

PROTOTIPO DE CABEZA ANIMATRÓNICA DE BAJO COSTO, UTILIZANDO MICROCONTROLADORES, SERVOMOTORES Y COMPONENTES 3D PARA APRENDER A MANIPULAR ROBOTS HUMANOIDES REALES

LOW COST ANIMATRONIC HEAD PROTOTYPE, USING MICROCONTROLLERS, SERVOMOTORS AND 3D COMPONENTS TO LEARN TO HANDLE REAL HUMANOID ROBOTS

Rafael De la Rosa Flores

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
rafa_elo31@hotmail.com

Eduardo M. Castillo Carcaño

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
eduardo.m.castillo.c@gmail.com

Claudia Zepeda Cortez

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
czepedac@gmail.com

Hilda Castillo Zacatelco

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
hildacz@gmail.com

Ana P. Cervantes Márquez

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
cervantes.patty@gmail.com

Resumen

Dentro del doctorado en Ingeniería del Lenguaje y del Conocimiento (LKE, por sus siglas en inglés) de la Facultad de Ciencias de la Computación (FCC) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), se está trabajando en áreas de: lenguaje natural, razonamiento, visión por computadora, robótica, entre otras; todas estas encaminadas a crear y desarrollar algoritmos que permitan a los agentes inteligentes tangibles (robots humanoides) la capacidad de interactuar en ambientes específicos. Prueba de ello es la reciente adquisición de dos robots humanoides por el Laboratorio LKE. Sin embargo, debido al alto costo de los

equipos, es necesario tener prototipos alternativos, que puedan ser utilizados por los estudiantes e investigadores para sus experimentos preliminares antes de ser implementados en los humanoides. En este proyecto se lleva a cabo el diseño y construcción de un prototipo de cabeza animatrónica, el cual consta de tres elementos. En la parte mecánica se utilizan piezas 3D, cámaras de vídeo y una mandíbula. Para la parte electrónica se utilizan servomotores, microcontroladores Raspberry y Arduino. Y por último, se implementa un mecanismo de control, para el funcionamiento de cada uno los elementos mecánicos del prototipo y que están asociados a los componentes electrónicos. Aunque resulta complejo modelar de manera fiel una cabeza humana, se obtuvo un prototipo rústico con un sistema de visión con movimientos horizontales y verticales; cuyo costo es de \$2000 pesos y permite realizar pruebas experimentales.

Palabra(s) Clave: Animatrónica, Impresión 3D, Microcontroladores, Modelado, Robots, Servomotores.

Abstract

The Ph. D. program on Language and Knowledge Engineering (LKE) from the Computer Sciences Department at the BUAP works in areas such as natural language, reasoning, computer vision and robotics among others, all of them focused on creating and developing algorithms that allow to bestow on tangible intelligent agents (humanoids robots) the capability of interacting in specific ambiances. Proof of this is the acquisition of two humanoid robots by the LKE laboratory. However, due to the high cost of these equipment, it is necessary to have alternative prototypes with which students and researchers could make preliminary experiments before implementing them in the humanoides. In this project the design and construction of an animatronic head prototype, which consists of three elements, is carried out. In the mechanical part, 3D parts, video cameras and a jaw are used. Servomotors, Raspberry microcontrollers and Arduino are used for the electronic part. And finally, a control mechanism is implemented, this is used for the operation of each one of the mechanical elements of the prototype and that are associated with the electronic components. Although it is complex to model a human

head faithfully, a rustic prototype was obtained with a vision system with horizontal and vertical movements; whose cost is \$120 dollars, and which allows experimental tests.

Keywords: *Animatronics, 3D Printing, Microcontrollers, Modeling, Robots, Servomotors.*

1. Introducción

El uso de microcontroladores tales como Raspberry, Arduino entre otros dispositivos ha permitido el desarrollo de proyectos interesantes de bajo costo, por ejemplo; Deshmukh & Shinde [2016] presentan un sistema de monitoreo de las condiciones ambientales en un rango reducido. Krauss [2016] desarrolló una plataforma en tiempo real de un vehículo autónomo. Bahrudin, Kassim & Buniyamin [2013] implementan un sistema de alarma contra incendios. Otro tipo de aplicaciones que utilizan este tipo de microcontroladores es el trabajo presentado por Aguirre & Giraldo [2014], ellos llevan a cabo un sistema embebido para realizar visión artificial o para el internet de las cosas, como se muestra en [Maksimovic, Vujovic, Davidovic, Milosevic & Perisic, 2014], además realizan un análisis de las ventajas y desventajas de utilizar este tipo de microcontroladores. Yousuf, Lehman, Nguyen, & Tang [2003] diseñan y construyen robots animatrónicos, lo cual permite a los estudiantes conocer el funcionamiento de este tipo de robots a través de todo el proceso de construcción. Otro trabajo interesante es el desarrollado por Fitzpatrick [2012], en éste se construye una cabeza animatrónica que permite realizar seguimiento de personas y desarrollaron una app para manipularla. En la tesis desarrollada por Van de Velde [2016] se presenta un nuevo enfoque que se utiliza para calibrar cabezas animatrónicas, sin tener conocimiento de la estructura mecánica de la misma y para probar su propuesta construyen una boca robótica que valida su propuesta. Por último, Kalnad [2016] realiza una investigación sobre los robots animatrónicos que se han desarrollado y el impacto que este tipo de robots tienen en diferentes áreas.

La revisión del estado del arte permite tener una visión general de la importancia que ha alcanzado el uso de microcontroladores, servomotores, entre otros, y dentro

del doctorado LKE de la FCC de la BUAP no se ha estado ajeno. A pesar de contar con robots con tecnología de punta, es complejo realizar pruebas en estos, ya que son susceptibles a fallos al no realizar las configuraciones correctas. Esto conlleva a pérdidas de tiempo, realizar ajustes innecesarios y en el peor de los casos descomponer algún elemento de los robots. Todo esto ha motivado a desarrollar prototipos alternativos, donde los estudiantes e investigadores realicen pruebas experimentales antes de ser implementados en los humanoides y éste es el objetivo de este trabajo de investigación, diseñar y construir un prototipo de cabeza animatrónica de bajo costo y que se asemeje al tamaño real de una cabeza humana.

Es de suma importancia entender que modelar la cabeza de un ser humano es de alta complejidad y aunque el prototipo que se obtiene es rústico, en principio funciona para conocer algunos de los elementos básicos de los robots, en particular, los movimientos del sistema ocular y la captura de imágenes a través de éste. Además, todo esto se logró sin realizar una gran inversión.

2. Métodos

El desarrollo del proyecto de investigación propuesto es llevado en dos etapas, diseñar utilizando un software dos subsistemas: ocular y de la mandíbula y construir cada una de las partes del diseño utilizando una impresora 3D. Además, para llevar a cabo estas dos etapas se toman en cuenta las siguientes consideraciones generales:

- Los componentes electrónicos deben estar totalmente contenidos dentro del prototipo. La cabeza debe de ser de tamaño promedio de un adulto.
- Para el diseño se tomaron en cuenta tres subsistemas, los ojos, la mandíbula y cejas, pero en la implementación solo se llevaron a cabo los dos primeros.
- El prototipo propuesto va a implementar dos subsistemas básicos; subsistema de ojos y subsistema de mandíbula. Cada uno controlado por servomotores y microcontroladores de manera independiente.
- Minimizar el costo total del proyecto, dándole prioridad a la parte funcional de los subsistemas antes mencionados.

Subsistema ocular

El modelo debe reducir en lo posible el uso de servomotores, de lo contrario, éste no podría adecuarse a la cabeza o ser un obstáculo para otros mecanismos, algunos requisitos son:

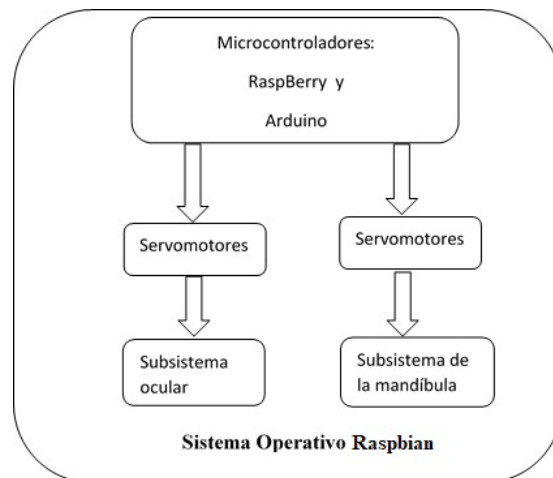
- El modelo de las cámaras es OV450 y deben estar incorporadas en el espacio del globo ocular.
- El mecanismo de los ojos debe ser capaz de moverse en las mismas direcciones que los ojos reales.
- No es necesario que cada ojo cuente con motores individuales, ya que el comportamiento natural es que ambos estén sincronizados.

Subsistema de la mandíbula

El mecanismo debe guardar una oclusión perfecta para lograr una apariencia cercana a la real, algunas características específicas son:

- El mecanismo debe poder imitar los movimientos de habla y masticado.
- El mecanismo debe ser compacto para guardar la proporción con la cabeza.
- El mecanismo debe tener una resistencia mecánica considerable.

En la figura 1 se muestra la estructura funcional que se plantea para el desarrollo de este proyecto.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1 Estructura funcional del prototipo propuesto.

Es de mencionar que en éste se toma en cuenta el sistema operativo Raspbian, que permite validar la funcionalidad de los dos subsistemas. Básicamente el subsistema ocular consta de las cámaras de video y las piezas 3D que se imprimieron para darle soporte y de igual manera para el subsistema de la mandíbula. Los microcontroladores Raspberry y Arduino permiten establecer, además de los servomotores, los movimientos necesarios a los subsistemas antes mencionados.

Modelado CAD

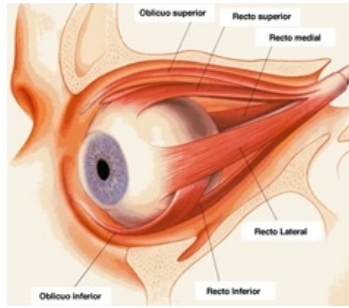
Para llevar a cabo el diseño del prototipo, primero es requisito necesario modelar los componentes básicos del mismo, como son: servomotores, cámaras y mandíbula, ya que a partir de estos se determinaría el tamaño de las diferentes estructuras de la cara. Por ello, es necesario emplear un software que permita diseñar la cabeza animatrónica en tres dimensiones y utilizando planos que permitan la extrusión con parámetros, ya que los componentes del prototipo son de carácter mecánico y debe de ser posible simular movimientos complejos con múltiples partes mecánicas. Después de analizar múltiples opciones en el mercado como CATIA, Solid Works y Autodesk Inventor entre los productos líderes en el modelado; se optó por elegir a Autodesk Inventor como software a usar.

Diseño del subsistema ocular

La complejidad mecánica del sistema ocular hace que se eleve el grado de dificultad de implementación de este, ya que éste consta de seis músculos (figura 2), los cuales hacen el movimiento en las direcciones ya conocidas, así como el anclaje del ojo. Generalmente se usa un acople universal mecánico para mantener al ojo anclado en la parte interior de la cavidad, figura 3. Sin embargo, para el desarrollo del prototipo no es posible implementar esa solución, porque el espacio está ocupado por las cámaras y no es posible desplazar la articulación del eje Z, ya que se presenta un desfase y hace que el ojo gire fuera de su órbita.

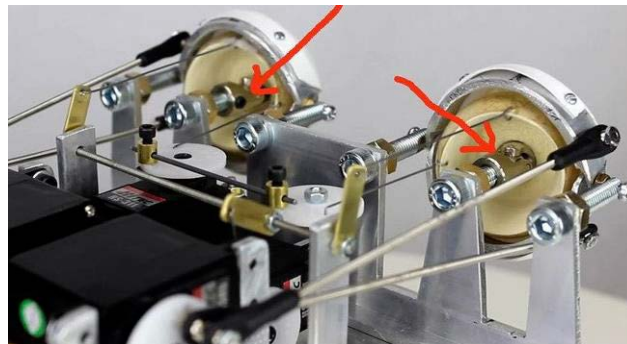
Debido a que las dimensiones de las cámaras son de 38x38 mm y se dificultaba el posicionamiento de algunas partes mecánicas, se decidió recortar el marco que las

sostiene. Posteriormente se inició el proceso de modelado. Para ello se tomaron las medidas de los objetos reales y creando modelos 3D que son fieles representaciones de estos en el diseño. Este proceso se repitió para todos los objetos que se integran al modelo como son: cámaras, servomotores, piezas mecánicas de acople, extensiones y varillas, rodamientos, figura 4.



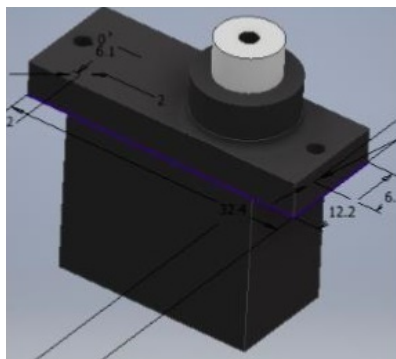
Fuente: [AAPOS, 2018].

Figura 2 Complejidad de la cavidad ocular.

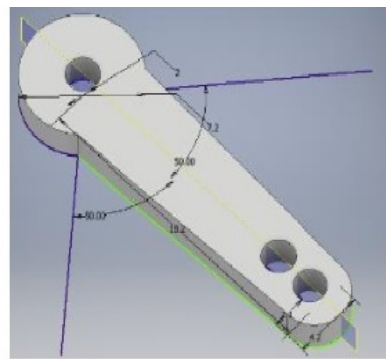


Fuente: [Animatronic Eye Mechanism, 2018].

Figura 3 Uso del Universal Ball Joint en un sistema ocular.



a) Servomotor.

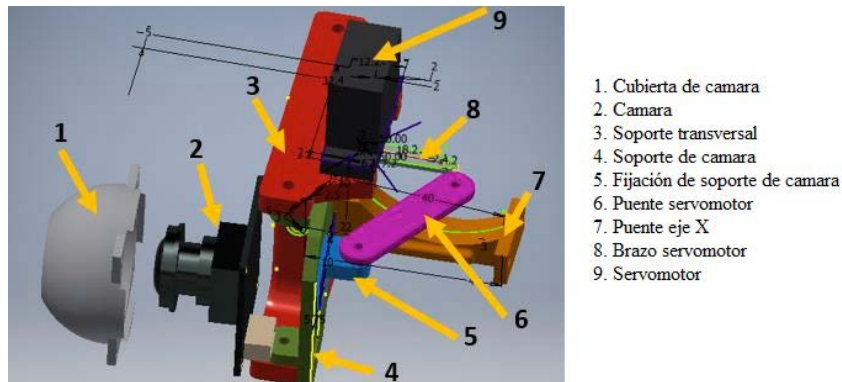


b) Acople con medidas reales

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4 Diseño de servomotor y acople.

Para lograr que la cámara se adaptara a la base que lo sostendrá, se modeló la base de la cámara. Para ello, se desplazaron los ejes, de movimiento, hacia adelante y por fuera de la semicircunferencia, hasta alcanzar el centro de la semiesfera de la cubierta de la cámara. Esto solucionó el problema de desplazamiento orbital en el eje Y, y para el eje X se implementó un puente para conectar el movimiento del eje a los dos ojos así solo será necesario el uso de un servomotor, en la figura 5 se muestra el diseño ocular final.



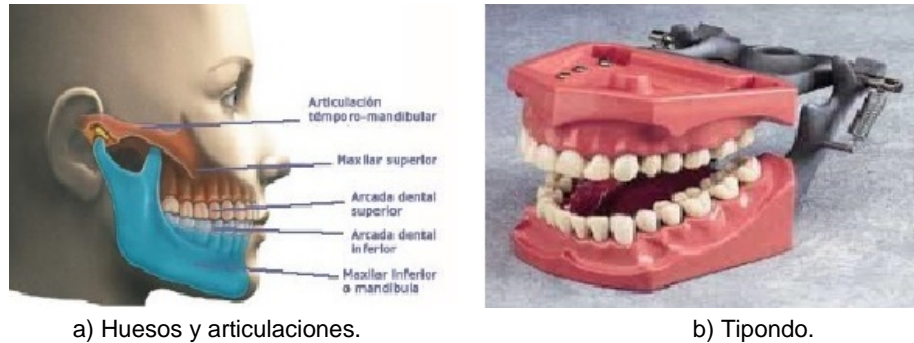
Fuente: Elaboración propia.

Figura 5 Diseño final del subsistema ocular.

Diseño del subsistema de la mandíbula

Una vez completado el diseño del mecanismo de ojos se pasó a modelar el mecanismo de la mandíbula, para esto, se identificaron las principales partes biológicas de la mandíbula. En la figura 6a se muestran los huesos y articulaciones de la boca. Debido a que el diseño de la mandíbula es complejo por la presencia de piezas dentales se compró un modelo dental para estudiar la anatomía de los dientes, ver figura 6b, y así evitar el diseño de cada pieza dental por separado. Sin embargo, para la mecanización de este, es necesario reacondicionar la articulación. Para ello, se procedió al corte de ésta, dejando solo el paladar, encías y dientes del maxilar superior y maxilar inferior. Se diseñaron dos piezas, una inmóvil que hará el papel de maxilar superior el cual permanecerá fijo junto con toda la cabeza y desde el cual se montarán los servomotores para dar el movimiento. Y la segunda que es donde se fijara el maxilar inferior o mandíbula del tipodonto. Además, para dar el movimiento de masticado y algunas expresiones poco comunes que son

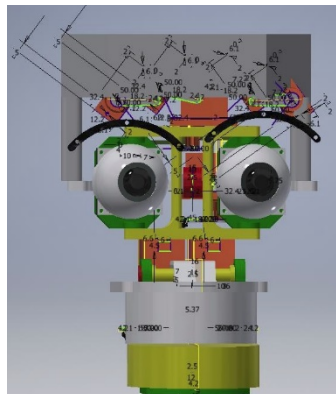
hechas con la boca, se diseñó una pieza transversal con un eje vertical el cual facilita algunos movimientos.



Fuente: Basado en [Logopedia y formación, 2003].

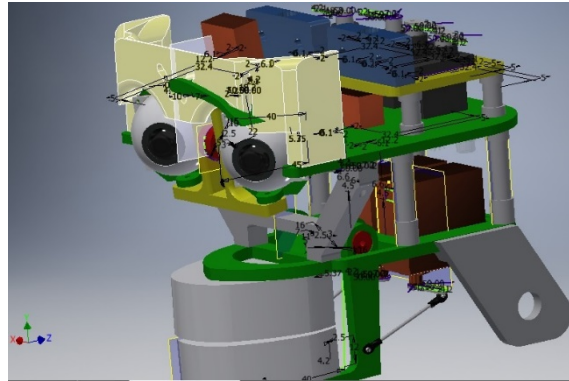
Figura 6 Estructura y componente usado para el subsistema de la mandíbula.

Por otra parte, se cortó el tipodonto retirando los brazos que realizan la oclusión dejando solo las encías separadas en dos piezas. Además, se devastaron los marcos superiores e inferiores para poder montarlo en el modelo impreso. Para reducir la fricción de los componentes y así evitar que el mecanismo sufra un desgaste, de tal manera que se diseñaron cavidades para el uso de rodamientos. Y finalmente para lograr el acople de los dos mecanismos y hacerlos parte de la cabeza se diseñaron uniones entre ellos en forma de columna, con esto se logró la estabilidad entre los dos mecanismos. Las figuras 7 y 8 muestran el diseño final del prototipo propuesto, en este ya están integrados los dos subsistemas, de la mandíbula y de los ojos.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7 Vista frontal del diseño del prototipo propuesto.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 8 Vista lateral del diseño del prototipo propuesto.

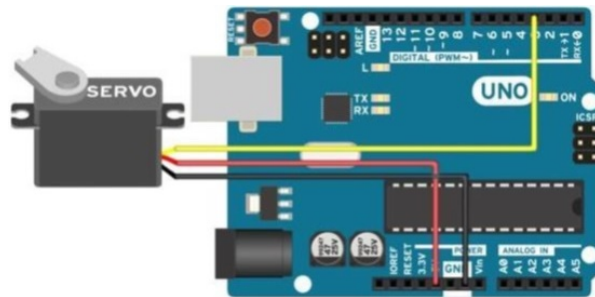
Subsistema de control Para mover cualquier motor "dc" con precisión e implementando un sistema de control, es necesario el uso de la modulación por ancho de pulso (PWM por sus siglas en inglés). La modulación por ancho de pulso es uno de los sistemas más empleados para el control de servomotores. Este sistema consiste en generar una onda cuadrada en la que se varía el tiempo que el pulso está a nivel alto, manteniendo el mismo período (normalmente), con el objetivo de modificar la posición del servomotor según sea necesario.

Para la generación de una onda PWM en un microcontrolador, lo más habitual es usar un temporizador y un comparador (interrupciones asociadas), de modo que el microcontrolador quede libre para realizar otras tareas y la generación de la señal sea automática efectiva. El mecanismo consiste en programar el temporizador con el ancho del pulso (el período de la señal) y al comparador con el valor de duración del pulso a nivel alto. Cuando se produce una interrupción del tipo overflow del temporizador, la subrutina de interrupción debe poner la señal PWM a nivel alto y cuando se produce la interrupción del comparador, ésta debe poner la señal PWM a nivel bajo. En la actualidad, algunos microcontroladores disponen de hardware específico para realizar esta tarea, pero consumen los recursos antes mencionados.

El sistema de control de un servomotor se limita a indicar la posición donde se debe situar. Esto se lleva a cabo mediante una serie de pulsos tales que la duración del pulso indica el ángulo de giro del motor. Cada servomotor tiene sus márgenes de operación, que se corresponden con el ancho del pulso máximo y mínimo que el

servomotor entiende. Los valores más generales se corresponden con pulsos de entre 1 ms y 2 ms de anchura, los cuales dejan al motor en ambos extremos (0° y 180°). El valor 1.5 ms indicaría la posición central o neutra (90°). Otros valores del pulso lo dejan en posiciones intermedias. Estos valores suelen ser los recomendados, sin embargo, es posible emplear pulsos menores de 1 ms o mayores de 2 ms, pudiéndose conseguir ángulos mayores de 180°. Si se sobrepasan los límites de movimiento del servomotor, éste comenzará a emitir un zumbido, indicando que se debe cambiar la longitud del pulso. El factor limitante es el tope del potenciómetro y sus límites mecánicos inherentes.

Los motores que se usaron son servomotores genéricos que cuentan con tres cables; rojo alimentación, café tierra común, amarillo recepción de pulsos PWM. Para que el sistema de control funcione se implementó la interfaz serial en Arduino el cual recibe los grados de cada motor. Cada motor está conectado a positivo y negativo de Arduino y los pines de pulso del servomotor a un pin con capacidad de producir PWM. Como se muestra en la figura 9. Así como también, dentro de la parte de control, se utilizó el microcontrolador Raspberry para obtener el vídeo de las cámaras. Esto permitió verificar la parte funcional del prototipo propuesto.



Fuente: [Onvacations, 2016].

Figura 9 Interfaz entre el microcontrolador Arduino y los servomotores.

Es importante mencionar que el número de servomotores utilizado en ambas fases es de tres; dos para el subsistema ocular y uno para el subsistema de la mandíbula, agregando las cámaras utilizadas, el tipontodo y los microcontroladores, lo cual ha permitido cumplir una de las consideraciones generales; que es minimizar el costo total del proyecto.

3. Resultados

Se ha diseñado y construido un prototipo de cabeza animatrónica funcional de bajo costo (el costo total del proyecto fue de \$2,000.00), la cual consta de dos subsistemas mecánicos; ocular y de la mandíbula, junto con la impresión de piezas 3D. Además, un sistema de control para el cual se utilizaron: tres servomotores, dos microcontroladores: Arduino y una Raspberry. En la figura 10 se muestra el prototipo ya finalizado. El microcontrolador Arduino se utiliza para controlar los movimientos de las cámaras a través de los servomotores.



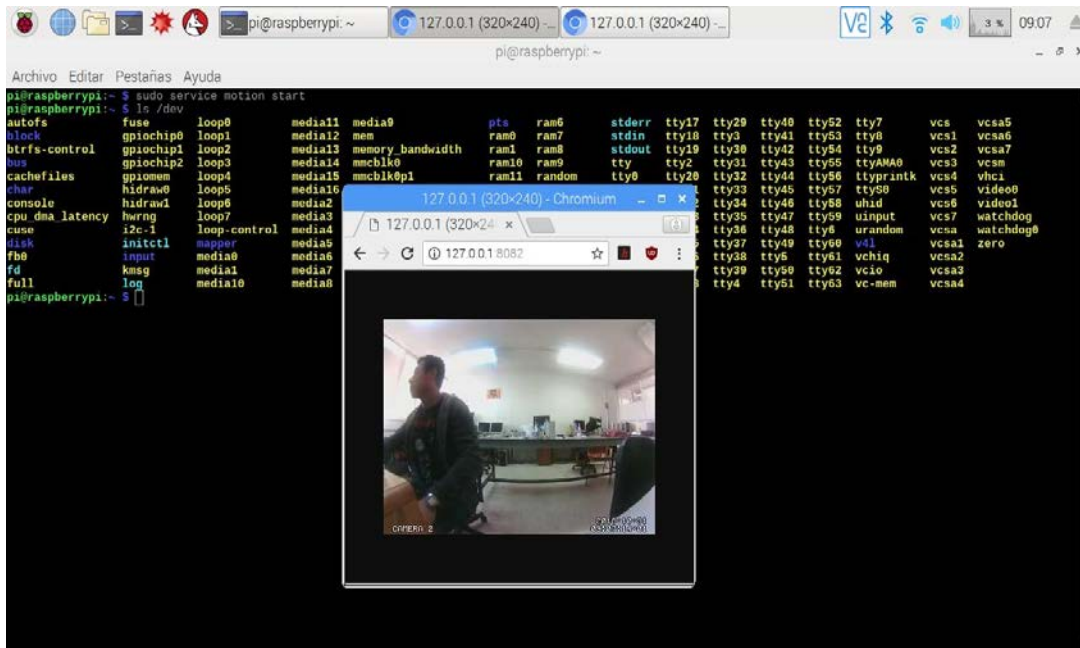
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10 Prototipo final y funcional, ya integrados los dos subsistemas.

Este prototipo es funcional y para ello se utilizó el sistema Raspbian nativo del microcontrolador Raspberry con el lenguaje de programación Python y la librería OpenCV. Con estos elementos se realizó una pequeña aplicación, la cual muestra la captura de imágenes a través de la cámara de vídeo, como se muestra en la figura 11. El movimiento del subsistema de la mandíbula se encuentra en fase de pruebas, ya que por el peso de sus componentes se dificulta el movimiento.

Además, usando una impresora 3D se logró la impresión de los componentes del prototipo en material "ABS". Cada archivo "CAD", fue sometido a una descomposición por capas que hace posible la producción de los archivos "gcode". Para la generación del archivo "gcode" de cada pieza se usó el programa "Ultimate Cura" en el cual se configuran parámetros de impresión como temperatura del

extrusor, temperatura de la cama, velocidad de los diferentes ventiladores que disipan el calor de las capas que componen el objeto.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 11 Imagen de salida, app desarrollada con Python.

La cabeza animatrónica construida, aunque es bastante rústica, cumple con el objetivo propuesto, ya que permite realizar pruebas experimentales con los microcontroladores y los servomotores. Todo esto se logró realizando una inversión mínima.

4. Discusión

El prototipo de cabeza animatrónica permite realizar pruebas tanto a investigadores como a estudiantes, aunque el modelo es bastante rústico, se realizan reconfiguraciones tanto a nivel de microcontroladores como a los servomotores. En el diseño y desarrollo de la parte mecánica resalta la complejidad de, solo en la fase de diseño del prototipo, modelar de manera correcta los movimientos que tiene el sistema de visión y de la mandíbula de los seres humanos. Como puede verse en las figuras 2, 6a y 6b, se tomaron consideraciones que son propias de los subsistemas que se trabajaron.

En lo que corresponde a la impresión de las partes 3D se recurrió a herramientas tales como calibrador (para obtener las dimensiones de cada uno de los subsistemas), pulidoras, entre otros, para darles el acabado necesario y poder ensamblar cada una de las partes impresas y obtener un prototipo lo más cercano a la dimensión de una cabeza de un ser humano. Aunque falta realizar una calibración más fina al microcontrolador Arduino con los servomotores, éste realiza los movimientos necesarios para enfocar a las personas y se probó satisfactoriamente el subsistema de visión con la aplicación realizada.

Cabe mencionar que el subsistema de la mandíbula se encuentra en fase de pruebas y falta realizar los ajustes a los servomotores y al microcontrolador Arduino para que este sea funcional. Por otra parte, dado que el microcontrolador Raspberry sólo trabaja con una cámara, se compró un adaptador para dar soporte a las dos cámaras, pero éste también se encuentra en fase de pruebas para sincronizar correctamente el flujo de información que se obtiene de ambas cámaras. Aunque existe otros proyectos más complejos [Fitzpatrick, R. J., 2012] y [Yousuf, A., 2003], se desconoce el costo total de los mismos.

Es de mencionar que se está trabajando con el sistema operativo para robots, ROS. Éste permitiría hacer transparente el mecanismo de control de los dos subsistemas, así como agregar más funcionalidades al prototipo propuesto.

5. Bibliografía y Referencias

- [1] AAPOS (2018). AAPOS Headquarters. San Francisco CA: <https://aapos.org/es/terms/conditions/22>.
- [2] Aguirre, Á. G., & Giraldo, P. J. R. (2014). Sistema embebido de bajo costo para visión artificial. *Scientia et technica*, 19(2), 163-173.
- [3] Animatronic Eye Mechanism (2018). Human Eye Technology: <http://browpicz.pw>.
- [4] Bahrudin, M. S. B., Kassim, R. A., & Buniyamin, N. (2013). Development of fire alarm system using raspberry pi and Arduino uno. In *Electrical, electronics and system engineering (iceese), 2013 international conference on* (pp. 43-48). IEEE.

- [5] Deshmukh, A. D., & Shinde, U. B. (2016, August). A low cost environment monitoring system using raspberry Pi and Arduino with Zigbee. In *Inventive Computation Technologies (ICICT), International Conference on* (Vol. 3, pp. 1-6). IEEE.
- [6] Fitzpatrick, R. J. (2012). *Designing and constructing an animatronic head capable of human motion programmed using face-tracking software* (Doctoral dissertation, Worcester Polytechnic Institute).
- [7] Kalnad, C. (2016). *Review on animatronics*. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research*.
- [8] Krauss, R. (2016, July). Combining Raspberry Pi and Arduino to form a low-cost, real-time autonomous vehicle platform. In *American Control Conference (ACC), 2016* (pp. 6628-6633). IEEE.
- [9] *Logopedia y formación* (2003). *La Relajación en la terapia de voz*. [Sitio web]. Recuperado de <https://logopediayformacion.blogspot.com/2012/06>.
- [10] Maksimovic, M., Vujovic, V., Davidovic, N., Milocevic, V., & Perisic, B. (2014). Raspberry Pi as Internet of things hardware: performances and constraints. *Design issues*, 3, 8.
- [11] Onvacations (2016). *Connect Servo Motor To Arduino Uno*. Colombia: <http://ww3.onvacations.co/connect-servo-motor-to-arduino-uno>.
- [12] Van de Velde, G. M. (2016). *Thesis: Design and control of a robotic mouth*. [tesis de maestría]. Bélgica: Universidad Libre de Bruselas. Recuperado de <https://goo.gl/SX52YP>
- [13] Yousuf, A., Lehman, W., Nguyen, P., & Tang, H. (2003). *Animatronics and emotional face displays of robots*.