 Valores = ser.readline().strip()
87 Velocidades = Valores.decode('
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
1000
```



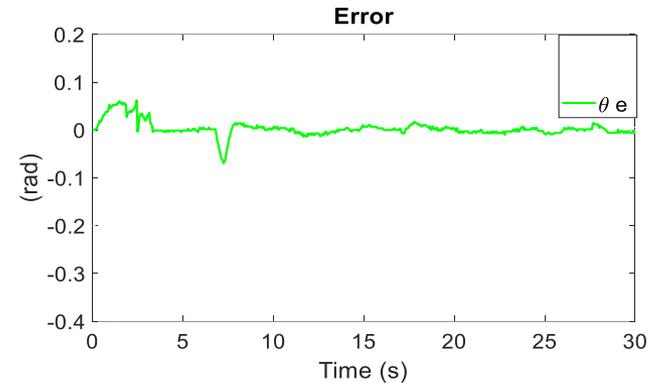
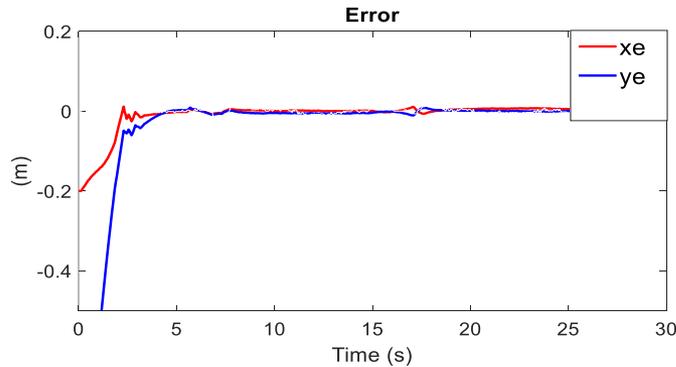
a) Sistema de control

b) Implementación de la técnica HIL

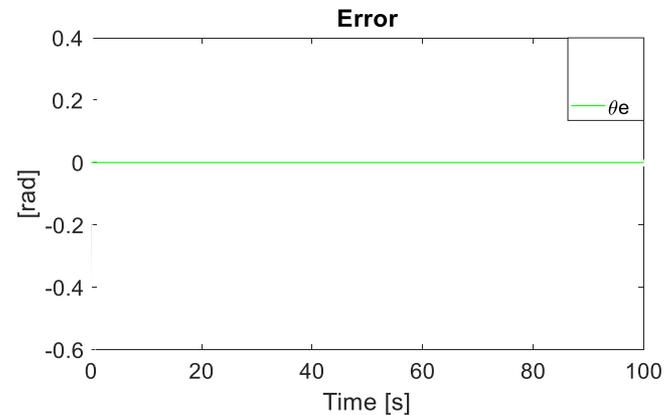
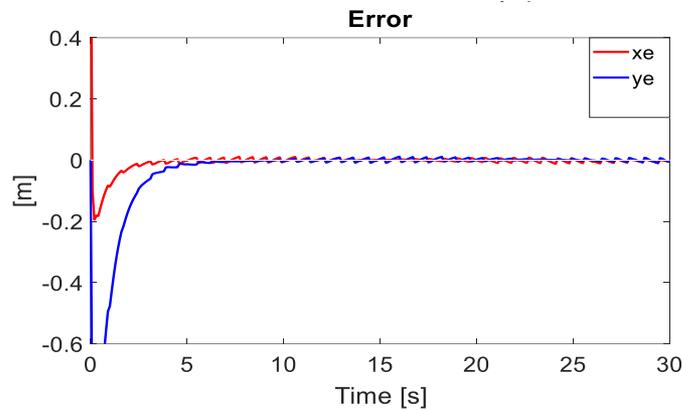
c) Entorno Virtual



Los resultados obtenidos muestran la estabilidad del algoritmo de control de trayectoria.



a) Errores de control en plataforma robótica



d) Control de errores con la técnica HIL



- La construcción del robot omnidireccional con ruedas tipo mecanum es más conveniente para realizarse en configuración AB y las disposiciones de las ruedas deben ser rectangulares
- El modelo cinemático y dinámico proporciona una mayor precisión de comportamiento con respecto al sistema físico para implementar y evaluar algoritmos de control avanzados
- El esquema de control propuesto funciona de manera optima uniendo el controlador cinemático que calcula el error de posición en cada periodo de muestreo, mientras que la compensación dinámica recibe esas velocidades calculadas para generar velocidades de referencia que son enviados a los modelos matemáticos.
- La técnica HIL es una opción viable para implementar algoritmos de control en situaciones en las que la planta real no está disponible, ya que el comportamiento del sistema se puede reproducir de forma fiable.



**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE**

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

**Artículo Académico Previo a la Obtención del Título de Ingeniero en Electrónica e Instrumentación**

**“CONTROL DE UN ROBOT OMNIDIRECCIONAL BASADO EN EL MODELO CINEMÁTICO Y DINÁMICO ”**

**Autores:**

Gallo Jiménez, Luis Vinicio  
Paste Guanoluisa, Byron David

Ing. Víctor H., Andaluz, Ph.D. *Tutor*

