

Diseño e implementación de un prototipo a escala de robot móvil acompañante

Mesías Ulloa Alejandro Ramiro, López Molina Christian Ramiro, Sotomayor Orozco Nelson

*Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional
Quito - Ecuador*

Abstract- Se presenta el diseño e implementación de un robot móvil acompañante, explorando nuevos aspectos de la robótica, haciendo énfasis en la interacción robot-humano. Dicho robot es de tipo terrestre rodante de tracción diferencial, con un sistema de control basado en microprocesadores.

Se implementó un sistema de seguimiento visual, mediante el sensor “KINECT” para el reconocimiento y ubicación de la forma humana. El prototipo acompaña a su usuario durante una caminata a ritmo moderado y de trayectoria horizontal sin desniveles, mientras permanezca en el campo de visión del sensor. La adquisición y análisis de la posición de la persona se realiza a través del software KINECT SDK, para Visual Studio de Microsoft, ejecutándose en una computadora portátil a bordo del robot.

Se implementó una interfaz hombre-máquina para un teléfono inteligente con sistema operativo Android, con la cual se activa o desactiva el modo de seguimiento; con el seguimiento desactivado, la interfaz permite manejar el robot.

El robot cuenta con sensores para evitar colisiones y un sensor para detección de gases nocivos e inflamables.

Este robot puede convertirse en una ayuda para personas con discapacidad, en rehabilitación o de edad avanzada, al llevar objetos que ellos no puedan cargar, entre otras aplicaciones.

I. INTRODUCCIÓN

La expansión de la robótica ha llevado al desarrollo de robots de servicio fuera del ámbito industrial y dentro de ambientes cotidianos, como por ejemplo robots de limpieza, educacionales, asistentes en oficinas, asistentes médicos, de vigilancia, acompañamiento o para tele-presencia. Estos robots de servicio, muchas veces móviles, necesitan una interacción cada vez más profunda, cercana y compleja con las personas. De aquí nace el campo de la robótica llamado Interacción Humano-Robot o HRI por sus siglas en inglés.

HRI es un área de estudio interdisciplinario sobre cómo los humanos interactúan con los robots y acerca de

cómo diseñar sistemas capaces de ejecutar tareas interactivas en ambientes humanos. El robot de servicio necesita sensores distintos a los que normalmente se manejan en ambientes industriales para que tengan nuevas capacidades. Por ejemplo reconocer y categorizar objetos, reconocer y localizar humanos o incluso saber su estado emocional [1].

Es en este marco de estudio que este proyecto pretende hacer un aporte al construir un robot acompañante prototipo, que como tarea principal siga a su usuario humano durante una caminata mediante el empleo de nueva tecnología de reconocimiento visual de humanos.

II. ESTRUCTURA DEL SISTEMA

El prototipo de robot acompañante cuenta con dos modos de funcionamiento: modo remoto que permite llevar el vehículo hacia donde el usuario lo requiera y modo de seguimiento en el cual el vehículo seguirá al usuario de manera autónoma.

Los dos modos son operados haciendo uso de un teléfono celular de sistema operativo ANDROID, que se comunica con el prototipo de manera inalámbrica mediante tecnología Bluetooth.

El modo de seguimiento es posible gracias al sensor de movimiento KINECT, desde el cual se adquieren datos hacia un computador portátil. Este procesa la información y envía los datos de ubicación del usuario mediante comunicación serial, hacia el microcontrolador Atmega164p encargado del control de motores y manejo de periféricos; en la Figura 1, se muestra la arquitectura del prototipo.

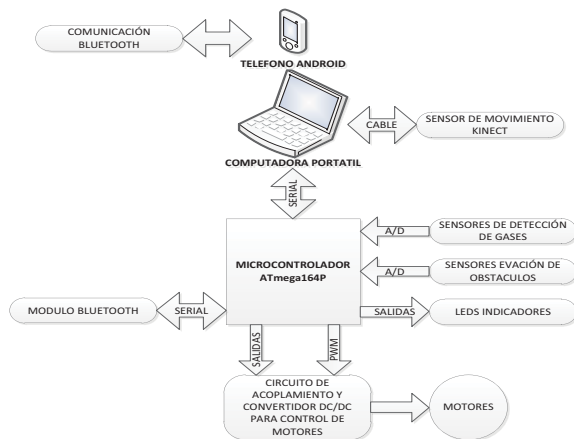


Figura 1 Ilustración de partes constitutivas del prototipo

Para la locomoción se utiliza dos motores DC en configuración diferencial, manejados haciendo uso de un convertor DC/DC que permite que el microcontrolador varíe la velocidad y sentido de giro de acuerdo a las necesidades del sistema.

Para brindar ventajas al usuario, el prototipo cuenta con un sensor para la detección de gases nocivos e inflamables (GLP, CO y CH₄), con señal de salida analógica, esta información se envía mediante Bluetooth para ser mostrada en la interfaz programada en el celular.

A. Sensor de movimiento KINECT

KINECT es un dispositivo adicional lanzado por Microsoft para su consola de juegos Xbox 360 en noviembre de 2010. Dicho dispositivo es un sensor, que tiene el propósito de reconocer el cuerpo humano, para permitir a los jugadores interactuar con los videojuegos mediante movimientos corporales, gestos o comandos de voz, sin necesidad de manipular controles o portar aparatos [19].

Como elementos principales, el sensor KINECT cuenta con una cámara a color, una segunda cámara monocromática de luz infrarroja, un proyector láser infrarrojo y el circuito integrado PS1080 de tipo System on Chip [25].



Figura 2 Distribución de los elementos del KINECT, tomado de [25]

Su campo de visión tiene una apertura horizontal de 57° y vertical de 43°. Cuenta con un motor en la base del sensor en +27° o -27° y tiene un sensor acelerómetro para estimar su inclinación real. El rango de profundidad absoluto que puede percibir es de 0,8 m a 4 m, siendo el

rango recomendado, para posicionar a las personas, de 1,2 m a 3,5 m [26][28].

Los datos que entrega el sensor a través del enlace USB 2.0 son de tipo flujo de imagen (image stream), a una velocidad de 30 veces cada segundo (30Hz). Un flujo de imagen es RGB de 8bits y resolución de 640 x 480 pixeles; y el otro flujo de imagen es de profundidad de 11bits con resolución de 320 x 240 pixeles [29].

KINECT utiliza dos voltajes de alimentación: 5V a través de la conexión USB a la PC, pero también 12V desde otro cable [29].

Hay que tomar en cuenta que una parte importante de la tecnología KINECT no se encuentra a bordo del cuerpo del sensor, sino que se trata de software de *Interfaz de Usuario Natural* (NUI) que corre en la PC, esta interfaz cuenta con los drivers que permiten a Windows comunicarse con KINECT y recibir los flujos de imagen de color y profundidad. El tratamiento de estos flujos de información se lo hace utilizando la plataforma de desarrollo Visual Studio de Microsoft, valiéndose esta a su vez del paquete de desarrollo de software KINECT SDK.

El algoritmo de identificación del KINECT SDK, se basa únicamente en las imágenes de profundidad y no en las de color. La razón para ello es que en la imagen de profundidad, las siluetas de los objetos, incluyendo las partes del cuerpo humano, quedan naturalmente separadas del fondo de la imagen y de otros objetos, como se representa en la Figura 3, lo que no es posible con una imagen plana de color. Además, en la imagen de profundidad no influye la iluminación de la escena ni la textura de los objetos. Estas condiciones facilitan enormemente el trabajo del algoritmo de la API NUI [30].



Figura 3 Imagen de profundidad procesada para representarla en una perspectiva lateral, lo cual enfatiza su carácter tridimensional, tomado de [31]

El método desarrollado por el grupo *Microsoft Research Cambridge & Xbox Incubation* en la Universidad de Cambridge, tiene por premisa el encontrar la figura humana y sus partes a partir de cada cuadro de imagen por sí solo; es decir, sin necesidad de tener en cuenta imágenes anteriores, ni información de dónde estuvo o va estar la persona [30].

El método tampoco trata de encontrar la silueta completa del humano y luego ir identificando sus partes de forma jerárquica. El algoritmo busca las partes humanas directamente. Es más bien simplificado, iterativo y trabaja a nivel de pixeles para clasificarlos

según 31 segmentos del cuerpo humano, que son las áreas coloreadas en la Figura 4 [30].



Figura 4 Segmentos en los que se clasifican los píxeles de la imagen de profundidad, tomado de [30]

III. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

A. Diseño Mecánico

El prototipo ha sido construido con tableros de fibra de media densidad (MDF, por sus siglas en inglés). Se escogió este material por su resistencia mecánica, costo, versatilidad y bajo peso; este último factor es de gran utilidad ya que el vehículo al tener como principal objetivo el ayudar a cargar objetos, no puede desperdiciar su capacidad de carga; además se puede mencionar que si bien el material es sensible a la humedad, esto no se muestra como un problema ya que el prototipo está diseñado para funcionar en ambientes cubiertos como casas y edificios.

Las llantas del vehículo son neumáticos inflables, esto por el bajo peso y gran agarre, reduciendo así los deslizamientos y haciéndolo útil para superficies con bajo coeficiente de fricción como baldosas o pisos encerados.



Figura 5 Prototipo construido

Se usa motores de corriente continua con caja reductora, que presentan las siguientes características:

TABLA I
CARACTERÍSTICAS DE MOTOR DC

Característica	Nominal	Unidades
Torque	3	N.m
Velocidad	90	rpm
Voltaje de funcionamiento	12	V
Corriente	3	A

Las características mencionadas permiten un funcionamiento óptimo, permitiendo que el prototipo tenga las siguientes características:

TABLA II
CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DEL PROTOTIPO

Característica	Nominal	Máxima	Unidades
Velocidad	0,9	1,45	m/s
Peso neto	6	-	Kg
Capacidad de carga	3	5	Kg

B. Diseño Electrónico de Potencia

Los motores que se van a utilizar son motores de corriente continua con las características mencionadas anteriormente, por tal razón se escogió una batería seca de las siguientes características:

TABLA III
CARACTERÍSTICAS DE BATERÍA, TOMADO DE [34]

CARACTERÍSTICA	VALOR	UNIDAD
Voltaje nominal	12	V
Capacidad nominal	12	12 AH (20h@600mA hasta 10,5V)
Máxima corriente de descarga (7 min)	36	A
Peso aproximado	3,7	Kg

La electrónica de potencia del prototipo se basa en un convertor DC-DC tipo puente H, que es capaz de soportar los cambios de voltaje y corriente, provocados por la variación de velocidad y cambio de sentido de giro de los motores; por esta razón el dimensionamiento de los transistores que lo conforman, se basa en los parámetros de funcionamiento de los motores.

Como resultado de las pruebas realizadas a los motores, se ha determinado que la relación de trabajo mínima para lograr romper la inercia del vehículo es de 0,35 ($D=0,35$), de esto se tiene que el voltaje medio mínimo que alcanzará el convertor es (ecuación 1):

$$V_{out_{min}} = D_{min} \cdot V_{in} = 0,35 \cdot 12 = 4,21V \quad (1)$$

La corriente nominal (I_n) del motor es 3[A], y la corriente máxima del motor es 10[A], de aquí que los transistores deberán soportar una corriente máxima de:

$$I_{T_{max}} = 10 \text{ A}$$

La frecuencia de la señal PWM de activación de la parte inferior del puente es:

$$f_{sw} = 120 \text{ Hz}$$

Por lo mencionado anteriormente se ha seleccionado los siguientes transistores:

- Para la parte superior del puente: TIP147 (PNP)
- Para la parte inferior del puente: TIP142 (NPN)

TABLA IV
CARACTERÍSTICAS DE LOS TRANSISTORES, TOMADO DE [37] [38]

SÍMBOLO	CARACTERÍSTICA	VALOR	UNIDAD
$V_{EBO(MAX)}$	Voltaje base-emisor máximo.	-5 TIP147 5 TIP142	V
I_C	Corriente de colector máxima.	-10 TIP147 10 TIP142	A
I_B	Corriente de base máxima.	-0,5 TIP147 0,5 TIP142	A
$V_{BE(SAT)}$	Voltaje base-emisor de saturación.	-3,5 TIP147 3,5 TIP142	V
t_d	Delay time	0,15	μs
t_r	Rise time	0,55	μs
t_{STG}	Storage time	2,5	μs
t_f	Fall time	2,5	μs

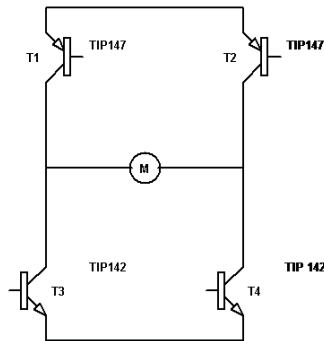


Figura 6 Conversor DC/DC

C. Diseño Electrónico de Control

El prototipo diseñado utiliza un microcontrolador ATmega164P para realizar la adquisición de datos provenientes desde la computadora, realizar el algoritmo de control, la conversión analógica/digital de los sensores de detección de gases, prevención de colisiones, la comunicación mediante el módulo Bluetooth con el celular y el control de los motores.

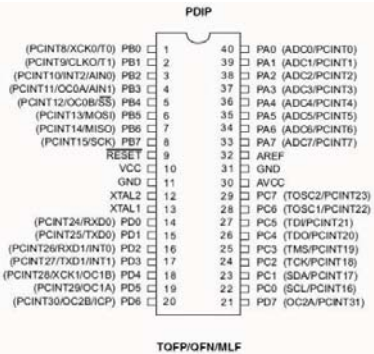


Figura 7 Microcontrolador ATmega164P, tomado de [36]

Los recursos utilizados del microcontrolador son los siguientes:

- LEDs indicadores.

Asignación de pines del microcontrolador para LEDs indicadores:

TABLA V ASIGNACIÓN DE PINES PARA LEDs INDICADORES

Nombre	PIN	Tipo	Función [1L]
PC7	29	Salida	Indicador de control encendido.
PC6	28	Salida	Indicador de modo seguimiento listo.
PC5	27	Salida	Indicador de seguimiento.
PC4	26	Salida	Indicador de modo seguimiento en espera.
PC3	25	Salida	Indicador de modo remoto.

- Entradas A/D:

Los sensores para prevención de colisiones y para detección de gases contaminantes, se comunican con el microcontrolador enviando señales analógicas con un rango de entre 0[V] y 5[V].

El modulo de conversión A/D interno del microcontrolador usa como referencia el voltaje de

alimentación ($V_{cc}=5V$) y realiza una conversión a $n=10$ bits, teniendo una resolución de 0,005 [V].

TABLA VI ASIGNACIÓN DE PINES PARA ENTRADAS A/D

Nombre	PIN	Tipo	Función
PA4	39	ADC3	Sensor ultrasónico 1.
PA3	38	ADC2	Sensor ultrasónico 2.
PA2	37	ADC1	Sensor de detección de gases nocivos contaminantes

- Puerto serial:

El microcontrolador mantiene comunicación por vía serial, con dos periféricos: un módulo Bluetooth y una computadora portátil a través del circuito integrado MAX232, a una velocidad de 9600bps, 8 bits, 1 bit de parada y sin paridad.

TABLA VII ASIGNACIÓN DE PINES PARA COMUNICACIÓN SERIAL

Nombre	PIN	Tipo	Función
PD0	14	Rx	Recepción de datos desde computadora.
PD1	15	Tx	Transmisión de datos hacia computadora.
PD2	16	Rx1	Recepción de datos desde módulo Bluetooth.
PD3	17	Tx1	Transmisión de datos hacia modulo Bluetooth.

- Control de motores.

El control de velocidad y sentido de giro se lo realiza controlando un puente de 4 transistores (conversor DC/DC), a través de un circuito de opto-acoplamiento.

Para controlar cada motor se utiliza 2 pines digitales de salida y una salida PWM; las dos salidas digitales sirven para controlar el encendido/apagado de la parte superior del puente, y la salida PWM para controlar el encendido/apagado de la parte inferior del puente (Figura 8).

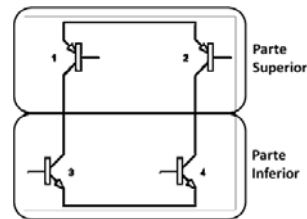


Figura 8 Puente de transistores

Desde el microcontrolador se emiten las señales y antes de llegar al sistema de opto-acoplamiento pasa por un circuito lógico (Figura 9) que permite usar la misma señal PWM para encender/apagar la parte inferior del puente.

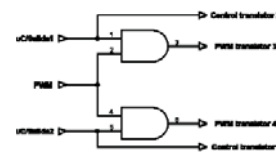


Figura 9 Circuito lógico, asociado al puente de transistores

TABLA VIII

ASIGNACIÓN DE PINES PARA CONTROL DE MOTORES

Nombre	PIN	Tipo	Función [1L]
PB1	2	Salida	Salida 1, motor 1
PB2	3	Salida	Salida 2, motor 1
PD5 (OC1A)	19	PWM	Señal PWM para motor 1
PB3	4	Salida	Salida 1, motor 2
PB4	5	Salida	Salida 2, motor 2
PD6 (OC2B)	20	PWM	Señal PWM para motor 2

IV. DESARROLLO DE SOFTWARE

La programación ha sido realizada en tres plataformas diferentes.

El programa para el elemento central de control, el microcontrolador ATMegal64, fue desarrollado en la herramienta Bascom-AVR, que es un compilador de lenguaje BASIC con librerías para microcontroladores de ATMEL.

El programa para la utilización del sensor KINECT y la adquisición de la posición de la persona es una aplicación para PC con Windows 7 y fue desarrollada en el entorno Visual Studio, en lenguaje C# (C Sharp), usando las herramientas instaladas con el paquete KINECT for Windows SDK.

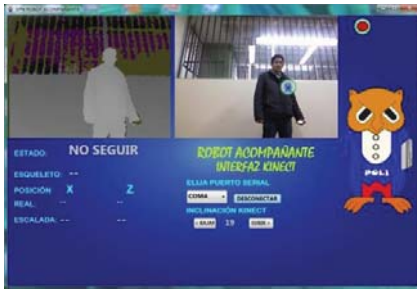


Figura 10 Aplicación para PC

El programa para la interfaz de control inalámbrica en el teléfono inteligente es una aplicación para el sistema operativo Android y fue desarrollada con una herramienta web experimental, ofrecida por Google y el Instituto Tecnológico de Massachuset, llamada Appinventor que presenta un lenguaje de programación por bloques de instrucciones.

A. Operación Global del Robot Acompañante

Previamente, deben activarse los interruptores de alimentación para los circuitos de potencia y de control, e iniciarse en el computador la aplicación para el KINECT.

Entonces, el usuario puede abrir la aplicación de la interfaz de control en el teléfono inteligente y conectarse al robot. Inmediatamente, el microcontrolador empieza a reportar el estado del sensor de gases nocivos e inflamables a la interfaz del teléfono. Dicho reporte es independiente y persiste durante todo el funcionamiento del robot.

En este momento, el robot se encuentra por defecto en el modo de paro. Los motores están detenidos. No existe comunicación con el computador. La forma en que

se indica este modo en el robot es encendiendo sólo una de las dos luces de faros.

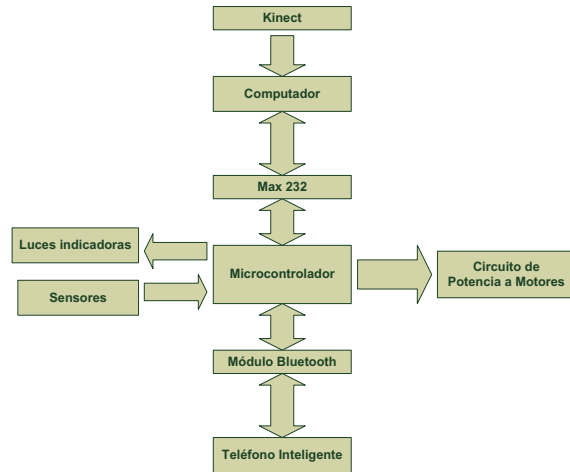


Figura 11 Relaciones entre los componentes sobre los que actúa el sistema de control

Aquí el usuario puede escoger entre el modo de manejo o el modo de seguimiento.

Para manejar al robot, el usuario debe pulsar el botón “Manejo” de la interfaz del teléfono, lo cual despliega en la pantalla el mando táctil de 5 posiciones. Cuando el usuario mueve el mando, la interfaz envía los códigos de la dirección al microcontrolador, el cual asigna velocidad y sentido de giro a cada motor, para conducir en la dirección deseada.

El modo de manejo se muestra en el robot encendiendo sus dos faros y también se le informa de esta elección al computador.

Para el modo de seguimiento, el usuario debe pulsar el botón “Seguir” en la interfaz del teléfono. Esta acción comunica al microcontrolador que ponga al robot en un estado de *seguimiento en espera*. La razón de este estado preliminar de seguimiento es que el robot, para poder seguir, necesita que el usuario se ubique en una zona inicial, frente al robot.

El estado de espera es reportado al computador para habilitar dicha zona inicial y es mostrado en el robot encendiendo una primera luz verde.

Si el KINECT ya detecta al usuario en la zona inicial, el computador le pide al microcontrolador que ponga al robot en un estado de *seguimiento listo*.

El estado de seguimiento listo es mostrado en el robot encendiendo una segunda luz verde. Además en la interfaz del teléfono se muestran botones de inicio y detención.



Figura 11 Interfaz del teléfono inteligente

En el estado de seguimiento listo, el usuario puede pulsar ya el botón de inicio de la interfaz, ordenando al microcontrolador poner al robot en el estado definitivo de *seguir*. Este es el estado principal del modo de seguimiento, en el cual, el computador le reporta constantemente al microcontrolador la posición del usuario relativa al sensor KINECT, mientras ignora a otras personas que puedan aparecer en el campo visual.

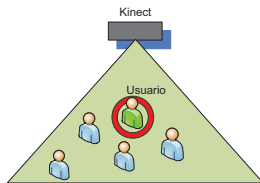


Figura 12 Esquema de posición inicial del usuario en el campo de vista del KINECT y luces indicadoras para el modo de seguimiento listo

El microcontrolador usa esta posición para realimentar compensadores digitales. Éstos deben mantener constantemente a la persona cerca del robot y en el centro de su campo visual, mediante la correcta regulación del avance y giro de los motores, logrando que el robot siga al usuario.

El estado de seguir se muestra en el robot, apagando las luces verdes y encendiendo una luz amarilla central.

Los sensores que evitan colisiones, influyen en este estado del robot, deteniéndolo o desviándolo parcialmente del seguimiento que está realizando.

Si durante la caminata la persona logra salir del campo visual del sensor o es totalmente obstruida, el robot regresa al estado de seguimiento en espera, activándose de nuevo la zona inicial.

Los modos de manejo, seguimiento o paro pueden ser elegidos y alternados en cualquier instante por el usuario desde la interfaz del teléfono.

B. Uso de Kinect para Seguimiento

El API de reconocimiento de figura humana del KINECT SDK, luego de haber identificado en una persona sus segmentos corporales mencionados anteriormente, calcula y determina en base a ellos una estructura corporal llamada esqueleto, que es un conjunto de 20 puntos clave del cuerpo humano, llamados juntas, las cuales se muestran en la Figura 13 [29], el recurso que maneja esta información es llamado *SkeletalTraking*.

El recurso *SkeletalTraking* contiene, para uso del programador, los datos de posición general de hasta 6

esqueletos y los datos de posición de juntas de hasta 2 prioritarios de esos 6 esqueletos, con cada esqueleto diferenciado con su propio *playerindex*; el número *playerindex* de cada persona se mantiene consistente mientras estén dentro de la escena. Si la persona sale, pierde el número que tenía. Cuando otra persona entra o reingresa, los números de *playerindex* disponibles son otorgados aleatoriamente [29]. Estas posiciones están expresadas en coordenadas cartesianas x , y , z , cuyo origen está en el centro del sensor. Los valores de los ejes X y Y , varían de -1 a 1 y son adimensionales. Los valores del eje z van de 0 a 4 metros.

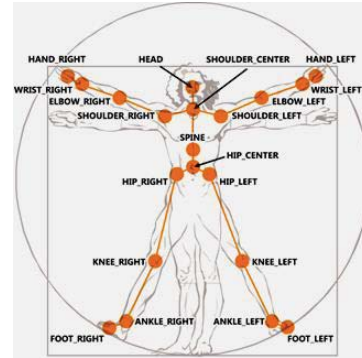


Figura 13 Juntas del esqueleto calculadas, tomado de [29]

El programa para la utilización del sensor KINECT del robot acompañante, durante el seguimiento, pregunta primero al recurso *SkeletalTracking* si el número de esqueleto memorizado, en la zona inicial, como usuario aún está siendo rastreado. Si la respuesta es negativa, entonces se determina que el usuario ha sido perdido y el estado actual es cambiado a *seguimiento en espera*, Además se le informa de esto al microcontrolador mediante un código por comunicación serial.

Por el contrario, si el esqueleto memorizado aun es rastreado, la aplicación tiene la tarea de enviar la posición del esqueleto del usuario al microcontrolador.

La posición general del usuario es un dato un tanto grueso y ruidoso. Por ello, se envía la posición de la junta llamada *Spine* que corresponde al centro del torso de la persona.

Luego, la aplicación toma este dato y lo acondiciona para enviarlo al microcontrolador. Primeramente, de las tres coordenadas de posición se toman solo la X y la Z . Los valores adquiridos de cada coordenada se codifican a través de ecuaciones lineales a códigos válidos para poder ser enviados dentro de un byte. El rango de los valores Z pasa de ser de entre 0.8 y 3.4 metros a números entre 1 y 130 . El rango de X pasa de ser de valores entre -1 a 1 a números entre 131 y 231 .

Las coordenadas X , Z codificadas son entonces enviadas consecutivamente a través del puerto serial.

V. MODELADO DEL PROTOTIPO Y DISEÑO DE CONTROLADORES

La dinámica del robot se ha dividido en 2 elementos de velocidad: la velocidad de giro y la velocidad de avance, cuya superposición configura la trayectoria de seguimiento que realiza el robot.

Cada componente de velocidad es determinada por dos controladores, el controlador de giro y el de avance.

Para obtener los valores de diseño de estos controladores se han utilizado herramientas computacionales del software MATLAB. Primero, a partir de pruebas experimentales y con la herramienta *System Identification Tool*, se obtuvo funciones de transferencia en lazo abierto del avance y del giro del robot, es decir que hizo la identificación del robot dividiéndolo en una *planta de avance* y una *planta de giro*. Luego, con la herramienta *SISO Design* se procedió a diseñar los compensadores para cada una de las plantas.

Para la adquisición de datos para la identificación, se creó un archivo de texto con las posiciones del usuario respecto al sensor, tanto de alcance (profundidad) como de giro (horizontal).

A. Modelado de Planta y Compensador de Avance

Para la adquisición de datos, el usuario se paró a una distancia inicial de 30 unidades del punto de referencia y luego el robot recibió una consigna constante de 30% de velocidad de avance, con lo cual empezó a acercarse hacia el usuario.

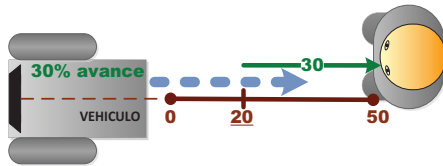


Figura 14 Prueba para la planta de avance en lazo abierto

La Figura 15, muestra en verde una señal paso de consigna que le ha ordenado al robot desplazarse frontalmente 30 unidades. En rojo se ve la respuesta de desplazamiento frontal del robot. Al estar en lazo abierto, el desplazamiento simplemente siguió creciendo sin estabilizarse, hasta que la adquisición se interrumpió.

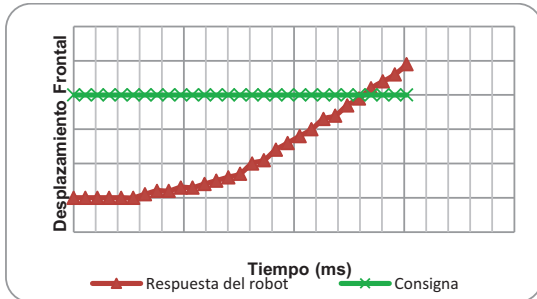


Figura 15 Interpretación de la prueba de profundidad como prueba de desplazamiento frontal del robot a lazo abierto

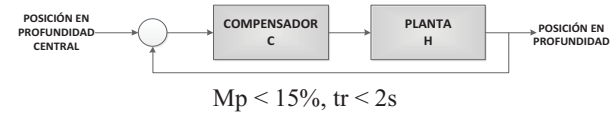
Estos datos fueron ingresados como vector de entrada y vector de salida a la herramienta *System Identification Tool*, obteniéndose finalmente el siguiente modelo (ecuación 2):

$$\frac{0,4}{s(s + 0,4)} \quad (2)$$

Al discretizar el modelo, considerando un periodo de muestreo de 100 ms, se tienen (ecuación 3):

$$\frac{0,001974(z + 0,9868)}{(z - 1)(z - 0,9608)} \quad (3)$$

Haciendo uso de la herramienta *SISO Design*, se obtuvo un compensador tipo red de adelanto con la siguiente topología y características de diseño:



El compensador así obtenido fue ingresado como ley de control en el microcontrolador del prototipo y para su correcto funcionamiento se realizó re-calibraciones de acuerdo al comportamiento real. El óptimo funcionamiento del prototipo se obtuvo con el siguiente modelo de compensador (ecuación 4):

$$C = \frac{16,05(z - 0,91)}{(z - 0,15)} \quad (4)$$

B. Modelado de Planta y Compensador de Giro

Para la adquisición de datos, el usuario se paró en una posición horizontal a 31 unidades de la posición central (hacia la izquierda y derecha) y luego el robot recibió una consigna constante de 31% de velocidad de giro para la izquierda y -31% para la derecha, con lo cual empezó a girar al lado correspondiente.

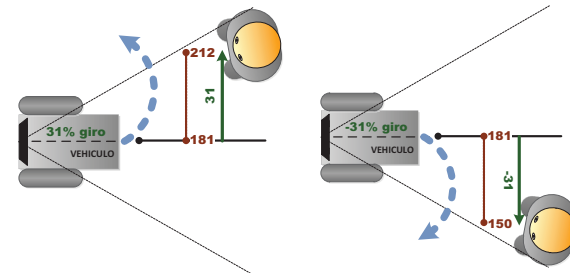


Figura 16 Pruebas para la planta de giro en lazo abierto

La Figura 17 muestra en verde una señal paso de consigna que le ha ordenado al robot desplazarse lateralmente 31 unidades. En rojo y naranja se ven respuestas de desplazamiento lateral del robot, sin tomar en cuenta el signo para el sentido de giro. Al estar en lazo abierto, el desplazamiento simplemente siguió creciendo sin estabilizarse, hasta que la adquisición se interrumpió. Estas pruebas en lazo abierto han tenido una duración de aproximadamente 2,3 segundos.

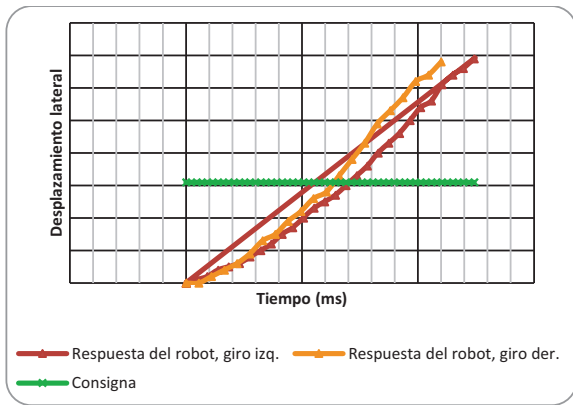


Figura 17 Interpretación de la prueba de posición horizontal como prueba de desplazamiento lateral del robot a lazo abierto

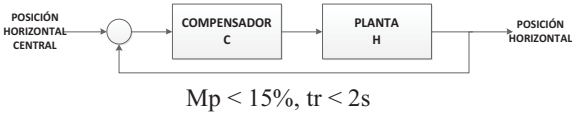
Estos datos fueron ingresados como vector de entrada y vector de salida a la herramienta *System Identification Tool*, obteniéndose finalmente el siguiente modelo (ecuación 5):

$$\frac{2,3}{s(s + 1,7)} \quad (5)$$

Al discretizar el modelo, considerando un periodo de muestreo de 100 ms, se tiene (ecuación 6):

$$\frac{0,010875(z + 0,9449)}{(z - 1)(z - 0,8437)} \quad (6)$$

Haciendo uso de la herramienta *SISO Design*, se obtuvo un compensador tipo red de adelanto con la siguiente topología y características de diseño:



El compensador así obtenido fue ingresado como ley de control en el microcontrolador del prototipo y para su correcto funcionamiento se realizó re-calibraciones de acuerdo al comportamiento real. El óptimo funcionamiento del prototipo se obtuvo con el siguiente modelo de compensador (ecuación 7):

$$C = \frac{10(z - 0,82)}{(z - 0,1)} \quad (7)$$

VI. PRUEBAS

Para comprobar el desempeño del prototipo se lo sometió inicialmente a tres pruebas.

En el transcurso de cada prueba se creó un archivo de texto con las posiciones del usuario respecto al sensor, tanto de alcance (profundidad) como de giro (horizontal). A partir de los datos se construyeron gráficas que muestran el desempeño del prototipo mientras realizaba el seguimiento del usuario.

En las figuras correspondientes a cada prueba, se pueden ver los cambios de posición en profundidad del usuario respecto al sensor KINECT, hay que tener en

cuenta que la posición de referencia para el alcance es de 20u y para el giro es 181u, por lo que el prototipo responde retornando a estas posiciones cuando existen cambios.

A. Prueba en Trayectoria Recta



Figura 18 Imágenes de prueba en trayectoria recta

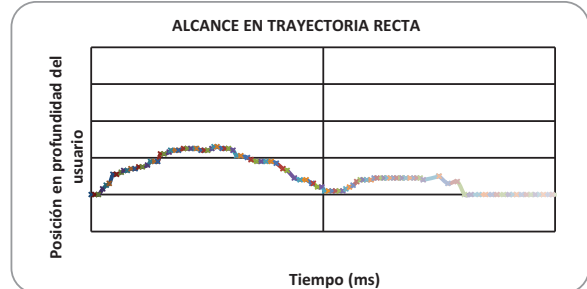


Figura 19 Comportamiento en alcance del prototipo, durante seguimiento en trayectoria recta

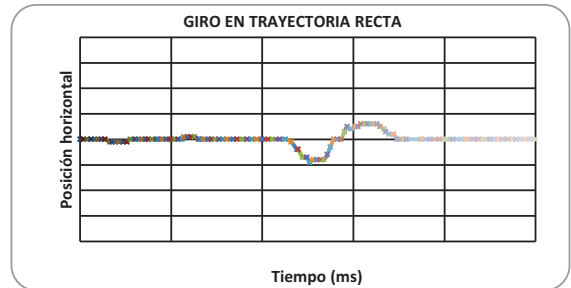


Figura 20 Comportamiento en giro del prototipo, durante seguimiento en trayectoria recta

B. Prueba en Trayectorias Curvas Hacia la Derecha E Izquierda

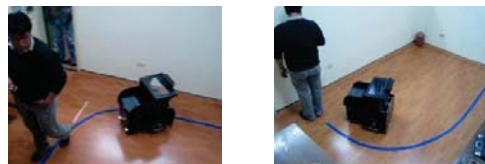


Figura 21 Imágenes de prueba en trayectoria curva

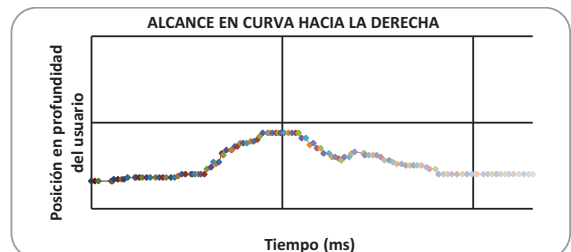


Figura 22 Comportamiento en alcance del prototipo, durante seguimiento en trayectoria curva a la derecha

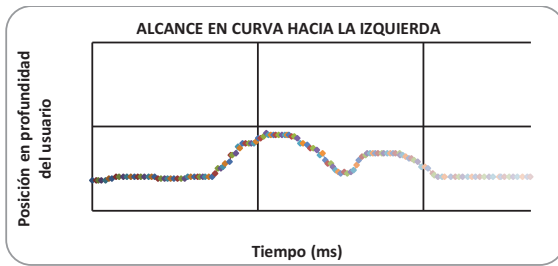


Figura 23 Comportamiento en alcance del prototipo, durante seguimiento en trayectoria curva a la izquierda

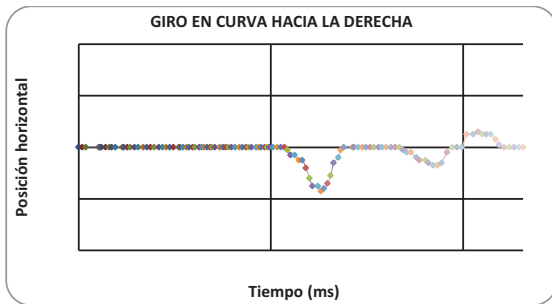


Figura 24 Comportamiento en giro del prototipo, durante seguimiento en trayectoria curva a la derecha

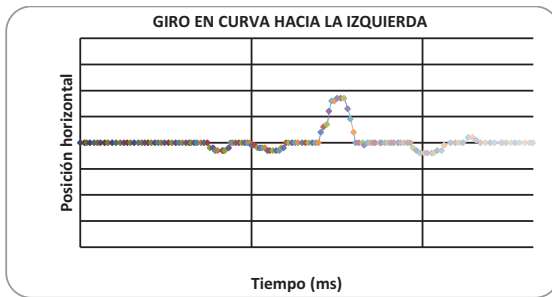


Figura 25 Comportamiento en giro del prototipo, durante seguimiento en trayectoria curva a la izquierda

En este tipo de trayectorias hay que notar que tanto la posición de alcance como la de giro varían simultáneamente, siendo los desplazamientos de alcance menores a los desplazamientos en giro esto motiva que el prototipo priorice la compensación horizontal a la de alcance, traduciéndose en que el prototipo siga una trayectoria secante (Figura 26) a la curva descrita por el usuario.



Figura 26 Trayectoria secante a la curva descrita por el prototipo

Para comprobar el funcionamiento del prototipo se lo introdujo en ambientes cotidianos en los que podría ser utilizado, para esta prueba en concreto se hicieron

recorridos libres a través de los pasillos de un centro comercial y por los pasillos de un supermercado.

Estas pruebas fueron desarrolladas exitosamente y permitieron comprobar el correcto desenvolvimiento del prototipo en ambientes cotidianos, sobretodo demostró que tiene la capacidad de mantenerse siguiendo al usuario a pesar de que distintas personas aparezcan de diversas maneras en el campo visual del robot. Además se pudo comprobar la capacidad de atravesar pasillos evitando colisiones con las diversas estructuras físicas.



Figura 27 Pruebas en ambientes cotidianos

VII. CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó un robot móvil tipo terrestre rodante de tracción diferencial, que puede alcanzar una velocidad máxima de 1m/s, el prototipo fue construido en MDF un material que debido a su bajo peso y resistencia, permite aprovechar el rendimiento del vehículo en beneficio del usuario.

Se implementó un sistema de seguimiento de personas, donde el señalizador o baliza no es un dispositivo portado por el usuario, sino que se trata de la posición de un punto del cuerpo del usuario determinado por medio de software de reconocimiento de imágenes, en este caso el punto usado es el centro del torso del usuario. El concepto de este sistema de seguimiento permite que se le pueda extender a otros tipos de control de robots y escogiendo otros puntos del cuerpo, como pueden ser las extremidades o la cabeza.

El sensor KINECT, a pesar de no haber sido diseñado expresamente para usarse en robótica móvil, ha demostrado ser competente para este tipo de aplicaciones. El flujo de imagen de profundidad para el reconocimiento de la figura humana se mantiene eficaz a pesar de que durante la navegación del robot se presentan vibraciones y constantes cambios de escenas e iluminación.

El sensor de movimiento KINECT se muestra como una estupenda solución para la identificación y seguimiento de la figura humana, ya que debido a su algoritmo de identificación alcanza velocidades de procesamiento relativamente altas (hasta 30fps), además se puede destacar la gran cantidad de herramientas de desarrollo gratuitas existentes en la actualidad.

Para el tratamiento de datos obtenidos desde el sensor de movimiento KINECT, se desarrolló un algoritmo matemático que permite facilitar el control implementado en el microprocesador del prototipo, ya que los datos tanto de posición horizontal como de profundidad del

usuario son enviados en datos con formato byte, que de acuerdo con su rango, el sistema los identifica e interpreta como la dirección y sentido del movimiento del usuario.

Una de las limitaciones del prototipo implementado es la zona muerta de profundidad de 0,8cm de extensión del sensor KINECT utilizado. Es por esta zona que se ha decidido no poner el setpoint de distancia más cerca de 120cm, también por ello se ha optado por no habilitar el desplazamiento en reversa del robot, pues cuando el usuario se acerca o ingresa a esta zona, los datos de posición pierden confiabilidad. Sin embargo, se comprobó que ambientes cotidianos como centros comerciales y supermercados presentan espacios donde traslados en reversa no fueron realmente necesarios.

Para que robots puedan tener una mejor interacción con humanos en ambientes cotidianos, son realmente útiles instrumentos que utilizan visión artificial como lo es el sensor KINECT. Este tipo de instrumentos demandan mayor capacidad de cómputo para el procesamiento informático, de la que puede ofrecer un microcontrolador por sí solo. Un mayor poder computacional permite elevar la rapidez de reacción del robot y su complejidad, por lo que involucrar computadoras a bordo de robots móviles es cada vez más necesario si se desea avanzar en la investigación de este campo.

Para el buen funcionamiento del prototipo se requiere garantizar pasillos mayores a 1,5m de ancho y trayectorias curvas mayores a 0,8m de radio, debido a las características físicas del prototipo.

La relación de trabajo PWM enviada al conversor dc-dc desde el microcontrolador y la velocidad del prototipo deben tener una relación lineal, debido a que los compensadores dan como resultado valores que deben corresponder proporcionalmente a la velocidad del prototipo.

Se ha demostrado que para que un robot con tracción diferencial realice una tarea de seguimiento se puede dividir su dinámica en velocidad de giro y velocidad de avance, con controladores independientes para cada uno de estos comportamientos cuyas señales se pueden superponer y complementar.

El satisfactorio desempeño de este prototipo en ambientes cotidianos, como es un centro comercial y un supermercado, hace viable pensar en continuar su desarrollo para aplicaciones concretas como carros de compras robóticos, ofreciendo mayor confort durante las compras a clientes regulares pero sobretodo a quienes presenten algún tipo de discapacidad en su movilidad. También se puede incorporar este método de seguimiento a robots de telepresencia potenciando su utilidad para cuando se desee hacer recorridos guiados de modo que el usuario remoto no tenga que maniobrar al robot y pueda concentrarse sólo en el recorrido. En definitiva, la

funcionalidad de este prototipo podría ser incorporada a cualquier tipo de robot móvil como un modo de funcionamiento adicional.

REFERENCIAS

- [1] D. Feil-Seifer, M. J. Matarić. Human-Robot Interaction. Center for Robotics and Embedded Systems, Los Angeles, CA. [Online]. Disponible: http://cres.usc.edu/pubdb_html/files_upload/585.pdf
- [2] HRI2007. (2007, Marzo). 2nd ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction. Washington DC, USA [Online]. Disponible: <http://hri2007.org/>
- [3] Shadow Caddy Pty Ltd. (2008) Shadow Caddy-A Better Way to Play Golf. Shadow Caddy Pty Ltd. [Online]. Disponible: <http://www.shadowcaddy.com/shadowcaddy-UK.php>
- [4] D. Blanch. (2008, Julio). Entrevista a Hubert Novak. ABC Radio Australia [Online]. Disponible: <http://www.radioaustralia.net.au/innovations/stories/s2296805.htm>
- [5] ABC Television. (2011) The new Inventors, Shadow Caddy. ABC Television [Online]. Disponible: <http://www.abc.net.au/tv/newinventors/txt/s2296849.htm>
- [6] M.G.M. Marc Gotta Merchandising. Gogo kaddy, Über uns. Gogo-kaddy.de [Online]. Disponible: http://www.gogo-kaddy.de/shop/page/6?shop_param=
- [7] M.G.M. Marc Gotta Merchandising. Gogo kaddy, Funktionsweise. Gogo-kaddy.de [Online]. Disponible: http://www.gogo-kaddy.de/shop/page/7?shop_param=
- [8] M.G.M. Marc Gotta Merchandising. Gogo kaddy Shop. Gogo-kaddy.de [Online]. Disponible: http://www.gogo-kaddy.de/shop/catalog/browse?shop_param=
- [9] O.M.G. S.r.l. (2006). Gogo, Images. O.M.G. S.r.l. [Online]. Available: <http://www.golfcaddygogo.com/en/Images-gogo-electronic-golf-trolley-omg-srl.html>
- [10] E. Tuncali. (2004). Ultrasonic Signal Follower Robot. Cumhuriyet University [Online]. Disponible: http://yunus.hacettepe.edu.tr/~b0022968/robot_eng.htm
- [11] A. Wiens. (2010). Ultrasonic Source Localizer. Washington University in St. Louis [Online]. Disponible: <http://students.ccc.wustl.edu/~adw4/ultrasonic/?file=kop1.php>
- [12] Hemin Shekh Omer. (2008) Information Acquisition Using Eye-Gaze Tracking for Person-Following with Mobile Robots. Hemin Shekh Omer [Offline]. Disponible: <http://www.hemin.co.uk/personFollowing.htm>
- [13] Garratt Gallagher. (2009). Garratt Gallagher-an overview. Garratt Gallagher [Online]. Disponible: <http://www.garratt.info/>
- [14] Garratt Gallagher. (2011). Robot Following Demo. ROS Org. [Online]. Disponible: <http://www.ros.org/wiki/mit-ros-pkg/KinectDemos/Follower>
- [15] John Risch. (2006). A.F.T AUTONOMOUS FOLLOWER TRANSPORT. Risch Enterprize Engieneering [Online]. Available: <http://www.rischerprizes.com/seniorProject.pdf>
- [16] George Schreyer. (2006). Roomba. Schreyer Family Page [Online]. Disponible: http://www.girr.org/random_stuff/roomba.html
- [17] Maria Isabel Ribeiro, Pedro Lima. (2002). Kinematic Models of Mobile Robots.
- [18] Microsoft Corporation. (2011). Kinect para Xbox. Microsoft [Online]. Disponible: <http://www.xbox.com/es-ES/kinect>
- [19] Wikipedia, versión inglés. (2011). Kinect Article. Wikipedia [Online]. Disponible: <http://en.wikipedia.org/wiki/Kinect>
- [20] D. Burnett. (2011). Getting started with Kinect and OpenNI and Xbox Kinect. Don Burnett [Online]. Disponible: <http://www.uxmagic.com/blog/?tag=NUI>
- [21] M. Rosoff. (2011). The Story Behind Kinect, Microsoft's Billion Dollar Business. Business Insider, Inc. [Online]. Disponible: <http://www.businessinsider.com/the-story-behind-microsofts-hot-selling-kinect-2011-1?op=1>

- [22] Department of Engineering at the University of Cambridge. (2011). Alumnus Dr Jamie Shotton and the development of Kinect for Xbox 360. University of Cambridge [Online]. Disponible: http://www.eng.cam.ac.uk/news/stories/2011/Xbox_Kinect/
- [23] J. Lowensohn. (2011). Timeline: A look back at Kinect's history. CBS Interactive [Online]. Disponible: http://news.cnet.com/8301-10805_3-20035039-75.html
- [24] Microsoft Corporation. (2011) Kinect for Windows. Microsoft [Online]. Disponible: <http://kinectforwindows.org/download/>
- [25] ROS wiki. (2010). Kinect Operation. ROS Org. [Online]. Disponible: http://www.ros.org/wiki/kinect_calibration/technical
- [26] PrimeSense. (2011). Our full 3D Sensing Solution. PrimeSenseBlog [Online]. Disponible: <http://www.primesense.com/en/technology/115-the-primesense-3d-sensing-solution>
- [27] M. Fisher. (2011). Kinect. Matthew Fisher [Online]. Disponible: <http://graphics.stanford.edu/~mdfisher/Kinect.html>
- [28] L. Case. (2011). Kinect in Depth. Tom's Hardware [Online]. Disponible: <http://www.tomshardware.co.uk/game-developers-conference-gdc-2011-world-of-warcraft-review-32131-2.html>
- [29] Microsoft Research, "Programming Guide Getting Started with the Kinect for Windows SDK Beta from Microsoft Research", 2011
- [30] J. Shotton, A. Fitzgibbon, M. Cook, T. Sharp, M. Finocchio, R. Moore, A. Kipman, A. Blake, "Real-Time Human Pose Recognition in Parts from a Single Depth Image", IEEE Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Colorado Springs, 2011
- [31] K. Mc Donald. (2010). Kinect point cloud with depth of field. Yahoo! Inc. [Online]. Disponible: <http://www.flickr.com/photos/kylemcdonald/5174106004/in/photosof-kylemcdonald/>
- [32] Hanwei Electronics Co., MQ-9 Semiconductor Sensor for CO/Combustible Gas. Hanwei Electronics CO., LTD. [Online]. Disponible: http://www.pololu.com/file/download/MQ9.pdf?file_id=0J314
- [33] MaxBotix® Inc. (2011). LV-MaxSonar®-EZ1™ High Performance Sonar Range Finder. MaxBotix Inc. [Online]. Disponible: http://www.maxbotix.com/documents/MB1010_Datasheet.pdf
- [34] POWER SONIC. PS-12100 12 Volt 12.0 AH. Power Sonic Inc. [Online]. Disponible: http://www.power-sonic.com/images/powersonic/sla_batteries/ps_psg_series/12volt/PS-12100_11_Feb_21.pdf
- [35] POWER SONIC. PS-1212 12 Volt 1.4 AH. Power Sonic Inc. [Online]. Disponible: http://www.power-sonic.com/images/powersonic/sla_batteries/ps_psg_series/12volt/PS-1212_11_Feb_21.pdf
- [36] ATMEL. (2009). 8-bit AVR Microcontroller with 16/32/64K Bytes In-System Programmable Flash. Atmel Corporation [Online]. Disponible: http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc7674.pdf
- [37] FAIRCHILD Semiconductor. (2000). PNP Epitaxial Silicon Darlington Transistor. Fairchild Semiconductor International [Online]. Disponible: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/fairchild/TIP147.pdf>
- [38] FAIRCHILD Semiconductor. PNP Epitaxial Silicon Darlington Transistor. Fairchild Semiconductor International [Online]. Disponible: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/fairchild/TIP142.pdf>
- [39] K. Ogata, "Ingeniería de control moderna", 3ra ed., Ed. Mexico: Prentice-Hall, Inc., 1998



Alejandro Mesías Ulloa, nació en Quito el 27 de mayo de 1984. Realizó sus estudios secundarios en el Colegio Alemán de Quito, donde obtuvo el Bachillerato Internacional en 2004.

Sus estudios superiores los realizó en la Escuela Politécnica Nacional y obtuvo el título de Ingeniero en Electrónica y Control.

Sus áreas de interés son los microcontroladores, la instrumentación industrial, robótica, las tecnologías de la información y la divulgación científica.



Christian López Molina, nació en Quito el 28 de Agosto de 1985. Realizó sus estudios secundarios y obtuvo el título de bachiller técnico en Electrónica en la Unidad Educativa Don Bosco.

Sus estudios superiores los realizó en la Escuela Politécnica Nacional y obtuvo el título de Ingeniero en Electrónica y Control.

Los temas profesionales que le interesan son la instrumentación industrial, robótica y el control de procesos industriales.



Nelson Sotomayor, nació en Quito-Ecuador el 9 de Septiembre de 1971. Realizó sus estudios secundarios en el Instituto Nacional Mejía. Se graduó en la Escuela Politécnica Nacional como Ingeniero en Electrónica y Control en 1999.

Obtuvo su título de Magíster en Ingeniería industrial en junio del 2006 en la Escuela Politécnica Nacional. En septiembre del 2008 como becario del Gobierno de México y la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), participó en el IV Curso Internacional de Robótica Aplicada, en el Centro Nacional de Actualización Docente CNAD ubicado en México DF. Actualmente desempeña el cargo de Profesor Principal T/C en el Departamento de Automatización y Control Industrial de la Escuela Politécnica Nacional.

Áreas de interés: robótica móvil, informática y redes, microcontroladores, automatización y control industrial. (nelson.sotomayor@epn.edu.ec)