 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

MEDICIÓN DE VARIABLES USANDO UN ENJAMBRE DE ROBOTS EN UNA RED MESH

Franklin Giovanni Bastidas Cuya

Programa Académico

Ingeniería Mecatrónica

Director(es) del trabajo de grado

Juan Sebastián Botero Valencia

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

Noviembre 2019

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

En el presente trabajo se diseña y construye un grupo de robots los cuales determinan un enjambre, este enjambre es monitoreado y controlado a través de una red de malla inalámbrica (WMN). Dentro de cada enjambre hay un enrutador de malla, el cual forma una red ad-hoc móvil auto-organizada de tal manera que todos los robots están conectados a todos los otros robots aun siendo móviles, obteniendo la capacidad de ejecutar la medición de variables entre sí, siendo para este caso la temperatura. Adicionalmente, el sistema tiene la capacidad de distribuir los nodos de tal forma que se optimizan los puntos de medición.

La metodología utilizada es en cascada, el cual está compuesto por etapas de: diseño de prototipos, construcción y ensamble de piezas, adquisición de datos térmicos y campos magnéticos, calibración de datos adquiridos, controlador PID, método de descenso del gradiente y transmisión de datos en una red WMN o Mesh.

Los resultados obtenidos de la topología en Malla auto-organizada permiten la transmisión de datos a un solo agente del enjambre o a todos los robots conectados a la red, a pesar que el número de robots conectados al sistema varíen respecto al tiempo. El trabajo presente evidencia el diseño, la configuración, el control, la adquisición y la transmisión de datos de cada agente móvil perteneciente al enjambre robótico en la red.

Palabras clave: Controlador PID, red de malla inalámbrica, descenso del gradiente, ad-hoc, enjambre robótico.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RECONOCIMIENTOS

Agradezco a Dios por brindarme todo el conocimiento adquirido para entender a través de la ciencia las maravillas que ha realizado con sus manos.

Al director Juan Sebastián por el apoyo y confianza para la realización de trabajos previstos en el laboratorio, además de acompañarme en el proceso de formación como futuro investigador.

A mi padre, Antonio; y mi madre, María, por apoyarme, guiarme y ser ejemplos de vida hasta en las cosas más insignificantes que he podido observar. Mis hermanos, Jonathan, Leidy y Melanie, por luchar y trabajar, regalándome su tiempo solo para verme continuar con mi formación.

A Lina que siempre estuvo en todo momento para aconsejarme en todas las decisiones y recordarme cada día ese futuro tan deseado por el cual me esfuerzo en todo momento.

A todos los que me acompañaron en este recorrido, ayudándome lo suficiente como para entender que podía contar con ellos, en especial a Estefania que con todos sus actos me ha demostrado el verdadero significado de la amistad.

A todos ellos, de los mas profundo de mi corazón, muchas gracias.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACRÓNIMOS

MRS Sistema de Múltiples robots

TCP Protocolo de control de Transmisión

CPU Unidad Central de Procesamiento

ROM Memoria de solo lectura

RAM Memoria de acceso aleatorio

IOT Internet de las cosas

NTC Coeficiente de temperatura negativo

PID Proporcional, integral y derivativo

GMD Método de descenso del gradiente

SGD Descenso de gradiente estocástico

NAG Descenso acelerado de Nesterov

CAD Diseño asistido por computadora

ABS Acrilonitrilo butadieno estireno

Li-Po Polímero de Litio

Wifi Fidelidad inalámbrica

IDE Entorno de desarrollo integrado

GPIO Pines de propósito general

I²C Inter-Integrated Circuit

ADC Conversión de señal analógica a digital

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	6
2.	MARCO TEÓRICO	8
2.1	De la naturaleza a la robótica de enjambre.....	8
2.1.1	Inteligencia de enjambre	8
2.1.2	Robótica de enjambre.....	9
2.2	Comunicación inalámbrica.....	9
2.2.1	Red de Malla Inalámbrica Mesh	10
2.2.2	Microcontrolador	11
2.3	Instrumentos de Medida	11
2.3.1	Magnetómetro y Matrices de transformación.....	12
2.3.2	Termistor y ecuación de Steinhart-Hart.....	13
2.4	Controlador PID.....	14
2.5	Descenso del Gradiente.....	14
3.	METODOLOGÍA	16
3.1	Estructura del Robot.....	17
3.2	Adquisición de Datos	20
3.3	Calibración del Magnetómetro	22
3.4	Sistema de Control	23
3.5	Descenso del Gradiente.....	24
3.6	Transmisión de Datos	24
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	26
5.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO.....	29
	REFERENCIAS	30
	APÉNDICE.....	32

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1. INTRODUCCIÓN

En la robótica móvil las tareas de búsqueda de variables, como ambientales o de exploración y reconocimiento de entornos pueden ser ejecutadas por un grupo de robots móviles autónomos, este trabajo en comparación de ser realizado por un robot único, más costoso pero de mayor característica es desarrollado por estos agentes móviles que mejoran el rendimiento debido a los efectos de un enjambre, por esta razón, representa un enfoque novedoso para la coordinación de grandes cantidades de robots (Gbenga & Ramlan, 2016). Además, posee la ventaja de realizar trabajos en paralelo permitiendo una ejecución de tareas más rápida. Estas características es aún más sorprendente cuando las restricciones de tamaño de la plataforma robótica no permite la exploración de un entorno con un solo robot y en un tiempo aceptable (Correll & Martinoli, 2009).

La idea principal detrás de un sistema de múltiples robots (SMR) es que muchos robots pueden cooperar para completar una tarea determinada más rápido que un solo robot móvil (Guzzoni, Cheyer, Julia, & Konolige, 1997), actuando en diferentes lugares al mismo tiempo. Estos sistemas no solo se caracterizan por el paralelismo, sino que también pueden ser tolerantes a fallas debido a la redundancia de los robots. Además de la cooperación, tres características deseadas de la robótica de enjambre son robustez, flexibilidad y escalabilidad. Todos estos tres conceptos están relacionados con una sola idea principal, que dicta que un sistema de enjambre debe ser capaz de realizar la tarea propuesta en diferentes condiciones (Nedjah & Junior, 2019). Se ha implementado varios estudios en la realización de una tarea única en respuesta a la entrada del usuario y una cantidad masiva de robots, como es el caso de Rubenstein et al. (Rubenstein, Cornejo, & Nagpal, 2014) el cual presentó un enjambre de mil robots y el equipo de construcción de robots inspirados en termitas diseñados por Werfel et al. (Werfel, Petersen, & Nagpal, 2014). Ambos trabajos están orientados a tareas de ensamblaje por un grupo de robots. En el trabajo de Rubenstein, los robots organizan espacialmente para mostrar, a nivel de enjambre, formas

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

predefinidas por el usuario y en el segundo trabajo, los robots construyen estructuras complejas predeterminadas utilizando bloques simples.

Se diseña y construye un grupo de robots que conforman un enjambre, estos robots son diseñados en el software PTC Creo Parametric, y luego creados a partir de superposición de capas sucesivas de material PLA, esto quiere decir por impresión 3D. El sistema tiene como objetivo la localización del mínimo local del parámetro de la temperatura del ambiente que rodea al robot según el descenso del gradiente por medio de un termistor, entregando la dirección en el cual la temperatura va decreciendo, luego realiza una posterior ubicación que es determinado por el tiempo de desplazamiento o ratio de aprendizaje para la siguiente iteración. El posicionamiento angular del robot es medido por el magnetómetro, el cual es calibrado por medio de matrices de transformación y luego a partir de un PID realizar un control de posicionamiento angular para finalmente realizar una nueva iteración acercándose cada vez más a un mínimo local de temperatura. La comunicación entre todos los agentes móviles que representan el sistema es por medio de una red mesh con topología autoorganizada y de tipo estrella, así cada robot conectado a esta red puede recibir información del sistema completo.

Objetivo general

Diseño, construcción y validez de un grupo de robots que conforman una plataforma de robótica de enjambre.

Objetivos específicos

- Transmisión de datos por red de malla inalámbrica.
- Controlador para posicionamiento angular
- Descenso de gradiente

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2. MARCO TEÓRICO

2.1 De la naturaleza a la robótica de enjambre

2.1.1 Inteligencia de enjambre

La inteligencia de enjambre surgió de estudios biológicos del comportamiento de los insectos, hormigas y abejas y como interactúan entre sí (Bonabeau, Dorigo, & Theraulaz, 1999). El tipo de comportamiento reflejado en los grupos de enjambre muestran una robusta y gran flexibilidad que se aprecia en su planificación de rutas, construcción de nidos, asignación de tareas y otros comportamientos colectivos complejos. Cada individuo de un enjambre tiene habilidades muy simples, sin embargo, se pueden distinguir a nivel grupal acciones como la búsqueda de colonias de hormigas y abejas, y la migración de multitudes de aves y peces como se muestra en la Figura 1 (Tan & Zheng, 2013). La inteligencia de enjambre se enfoca en el diseño y estudio de métodos computacionales eficientes para resolución de problemas inspirándose de la naturaleza.

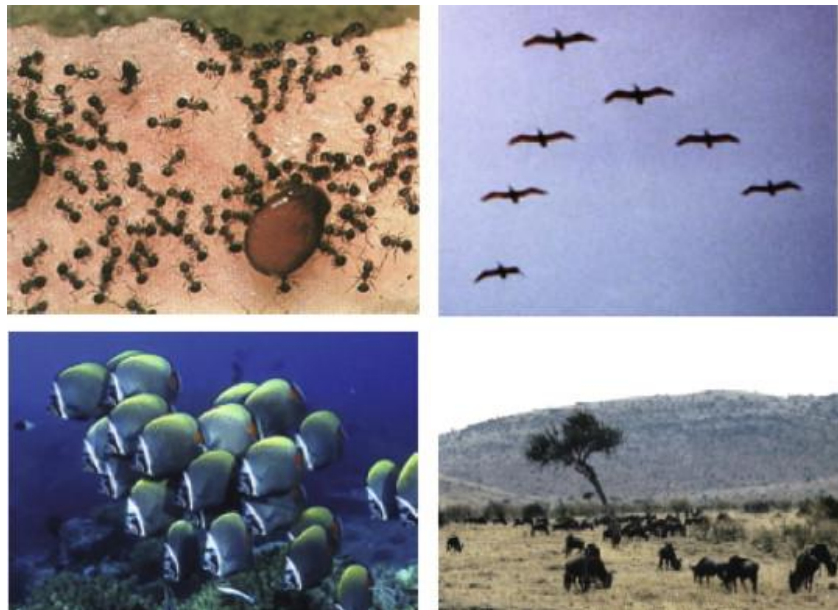


Figura 1. Grupos de enjambres (tomado de (Tan & Zheng, 2013))

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.1.2 Robótica de enjambre

La metodología de la inteligencia de enjambre es aplicado en la robótica, al desarrollo de prototipos robóticos relativamente simples con comportamientos colectivos escalables y flexibles, donde la coordinación de este grupo de robots multi-agente en conjunto cumple un papel fundamental para el desarrollo de una tarea compleja (Sahin, 2005). Una de sus características principales son las interacciones realistas de cada grupo de robots con su medio ambiente, además de las ventajas de escalabilidad, robustez y rentabilidad, esto quiere decir que la cantidad de robots puede ser variada, ya que los algoritmos diseñados son independientes al número de agentes, todo el sistema robótico debe tener la capacidad de culminar con el trabajo asignado, incluso cuando haya pérdida o falla de individuos, esto lo hace auto reconfigurable a nivel de sistema, por último, los agentes que conforman el enjambre contrastan la idea de un robot único, complejo y costoso que realiza tareas que son difíciles o que requieran monitoreo simultaneo, algunos de estos ejemplos se muestran en la figura 2 y figura 3.

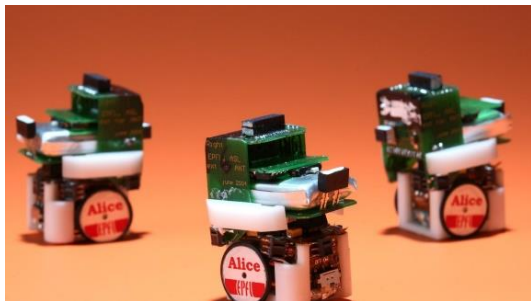


Figura 2. Robots de enjambre Alice (Tomado de (Correll & Martinoli, 2009)).

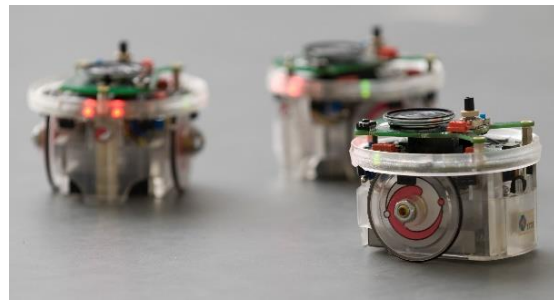


Figura 3. Robot de enjambre e-puck (Tomado de (Mondada et al., 2009)).

2.2 Comunicación inalámbrica

La transferencia de datos y estado actual del enjambre es por medio de una comunicación en red de malla inalámbrica, a través de un módulo Wifi ESP8266, igualmente la adquisición de datos es por medio de un microcontrolador. Todo esto incluido en la plataforma NodeMCU.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.2.1 Red de Malla Inalámbrica Mesh

Teniendo en cuenta que el enjambre de robots, dependiendo de la geometría y forma del robot, tiene una gran versatilidad para el desplazamiento, además de poder moverse a grandes distancias entre ellos, se debe tomar en cuenta el entorno de red de comunicación que se realiza entre los agentes móviles, usuarios y administradores (Li et al., 2008). Por este motivo se propone una red Wifi Mesh el cual dará la facilidad de comunicación entre sí de todos los dispositivos, la topología de la red Mesh se puede representar en la Figura 4.



Figura 4. Red inalámbrica Mesh.(Tomado de (Xataka, n.d.))

La red Mesh está compuesta por nodos que realizan la comunicación entre ellos en una misma red a diferencia de las acciones que realiza un router con varios repetidores donde no hay comunicación entre los repetidores sino entre el router y cada repetidor. La red mesh tiene una configuración avanzada de gestión de datos debido a que redirecciona el envío de información por la mejor señal de la red dando como resultado uno de los mejores y rápidos envíos de datos. Por último, la red cambia con respecto al estado de señal de cada nodo, estos realizan una reconexión con otros nodos dependiendo de la calidad de señal.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.2.2 Microcontrolador

Todo el proceso de control de cada agente móvil debe tener la facilidad en términos de dimensiones, transmisión de datos y velocidad de procesamiento, con el fin de cumplir con el objetivo previsto. Para cada robot móvil fue implementado el ESP8266, el cual es un chip de bajo costo que tiene una pila TCP/IP completa y un microcontrolador. El microcontrolador es un conjunto de dispositivos que incluyen una unidad central de procesamiento (CPU), memoria de programa, memoria de datos y entradas-salidas(E/S), estos dispositivos son programables para uso general, donde el algoritmo es guardado en las memorias no volátiles del microcontrolador como la ROM (Memoria de solo escritura) y memoria flash, estas memorias no son afectadas por el estado de fuente de alimentación, permitiendo la retención y ejecución continua del código luego de cada reinicio del sistema. Por otra parte, la ejecución de variables temporales son guardadas en memorias volátiles como la RAM (Memoria de acceso aleatorio), en este registro se almacenan variables que varían con respecto al tiempo y son usadas mientras el sistema se encuentra en funcionamiento (Ibrahim & Ibrahim, 2010).

Con la llegada de los microcontroladores no solo se redujeron los costos de implementación de prototipos y procesos industriales, sino que aportó facilidad en el manejo de áreas como robótica y control, además de ser factor importante para el Internet de las cosas (IoT) donde es utilizado por su capacidad y dimensiones reducidas. El ESP8266 juega un papel muy importante por su bajo costo y capacidad de comunicación Wifi.

2.3 Instrumentos de Medida

Los datos adquiridos por cada enjambre representan el estado actual del ambiente que rodea el robot y la orientación del robot con respecto a un punto de referencia, para luego ser procesado por el sistema de control y descenso de gradiente, determinando el vector del gradiente térmico y desplazamiento del robot.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.3.1 Magnetómetro y Matrices de transformación

Sensor magnético o también conocido como Magnetómetro, es un sensor para medir la intensidad de campo magnético (inducción magnética), esto quiere decir que mide la fuerza y dirección del campo en las proximidades del dispositivo. Estas medidas pueden variar de un lugar a otro, puesto que los campos magnéticos dependen del ambiente, lugar o latitud en el que se encuentre, esto por diferente naturaleza de las rocas, la interacción entre las partículas cargadas por el sol y la atmosfera (Bai, Bai, Bai, & Bai, 2019).

La orientación del dispositivo se relaciona con la referencia del norte magnético de la tierra, teniendo en cuenta los errores del magnetómetro como el efecto Hard-Iron y el Soft-Iron. Donde el efecto Hard-Iron son fuentes de ruido magnético estacionario de las placas en el cual está instalada el sensor, como resultado de este efecto se cambia el origen de la esfera ideal de medida. El efecto Soft-Iron surge de los dispositivos o metales cerca del sensor que distorsionan el campo magnético alrededor de este, esto afecta la medida del sensor en el cual estira e inclina la esfera ideal de medida, creando un elipsoide.

Hay varios métodos para corregir estos efectos, ya sea de hardware cambiando las posiciones de cada sensor y metales presentes o de software, realizando una función matemática para la obtención de una esfera ideal, en este caso se implementa las ecuaciones de Euler para realizar las matrices de transformación tanto de rotación como de traslación, y acercarse más a la esfera de medida esperada.

Las matrices de transformación geométricos a utilizar son las de traslación y escala, estas matrices deforman y desplazan todos los puntos que representan una figura o geometría, la matriz de escala a utilizar se denota en la ecuación R_1 y la matriz de traslación es representado en la ecuación R_2

$$R_1(\alpha) = \begin{bmatrix} E_x & 0 & 0 \\ 0 & E_x & 0 \\ 0 & 0 & E_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$R_2(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T_x \\ 0 & 1 & 0 & T_y \\ 0 & 0 & 1 & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Luego de calibrar y disminuir el error del magnetómetro con respecto al efecto Hard-Iron y Soft-Iron se determina el ángulo respecto al Norte con la siguiente ecuación:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{m_y}{m_x} \right) \quad (3)$$

Donde los parámetros m_y y m_x son los datos adquiridos por el sensor en los planos coordinados referentes a la esfera ideal de medida.

2.3.2 Termistor y ecuación de Steinhart-Hart

Para determinar las temperaturas en el ambiente que rodea cada robot, se utilizan los termistores. Los termistores son semiconductores que a partir de cambios de la temperatura del cuerpo varia la resistencia eléctrica que pasa a través de él. Este sensor será fundamental para obtener una magnitud física del ángulo que representa la dirección decreciente de la temperatura llamada también Gradiente de temperatura. Para el trabajo presente se utilizan el tipo de termistor NTC (Negative Temperature Coefficient) donde su resistencia decrece a medida que incrementa la temperatura.

Los termistores NTC relacionan la temperatura y resistencia R_t a partir de la ecuación de Steinhart-Hart (Liu, Guo, Liu, & Wu, 2018):

$$\frac{1}{T} = A_0 + A_1 \ln R_t + A_2 (\ln R_t)^3 \quad (4)$$

Donde A_0 , A_1 y A_2 son los coeficientes Steinhart-Hart para el termistor específico y R_t es la resistencia del termistor a temperatura T en kelvin. Los coeficientes se encuentran tomando la resistencia del termistor a tres temperaturas y resolviendo las siguientes tres ecuaciones simultáneas (*Steinhart & Hart equation for 10k Thermistors*, 2009):

$$\frac{1}{T_1} = A_0 + A_1 \ln R_1 + A_2 (\ln R_1)^3 \quad (5)$$

$$\frac{1}{T_2} = A_0 + A_1 \ln R_2 + A_2 (\ln R_2)^3 \quad (6)$$

$$\frac{1}{T_3} = A_0 + A_1 \ln R_3 + A_2 (\ln R_3)^3 \quad (7)$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.4 Controlador PID

La realimentación de un sistema es capaz de ocasionar mejoras en la precisión de un proceso autónomo, captando e informando al mismo sistema de los sucesos ocasionados en su salida respecto a su entrada. El controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) es un sistema de bucle cerrado que realimenta el valor de la entrada con el valor de la salida para determinar y minimizar el error del sistema del valor o setpoint deseado. El controlador PID es la forma más dominante de realimentación usado hoy en día, con más del 90% de lazos de control usando esta técnica (Åström, Hägglund, & Åström, 1995) por la efectividad, simplicidad y mejor comprensión de la acción de control, además de la facilidad de realización de PID digitales. El controlador PID se puede expresar matemáticamente como:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t') dt' + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (8)$$

Donde K_p , K_i y K_d son los coeficientes proporcional, integral y derivativo para las ganancias del sistema y $e(t)$ es el error del sistema en un instante de tiempo. El controlador PID continuamente calcula el error, que es la diferencia entre el valor obtenido y el valor deseado, este error es nuevamente implementado en el sistema para realizar una acción. La magnitud de esta acción dependerá de los coeficientes del PID, el cual según sus constantes y la planta (máquina a controlar), el sistema puede optar por varios resultados donde pueden ser sobreamortiguado, subamortiguado o críticamente amortiguado.

2.5 Descenso del Gradiente

El método de Descenso de gradiente (GDM) o también conocido como el “Descenso más pronunciado” o “Método de descenso más pronunciado” es uno de los algoritmos de optimización de aprendizaje automático, el cual abarca muchas aplicaciones, pero el campo con más uso extensivo de esta técnica son las redes neuronales. El GDM utiliza el cambio de parámetros que rodea una coordenada para buscar un punto óptimo, es decir, un

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

máximo o un mínimo para cualquier función dada. Estos puntos encontrados pueden ser locales o globales, aquí es donde la constante de aprendizaje tiene el trabajo de buscar el valor esperado en un tiempo respecto a la magnitud del mismo. La operación más importante del descenso del gradiente es la identificación de la razón o cambio que rodea un punto respecto a un eje coordenado, esto es denotado como la derivada y es representado en la siguiente ecuación:

$$f'(x) = \lim_{h \rightarrow \infty} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} \quad (9)$$

Donde $f(x)$ es la función y h es un desplazamiento alrededor de x .

El descenso del gradiente calcula a la derivada parcial respecto a cada parámetro que rodea el punto actual, el resultado que puede ser un mínimo local o global es restado por la magnitud del parámetro anterior por la velocidad de aprendizaje como se representa en la siguiente ecuación:

$$x_i + 1 = x_i - sf_i \nabla f(x_i) \mid i \geq 0 \quad (10)$$

Donde i es el número de iteración, $\nabla f(x_i)$ es el gradiente de la función en cada iteración (o paso alrededor de un punto) de la función $f(x_i)$, la solución óptima del sistema se obtiene más rápidamente si la dirección de búsqueda se realiza en la dirección del gradiente, por último sf_i es la constante de aprendizaje o factor de escala de paso del gradiente (Christensen & Bastien, 2016). Esta constante de aprendizaje normalmente tiene un valor entre 0 y 1 y representa la rapidez que converge el algoritmo, un valor demasiado alto podría hacer que el algoritmo se salte un mínimo cercano, en cambio un valor demasiado bajo hace que el algoritmo nunca llegue al mínimo, hay diferentes técnicas para ajustar el valor óptimo de esta constante como SGD, Momentum, NAG, Adagrad, Adadelta y Rmsprop.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3. METODOLOGÍA

EL desarrollo de este trabajo es realizado con respecto al modelo en Cascada o Waterfall model, donde es efectuado linealmente utilizando etapas rígidas, esto quiere decir que luego de terminar una fase inmediatamente comienza la siguiente, esta metodología es representado en la siguiente Tabla 1.

Etapa	Actividades	Herramientas
Estructura del Robot	Diseño 3D para las plataformas asignadas a cada driver, controlador, motores, baterías y sensores	CAD
	Simulación de Ensamble de piezas	CAD
	Ensamble físico de piezas	Diagrama de Ensamble
Adquisición de Datos	Algoritmo de lectura de parámetros del giroscopio AK8963C	Software
	Algoritmo de lectura de parámetros del termistor NTC de 10K con steinhart-Hart	Software
Calibración del Magnetómetro	Calibración del magnetómetro para la obtención de la esfera ideal basado en Matrices de transformación	Software
Sistema de Control	Controlador PID para el ángulo de rotación del robot respecto al Norte.	Software
Descenso del Gradiente	Algoritmo de desplazamiento del robot a partir del descenso del	Software

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

	gradiente respecto a la temperatura	
Transmisión de Datos	Algoritmo de transmisión de datos en una red Mesh	Software
Ensamble de funciones y resultados	Análisis y validez de datos obtenidos	

Tabla 1. Metodología en Cascada

3.1 Estructura del Robot

Esta estructura establece el montaje y acople de todos los sensores, motores, baterías y drivers en su plataforma, para este caso, la estructura está formada por 3 niveles, donde el primer nivel está conformado por 2 motorreductores N20 de 600RPM a 5V, rueda esférica deslizante y batería Li-Po de 850mAh, cabe aclarar que cada agente del enjambre no cuenta con las mismas características de velocidad y torque del motor. El soporte para el motor N20 es comercial y de material ABS como se muestra en la figura 5 y es diseñado para la configuración diferencial del robot, por este mismo motivo, se implementa la rueda esférica deslizante al otro extremo de la base del nivel y de los motorreductores, como se muestra en la figura 6.



Figura 5. Motorreductores acoplados a base



Figura 6. Rueda esférica deslizante acoplada a base.

La plataforma del segundo nivel está diseñada para el montaje del controlador NodeMCU, el cual incluye una Tensilica Xtensa LX106, que es un microcontrolador que procesa los datos a una frecuencia de hasta 160MHz con software necesario para manejar conexión 802.11, ver Figura 7. Las especificaciones técnicas del microcontrolador se representan en

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

la Tabla 2. Además de contar con un módulo Wifi, tiene la ventaja y facilidad de ser programado en el IDE Arduino, en este software se puede utilizar librerías preinstaladas, ahorrando tiempo en programación y orientándose más por la parte técnica del problema.

Ficha técnica NodeMCU	
Microcontrolador	Tensilica Xtensa LX106
RAM	64 KiB para instrucciones
	96 KiB para Datos
GPIO	9 pines
Voltaje de Entrada (USB)	5V
Corriente Stand-By	@80MHz: 80mA
	@160MHz: 90mA-100mA
Wifi	802.11 b/g/n
ADC	10 bits
Alimentación externa (Vin)	5V – 20V



Figura 7. Chip NodeMCU

Tabla 2. Especificaciones NodeMCU

El control de la locomoción diferencial del robot está basado en el driver L293D, el cual es un dispositivo conformado por cuatro compuertas lógicas de tres estados, cada pareja se comporta como un puente H, esto quiere decir que puede invertir en sus terminales el flujo de la corriente, obteniendo como resultado un cambio de dirección en los motores. Por otra parte, el módulo puede controlar motores de hasta 36V teniendo gran versatilidad y amplio rango de actuadores a usar. Para la implementación y fácil conexión con el NodeMCU, se utiliza un shield que tiene el driver L293D en su placa base, headers hembra para la instalación del NodeMCU, pulsador de alimentación de batería, pines en paralelo con el GPIO del microcontrolador y borneras para los motores y para la batería, ver Figura 8. Las especificaciones del motor shield se representan en la Tabla 3.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Ficha técnica Motor Shield	
Voltaje Motor (VM)	4.5V – 36V
Voltaje entrada (VIN)	4.5V – 9V
Disipación de energía	4 W (T=90°C)
Temperatura de Trabajo	-25°C ~ +125°C
Corriente de salida	<= 1.2 A

Tabla 3. Especificaciones Motor Shield

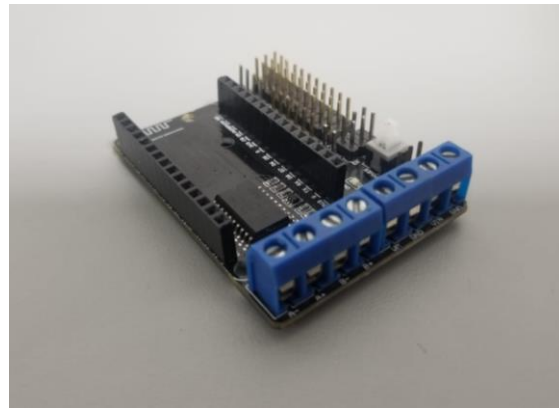


Figura 8. Shield Motor NodeMCU.

El ultimo nivel del robot está conformado por el Magnetómetro AK8963 y el termistor NTC. Este nivel es un acople directamente del NodeMCU, sobre él está el magnetómetro y de él sale una extensión aún más alta en donde se encuentra el sensor de temperatura, la lectura de la intensidad del campo magnético es por medio del protocolo de comunicación I²C, en él se puede configurar el sensor, por ejemplo, ajustar la sensibilidad del sensor magnético, las especificaciones técnicas del Magnetómetro se representan en la Tabla 4. El termistor está ubicado en una extensión más alta para determinar la temperatura que rodea el robot en la parte superior de él y evitar la lectura de las temperaturas locales creadas por el NodeMCU en funcionamiento, el módulo usado es el KY-013, ver Tabla 5. En esta placa el sensor se encuentra en serie con una resistencia de 10k creando un divisor de voltaje que va dirigido al microcontrolador para determinar la temperatura local del sensor.

Ficha técnica Magnetómetro	
Ejes de Medición	3 ejes
ADC	14 bits (0.6 uT/LSB)
	16 bits (0.15 uT/LSB)
Comunicación	I ² C
	SPI
Modo de operación	Baja potencia
	Medida continua
	Medición de Trigger externo
Temperatura de operación	-30°C ~ +85°C

Ficha técnica Termistor NTC	
Voltaje de operación	5V
Rango de Medición Temperatura	-55°C ~ +125°C
Precisión de medición	+/- 0.5°C

Tabla 5. Especificaciones Termistor NTC 10k.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Voltaje de Operación	2.4V – 3.6V
Consumo de Corriente	280uA
Rango de Medición	±4800T

Tabla 4. Especificaciones Magnetómetro AK8963C.

Teniendo todas las piezas ensambladas y añadiendo la batería, el prototipo final del robot se puede ver en la siguiente Figura 9 y el robot simulado en la Figura 10.

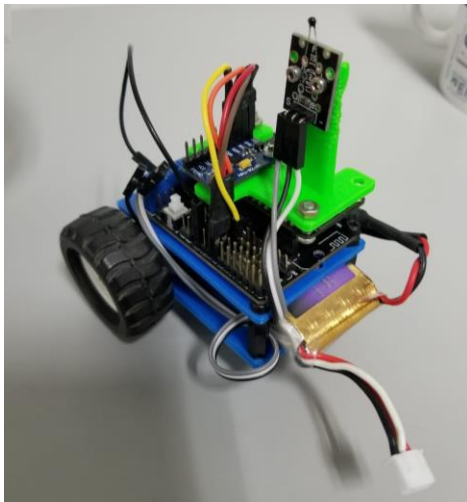


Figura 9. Ensamble físico

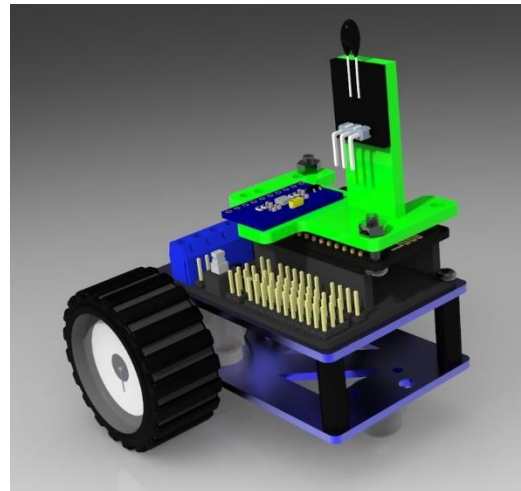


Figura 10. Ensamble simulado

3.2 Adquisición de Datos

Se inicia la lectura de los parámetros a obtener por el magnetómetro, por esta razón se configura la interfaz para el protocolo I²C para la comunicación entre el NodeMCU y el magnetómetro AK8936, este sensor mencionado anteriormente cuenta con una lectura en 3 ejes y es configurado con una sensibilidad de 0.6uT/LSB a un rango de medida de ±4800T, ver Tabla 4. Por medio de las direcciones de memoria se leen las variables obtenidas, se toman 800 datos con un periodo de muestreo de 10ms (periodo de muestreo máximo del arduino), luego se visualiza los datos obtenidos por el monitor serial a 9600 Baudios (Bits

por segundo) del IDE Arduino para la verificación de los parámetros del ángulo con la posición del robot. Se determina que los valores obtenidos no son los ideales, esto porque al realizar un giro de 360 grados del robot en todos sus ejes, los valores obtenidos no son simétricos mostrando una desviación de la esfera ideal de medida, véase figura 11. La calibración de estos datos se verá en el numeral (3.3).

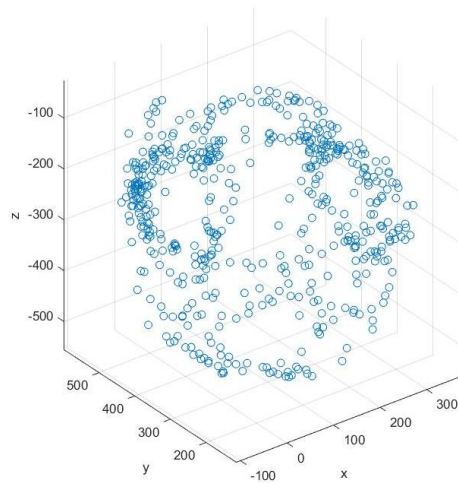


Figura 11. Esfera de medida de datos del Magnetómetro sin calibrar

Para la lectura de temperatura se utiliza el termistor NTC el cual, a mayor temperatura menor es la resistencia que pasa a través del sensor. La relación de la variación de la resistencia con respecto a la temperatura obtenida no es lineal, por esta razón se debe recurrir a algún método matemático para representar correctamente el valor de la temperatura del sensor. Para este caso se recurre a la ecuación de Steinhart-Hart y se procede a medir la resistencia del termistor en diferentes casos de temperatura, para hallar los valores de los coeficientes A_0 , A_1 y A_2 de la ecuación (4):

$$\text{Con } T_1 = 0^\circ\text{C la resistencia } R_1 = 32650 \, \Omega \quad (11)$$

$$\text{Con } T_2 = 50^\circ\text{C la resistencia } R_2 = 3603 \, \Omega \quad (12)$$

$$\text{Con } T_3 = 100^\circ\text{C la resistencia } R_3 = 678.3 \, \Omega \quad (13)$$

Estos valores son remplazados en las ecuaciones (5), (6) y (7) respectivamente y se resuelve el sistema de ecuaciones determinando los coeficientes:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$A_0 = 0.00112530885, A_1 = 0.00023471186, A_2 = 0.00000006566 \quad (14)$$

Y así obtenemos la ecuación Steinhart-Hart que representa la temperatura de nuestro sensor, despejando T de la ecuación (4):

$$T = \frac{1}{(0.00112530885) + (0.00023471186) \ln R_t + (0.00000006566)(\ln R_t)^3} \quad (15)$$

Donde R_t es la resistencia medida del termistor.

3.3 Calibración del Magnetómetro

La calibración del magnetómetro se realiza con las ecuaciones de Euler, los datos obtenidos previamente representan una elipse y el centro de esta elipse se encuentra ubicado (114,365.9) en el plano XY, véase figura 12. Y el centro en el plano YZ se encuentra ubicado en el punto (365.9, -292.4) véase figura 13. Para corregir el efecto Hard-Iron en las medidas se conoce define los parámetros para la matriz de transformación en donde se efectúa la traslación de los puntos del centro de la elipse (114, 365.9, -292.4) al centro de los ejes coordenados (0,0,0), esto es la diferencia en entre estos puntos. Estos valores son remplazados en la ecuación (2) para dos planos coordenados XY y YZ.

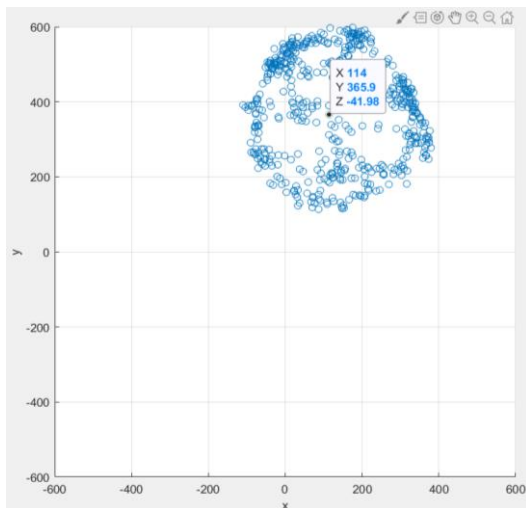


Figura 12. Datos Magnetómetro, plano XY

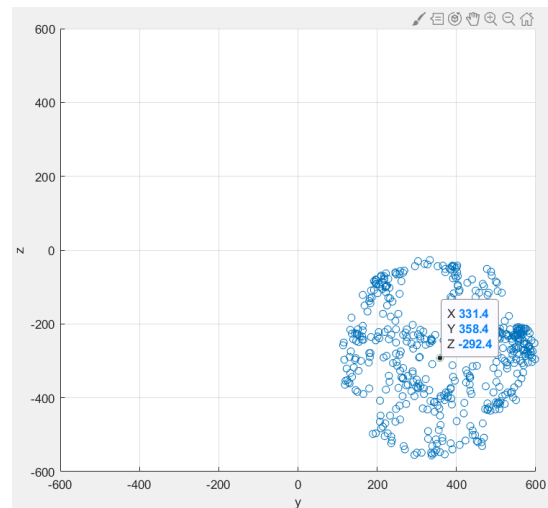


Figura 13. Datos Magnetómetro, plano YZ

En el plano coordenado XY se desea desplazar toda la geometría al origen (0,0) para esto se usa la matriz de traslación donde los parámetros de la ecuación son:

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$T_x = 114, \quad T_y = 365.9 \quad (16)$$

En el plano coordenado YZ los parámetros de la ecuación son:

$$T_y = 365.9, \quad T_z = -292.4 \quad (17)$$

Para corregir el efecto Soft-Iron, se determinan los parámetros de la matriz de transformación de escala realizando una diferencia entre los valores de alto y ancho de la esfera en los dos planos coordenados. Para esta parte se restan los datos máximos y mínimos de los planos XY y YZ en sus ejes, obteniendo el alto y ancho de la esfera para cada plano, luego haciendo una relación entre el alto y el ancho de cada plano se determina el porcentaje faltante para que ambos valores, alto y ancho, tengan las mismas medidas, ya que esto es la característica de una esfera. Los valores obtenidos para la ecuación (1) son:

$$E_x = 1.0187, \quad E_y = 1, \quad E_z = 1.1725 \quad (18)$$

Con estos parámetros las matrices de transformación para la corrección de los efectos Hard-Iron y Soft-Iron del magnetómetro se denotan en las siguientes ecuaciones:

$$R_1(\alpha) = \begin{bmatrix} 1.0187 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1.1725 \end{bmatrix} \quad (19) \quad R_2(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 114 \\ 0 & 1 & 0 & 365.9 \\ 0 & 0 & 1 & -292.4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

3.4 Sistema de Control

El sistema a controlar es la orientación del robot según un ángulo de referencia el cual es entregado por el magnetómetro. El robot por ser de tracción diferencial rota su eje z realizando un cambio de velocidad en la llanta izquierda con la misma magnitud del cambio de velocidad en sentido contrario de la llanta derecha. Esta rotación se realiza para orientar el robot en la dirección que debe seguir luego de determinar el ángulo correspondiente al descenso del gradiente que depende de la temperatura obtenida por el termistor, este método se verá en el numeral (3.5). Los coeficientes de K_p , K_i y K_d son hallados luego de varias iteraciones de estos parámetros según la gráfica de respuesta a un escalón, estas constantes son:

$$K_p = 3.5, K_i = 0.5, K_d = 0.001 \quad (21)$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Y reemplazados en (8) se obtiene la siguiente ecuación:

$$u(t) = 3.5e(t) + 0.5 \int_0^t e(t') dt' + 0.001 \frac{de(t)}{dt} \quad (22)$$

Donde $e(t)$ es la diferencia entre el dato del ángulo medido y el deseado, en cada tiempo de muestreo.

3.5 Descenso del Gradiente

Teniendo el control de la orientación del robot respecto al norte medido por el magnetómetro y conociendo la temperatura obtenida por el termistor, el paso a seguir es determinar la dirección de cada agente del enjambre para dirigirse a una temperatura mínima local en el espacio en el que se encuentre, esto es realizado por el método de descenso del gradiente. Cada agente robótico realiza un desplazamiento en dos direcciones perpendiculares, uno en cero (0) grados y otro en noventa (90) grados, con el fin de determinar el cambio de temperatura entre el punto inicial y ambos puntos luego del desplazamiento, posteriormente en base a la ecuación (9) se realiza la derivada del cambio de la temperatura respecto a ambos puntos con un desplazamiento h en unidades de tiempo (milisegundos), con el fin de determinar el ángulo correspondiente a la temperatura mínima que rodea el robot. Luego de obtener el ángulo en dirección a la temperatura mínima, el robot se desplaza en un tiempo sf_i , el cuál es el ratio de aprendizaje del robot para cada evaluación de la derivada, esta constante representa el tiempo que se desplaza el robot en dirección del valor mínimo de temperatura.

3.6 Transmisión de Datos

Por último, la comunicación entre cada robot perteneciente al enjambre se realiza por una red ad-hoc, el cual quiere decir que no se requiere planificación, controlador central o enrutador. Además, Cualquier sistema de uno o más nodos se autoorganiza en una sola malla completamente funcional donde todos los nodos están conectados. Para esta configuración se utiliza la librería PainlessMesh, la cual genera una red de topología en estrella, evitando cualquier ruta circular. Esta red no es TCP/IP de nodos, sin embargo, cada

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

nodo se identifica por su chipid de 32 bits, el cual se encuentra en el SDK del esp8266 (NodeMCU), esto quiere decir que cada nodo tiene un único número, este número representa el agente móvil, además de ser la identificación para especificar el robot al cual se desea transmitir la información.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Calibración del Magnetómetro

A continuación, se describen las compensaciones para el magnetómetro expresados en *miliGauss* (mG) los cuales fueron obtenidas en el numeral (3.3) en las ecuaciones (19), (20) y representados en la tabla 6. La figura 14 es la esfera ideal de medida luego de ser multiplicados matricialmente los datos obtenidos del magnetómetro por las matrices de transformación, nótese que el centroide de la esfera se encuentra ubicado en el punto (0,0,0) dando como resultado la adecuada calibración.

Magnetómetro			
Parámetros de corrección (mG)	X	Y	Z
Factor de Escala	1.0187	1	1.1725
Bias	114	365.9	-292.4

Tabla 6. Parámetros de compensación del Magnetómetro

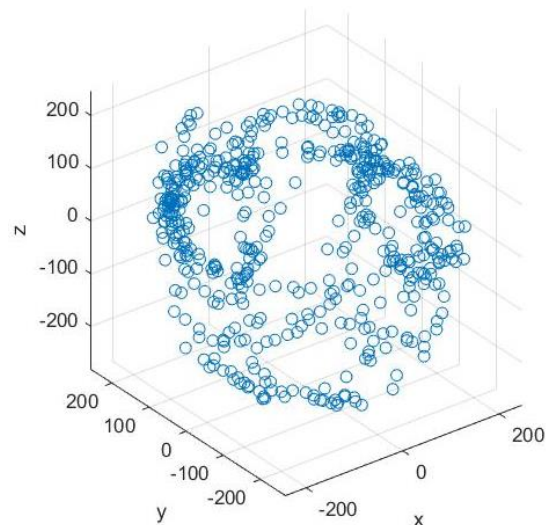


Figura 14. Esfera ideal de medida del Magnetómetro

4.2 Controlador PID

El controlador PID para la orientación deseada del robot diferencial está representado en la ecuación (22) y en la tabla 7. La figura 15 es la respuesta del sistema con los coeficientes escogidos del PID respecto al ángulo deseado o Setpoint el cual en este caso es de 90° . El tiempo de muestro es de 20 milisegundos y el tiempo total de adquisición de datos es de

3500 milisegundos lo suficiente para determinar los componentes de la gráfica de respuesta y la viabilidad de estos coeficientes.

Controlador PID	
K_p	3.5
K_i	0.5
K_d	0.001

Tabla 7. Coeficientes controlador PID.

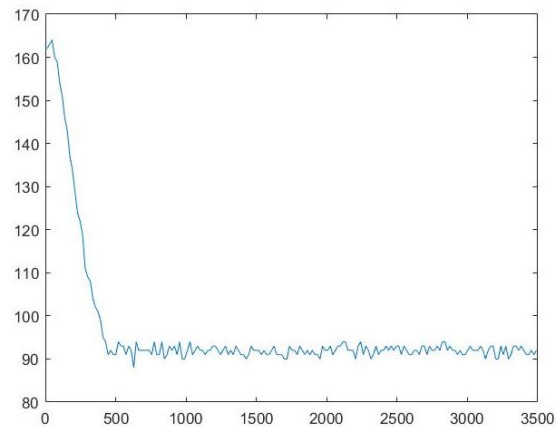


Figura 15. Respuesta de sistema.

4.3 Descenso del Gradiente

El funcionamiento del método de descenso del gradiente es visualizado en las tablas 8 y 9. En el cual el ratio de aprendizaje sf_i y la constante derivativa h son cambiados para determinar la viabilidad del sistema en hallar un mínimo local, la tabla 8 muestra un mejor resultado por cada iteración, acercándose cada vez más a valores decrecientes de temperatura. En cambio, la tabla 9 se puede apreciar que el agente móvil rodea el mínimo local.

Ratio (Sf_i) = 0.35, derivada $h= 0.13$	
Nº Iteración	grados Celcius
1	24.03
2	23.53
3	23.36
4	23.09
5	23.09
6	23.00

Tabla 8. Ratio de aprendizaje de 0.35

Ratio (Sf_i) = 0.65, derivada $h= 0.15$	
Nº Iteración	grados Celcius
1	23.26
2	23.18
3	23.27
4	23.18
5	23.21
6	23.09

Tabla 9. Ratio de aprendizaje de 0.65

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.4 Transmisión de Datos

La comunicación entre tres (3) agentes móviles al iniciar el sistema es visualizada en la figura 16, en el cual se aprecia el nodo verde como el robot móvil encargado de representar la topología de la red mesh prevista. La figura 17 representa la topología de la red luego de apagar el nodo con ID “2142708745” por 2 min y encenderlo nuevamente, esto representa la configuración de la red mencionada en el numeral (3.6) y su autoorganización.

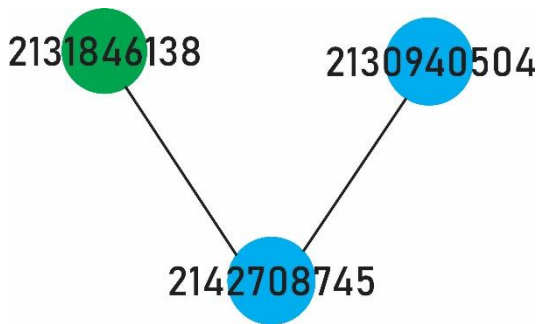


Figura 16. topología inicial Red Mesh

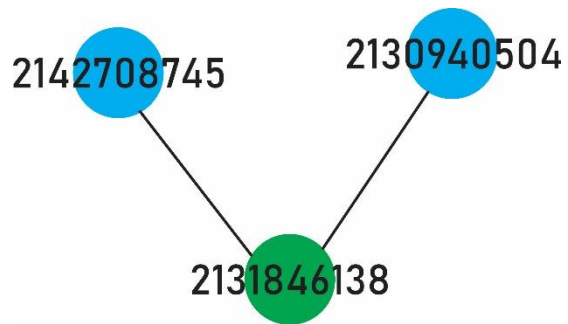


Figura 17. Topología luego de reinicio Red Mesh.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

- Hay que tener en cuenta que la velocidad de transmisión de datos depende de la cantidad de robots conectados a la red móvil. Para este caso con un número de 3 nodos, el tiempo de envío entre dato y dato es de máximo 100 milisegundos.
- Se puede mejorar la implementación del descenso del gradiente con sensores de flujo, esto con el fin de determinar con precisión la posición en el que se encuentra cada robot.
- La sintonización del PID puede ser mejorado realizando el modelo cinemático del sistema realimentado, obteniendo así los coeficientes correspondientes para el debido posicionamiento del robot diferencial respecto al Norte medido.
- La robótica de enjambre está ligada a varios campos de estudio, uno de los trabajos futuros es la implementación en visión artificial donde se puede ubicar cada robot en el espacio y realizar trabajos cooperativos a mayor precisión.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

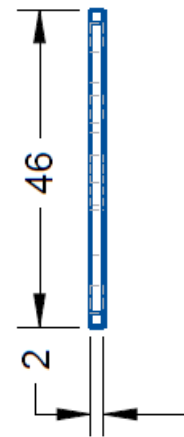
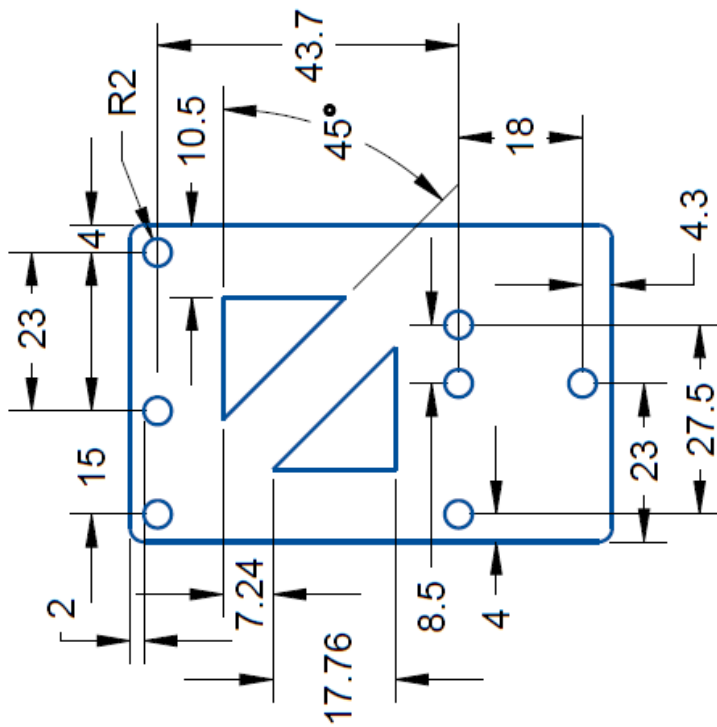
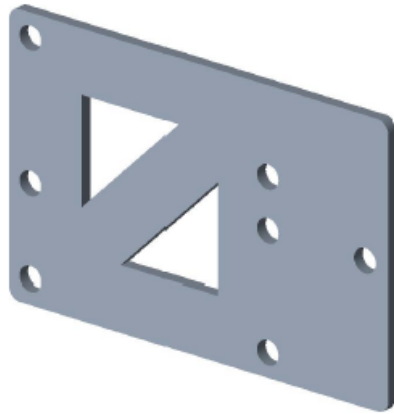
REFERENCIAS

- Åström, K. J. (Karl J., Hägglund, T., & Åström, K. J. (1995). *PID controllers*. International Society for Measurement and Control.
- Bai, Y., Bai, Q., Bai, Y., & Bai, Q. (2019). Subsea Surveying, Positioning, and Foundation. *Subsea Engineering Handbook*, 81–121. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812622-6.00004-X>
- Bonabeau, E., Dorigo, M., & Theraulaz, G. (1999). *From Natural to Artificial Swarm Intelligence*. New York, NY, USA: Oxford University Press, Inc.
- Christensen, J., & Bastien, C. (2016). Introduction to General Optimization Principles and Methods. In *Nonlinear Optimization of Vehicle Safety Structures* (pp. 107–168). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-417297-5.00003-1>
- Correll, N., & Martinoli, A. (2009). Towards Multi-Robot Inspection of Industrial Machinery - From Distributed Coverage Algorithms to Experiments with Miniature Robotic Swarms. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 16.
- Gbenga, D. E., & Ramlan, E. I. (2016). Understanding the Limitations of Particle Swarm Algorithm for Dynamic Optimization Tasks: A Survey Towards the Singularity of PSO for Swarm Robotic Applications. *ACM Comput. Surv.*, 49(1), 8:1--8:25. <https://doi.org/10.1145/2906150>
- Guzzoni, D., Cheyer, A., Julia, L., & Konolige, K. (1997). Many Robots Make Short Work: Report of the SRI International Mobile Robot Team. *AI Magazine*, 18(1), 55. <https://doi.org/10.1609/aimag.v18i1.1274>
- Ibrahim, D., & Ibrahim, D. (2010). Microcontroller Systems. *SD Card Projects Using the PIC Microcontroller*, 1–40. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-719-1.00005-1>
- Li, M., Chen, M., Lu, K., Mao, S., Zhu, H., & Prabhakaran, B. (2008). Robot swarm communication networks: Architectures, protocols, and applications. *3rd International Conference on Communications and Networking in China, ChinaCom 2008*, 162–166. <https://doi.org/10.1109/CHINACOM.2008.4684993>
- Liu, G., Guo, L., Liu, C., & Wu, Q. (2018). Evaluation of different calibration equations for NTC thermistor applied to high-precision temperature measurement. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 120, 21–27. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.02.007>

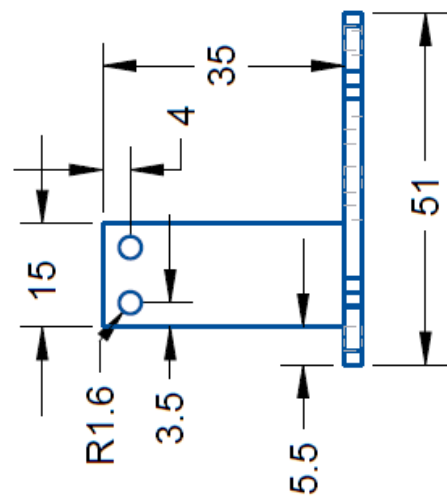
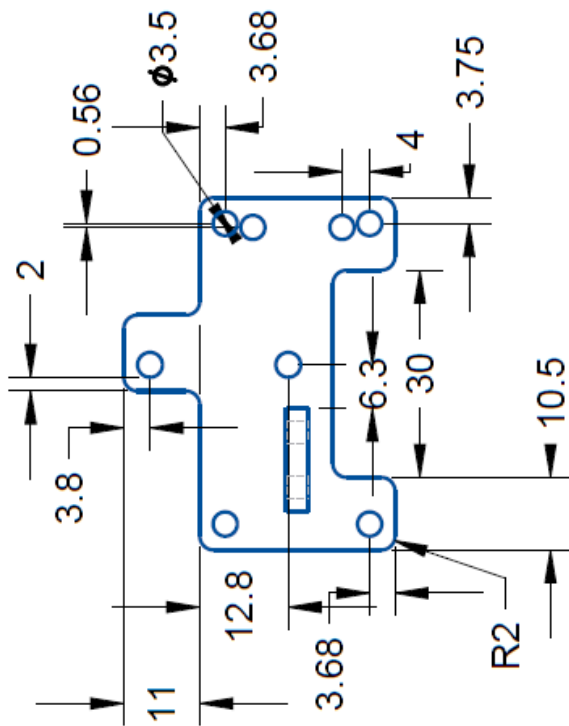
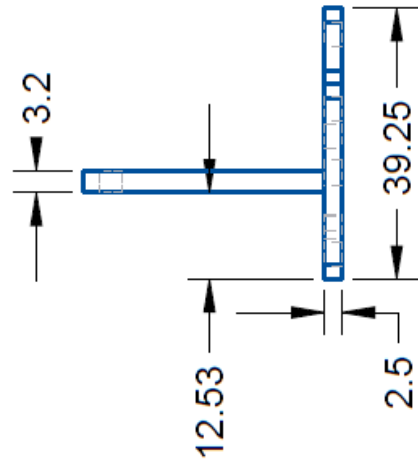
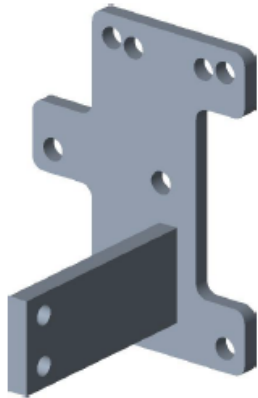
	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Mondada, F., Bonani, M., Raemy, X., Pugh, J., Cianci, C., Klaptocz, A., ... Martinoli, A. (2009). The e-puck, a Robot Designed for Education in Engineering. *Proceedings of the 9th Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions*, 1(1), 59–65. Retrieved from <http://infoscience.epfl.ch/record/135236>
- Nedjah, N., & Junior, L. S. (2019). Review of methodologies and tasks in swarm robotics towards standardization. *Swarm and Evolutionary Computation*, 50, 100565. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2019.100565>
- Rubenstein, M., Cornejo, A., & Nagpal, R. (2014). Programmable self-assembly in a thousand-robot swarm. *Science*, 345(6198), 795–799. <https://doi.org/10.1126/science.1254295>
- Sahin, E. (2005). Swarm Robotics: From Sources of Inspiration to Domains of Application. In E. Sahin & W. M. Spears (Eds.), *Swarm Robotics* (pp. 10–20). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Steinhart & Hart equation for 10k Thermistors. (2009). Retrieved from <https://www.skyeinstruments.com/wp-content/uploads/Steinhart-Hart-Eqn-for-10k-Thermistors.pdf>
- Tan, Y., & Zheng, Z. (2013). Research Advance in Swarm Robotics. *Defence Technology*, 9(1), 18–39. <https://doi.org/10.1016/J.DT.2013.03.001>
- Werfel, J., Petersen, K., & Nagpal, R. (2014). Designing Collective Behavior in a Termite-Inspired Robot Construction Team. *Science*, 343(6172), 754–758. <https://doi.org/10.1126/science.1245842>
- Xataka. (n.d.). *red Mesh*. Retrieved from https://i.blogs.es/aeca4b/sol15.png/1366_2000.jpeg

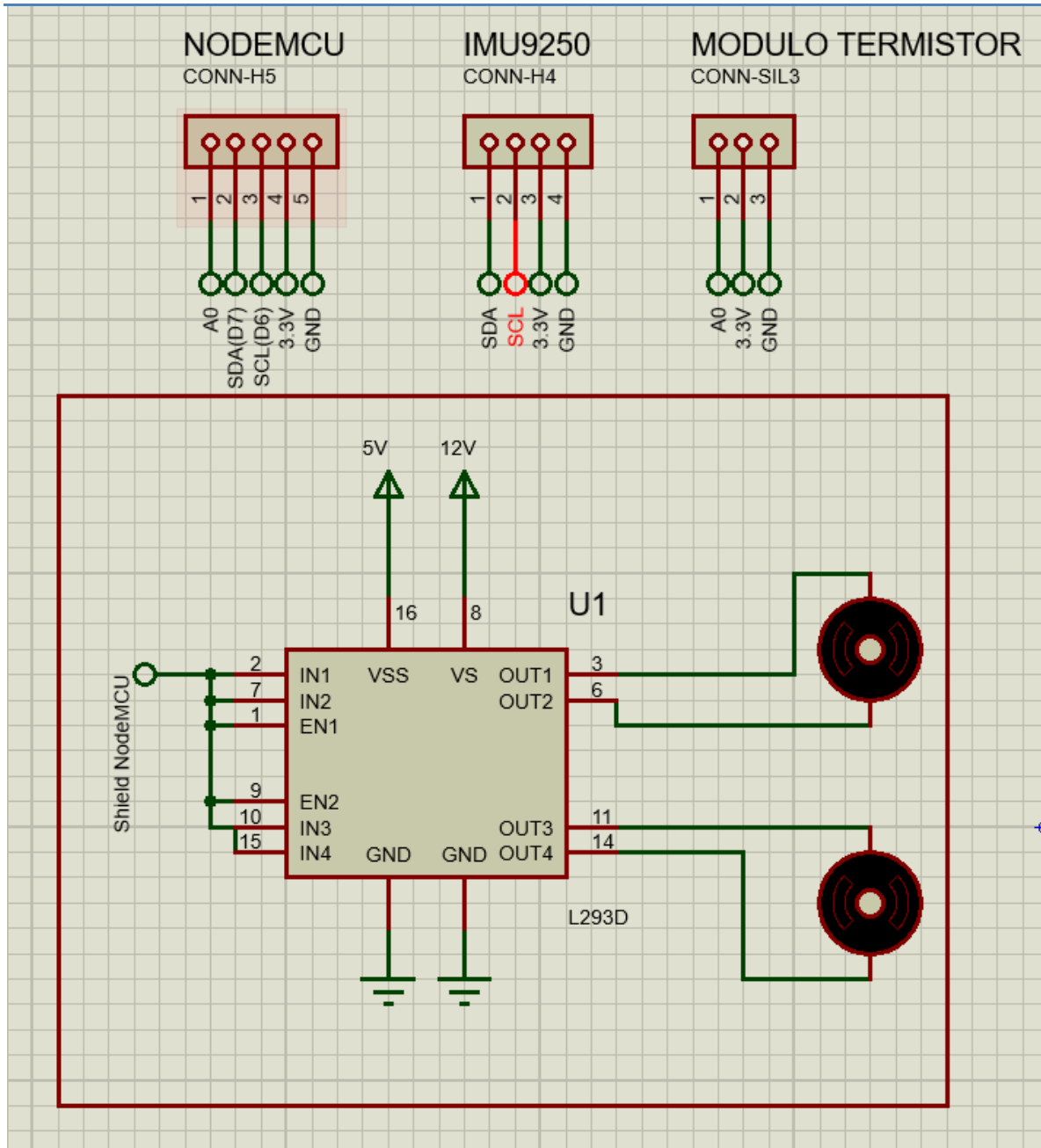
APÉNDICE A



APÉNDICE C



APÉNDICE D



	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

FIRMA ESTUDIANTES _____

FIRMA ASESOR _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO___ ACEPTADO___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES___

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____