

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA DE ACCESO REMOTO AL CONTROLADOR DE UN BRAZO MANIPULADOR

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Ismael Bautista
para optar al título de
Ingeniero Electricista.

Caracas, junio de 2019

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA DE ACCESO REMOTO AL CONTROLADOR DE UN BRAZO MANIPULADOR

TUTOR ACADÉMICO: Profesora Tamara Pérez

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Ismael Jesús Bautista García
para optar al título de
Ingeniero Electricista.

Caracas, junio de 2019

A quien deseas dedicar este trabajo

RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS

Ismael J. Bautista G.

**DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA DE
ACCESO REMOTO AL CONTROLADOR DE UN
BRAZO MANIPULADOR**

Tutor Académico: Tamara Pérez. Tesis. Caracas, Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Mención Electrónica Computación y Control. Año 2019, 85 pp.

Palabras Claves: Palabras clave.

Resumen.- Escribe acá tu resumen

ÍNDICE GENERAL

RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS	III
ÍNDICE GENERAL	VIII
LISTA DE FIGURAS	XII
LISTA DE TABLAS	XIV
LISTA DE ACRÓNIMOS	XV
INTRODUCCIÓN	1
EL PROBLEMA	2
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Justificación	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo general	3
1.3.2. Objetivos específicos	3
1.4. Alcance y limitaciones	3
1.5. Análisis de factibilidad	4
MARCO TEÓRICO	5
2.1. Antecedentes	5
2.2. Fundamentos sobre brazos manipuladores.	6
2.2.1. Grados de libertad	6

2.2.2. Brazo manipulador	7
2.2.3. Brazo pick and place.	8
2.2.4. PUMA.	9
2.2.5. Canadarm	10
2.2.6. Brazo manipulador MA2000.	11
2.2.7. Uso de librerías en lenguaje C	12
TÉCNICAS Y METODOLOGÍAS DE ACCESO REMOTO EN BRAZOS MANIPULADORES	13
3.1. Acceso remoto.	13
3.1.1. Radiofrecuencia (RF).	13
3.1.2. Bluetooth y Wi-Fi.	16
ACCIONES DEL SISTEMA DE CONTROL DEL BRAZO MANIPULADOR MA2000.	21
4.1. Software Robocom	23
4.1.1. Elementos fundamentales	24
4.1.2. Generación de la trama	27
4.2. Unidad de control	32
4.3. PWM	32
SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS	35
SISTEMA DE ACCESO REMOTO	37
6.1. Kit de desarrollo de software: Espressif NON OS ESP-8266 SDK	39
6.1.1. osapi.h	39
6.1.2. user_interface.h	40
6.1.3. driver/uart.h	40

6.1.4.	espconn.h	40
6.1.5.	gpio.h	40
6.1.6.	eagle_soc.h	40
6.2.	Contenido del programa	41
6.2.1.	user_main.c	41
6.2.2.	user_config.h	42
6.2.3.	funciones.h y funciones.c	42
6.2.4.	pagina.h	43
6.2.5.	Compilado	43
6.3.	Funcionamiento	43
6.3.1.	Pseudocódigo	45
6.3.2.	Función server_recv	50
6.3.3.	Función server_sent	50
6.3.4.	Función server_discon	51
6.3.5.	Función server_listen	51
6.3.6.	Función server_recon	51
6.3.7.	Función init_tcp	51
6.3.8.	Función ap_config_func	52
6.3.9.	Función gpio_init	52
6.3.10.	Función mover_motor	52
6.3.11.	Función mover_motor_2	54
6.3.12.	Funciones cambiar_constante, parametro_pid, puenteH	54
6.3.13.	Función myatof	54
RESULTADOS		55
7.1.	Interfaz	55

7.1.1. Página web alojada en servidor	55
7.1.2. Solución a posibles inconvenientes	63
7.1.3. Aplicación Android	65
7.2. Montaje	68
CONCLUSIONES	70
RECOMENDACIONES	71
REFERENCIAS	72

LISTA DE FIGURAS

2.1.	Estructura básica de un brazo robótico. Fuente: [6]	7
2.2.	Eckovation	8
2.3.	Representación de un brazo PUMA 560. Fuente: https://grabcad.com/library/robot-puma-560	9
2.4.	Modelos de brazo Canadarm.	10
2.5.	Robot MA2000	11
3.1.	Algunos transceptores de radiofrecuencia.	14
4.1.	Esquema de indentificación de los motores del brazo y la pinza neumática.	21
4.2.	Detalle de pinza neumática	22
4.3.	Vista inicial al abrir el software Robocom.	24
4.4.	Panel inferior de Robocom	25
4.5.	Función 'Setpointer' del software Robocom.	26
4.6.	Configuración de constantes de calibración del software Robocom	27
4.7.	Vista de trama transmitida por el software Robocom al iniciar conexión.	28
4.8.	Pines de conexión del módulo controlador original.	34
6.1.	Placa del microcontrolador ESP-8266.	37
6.2.	Compilado del programa.	43
6.3.	Ejemplo de comunicación cliente- servidor.	44

7.1.	Detección de señal Wi-Fi emitida por el microcontrolador ESP-8266.	55
7.2.	Solicitud de clave para entrada a la página.	56
7.3.	Página web completa.	57
7.4.	Encabezado de página	58
7.5.	Esquema del brazo robot y probador de trayectorias	59
7.6.	Movimiento del brazo en tiempo real	61
7.7.	Configuración de parámetros generales	62
7.8.	Vista de chrome:// net-internals	64
7.9.	Aplicación vista desde el menú.	66
7.10.	Vista principal de la aplicación Android.	67
7.11.	Esquemático de conexión entre ESP-8266 y dsPIC30F3011	68
7.12.	Fotografía del montaje en protoboard de la tarjeta de desarrollo.	69
7.13.	Montaje del prototipo.	69

LISTA DE TABLAS

3.1.	Ancho de banda de datos según las versiones.	17
3.2.	Clases según potencia de transmisión y alcance.	17
3.3.	Versiones de Wi-Fi.	19
3.4.	Comparación entre Bluetooth y Wi-Fi.	20
4.1.	Estructura general de la trama de comunicación.	27
4.2.	Comandos enviados al generar trama default. Información obtenida con el software SerialMon.	28
4.3.	Comandos emitidos desde el software Robocom (cliente) al brazo.	31
4.4.	Comandos emitidos por el controlador (servidor) como respuesta al cliente.	32
5.1.	Estimación de requerimientos para el diseño.	36
6.1.	Especificaciones de hardware	38
6.2.	Especificaciones de software	38
6.3.	Registros de GPIO del ESP-8266. Fuente: Espressif.	41
6.4.	Información sobre la conexión WiFi	47
6.5.	Comandos aceptados en las solicitudes HTTP.	49

LISTA DE ACRÓNIMOS

API: Application Programming Interface. GPIO: General Purpose Input Output. IDE: Integrated Development Environment. IoT: Internet of Things. ISM: Industrial, Scientific and Medical Radio Band. JS: JavaScript OS: Operative System. PID: Proportional Integral Derivative controller. PUMA: Programmable Universal Machine for Assembly, o Programmable Universal Manipulation Arm. PWM: Pulse Width Modulation. RF: Radiofrecuencia RX: Recepción. SDK: Software Development Kit. Kit de Desarrollo de Software. TX: Transmisión. UART: Universal Asynchronous Receiver Transmitter. WPA: Wi-Fi Protected Access. WPAN: Wireless Personal Area Network.

INTRODUCCIÓN

En este archivo debe escribir su introducción.

De acuerdo a Brea la transformada de Laplace debe estudiarse como una función definida en el campo de los números complejos

De acuerdo a la ecuación

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1. Planteamiento del problema

El brazo manipulador que se encuentra en el Laboratorio de Control (LCID) actualmente cuenta con un controlador y una interfaz instalados en un computador que sirve de administrador de las acciones de control del sistema. No obstante, el brazo manipulador es de uso reducido porque necesita ajustes en cuanto al controlador y porque las plataformas computacionales se están haciendo obsoletas; por lo que se quiere añadir a esta implementación otro sistema para realizar acciones de control de forma remota.

1.2. Justificación

Este equipo permitirá reforzar conocimientos en el área de sistemas automáticos de control. Siendo este manipulador un diseño enfocado como equipo de laboratorio en la Escuela de Ingeniería Eléctrica (EIE) [5], es siempre importante una propuesta para mejorar la utilidad del mismo utilizando nuevas tecnologías relacionadas con accesos remotos.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Diseñar un prototipo de sistema de acceso remoto al controlador del brazo manipulador MA2000.

1.3.2. Objetivos específicos

- Documentar las técnicas y metodologías de acceso remoto empleadas comúnmente en brazos manipuladores.
- Determinar las acciones del sistema de control del brazo manipulador.
- Seleccionar los dispositivos necesarios para el diseño.
- Seleccionar el modo de acceso remoto.
- Diseñar el sistema de acceso remoto.
- Validar la propuesta.
- Realizar un manual del prototipo.

1.4. Alcance y limitaciones

El presente trabajo estará solo enmarcado en el diseño del prototipo. Por lo tanto, no contempla una aplicación práctica a un sistema industrial real. Cualquier implementación física o ajuste mecánico para la validación no está contemplada en este trabajo.

1.5. Análisis de factibilidad

Para la realización de este trabajo se cuenta con una documentación ampliada del sistema de control del brazo manipulador en cuestión. Además, existe suficiente información con respecto al internet de las cosas y manipulación remota de sistemas.

Por otra parte, al tratarse del diseño de un prototipo, no requiere necesariamente una implementación, por lo cual este trabajo se considera factible ya que disminuye los riesgos económicos y el autor considera que cuenta con la información necesaria.

De ser necesario, cualquier costo adicional será asumido por el autor. Por último, el tiempo que se propone se considera suficiente para la realización de este trabajo.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Marcano, Juan. "Implementación de sistema de programación de Trayectorias para el brazo manipulador MA2000". Universidad Central de Venezuela, 2013. Tutor: Prof. Alejandro González. Para establecer el control de posición del MA2000, se implementó un controlador de posición PID independiente para tres articulaciones utilizando el motor DSP de un dsPIC. Se desarrolló un software en el PC que se comunica con el microcontrolador y permite el ajuste dinámico del controlador PID y la visualización de la respuesta dinámica de cada articulación así como la programación de trayectorias. Se ha recuperado el funcionamiento de la pinza neumática del equipo y se ha elaborado documentación en línea del proyecto. [5]

Labrador, Alexis. "Diseño de un equipo para el control y monitoreo de un motor asincrónico usando una aplicación móvil". Universidad Central de Venezuela, 2018. Tutor: Prof. Servando Álvarez. El presente trabajo reporta el diseño de un equipo para controlar el encendido y apagado, junto al monitoreo de tensión, corriente y tiempo de funcionamiento de un motor asincrónico usando un ordenador de placa reducida y un dispositivo móvil por medio de la red de comunicación Internet de las cosas. Para lograrlo se selecciona el ordenador de placa reducida Raspberry Pi 3 modelo B, el sensor ACS712, módulos de relés para

el accionamiento y componentes electrónicos, se elige y se programa la plataforma de IoT, Ubidots for Education, para el monitoreo y control de forma remota, se selecciona la arquitectura de red en estrella, se eligen los tipos y modo de avisos que tendrá el sistema según las que permite Ubidots for Education, para finalmente implementar dicho diseño con el fin de validar el correcto funcionamiento. [4]

Valderrama, Jorge. "Diseño de un conjunto de prácticas para la configuración y uso básico del microcontrolador ESP8266". Universidad Central de Venezuela, 2018. Tutor: Prof. Ebert Brea. Este trabajo tiene como resultado una guía para la programación básica del microcontrolador ESP8266 a través del NON OS SDK de Espressif. En él se estudian los elementos básicos como: UART, GPIO, Interrupciones, Timer y Wifi. Cada uno de estos elementos estudiados viene acompañado por una guía de programación y ejemplos para implementación. [8]

2.2. Fundamentos sobre brazos manipuladores.

2.2.1. Grados de libertad

En [1] se describe cada uno de los seis grados de libertad del brazo manipulador como una unión que permite al robot doblar, rotar o trasladar la parte móvil de este. Así como lo muestra la figura 2.1, donde cada grado de libertad está identificado y relacionado con términos antropomórficos.

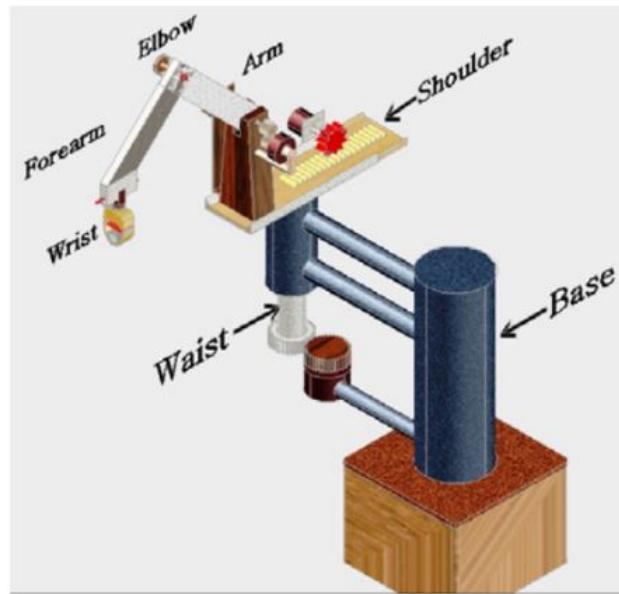


Figura 2.1. Estructura básica de un brazo robótico. Fuente: [6]

2.2.2. Brazo manipulador.

Un brazo manipulador, o comúnmente llamado "brazo robot", es un sistema electrónico programado para realizar acciones de control a una parte mecánica. Estos existen de diversos tipos y morfologías y tienen múltiples aplicaciones industriales.

El término "brazo" se le atribuye por su similitud a la extremidad humana y a su funcionalidad. Contando en algunos casos con partes como "codo", "muñeca", "hombro", "mano", entre otros. Existen de tipo: esférico, articulado, SCARA, cilíndrico y cartesiano. Como se observa en la figura 2.2.

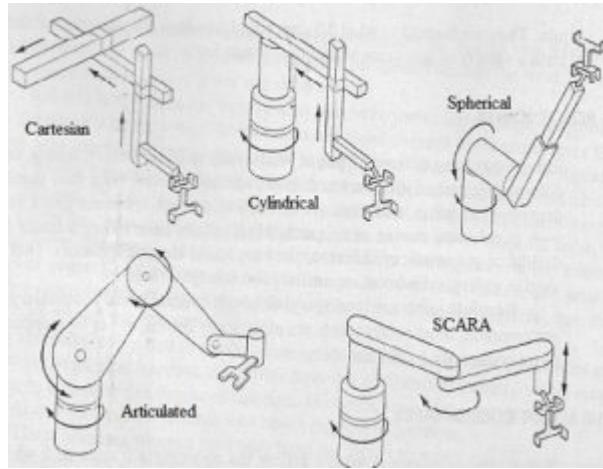


Figura 2.2. <https://engineering.eckovation.com/pick-place-robotic-arm/>

Entre algunos brazos manipuladores conocidos se tienen: PUMA, Stanford y Canadarm.

2.2.3. **Brazo pick and place.**

El término "pick and place" está asociado a la utilidad del brazo robótico. Ya que posee un elemento final que permite sostener y soltar un elemento deseado. Según la figura 2.2 cualquier tipo de brazo robot puede ser utilizado como pick and place, ya que no depende de sus grados de libertad ni de uniones, sino de poseer un elemento como una pinza o garra para cumplir una función específica.

Los siguientes brazos manipuladores a describir, se consideran del tipo "pick and place" debido a sus funciones.

2.2.4. PUMA.

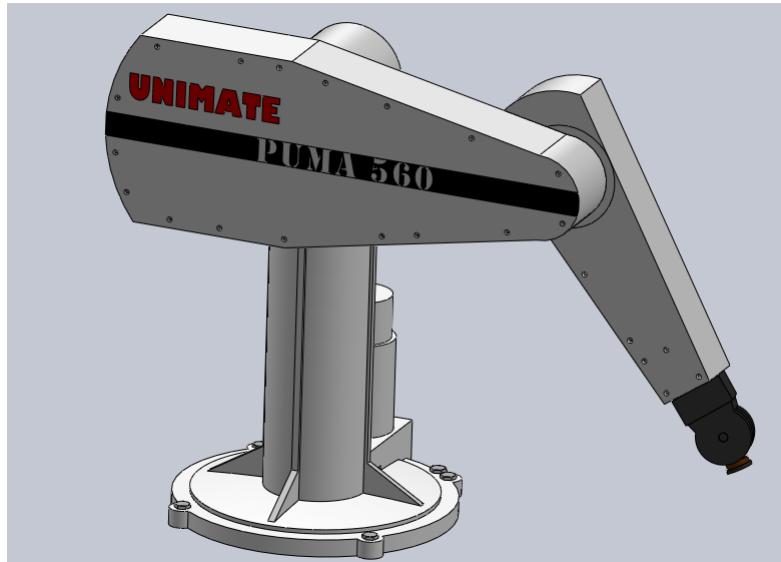


Figura 2.3. Representación de un brazo PUMA 560. Fuente: <https://grabcad.com/library/robot-puma-560>

El brazo PUMA: Programmable Universal Machine for Assembly, o Programmable Universal Manipulation Arm, por sus siglas en inglés; es un robot industrial desarrollado por la empresa Unimation alrededor del año 1980. Entre los modelos más conocidos destacan los de la serie 500, que corresponden a brazos de seis grados de libertad con una herramienta final de control.

Ha sido muy utilizado en el campo de la medicina, ya que una característica importante de este sistema es que cuenta con un marco que le permite una mayor precisión y rapidez en los movimientos. Según se menciona en [7], este cuenta con la aceptación de su uso para fines médicos.

2.2.5. Canadarm

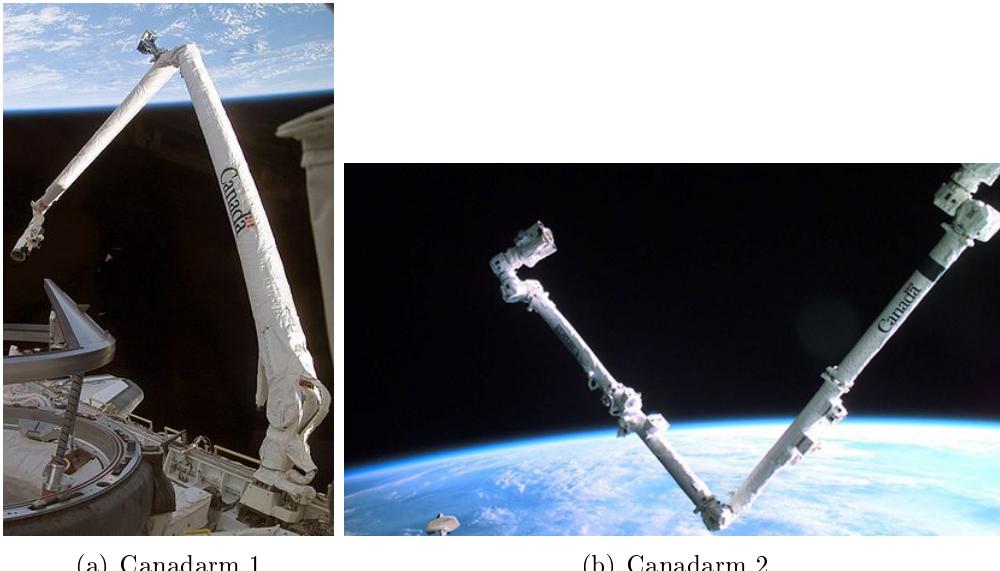


Figura 2.4. Modelos de brazo Canadarm.

Es un robot diseñado por un equipo de industrias canadienses (Spar Aerospace Ltd., CAE Electronics Ltd. y DSMA Atcon Ltd) bajo la dirección del Concilio Nacional de Investigación de Canadá (NRCC, por sus siglas en inglés). En la actualidad, el brazo Canadarm 2 se encuentra en la Estación Espacial Internacional (ISS).

Se trata de un robot de seis grados de libertad y un elemento final de control controlado por control remoto desde la ISS. El primer modelo, el Canadarm, operó durante treinta años en la Estación Espacial Internacional (ISS) y fue conocido también con el nombre Shuttle Remote Manipulator System (SRMS).

2.2.6. Brazo manipulador MA2000.



Figura 2.5. Robot MA2000

Es un brazo robot diseñado alrededor de los años 1980s por George Carter, fundador de Labman Automation Ltd y fabricado por TecQuipment International Ltd, como petición de la Open University británica.

El diseño original era accionado por servomotores que permitían realizar control a lazo cerrado en cualquier instante. Requería adicionalmente una unidad compresora de aire para accionar la pinza neumática.

En un principio, este brazo era controlado por computadores IBM o por microcontroladores BBC.

En el trabajo de Marcano, se realizó un controlador manejado por computador al cuál se le realizarán mejoras para alcanzar un acceso remoto a este sistema.

2.2.7. Uso de librerías en lenguaje C

Para el desarrollo de aplicaciones con manipulación de caracteres y cadenas, es necesario utilizar la librería *string.h*. Esta librería está incluída en el estándar de lenguaje C, ya que es de uso común.

Incluye funciones para manipulación de arreglos de caracteres. Propiamente, define un tipo de variable, un macro y varias funciones para manipulación de arreglos y cadenas. Algunas de las funciones utilizadas comúnmente son: *strtok*, *strcmp*, *strncmp*, *memset*, *strlen*, *strcpy*, *strncpy*, entre otros.

Otra librería importante es *stdlib.h*. También está incluída en el lenguaje C estándar ya que ofrece muchas funciones útiles para manejo de memoria y operaciones numéricas. En definitiva, esta librería define cuatro tipos de variables, múltiples macros, y varias funciones de uso general; funciones como: *atoi*, *atof*, *atol*, *malloc*, *free*, *abort*, *abs*, *rand*, entre otras, son las más utilizadas.

CAPÍTULO III

TÉCNICAS Y METODOLOGÍAS DE ACCESO REMOTO EN BRAZOS MANIPULADORES

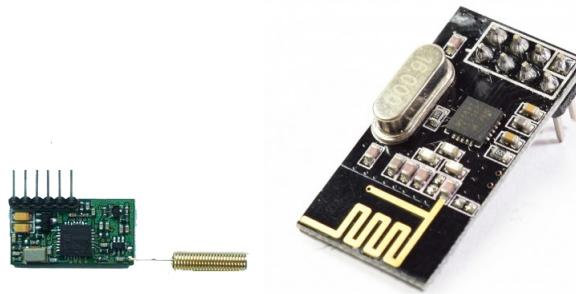
3.1. Acceso remoto.

En este trabajo se entenderá como Acceso Remoto a todo sistema o recurso ubicado físicamente en una estancia que realice una acción sobre otro en distinto lugar de forma inalámbrica vía una red local, externa, o a través de cualquier medio de comunicación como WiFi, Bluetooth, GPRS, UMTS, entre otros.

3.1.1. Radiofrecuencia (RF).

Cuando se habla de RF, se refiere al espectro de radiofrecuencia contemplado entre los 3Hz hasta 300GHz dentro del espectro electromagnético.

Al realizar este tipo de diseño, es necesaria la implementación de circuitos osciladores que logren emitir o recibir la onda de radio que contiene la información de interés. No obstante, con la ayuda de transceptores de radiofrecuencia integrados como el nRF24L01 (Figura 3.1(b)) o KYL-500S (Figura 3.1(a)), se puede realizar el mismo proceso optimizado para el trabajo con microcontroladores.



(a) KYL-500S. (b) nRF24L01. Fuente: Nordic
Fuente: Shenzhen Semiconductor.
KYL Communication
Equipment Co., Ltd.

Figura 3.1. Algunos transceptores de radiofrecuencia.

El diseño de un acceso remoto por RF debe llevar dos etapas: Transmisión y recepción. La etapa de recepción debe estar conectada al brazo robot, con el interés de realizar las mínimas modificaciones posibles.

Es necesario el establecimiento de una interfaz de comunicación para la ejecución de la acción de control de forma inalámbrica, por lo tanto es común el diseño de circuitos osciladores/transmisores/receptores que se colocan en el sistema a controlar y su unidad remota.

Por otro lado, una mejora de estos sistemas se obtiene al utilizar circuitos integrados como el NFR24L01 o el KYL-500S. Estos circuitos transceptores poseen la unidad de transmisión y recepción disponibles según sea la necesidad. Aunado a esto, es importante señalar que existen con la variedad de frecuencias y ancho de banda que requiera el diseñador. Por este motivo, son de gran utilidad para el diseño de accesos remotos.

Una aplicación de un modelo de acceso remoto en brazos manipuladores o de robots en general, puede verse en [6], [1] y [2].

Lo señalado en el trabajo [6] trata de un diseño e implementación de un brazo robótico controlado de forma inalámbrica con fines industriales hecho en la Universidad de Ingeniería y Tecnología en Bangladesh. En este proyecto se contempla un brazo robótico de seis grados de libertad capaz de sostener un objeto de peso específico y colocarlo en una posición deseada. Para controlarlo se estableció un sistema que recibe instrucciones vía un joystick inalámbrico.

El sistema se incluyó dentro del brazo para mayor facilidad de uso. El controlador del brazo se diseñó usando un microcontrolador ATMEGA-328P, el microcontrolador utilizado en el control remoto fue un ATMEGA-8; ambos dispositivos programados bajo el IDE de Arduino. Estos integrados se encargan de recibir la señal digital que es procesada por un módulo transceptor de comunicación RF no especificado en el documento.

La utilidad del manejo remoto de sistemas de medición puede observarse en propuestas como el trabajo [1], donde se realizó un diseño e implementación de un ambiente robótico de asistencia y monitoreo de variables físicas, controlado de forma inalámbrica usando un módulo de comunicación por RF, NFR24L01 y dos microcontroladores PIC16F77A, uno para monitoreo y manipulación de periféricos; y otro como Interfaz Humano Máquina (HMI).

De forma similar al trabajo anterior, en [2] se utilizan dos microcontroladores AT89c52 y dos módulos KYL-500S para el diseño del controlador remoto de un interruptor de pared de 13A.

La tecnología de Radiofrecuencia también involucra sistemas de comunicación vía Bluetooth o WiFi, debido a que estas ofrecen facilidades compatibles con la tecnología en vanguardia; además de permitir la conectividad a internet y ser un recurso importante en los sistemas para IoT.

3.1.2. Bluetooth y Wi-Fi.

Entre las propuestas tecnológicas existentes en las comunicaciones inalámbricas; Bluetooth y Wi-Fi son las principales opciones debido a su facilidad de acceso y la disponibilidad de software y hardware compatibles con una gran cantidad de dispositivos.

Estas tecnologías ofrecen una oportunidad para realizar sistemas de IoT, ya que las tecnologías Bluetooth y Wi-Fi están contenidas en muchos dispositivos móviles de múltiples gamas. Además, existen módulos de microcontroladores y microprocesadores que cuentan con capacidad de conectarse a una red Wi-Fi o establecer una conexión por Bluetooth. Dispositivos como: Espressif ESP-8266, Espressif ESP-32, Raspberry Pi 3, Cypress CYW954907, entre otros; son algunos ejemplos de tarjetas de desarrollo compatibles con ambas tecnologías.

Para esquematizar la importancia de ambas tecnologías, es necesario describir las características principales de estas:

Bluetooth

Es una tecnología diseñada por el grupo Bluetooth Special Interest Group (SIG), Inc, que se encarga de comercializar e implementar esta herramienta de comunicación en sus productos.

Está diseñada para redes WPAN, o Redes Inalámbricas de Área Personal y su principal funcionalidad es la transmisión de datos entre dispositivos sin requerir conectores.

Su banda de funcionamiento es la ISM de 2.4GHz en el espectro de radiofrecuencia y cuenta con un consumo de potencia reducido en sus últimas versiones.

Desde sus inicios, ha presentado mejoras en la tasa de transmisión de datos, conectividad, ancho de banda, alcance y consumo de potencia. La última versión publicada en la página web oficial es la 5.1, que cuenta con una tasa de 50Mbps. La mejora de esta característica se puede observar en la tabla 3.1. Del mismo modo, la potencia de transmisión se caracteriza por clases como se muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3.1. Ancho de banda de datos según las versiones.

Versión	Ancho de banda
Versión 1.2	1 Mbps
Versión 2.0 + EDR	3 Mbps
Versión 3.0 + HS	24 Mbps
Versión 4.0	32 Mbps
Versión 5	50 Mbps

Tabla 3.2. Clases según potencia de transmisión y alcance.

Clase	Potencia máxima permitida	Alcance
Clase 1	100 mW	100 metros
Clase 2	2.5 mW	5-10 metros
Clase 3	1 mW	1 metro
Clase 4	0.5 mW	0.5 metro

En [9] se utilizó Bluetooth para controlar remotamente los movimientos de un brazo robot de cuatro grados de libertad. El controlador del brazo se realizó con un microcontrolador ATMEGA2560, la transmisión de las instrucciones se hizo con un control remoto de Playstation con conectividad Bluetooth.

Wi-Fi

Es una tecnología desarrollada por la Alianza Wi-Fi en los años 2000. Es un estándar diseñado para la familia del protocolo IEEE 802, para redes inalámbricas de área local y es comúnmente utilizado con el protocolo Ethernet para establecer conexiones en red a internet.

Su capacidad de alcance es elevada, esto lo hace un elemento útil en el monitoreo y control de variables en campo abierto usando sensores que cuentan con esta tecnología. Además, tiene una alta velocidad de transmisión, comparable con la comunicación cableada. Las bandas que utiliza están determinadas según los estándares de IEEE 802.11. Como aspecto adicional, posee baja latencia para comunicaciones en tiempo real. Sin embargo, dependerá del procesamiento realizado por el dispositivo en cuestión.

Una ventaja de esta tecnología ante otras de radiofrecuencia es la seguridad en el envío de datos. Cada dispositivo emisor/receptor cuenta con la posibilidad de encriptar la transmisión usando WPA o WPA2.

En la página web oficial establece la sexta generación para el año 2019 como la más actualizada. Esta cuenta con mejoras de seguridad, tasa de transmisión, alcance y fidelidad. Parte de esta información se puede observar en la tabla 3.3

En [3] se construyó un brazo robot de cuatro grados de libertad basado en IoT. El controlador del robot se realizó usando una placa de desarrollo NXP FRDM-KL25Z, conectado a un módulo ESP-8266 para conectividad Wi-Fi.

Este sistema recibe las instrucciones vía una plataforma web conectada a internet, y esta se comunica con el módulo ESP para establecer la conexión y de esta forma completar el sistema de IoT.

Tabla 3.3. Versiones de Wi-Fi.

Generación	Estándar IEEE	Tasa de enlace máxima
Wi-Fi 6	802.11ax	600-9608 Mbps
Wi-Fi 5	802.11ac	433-6933 Mbps
Wi-Fi 4	802.11n	72-600 Mbps
Wi-Fi 3	802.11g	3-54 Mbps
Wi-Fi 2	802.11a	1.5 to 54 Mbps
Wi-Fi 1	802.11b	1 to 11 Mbps

Luego de estudiar los aspectos generales de ambas tecnologías, en la tabla 3.4 puede apreciarse la comparación de estas en sus principales características.

Tabla 3.4. Comparación entre Bluetooth y Wi-Fi.

Característica	Bluetooth	Wi-Fi
Ancho de banda	Bajo	Alto
Requerimientos de hardware	Adaptador de Bluetooth en todos los dispositivos que requieran conexión.	Adaptador inalámbrico en todos los dispositivos de la red. Router inalámbrico.
Facilidad de uso	De uso simple y el intercambio de dispositivos es más sencillo.	Es más complejo y requiere configuración de hardware y software.
Rango	10 metros	100 metros
Seguridad	Menos seguro en comparación	Las características de seguridad son mejores. Posee algunos riesgos.
Consumo de potencia	Bajo	Alto
Rango de frecuencia	2.400 GHz y 2.483 GHz	2.4 GHz y 5 GHz
Flexibilidad	Soporte para un número limitado de usuarios. (Conexión por pares)	Soporte para gran cantidad de usuarios. (Conexión en red)
Técnicas de modulación	GFSK (Desplazamiento de frecuencia gausiana)	OFDM (Multiplexación por división de frecuencias ortogonales) y QAM (Modulación de amplitud en cuadratura)

CAPÍTULO IV

ACCIONES DEL SISTEMA DE CONTROL DEL BRAZO MANIPULADOR MA2000.

Este brazo manipulador cuenta con seis grados de libertad, siendo tres correspondientes al hombro, codo y muñeca, controlados con motores DC. Los grados restantes, correspondientes a la mano, poseen motores de aeromodelismo. Cuenta también con una pinza neumática como herramienta final de control. Esto se observa en las figuras 4.1 y 4.2.

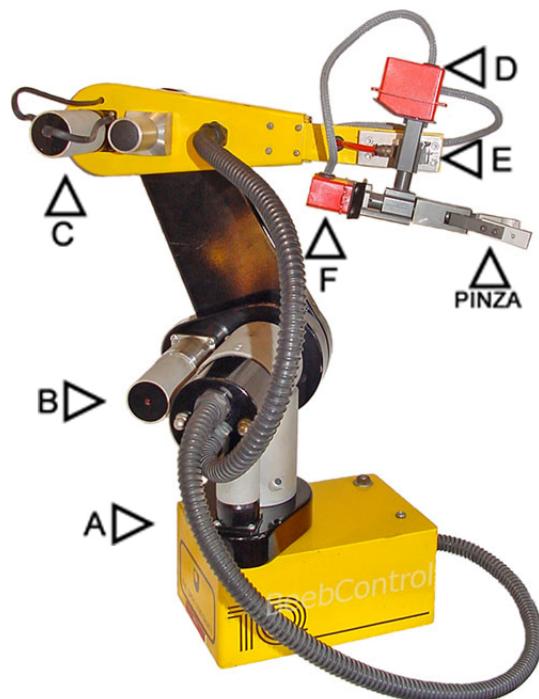


Figura 4.1. Esquema de identificación de los motores del brazo y la pinza neumática.

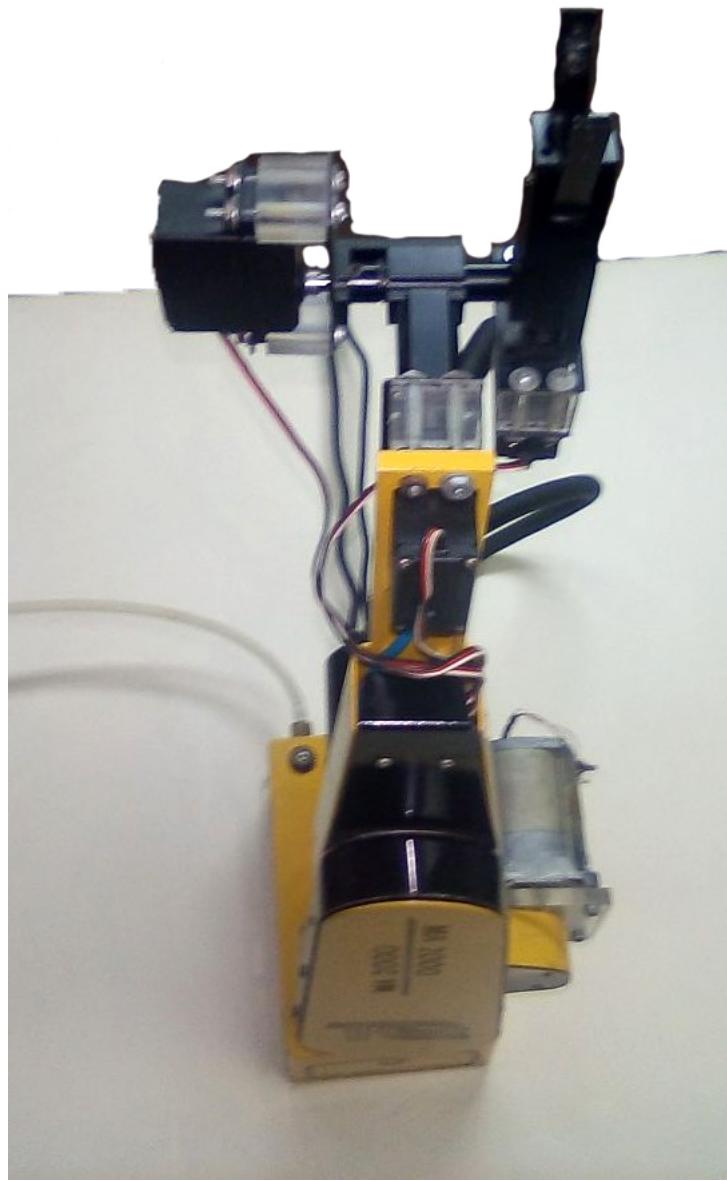


Figura 4.2. Detalle de pinza neumática

Con respecto a cada grado de libertad, se tienen fijados los límites de movilidad de 270° para los motores DC y 120° para los motores de aeromodelismo. Esto para evitar daños a la integridad del equipo.

El controlador principal del sistema está desarrollado con un microcontrolador

dsPIC30F3011, quien actúa como servidor recibiendo vía puerto serial las órdenes de control, para posteriormente realizar las correspondientes acciones indicadas en cada trama. Para ello, cuenta con un módulo convertidor de USB-Serial (FT-DI232) para una óptima comunicación con el computador y el software cliente. El controlador también puede responder el estado de cada articulación relacionada a los motores DC, leyendo las entradas analógicas conectadas a potenciómetros que ayudan a conocer la posición del brazo y así ejecutar el control PID.

El sistema realiza una acción de control PID en tres articulaciones principales (hombro, codo y muñeca). Para esto se configuran los parámetros desde el software cliente y se envían al controlador en una trama de tres bytes vía puerto serial.

4.1. Software Robocom

Anteriormente mencionado como 'software cliente', este programa es una interfaz gráfica de usuario desarrollada en lenguaje C++ que permite generar la trama de comunicación que se transmite del computador a la unidad de control mediante el puerto serial.

Esta herramienta permite la posibilidad de editar las variables relacionadas al movimiento del brazo y al controlador PID (factor proporcional, factor integral y factor derivativo) para cada motor DC, correspondientes al hombro, codo y muñeca. Configura la activación o desactivación de los puentes H, el accionamiento de la pinza neumática. También puede configurar el timer PR1 del microcontrolador con el que se estima el tiempo de muestreo para la ejecución de las acciones de control.

4.1.1. Elementos fundamentales

A continuación, se explicarán los detalles de mayor uso contenidos en el software Robocom.

Al abrir el programa, se puede observar lo indicado en la figura 4.3:

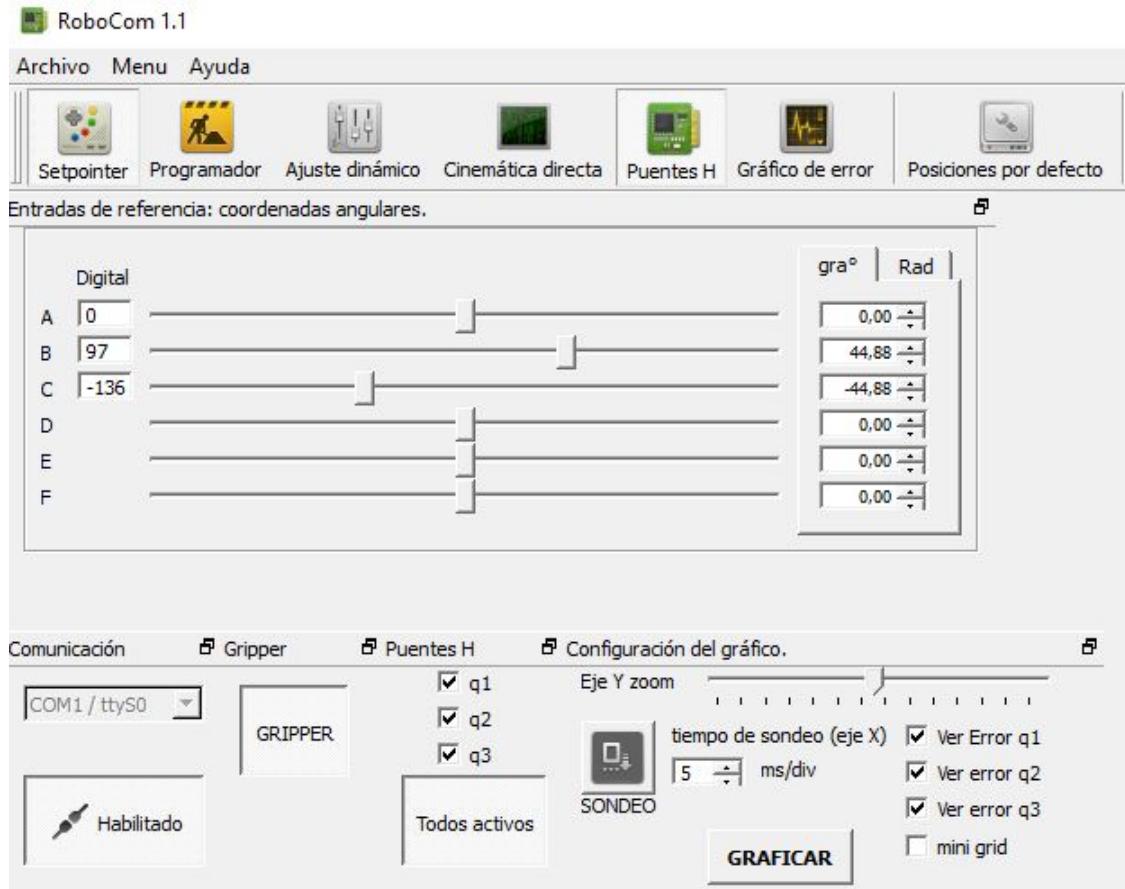


Figura 4.3. Vista inicial al abrir el software Robocom.

En el panel inferior, según se observa en la figura 4.4, se encuentran las configuraciones generales de comunicación, el accionamiento de la pinza neumática, la habilitación de los puentes H y un menú que corresponde a la configuración del graficador del error.

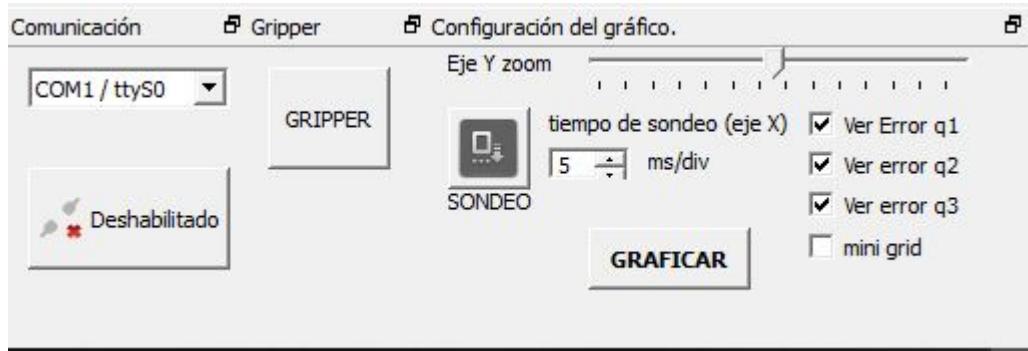


Figura 4.4. Panel inferior de Robocom

En la pestaña 'Comunicación', se selecciona el puerto COM al que se conecta originalmente el controlador del brazo.

La pestaña 'Gripper' posee un botón que activa o desactiva la pinza neumática.

La pestaña 'Puentes H' permite habilitar o deshabilitar los puentes H de los motores principales.

En la pestaña 'Configuración del gráfico' se encuentran las opciones de visualización del error. No obstante, esta funcionalidad no es estudiada en este trabajo.

Un elemento importante es el 'Setpointer', indicado en la figura 4.5. Ya que esto permite ajustar la entrada de referencia al controlador y también realizar movimientos en tiempo real con el brazo.

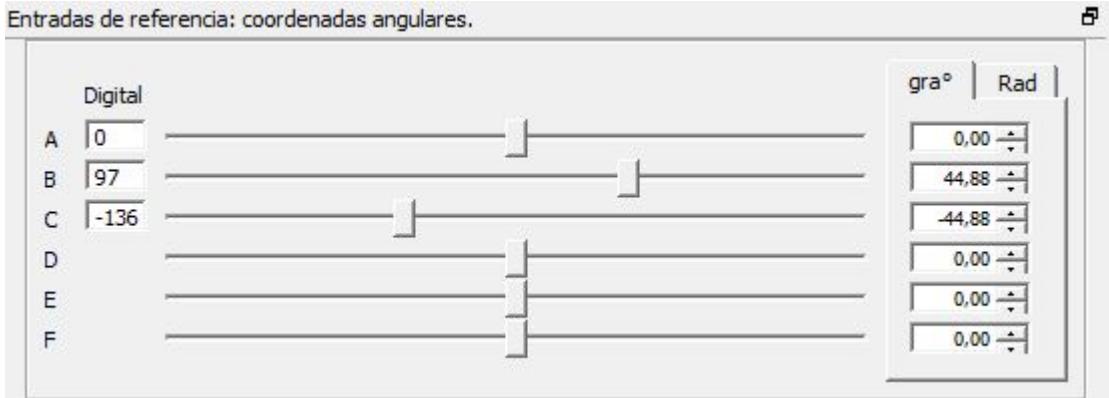


Figura 4.5. Función 'Setpointer' del software Robocom.

A la izquierda se observan las letras 'A,B,C,D,E,F' que corresponden a cada motor a mover. 'A,B,C' son para los motores del hombro, codo y muñeca. El resto es para los motores de aeromodelismo de la mano. De igual modo, la parte central cuenta con barras deslizantes que permiten generar la trama en tiempo real.

Los números que se observan en el panel 'Digital' son los utilizados para generar el segundo y tercer byte (dato) de la trama de comunicación.

El programa realiza una conversión del número observado en digital a grados o radianes según la expresión 4.1:

$$Valor_{grados} = (Valor_{digital} + K_{offset})K_{pro} \quad (4.1)$$

Donde K_{pro} es una constante de calibración para convertir el ángulo de binario a grados, medida en [grados/bits] y su valor de inicio es 0.33 grados/bits para los tres casos (A, B, C). Para los casos (D, E, F), el valor es fijo y vale 0.035[grados/bits].

K_{offset} es el error de corrección de la conversión a bits y es medida en [bits].

Su valor inicial es 0 para el motor A y C, y 39 para el motor B. Para los motores (D, E, F), el valor es fijo y vale 5682[bits].

En la pestaña 'Calibración', mostrada en la figura 4.6, puede apreciarse mejor esta información.

Calibración		
	Kpro [grados/bit]	Koffset [bits]
q1	0,33000	0
q2	0,33000	39
q3	0,33000	0

Figura 4.6. Configuración de constantes de calibración del software Robocom

4.1.2. Generación de la trama

La estructura general de la trama enviada desde el software Robocom al sistema de control consta de:

Tabla 4.1. Estructura general de la trama de comunicación.



La cabecera o 'comando' de la trama puede tomar cualquier valor referido en la tabla 4.3. El valor indicará qué instrucción ejecutará el controlador y qué valor tomará el dato del comando.

Un ejemplo de esto, puede verse en la figura con ayuda del software DockLight v2.2, que es un sniffer/monitor de puerto serial RS232 para Windows.

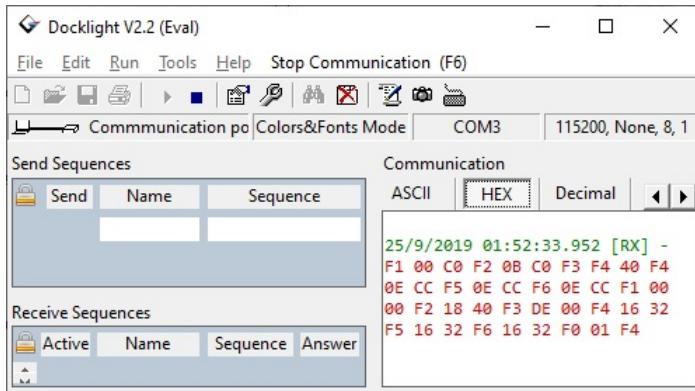


Figura 4.7. Vista de trama transmitida por el software Robocom al iniciar conexión.

Desde Robocom se puede enviar una rutina default para configuración previa de la posición de cada motor. Esto se logra presionando la pestaña 'Posiciones por defecto' que se observa en la figura 4.3.

Esto produce la siguiente trama:

Tabla 4.2. Comandos enviados al generar trama default. Información obtenida con el software SerialMon.

TRAMA	INSTRUCCIÓN
F1 00 C0	Motor 1 en 0,99
F2 0B C0	Motor 2 en 28,38
F3 F4 40	Motor 3 en -15,51
F4 0E CC	Motor 4 en -66,29
F5 0E CC	Motor 5 en -66,29
F6 0E CC	Motor 6 en -66,29
F1 00 00	Motor 1 en 0
F2 18 40	Motor 2 en 44,88
F3 DE 00	Motor 3 en -44,88
F4 16 40	Motor 4 en 0,49
F5 16 32	Motor 5 en 0
F6 16 32	Motor 6 en 0
F0 01 F4	PR1 en 500

Para comprender los datos enviados que se muestran en la tabla 4.2, se tiene una lista de comandos permitidos en la comunicación del controlador y Robocom. Esta lista se muestra en la tabla 4.3.

Cada dato incluido en la trama es procesado para ser enviado de forma correcta a la unidad de control. El procesado se realiza partiendo de un valor digital que luego es calculado en su equivalente en grados o radianes.

La construcción del dato para los motores A,B y C es la siguiente:

$$V_{digital} = V_{digital} << 6$$

$$V_{high} = V_{digital} >> 8$$

$$V_{low} = V_{digital}$$

El calculo del equivalente en grados es:

$$V_{grados} = K_{pro}(V_{digital} + K_{offset}) \quad (4.2)$$

Considerando como valores por defecto $K_{pro} = 0,33$ [grados/bits] para cada motor y $K_{offset} = 0$ para los motores A y C; y $K_{offset} = 39$ [bits] para el motor B. Estos valores pueden ser modificados dentro de la interfaz del programa según como lo requiera el usuario.

La construcción del dato para los motores D, E y F es la siguiente:

$$V_{high} = V_{digital} >> 8$$

$$V_{low} = V_{digital}$$

El calculo del equivalente en grados es:

$$V_{grados} = 0,035(V_{digital} - 5682) \quad (4.3)$$

La información contenida en la cabecera y cuerpo de la trama transmitida, se construye de acuerdo a las tablas 4.3 y 4.4.

Tabla 4.3. Comandos emitidos desde el software Robocom (cliente) al brazo.

CLIENTE		
1er byte Comando (8 bits)	2do y 3er Byte Dato (16 bits)	Descripción
E0	00	Enable articulacion A
	01	Disable articulacion A
	02	Enable articulacion B
	03	Disable articulacion B
	04	Enable pinza neumática
	05	Disable pinza neumática
	06	Enable articulacion C
	07	Disable articulacion C
	09	Solicitud de la posición del A/D de articulación A
	10	Solicitud de la posición del A/D de articulación B
	11	Solicitud de la posición del A/D de articulación C
F0	Dato	Escribir Periodo de muestreo
F1	Dato	Escribir Referencia de control de PID A (PID_A.controlReference)
F2	Dato	Escribir Referencia de control de PID B (PID_B.controlReference)
F3	Dato	Escribir Referencia de control de PID C (PID_C.controlReference)
F4	Dato	Escribir Referencia de motor de modelismo D (OC1RS)
F5	Dato	Escribir Referencia de motor de modelismo E (OC2RS)
F6	Dato	Escribir Referencia de motor de modelismo F (OC3RS)
F7	Dato	Escribir término proporcional del PID A
F8	Dato	Escribir término proporcional del PID B
F9	Dato	Escribir término proporcional del PID C
FA	Dato	Escribir término integral del PID A
FB	Dato	Escribir término integral del PID B
FC	Dato	Escribir término integral del PID C
FD	Dato	Escribir término derivativo del PID A
FE	Dato	Escribir término derivativo del PID B
FF	Dato	Escribir término derivativo del PID C

El controlador también puede dar respuesta a las solicitudes de posición del A/D. Los comandos emitidos por el controlador se observan en la tabla 4.4. No obstante, no son objeto de estudio de este trabajo.

Tabla 4.4. Comandos emitidos por el controlador (servidor) como respuesta al cliente.

SERVIDOR		
1er byte Comando (8bits)	2do y 3er byte Dato (16bits)	Descripción
A9	Dato	Valor del A/D de articulación A
B9	Dato	Valor del A/D de articulación A*
C9	Dato	Valor del A/D de articulación B
D9	Dato	Valor del A/D de articulación B*
E9	Dato	Valor del A/D de articulación C
F9	Dato	Valor del A/D de articulación C*

4.2. Unidad de control

El microcontrolador recibe todas las instrucciones vía puerto serial configurado con 8 bits, 1 bit de parada, 115200 baudios; y utiliza solo los pines de Rx (U2RX) y Tx(U2TX) para establecer la comunicación. Ante cada instrucción de movimiento, el microcontrolador puede emitir un total de nueve señales PWM. Para los motores A, B, C, les corresponden dos señales, una para movimiento positivo y otra para movimiento negativo, respectivamente. El resto de los motores poseen solo una señal PWM para cada uno. El diagrama de conexiones e identificación de las funciones de cada pin se puede observar en la figura 4.8.

4.3. PWM

El manual anexo al trabajo de Marcano ([5]) indica que:

Motores A, B, C:

Estos motores tienen configurado una señal PWM de 11bits y frecuencia 29,328kHz. Marcano lo explica a continuación:

"La resolución de la señal de PWM obtenida es de 11 bits, por lo tanto para obtener un duty cycle máximo es necesario que el registro PDCx tenga un valor de 2048. Los pines de salida de PWM se han configurado en modo complementario, por lo tanto para que la corriente promedio entregada al motor sea cero es necesario colocar PDCx=1023, para que el motor produzca par máximo el registro de duty cycle debe ser PDCx=0 para que gire en un sentido ó PDCx =2048 para que gire en el otro sentido."

Motores D, E, F:

"Se ha configurado el mismo para un periodo de 17,3 ms, para obtener una posición del servomotor centrada, que corresponde con un pulso 1,5 ms de duración el registro de duty cycle debe ser OCxRS=0x1632 (5682 en decimal). Es necesario generar un pulso desde los 1 ms hasta los 2ms por lo tanto los valores válidos del registro en esta aplicación van desde el 3788 hasta el 7576 (en sistema decimal), lo que permite obtener la posición deseada en dentro del rango de posiciones del servomotor."

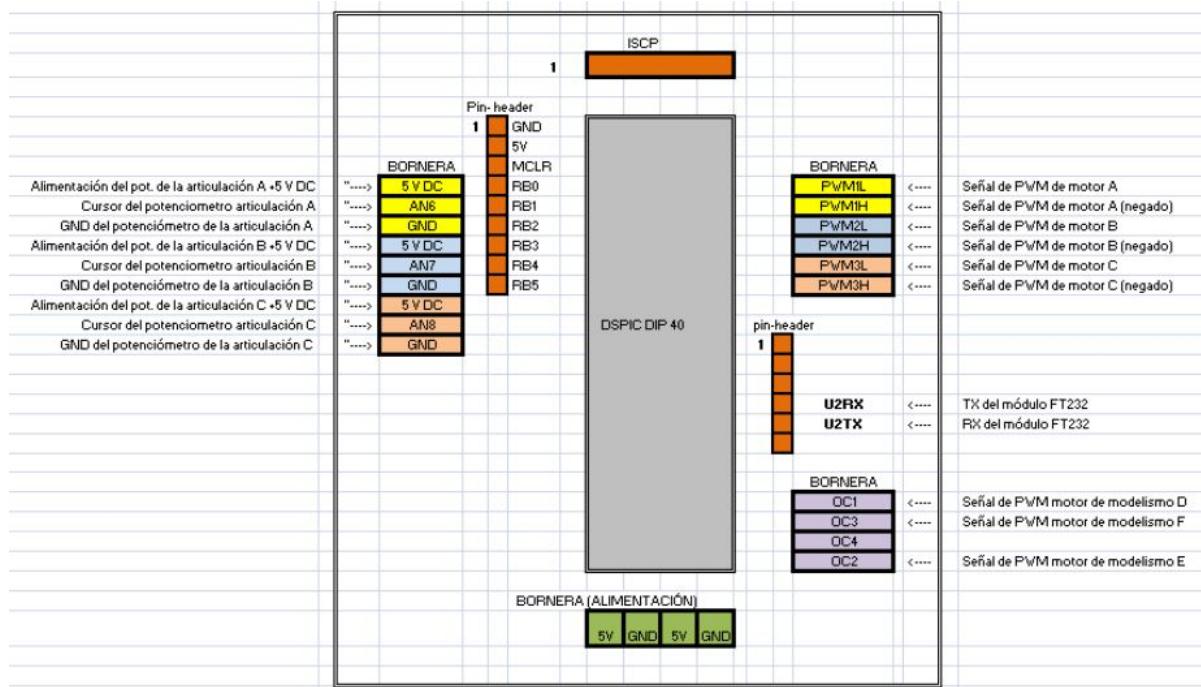


Figura 4.8. Pines de conexión del módulo controlador original.

CAPÍTULO V

SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS

Las especificaciones del diseño del sistema de acceso remoto requieren el establecimiento de un servidor web para realizar una comunicación inalámbrica desde una página web con acceso desde un cliente. En esta página web se desea implementar los comandos de movimiento y configuración del brazo robot en tiempo real o con baja latencia para así eliminar completa o parcialmente la presencia de un computador de forma cableada.

Para compensar la ausencia del computador, este dispositivo debe conectarse al controlador del brazo manipulador vía puerto serial para así establecer la comunicación entre el servidor y el cliente hacia el robot.

Por este motivo, se considera que las necesidades del proyecto requieren de uno o varios dispositivos que cuenten con UART, medios de conexión por radiofrecuencia, memoria flash adaptable a las necesidades del código, y puertos de propósito general suficientes para implementar el prototipo. Dichas de otro modo, se resumen los requerimientos en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Estimación de requerimientos para el diseño.

Comunicación por radiofrecuencia	Sí
Memoria flash	Por el orden de los MB
GPIO	Al menos 10
Costo	Económico
UART	Sí
Capacidad de programación en lenguaje C	Sí

En el mercado existe una gran cantidad de dispositivos que cubren estos requerimientos y muchos otros no contemplados. Por ello se analizarán algunos de los más importantes.

Raspberry Pi 3

Esta tarjeta de desarrollo cuenta con microprocesador ARM Cortex

Cypress CYW54907

Contiene un microprocesador ARM Cortex R4

ESP 8266

ESP 32

CAPÍTULO VI

SISTEMA DE ACCESO REMOTO

El sistema de acceso remoto está desarrollado sobre un microcontrolador ESP-8266 12-E, utilizando la tarjeta de desarrollo Wemos para el prototipo de este trabajo.

Para el desarrollo del sistema se utilizó como herramienta de programación el Kit de Desarrollo de Software (SDK) ESP-8266 NON-OS SDK de Espressif en lenguaje C, usando el PlatformIO IDE de Atom versión 1.38.1, compilado con GCC (GNU) 4.8.2.

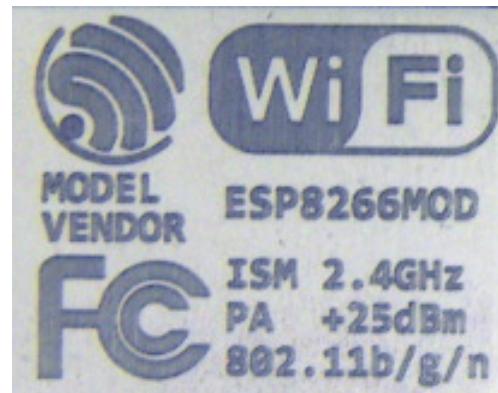


Figura 6.1. Placa del microcontrolador ESP-8266.

La información de las especificaciones de hardware y software se observan en la tabla 6.1 y 6.2.

Tabla 6.1. Especificaciones de hardware

HARDWARE	
Tarjeta de desarrollo	LOL1n
Microcontrolador	ESP-8266 12-E
RAM	80KB
Flash	4MB
Oscilador	80MHz
Procesador	Xtensa Tensilica L106
WiFi	892.11b/g/n
ISM	2,4GHz
PA	+25dBm

Tabla 6.2. Especificaciones de software

SOFTWARE	
SDK	Espressif ESP-8266 NON-OS SDK v2.1.0
Lenguaje	C
Compilador	GCC (GNU) 4.8.2
IDE	Atom PlatformIO IDE v1.38.1

6.1. Kit de desarrollo de software: Espressif NON OS ESP-8266 SDK

SDK, en inglés Software Development Kit. Es un compilado de herramientas necesarias para desarrollar aplicaciones específicas para el entorno deseado.

En el caso del Espressif NON OS ESP-8266 SDK, se trata de un kit diseñado por la empresa Espressif para desarrollar software en dispositivos sin sistema operativo. En ella tiene las librerías de mayor importancia para la configuración y uso del ESP-8266.

El SDK NON-OS provée un conjunto de interfaces de programación de aplicaciones (API) para las funcionalidades del núcleo ESP-8266, como recepción/transmisión de datos a través de Wi-Fi, funciones para el manejo de TCP/IP, funciones para la interfaz de hardware y el manejo básico del sistema.

Las librerías más importantes incluídas dentro del SDK son: osapi.h, user_interface.h, driver/uart.h, espconn.h, gpio.h, eagle_soc.h.

6.1.1. osapi.h

Esta librería realiza una re-definición de algunas de las funciones más importantes de la librería string.h y algunas funciones para manejo del timer. Todas las funciones incluídas en esta librería incluyen el prefijo 'os', que simboliza que estas arrojan una respuesta de debug vía puerto serial al momento de utilizarlas.

Para deshabilitar estos comandos, es necesario escribir previo a todas las declaraciones del programa principal: 'system_set_os_print(0)'. Y con esto pueden utilizarse sin inconvenientes las funciones con comandos 'os'.

6.1.2. user_interface.h

Contiene las definiciones de las estructuras para configurar el Wi-Fi en modo estación o punto de acceso.

6.1.3. driver/uart.h

Posee los macros y variables necesarias para la configuración del UART.

6.1.4. espconn.h

Define las estructuras para la creación del socket TCP o UDP, así como los prototipos y declaraciones de las funciones de la API correspondiente. Con estas funciones es posible establecer un servidor o cliente mediante solicitudes y respuestas.

6.1.5. gpio.h

Contiene los prototipos y definiciones de las funciones que configuran los puertos de propósito general (GPIO). En concreto, las funciones que seleccionan un pin como entrada o salida, en modalidad baja o alta; entre otros parámetros.

6.1.6. eagle_soc.h

Esta librería es, quizá, de las más importantes. En ella se definen los macros que permiten acceder a las múltiples funciones de los GPIO.

Como puede observarse en la tabla 6.3, el ESP-8266 posee múltiples puertos de propósito general, por ello es necesario indicar el propósito de uso de cada GPIO deseado.

Tabla 6.3. Registros de GPIO del ESP-8266. Fuente: Espressif.

FUNCTION 3	FUNCTION 4	AT RESET	AFTER RESET	SLEEP
GPIO1	CLK_OUT	oe=0, wpu	wpu	oe=0
	CLK_RTC	oe=0,wpu	wpu	oe=0
	U0TXD	oe=0,wpu	wpu	oe=0
GPIO3	CLK_XTAL	oe=0,wpu	wpu	oe=0
		oe=0		oe=0
		oe=0		oe=0
GPIO6	U1CTS	oe=0		oe=0
GPIO7	U1DXD	oe=0		oe=0
GPIO8	U1RXD	oe=0		oe=0
GPIO9	HSPIHD	oe=0		oe=0
GPIO10	HSPIWP	oe=0		oe=0
GPIO11	U1RTS	oe=0		oe=0
GPIO12	U0DTR	oe=0, wpu	wpu	oe=0
GPIO13	U0CTS	oe=0, wpu	wpu	oe=0
GPIO14	U0DSR	oe=0, wpu	wpu	oe=0
GPIO15	U0RTS	oe=0, wpu	wpu	oe=0
DEEPSLEEP	BT_XTAL_EN	oe=1, wpd	oe=1, wpd	oe=1

6.2. Contenido del programa

El programa consta de cinco archivos: user_main.c, user_config.h, funciones.h, funciones.c, pagina.h.

6.2.1. user_main.c

En el archivo user_main.c se encuentra el segmento de código principal y las rutinas de configuración del módulo para su operatividad.

6.2.2. user_config.h

En el archivo user_config.h se define el mapeo de pines de la tarjeta de desarrollo de acuerdo a la identificación de las GPIO según el SDK. También se definen algunas variables utilizadas para generar las tramas de comunicación y las variables para SSID y contraseña de la red WiFi.

6.2.3. funciones.h y funciones.c

En el archivo funciones.h se encuentran los prototipos de todas las funciones y el llamado de las librerías de mayor importancia desde el SDK, indicadas a continuación.

```
#include "stdlib.h"
#include "stdio.h"
#include "osapi.h"
#include "user_interface.h"
#include "driver/uart.h"
#include "ets_sys.h"
#include "c_types.h"
#include "espconn.h"
#include "mem.h"
#include "gpio.h"
#include "eagle_soc.h"
```

En el archivo funciones.c están todas las definiciones de las funciones utilizadas en el programa. Además, están declaradas las variables y estructuras globales necesarias.

6.2.4. pagina.h

Este archivo contiene dos variables tipo char que contienen en una cadena el código HTML de la página web y la cadena de respuesta ante una solicitud exitosa.

6.2.5. Compilado

Al compilar el código y cargarlo en el microcontrolador, el IDE muestra los valores totales del consumo de memoria de esta aplicación, como se observa en la figura 6.2.

```
platformio run
Processing esp12e (platform: espressif8266; board: esp12e; framework: esp8266-nonos-sdk)

Verbose mode can be enabled via `--verbose` option
CONFIGURATION: https://docs.platformio.org/page/boards/espressif8266/esp12e.html
PLATFORM: Espressif 8266 2.0.4 > Espressif ESP8266 ESP-12E
HARDWARE: ESP8266 80MHz, 80KB RAM, 4MB Flash
PACKAGES: toolchain-xtensa 1.40802.0 (4.8.2), tool-esptool 1.413.0 (4.13), framework-esp8266-nonos-sdk 2.1.0
LDF: Library Dependency Finder -> http://bit.ly/configure-pio-ldf
LDF Modes: Finder ~ chain, Compatibility ~ soft
Found 2 compatible libraries
Scanning dependencies...
Dependency Graph
[!-- <func>
Retrieving maximum program size .pio\build\esp12e\firmware.elf
Checking size .pio\build\esp12e\firmware.elf
Memory Usage -> http://bit.ly/pio-memory-usage
DATA: [=====] 75.0% (used 61413 bytes from 81920 bytes)
PROGRAM: [=====] 69.5% (used 262073 bytes from 376832 bytes)
[SUCCESS] Took 10.13 seconds
```

Figura 6.2. Compilado del programa.

6.3. Funcionamiento

El programa principal consta del establecimiento de un servidor TCP que espera una solicitud HTTP proveniente del browser al que se tiene acceso como cliente.

El funcionamiento específico se resume en la figura, que muestra la comunica-

ción cliente-servidor al momento de solicitar un comando.

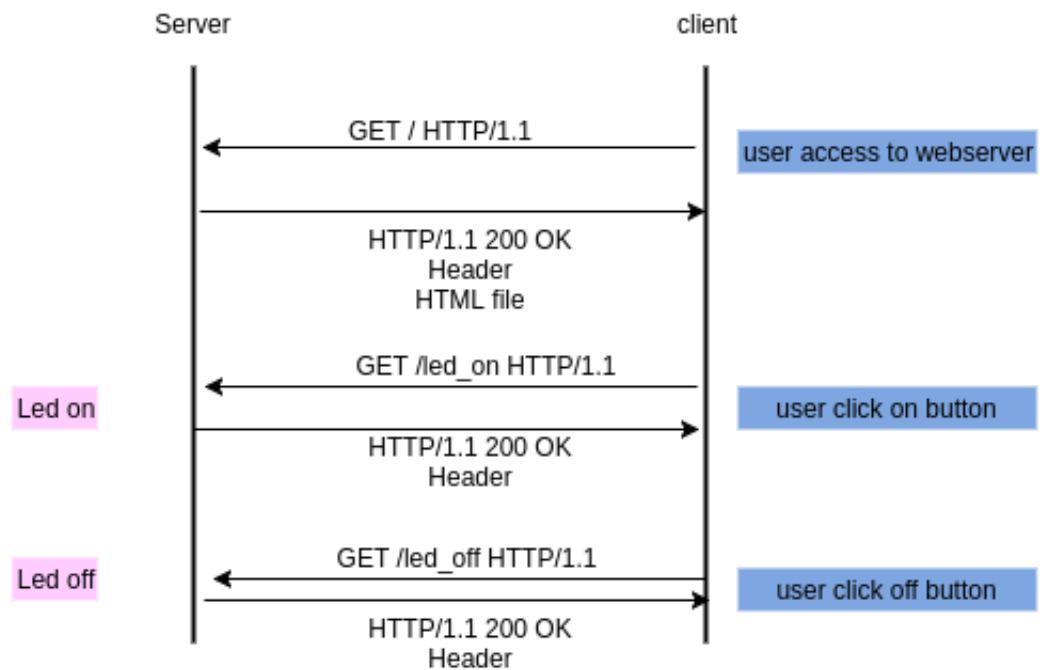


Figura 6.3. Ejemplo de comunicación cliente- servidor.

6.3.1. Pseudocódigo

Programa principal;

begin

```
    Configurar UART;  
    Configurar GPIO;  
    Encender LED D4;  
    Configurar WiFi;  
    Crear servidor TCP;  
while 1==1 do  
    | //Esperar solicitud TCP;  
end  
end
```

```

Interrupción Wifi;
begin
    if Conexión a página then
        Abrir canal TCP;
        Responder 200 OK;
        Encender LED D2 al iniciar carga;
        Apagar LED D2 al culminar carga;
        // Este canal no requiere ser desconectado.
    end
    while Canal abierto do
        switch Solicitud do
            case Mover motor do
                Recibir cadena HTTP;
                Procesar información;
                Calcular el valor del movimiento;
                Construir la trama;
                Enviar al puerto serial;
                Desconectar canal TCP;
            end
            case Configurar parámetro do
                Recibir cadena HTTP;
                Procesar información;
                Calcular el valor del parámetro;
                Construir la trama;
                Enviar al puerto serial;
                Desconectar canal TCP;
            end
            case Configurar constantes de calibración do
                Recibir cadena HTTP;
                Procesar información;
                Calcular el valor de la constante;
                Cambiar el valor de la constante;
                Desconectar canal TCP;
            end
        end
    end
end

```

```

Función de desconexión;

begin
    | Borrar canal TCP;
    | Crear nuevo canal TCP. //Esperar;
end

```

En la tabla 6.3.1, se especifica la información de la señal WiFi sobre la que se crea el servidor. Este es creado en el puerto 8266 sobre la IP 192.168.4.1 vía la señal WiFi emitida desde el microcontrolador. Esta comunicación se realiza a 2.4GHz y 54Mbps y solo puede crear 4 canales de comunicación TCP en paralelo, por ese motivo debe desconectarse después de cada comunicación para evitar la saturación del servidor.

Tabla 6.4. Información sobre la conexión WiFi

SSID	ESP8266-WiFi
Contraseña	esp123456
Dirección MAC	e0:e6:2e:7b:d4:7b
Dirección IP	192.168.4.2
Puerta de enlace	192.168.4.1
Máscara de subred	255.255.255.0
DNS	192.168.4.1
Frecuencia	2.4 GHz
Velocidad de conexión	54 Mbps
Seguridad	WPA / WPA2 PSK
Dirección IPv6	fe80::525c:d653:7ba:b7cb

Para procesar cada string se utiliza la librería *string.h* (declarada dentro de *osapi.h* en el SDK) que contiene múltiples funciones para el manejo de cadenas.

La cadena recibida en cada comunicación se trata de una petición HTTP con método GET que posee la siguiente estructura:

```
GET /?comando=valor HTTP/1.1
Host: 192.168.4.1:8266
Connection: keep-alive
Accept: */*
X-Requested-With: XMLHttpRequest
User-Agent: Mozilla/5.0 (Windows NT 10.0; Win64; x64)...
Referer: http://192.168.4.1:8266/
Accept-Encoding: gzip, deflate
Accept-Language: es-ES,es;q=0.9,en;q=0.8
```

Una vez recibida la cadena tras una solicitud, es comparada con la función *strcmp*. Esta es usada para encontrar una coincidencia dentro de la lista de comandos permitidos que se encuentran en la tabla 6.5.

Tabla 6.5. Comandos aceptados en las solicitudes HTTP.

COMANDO	STRING	FUNCIÓN
cmd00	GET / HTTP/1.1	Solicitud de la página desde el browser
cmd1	GET /?num1	Mover motor 1
cmd2	GET /?num2	Mover motor 2
cmd3	GET /?num3	Mover motor 3
cmd4	GET /?num4	Mover motor 4
cmd5	GET /?num5	Mover motor 5
cmd6	GET /?num6	Mover motor 6
cmd7	GET /?gripon	Habilitar pinza neumática
cmd8	GET /?gripoff	Deshabilitar pinza neumática
cmd9	GET /?PR1	Configurar timer PR1
cmd11	GET /?Kp1	Factor proporcional PID 1
cmd12	GET /?Ki1	Factor integral PID 1
cmd13	GET /?Kd1	Factor derivativo PID 1
cmd14	GET /?Kp2	Factor proporcional PID 2
cmd15	GET /?Ki2	Factor integral PID 2
cmd16	GET /?Kd2	Factor derivativo PID 2
cmd17	GET /?Kp3	Factor proporcional PID 3
cmd18	GET /?Ki3	Factor integral PID 3
cmd19	GET /?Kd3	Factor derivativo PID 3
cmd20	GET /?Kpro1	Constante de calibración proporcional 1
cmd21	GET /?Koffset1	Constante de calibración de offset 1
cmd22	GET /?Kpro2	Constante de calibración proporcional 2
cmd23	GET /?Koffset2	Constante de calibración de offset 2
cmd24	GET /?Kpro3	Constante de calibración proporcional 3
cmd25	GET /?Koffset3	Constante de calibración de offset 3
cmd26	GET /?puente1=ON	Habilitar Puente H 1
cmd27	GET /?puente1=OFF	Deshabilitar Puente H 1
cmd28	GET /?puente2=ON	Habilitar Puente H 2
cmd29	GET /?puente2=OFF	Deshabilitar Puente H 2
cmd30	GET /?puente3=ON	Habilitar Puente H 3
cmd31	GET /?puente3=OFF	Deshabilitar Puente H 3

De haber una coincidencia, en esta solicitud es de principal interés obtener los parámetros *comando=valor* para algunas peticiones. Como es el caso de los movimientos de los motores y la configuración de parámetros.

Para ello se utiliza la función *strncpy* para copiar al menos 30 caracteres en una variable auxiliar y de esta manera manipular una cadena menor.

Una vez recortada la cadena, se utiliza la función *strtok* para separar cada parte del mensaje en subvariables o tokens. Colocando como selector el carácter de espacio '' e igual '='.

El código del microcontrolador está, además de por comandos, estructurado por un total de catorce funciones que se ejecutan según sea el caso. Estas serán explicadas en los siguientes apartados.

6.3.2. Función server_recv

Esta es principalmente la función de respuesta ante recepción de información en el servidor.

En ella se obtiene la cadena recibida en el canal TCP para la posterior identificación de los comandos. Para esto, se realiza una evaluación de cadenas mediante la función *strncmp* de la librería *string.h* para buscar el identificador del comando.

Posteriormente, de acuerdo al resultado del comando, esta ejecutará una instrucción contenida en un bloque condicional único para cada caso.

6.3.3. Función server_sent

Función de callback cuando se envía algo desde el servidor. Esta función enciende un LED de notificación en el pin D2 de la tarjeta de desarrollo.

6.3.4. Función server _discon

Función de callback cuando se desconecta un canal TCP. Esta borra por completo el canal y vuelve a habilitar el servidor TCP en el puerto 8266, seguidamente apaga un led en el pin D4 de la tarjeta de desarrollo.

6.3.5. Función server _listen

Esta función se utiliza para declarar cuáles serán las funciones de callback para 'escuchar' las conexiones en el canal TCP. Para hacer esto, se utiliza las funciones *espconn_regist_sentcb* y *espconn_regist_disconcb* del NON-OS SDK.

6.3.6. Función server _recon

Esta función se encarga de reconectar el servidor en caso de una falla en el establecimiento del canal TCP. Esto ocurre raramente. No obstante, se incluye como medida cautelar ante posibles errores en la comunicación.

6.3.7. Función init _tcp

Dentro de la estructura de configuración de la conexión, se define el apuntador, el tipo (TCP) y el puerto para establecer la conexión.

Luego, con las función *espconn_regist_connectcb* se define el callback para 'escuchar' el servidor.

Finalmente, para crear el servidor, se utiliza *espconn_accept* y se enciende un led en el pin D4 de la tarjeta de desarrollo.

6.3.8. Función ap_config_func

Esta función configura la conexión que realiza el microcontrolador por medio de la señal WiFi. Se selecciona el modo de punto de acceso (SOFTAP MODE) en donde se da valor a la SSID y contraseña de la conexión a establecer. Como SSID se colocó 'ESP8266-WiFi' y contraseña 'esp123456' con seguridad WPA/WPA2 PSK, como se indica en la tabla 6.3.1.

6.3.9. Función gpio_init

Esta función configura los pines D2 y D4 como salidas digitales. También configura el UART2 de 8 bits con bit de parada y 115200 baudios.

6.3.10. Función mover_motor

Esta función recibe la cadena y la separa por secciones para tomar su valor.

De la cadena recibida, toma los primeros 30 caracteres y se procesa como se explica a continuación:

Información de la trama HTTP enviada por el cliente (Browser):

El cliente realiza un request GET cuya cabecera contiene lo siguiente:

```
GET /?num1=XXX HTTP/1.1
```

En este mensaje el valor XXX debe ser aislado para ser procesado. Esto se hace mediante la función *strtok* de la librería *string.h*. Se colocarán como selectores de token, los caracteres ' ' y '='.

1ra vez:

GET /?num1=XXX HTTP/1.1

^ token=GET

2da vez:

/?num1=XXX HTTP/1.1

^ token=/?num1

3ra vez:

XXX HTTP/1.1

^ token=XXX y con esto ya se obtiene el valor de XXX.

Una vez obtenido ese valor, este es convertido en entero con la función *atoi* de la librería *stdlib.h* o convertido en float con la función *atof* (o en su defecto, la función personalizada *myatof*). Seguidamente, se aplica la conversión según la expresión 6.1 obtenida de la ecuación 4.1.

$$Valor_{digital} = \left(\frac{Valor_{grados}}{K_{pro}} \right) - K_{offset} \quad (6.1)$$

Una vez convertido el valor, este se desplaza 6 bits a la izquierda para ordenarlos.

Como se desea transmitir una trama como la indicada en la tabla 4.1.2, es necesario que el valor obtenido anteriormente se desplace 8 bits a la derecha para así dar valor al dato high. El dato low no tiene mayores modificaciones, así que esta función termina su trabajo enviando el arreglo con la instrucción *uart0_tx_buffer* del NON-OS SDK.

6.3.11. Función mover_motor_2

Esta función realiza la misma operación que *mover_motor* (6.3.10). Sin embargo, la calibración de offset y proporcionalidad ya están predefinidas y no pueden cambiarse. Esto se hace para dar movimiento a los motores de la mano del robot (D, E, F).

6.3.12. Funciones cambiar_constante, parametro_pid, puenteH

Estas funciones se utilizan para cambiar el valor de las constantes de calibración presentes en los motores A, B y C (*cambiar_constante*). También configura los parámetros del PID como Kp, Ki, Kd de los motores A, B y C (*parametro_pid*). El registro PR1 del timer del controlador y por último habilita o deshabilita los puentes H de los motores A, B y C (*puenteH*).

Estas funciones realizan un procesado similar a *mover_motor* y dan como resultado el número float de interés extraído de la cadena recibida para el caso de la función (*cambiar_constante*), o el envío directo de la trama generada con ayuda de la función *uart0_tx_buffer*

6.3.13. Función myatof

Esta función se usa para convertir un carácter ASCII a un valor float. No se utiliza la función *atof*, de la librería *stdlib.h*, ya que genera un error de compilación debido a que las funciones *malloc* y *free* están declaradas dentro del SDK como *os_malloc* y *os_free* y escritas de otra manera el compilador no las reconoce. Por lo tanto, se requirió un algoritmo que realizara el mismo proceso.

CAPÍTULO VII

RESULTADOS

7.1. Interfaz

Para acceder al servidor, primero debe comprobarse que el dispositivo está conectado correctamente. Usando otro dispositivo que cuente con Wi-Fi puede hacerse esto rápidamente, mostrando lo indicado en la figura.

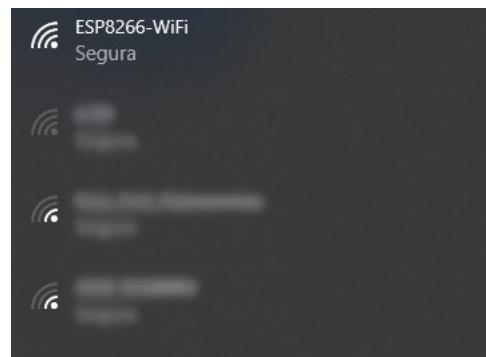


Figura 7.1. Detección de señal Wi-Fi emitida por el microcontrolador ESP-8266.

7.1.1. Página web alojada en servidor

La aplicación principal consta de una página web alojada en el servidor ESP-8266 a la que se puede acceder vía <http://192.168.4.1:8266> que luce como se observa en la figura 7.3.

Al abrir la web, esta solicitará al usuario que ingrese una clave. De ser exitosa, permitirá el ingreso; en caso contrario, enviará al usuario a Google. Esto se observa

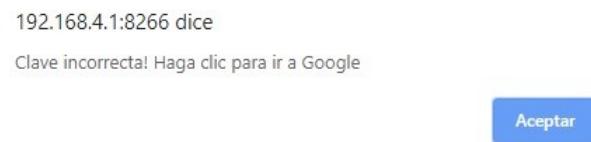
en la figura 7.2.



(a) Solicitud de clave



(b) Clave exitosa



(c) Clave incorrecta

Figura 7.2. Solicitud de clave para entrada a la página.

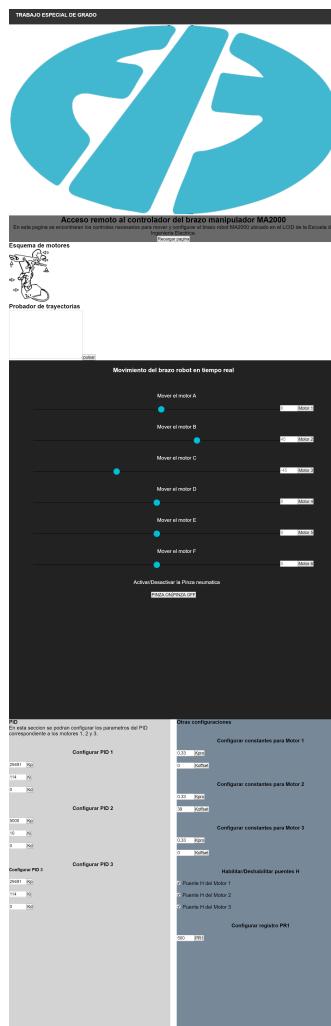


Figura 7.3. Página web completa.

Vista en detalle, las partes de la página son:

Encabezado



Figura 7.4. Encabezado de página

En la figura 7.4 puede verse la presentación de la web, con una imagen alojada en el microcontrolador codificada en base64.

Por otra parte, en la parte inferior puede observarse el botón 'Recargar página' que reconfigura todos los parámetros a sus valores originales, enviando esta trama al brazo robot. Es importante mencionar que cada vez que la página se recargue, esto ocurrirá.

Sección de pruebas

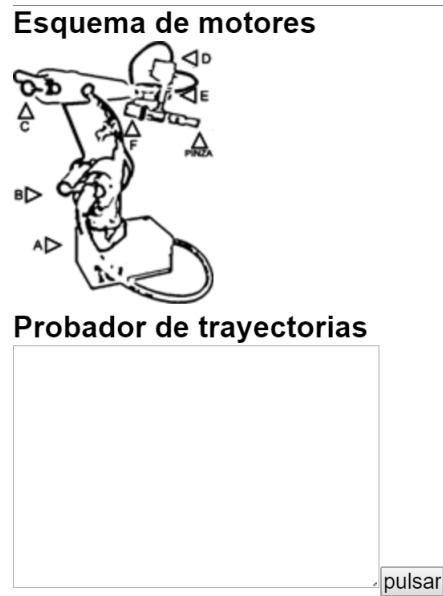


Figura 7.5. Esquema del brazo robot y probador de trayectorias

En la figura 7.5 se observan dos elementos: Una imagen del esquema de motores, codificada en base64. Y un cuadro de texto que indica 'Probador de trayectorias'.

Este probador tiene la finalidad de probar rutinas de movimiento sencillas (sin retardos), con la idea de realizar un bosquejo rápido del movimiento que desea el usuario.

Al presionar el botón 'pulsar', toda la rutina contenida en el cuadro de texto se enviará al brazo robot.

Las rutinas deben tener la estructura siguiente:

q1 -65.00

q2 35.00

q3 -65.00

q4 34.83

q5 -65.01

q6 -34.65

grip on

q1 34.48

q2 -65.02

q3 34.30

q4 -65.04

q5 34.13

q6 65.05

grip off

En estas rutinas, 'qi' es el indicador de movimiento para el motor deseado. Siendo 1, 2, 3, 4, 5 y 6 correspondientes a los motores A, B, C, D, E y F. El número siguiente es el aproximado en grados del movimiento deseado. Puede ser un número entero o un número real de dos cifras significativas. El signo indica si el movimiento es en sentido negativo o no.

Movimiento en tiempo real

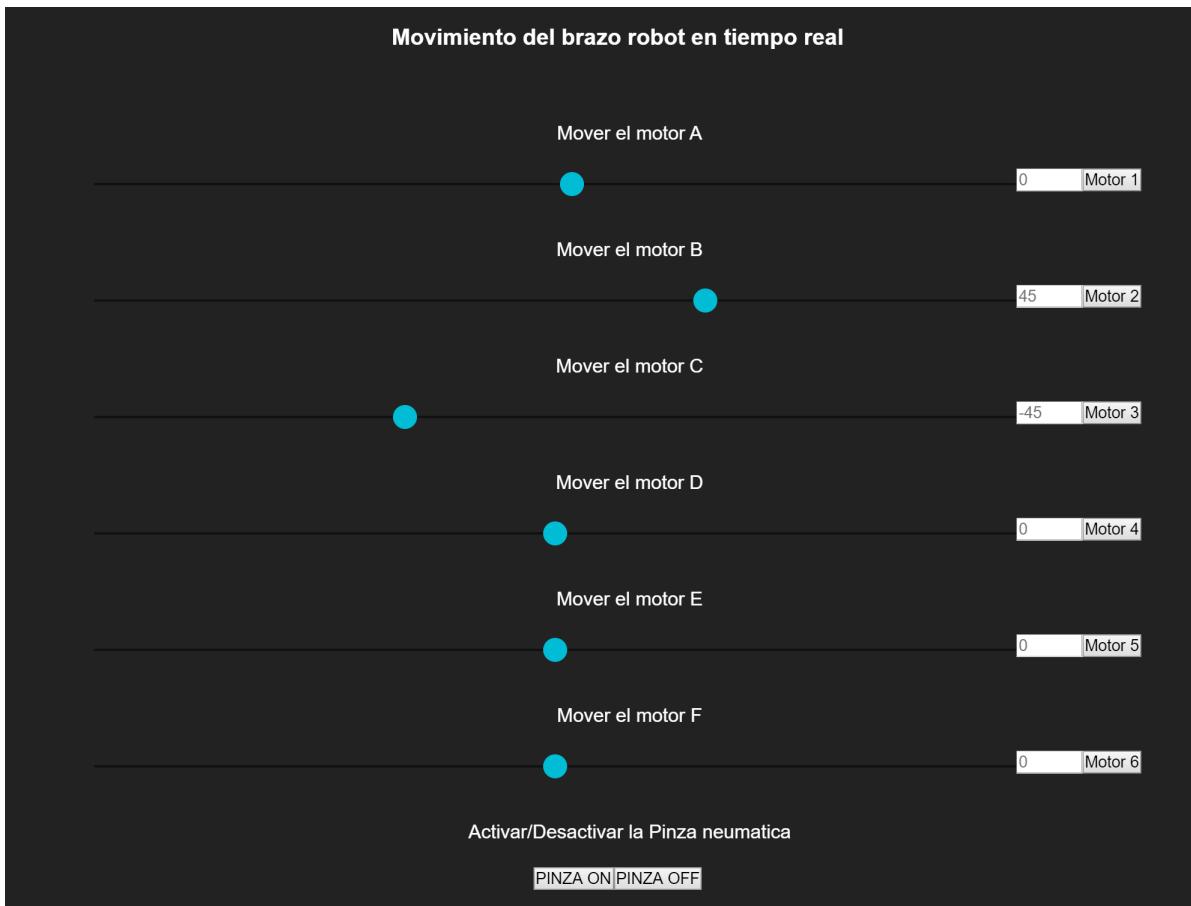


Figura 7.6. Movimiento del brazo en tiempo real

En la figura 7.6, se observan los cursores de movimiento en tiempo real. Al accionar cualquiera de estos, el valor indicado en la casilla de la derecha cambiará y a su vez será enviado al brazo robot. Además, el usuario puede colocar manualmente un valor específico en estas casillas y seguidamente presionar el botón del motor de su selección.

Es importante mencionar que los valores presentados al cargar la página son los enviados por defecto al inicio de la carga de esta.

En la parte inferior se encuentran los botones para la habilitación o deshabilitación de la pinza neumática.

Configuración de parámetros

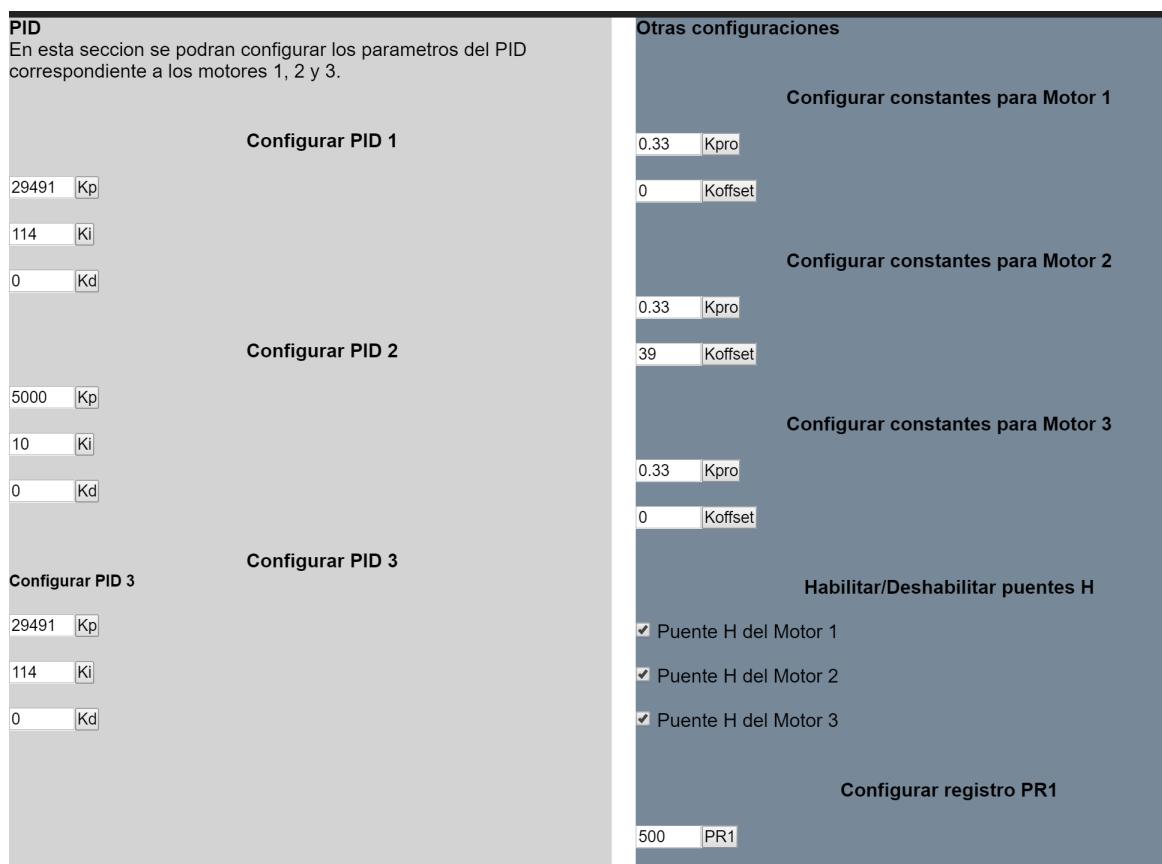


Figura 7.7. Configuración de parámetros generales

En la figura 7.7 pueden observarse los parámetros configurables del brazo robot.

A la izquierda se encuentran los parámetros correspondientes a los tres controladores PID presentes en el robot. Los valores mostrados son los enviados por defecto. Sin embargo, se recomienda al usuario cambiarlos a valores óptimos para evitar oscilaciones indeseadas.

A la derecha, se encuentran los parámetros de calibración para el cálculo del valor de movimiento. Estos son los considerados en la ecuación 4.2, por lo tanto es importante realizar variaciones solo cuando el usuario esté completamente seguro.

Seguidamente, se observan las opciones para habilitar o deshabilitar los puentes H de los motores principales. No obstante, esto no es recomendable modificar debido a que los motores constantemente realizan movimientos en sentidos positivos y negativos.

Por último, está la opción de configuración del registro PR1, quien se encarga de seleccionar la tasa de muestreo del controlador manejado por el dsPIC. El valor mostrado es el seleccionado por defecto. Es importante mencionar que este valor solo debe ser modificado cuando se esté completamente seguro de sus consecuencias.

7.1.2. Solución a posibles inconvenientes

La aplicación web contenida en la página está desarrollada en JavaScript. Concretamente, con herramientas de JS y de JQuery.

Cada navegador o browser actualizado cuenta con JavaScript. Además, cualquiera que ejecute una página web que utilice JQuery automáticamente descarga esta librería (jquery.min.js), permitiendo que pueda cargarse con mayor rapidez en la siguiente ocasión. No obstante, algunas veces esto no se guarda en la memoria por diversos motivos.

Dentro del código HTML, se hace la solicitud de

<https://ajax.googleapis.com/ajax/libs/jquery/1/jquery.min.js>

Para que el browser integre esta librería debe estar previamente descargada,

de lo contrario ocasionará problemas en la página y no se ejecutará correctamente.

Un método para solucionar esta eventualidad es introducir el enlace anterior en el navegador a utilizar con conectividad a internet. El parámetro '/1/' de la cadena solicita la versión más actual disponible.

En algunos casos, esto no soluciona el problema de conexión; por lo que es necesario ajustar parámetros internos del navegador.

Si se está utilizando Google Chrome (probado con versión 76.0.3809.132) u Opera (probado con versión 63.0.3368.94) se puede acceder a la memoria caché de DNS, y así ajustar el valor por defecto. Esto se hace accediendo a la dirección:

```
chrome://net-internals/#dns
```

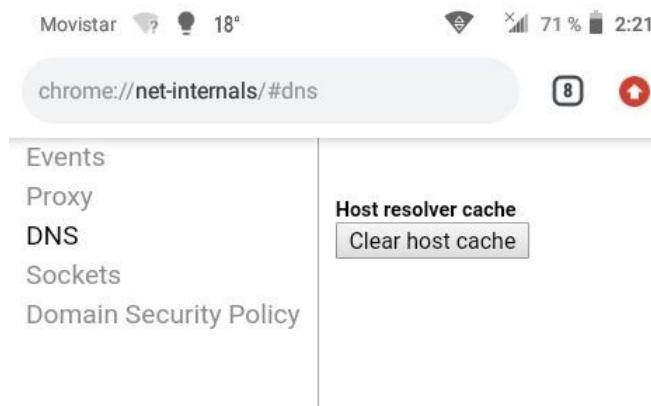


Figura 7.8. Vista de chrome:// net-internals

En la ventana mostrada en la figura 7.8 se debe presionar el botón 'Clear host cache'.

Si el problema de conectividad persiste, es necesario eliminar los valores de cookies, caché y demás datos de navegación y repetir lo explicado al inicio de esta sección (descargar nuevamente la librería jquery.min.js).

7.1.3. Aplicación Android

Esta aplicación fue desarrollada en Android Studio versión 3.4.1 para API 27 (Android 8.1 Oreo) en lenguaje Java.

La funcionalidad de la aplicación es comunicarse a través de un canal TCP con el servidor establecido en el ESP-8266. Allí enviará los comandos generados por el archivo de texto en el que será leído línea por línea. Esto se repetirá tantas veces como quiera el usuario.

En esta aplicación sí se permite el uso de comandos de retardo (wait). Un ejemplo es la siguiente rutina:

```
q1 -74
q3 -110
wait 200
q1 -73
q3 -109
wait 200
q1 -72
q3 -108
wait 200
q1 -71
q3 -107
wait 200
```

Los comandos 'wait' deben ir acompañados de un valor numérico entero que simbolizará un retardo en milisegundos.

En la figura 7.9 se observa la vista en miniatura desde el menú de aplicaciones.

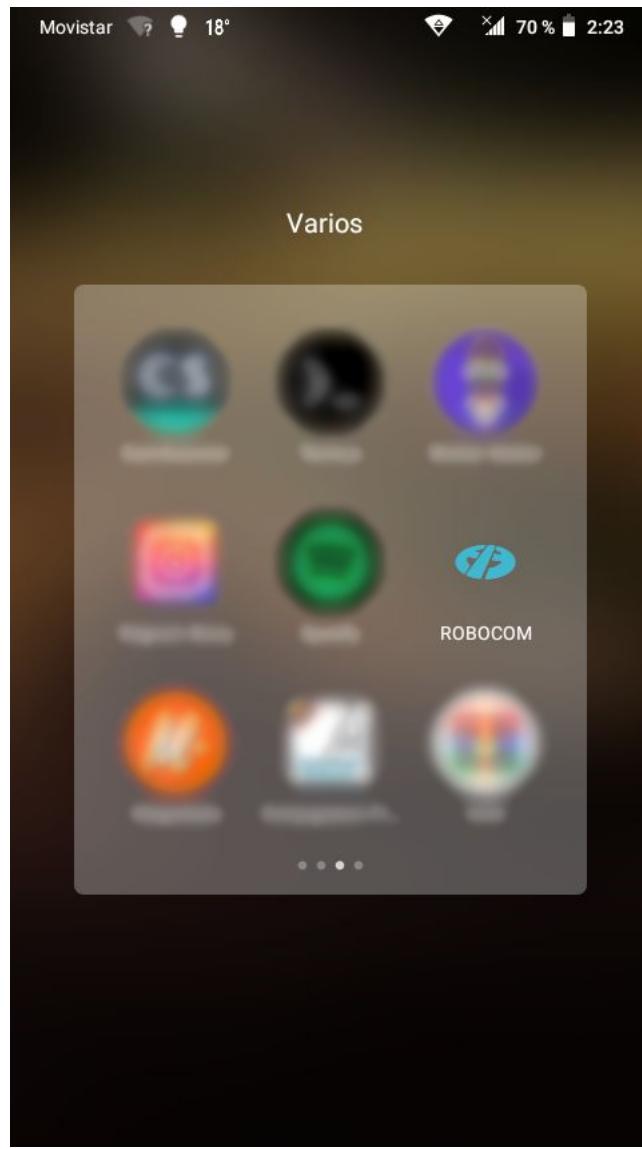


Figura 7.9. Aplicación vista desde el menú.

En la figura 7.10 se observa la interfaz de la aplicación.

El banner muestra el nombre de esta, 'ROBOCOM'. Seguidamente, el cuerpo de esta establece un campo de texto editable con etiqueta 'Número de repeticiones'. En esta opción se coloca el número de veces que desea repetirse la rutina. Al dejar el valor en '0', el programa se ejecutará una sola vez.

A un lado se encuentra la etiqueta 'Status', que indica si la comunicación fue exitosa o no. De serlo, marcará el número '200'; en caso contrario marcará '404'.

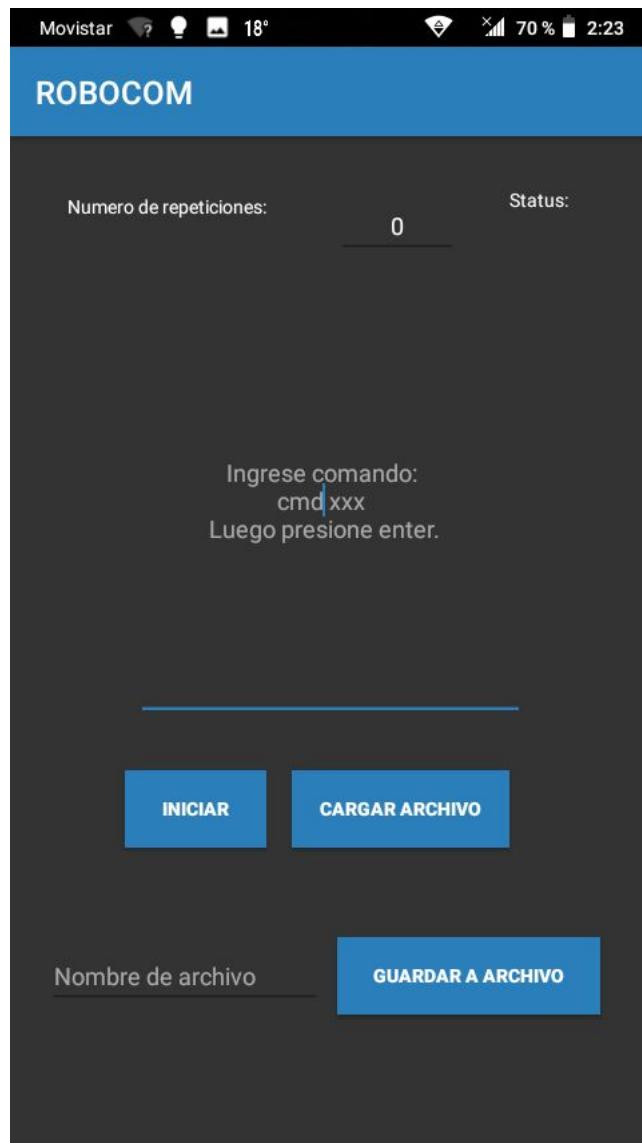


Figura 7.10. Vista principal de la aplicación Android.

Al centro de la aplicación está el campo de texto en el que se posará el texto de la rutina. Allí pueden escribirse los comandos de movimiento y configuración directamente o desde un archivo de texto que puede ser cargado al presionar el botón 'Cargar Archivo'.

Las rutinas generadas o modificadas pueden ser guardadas en un nuevo archivo indicando el nombre y presionando la opción 'Guardar a archivo'.

7.2. Montaje

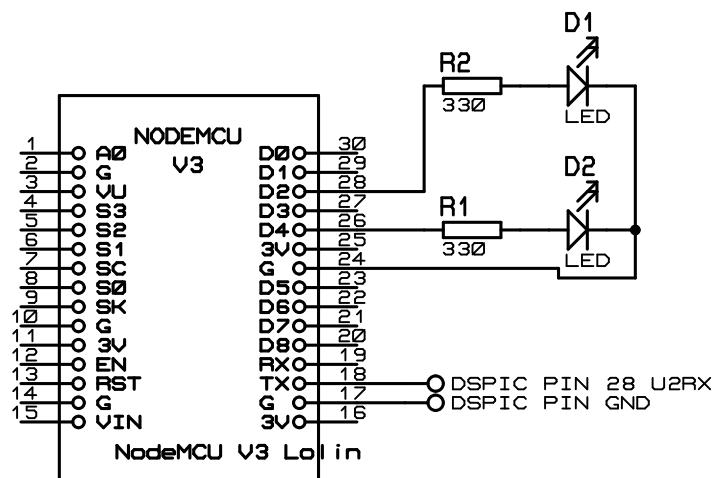


Figura 7.11. Esquemático de conexión entre ESP-8266 y dsPIC30F3011

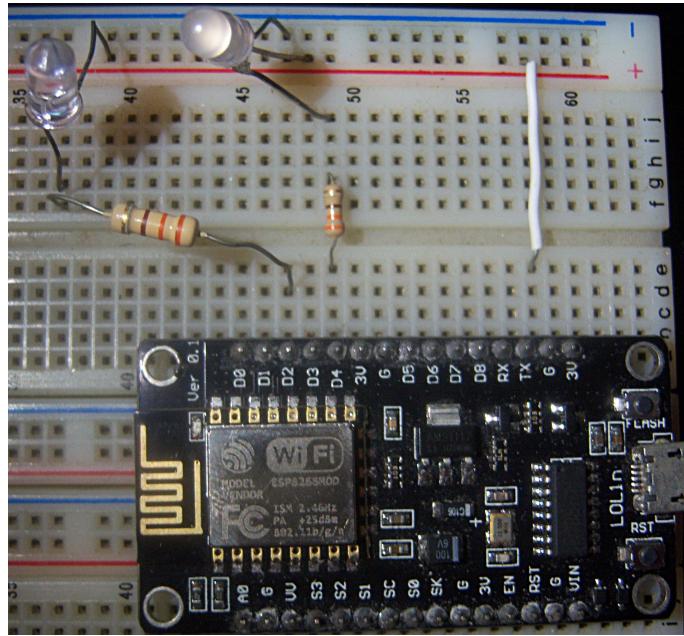


Figura 7.12. Fotografía del montaje en protoboard de la tarjeta de desarrollo.

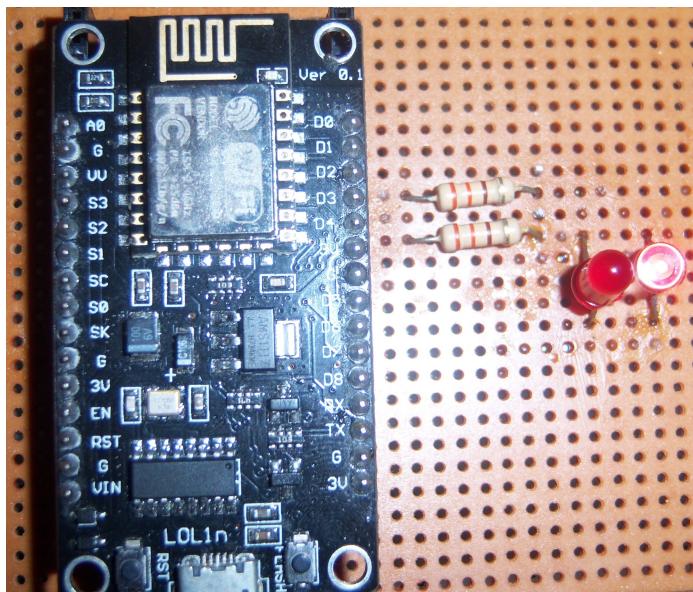


Figura 7.13. Montaje del prototipo.

CAPÍTULO VIII

CONCLUSIONES

CAPÍTULO IX

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

- [1] ALAM, M., AND JAMIL. Design and implementation of a rf controlled robotic environmental survey assistant system. pp. 438–442.
- [2] ARU, A. Design exploration of a microcontroller based rf remote control 13amps wall socket. *IOSR Journal of Computer Engineering* 11 (01 2013), 56–60.
- [3] KAUSTUBH, G. Wireless mobile robotic arm. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* 04 (3 2017), 757–759.
- [4] LABRADOR, A. *Diseño de un equipo para el control y monitoreo de un motor asincrónico usando una aplicación móvil*. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad Central de Venezuela, Caracas, 2018.
- [5] MARCANO, J. *Implementación de sistema de programación de Trayectorias para el brazo manipulador MA2000*. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad Central de Venezuela, Caracas, 2013.
- [6] MD. BONY, A. Design and implementation of a remote controlled robotic arm based on industrial application perspective. *International Conference on Mechanical, Industrial and Materials Engineering 2013 (ICMIME2013)* (2013).
- [7] MILLER, R., ERIKSSON, L., FLEISHER, L., WIENER-KRONISH, J., AND YOUNG, W. *Anesthesia E-Book*. Elsevier Health Sciences, 2009.

- [8] VALDERRAMA, J. *Diseño de un conjunto de prácticas para la configuración y uso básico del microcontrolador ESP8266*. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad Central de Venezuela, Caracas, 2018.
- [9] YUSOFF, M., AND SAMIN. Wireless mobile robotic arm. *Procedia Engineering* 41 (12 2012), 1072–1078.

Espressif Systems

ESP 8266 Technical Reference version 1.3 2017

ESP8266 Non-OS SDK API Reference version 3.0.1 2019

ESP8266 SDK Getting Started Guide version 2.0 2016

ESP8266EX Datasheet version 6.0 2018