

# Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico

## Tesis de Maestría

Control Tolerante a Fallas en la Locomoción de un Robot  
Cuadrúpedo Basado en Generador Central de Patrones

presentada por

**Ing. Luis Ariel Doñate Alcázar**

como requisito para la obtención del grado de  
**Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica**

Director de tesis

**Dr. Luis Gerardo Vela Valdés**

Codirector de tesis

**Dr. Enrique Quintero-Mármol Márquez**

Cuernavaca, Morelos, México. Enero de 2019.



**SEP**  
SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Cuernavaca, Mor., 10 de diciembre de 2018.

OFICIO No. DIE/0184/2018

**Asunto:** Aceptación de documento de tesis

**DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ**  
**SUBDIRECTOR ACADÉMICO**  
**PRESENTE**

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del **C. Luis Ariel Doñate Alcazar**, con número de control **M17CE004** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado **“Control Tolerante a Fallas en la Locomoción de un Robot Cuadrúpedo Basado en Generador Central de Patrones”** y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Luis Gerardo Vela Valdés  
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica  
Cédula profesional 7980044

CODIRECTOR DE TESIS

Dr. Enrique Quintero-Mármol Márquez  
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica  
Cédula profesional 10259407

REVISOR 1

Dr. Manuel Adam Medina  
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica  
Cédula profesional 5992003

REVISOR 2

Dr. Guadalupe Madrigal Espinosa  
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica  
Cédula profesional 2579043

C.p. M.T.I. María Elena Gómez Torres- Jefa del Departamento de Servicios Escolares

Estudiante  
Expediente  
RFEJ/lrr.



**SEP**  
SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Cuernavaca, Morelos, **17/Diciembre/2018**

OFICIO No. SAC/586/2018

Asunto: Autorización de impresión de tesis

**ING. LUIS ARIEL DOÑATE ALCAZAR**  
**CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS**  
**EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA**  
**PRESENTE**

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "Control Tolerante a Fallas en la Locomoción de un Robot Cuadrúpedo Basado en Generador Central de Patrones", ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo

**ATENTAMENTE**

*Excelencia en Educación Tecnológica®*  
*"Conocimiento y tecnología al servicio de México"*

**DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ**  
**SUBDIRECTOR ACADÉMICO**



C.p. M.T.I. María Elena Gómez Torres- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.  
Expediente

GVGR/mcr

**cenidet**<sup>®</sup>  
Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos.  
Tel. (01) 777 3 62 77 70, ext. 4106, e-mail: dir\_cenidet@tecnm.mx  
[www.tecnm.mx](http://www.tecnm.mx) | [www.cenidet.edu.mx](http://www.cenidet.edu.mx)



## DEDICATORIA

A **dios**, por nunca abandonarme ni en mis momentos más oscuros, por iluminar mi camino desde el momento que nací, por darme la fuerza necesaria para continuar día a día y por ser el autor de todo lo bueno y hermoso que sucede en mi vida, ¡muchas gracias!.

A mis queridos padres el **Sr. Rubén Doñate Cárdenas** y la **Sra. Lourdes Alcázar Sarracino**, por ser los pilares de mi vida, por darme mucho amor y por hacer de mí una gran persona, son ustedes mi mayor tesoro y sin ustedes y su apoyo incondicional no sería quien soy ahora.

A mi hermano **Rubén** por ser un ejemplo de superación durante toda mi juventud y por el apoyo que siempre ha otorgado a la familia.

A mi tía **Concepción**, por ayudar a criarme y ser una segunda madre durante toda mi vida.

A toda **mi familia** por siempre brindarme su apoyo incondicional.

A mis profesores el **Dr. Luis Gerardo Vela Valdés** y al **Dr. Enrique Quintero-Mármol Márquez** por guiarme en el camino correcto durante mi estancia en el CENIDET, por apoyarme para la conclusión de mi trabajo de tesis y por todas sus enseñanzas.

A mis revisores el **Dr. Manuel Adam Medina** y al **Dr. Guadalupe Madrigal Espinosa** por sus observaciones y valiosos comentarios que contribuyeron a mejorar la calidad de mi trabajo de una forma muy notable.

A la licenciada **Lorena** por apoyarme a mí y a todos los estudiantes del CENIDET, por guiarnos y orientarnos durante nuestra estancia.

A mis compañeros y amigos **Miguel, Alfonso, Alejandra, Luis, David e Ian** por apoyarme durante estos dos años y por brindarme su valiosa amistad.

A mi novia **Aranza-Zu Rondanini** por darme su apoyo, por estar conmigo siempre y darle alegría a mis días.

## AGRADECIMIENTOS

*Agradezco al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) y a todo su personal por darme la oportunidad de obtener el grado de maestro en ciencias.*

*Agradezco al Tecnológico Nacional de México por brindar la infraestructura para que jóvenes como yo puedan seguir con sus estudios de posgrado.*

*Agradezco al CONACYT por el apoyo económico otorgado durante dos años que me permitió obtener el grado académico.*

# CONTENIDO

Dedicatoria.....	i
Agradecimientos .....	ii
Resumen ejecutivo .....	vi
Lista de figuras.....	vii
Lista de tablas .....	viii
Nomenclatura.....	ix
Capítulo 1.....	1
1.-Introducción .....	1
1.1.-Antecedentes .....	2
1.2.- Planteamiento del problema.....	3
1.3.- Objetivos generales y particulares .....	4
1.4.- Metas.....	4
1.5.- Estado del arte.....	5
1.5.1.- Generación de locomoción.....	5
1.5.2.- Robótica bio-inspirada .....	7
1.5.3.- Tolerancia a fallas en la locomoción de robots móviles .....	9
1.6.- Propuesta de solución .....	10
1.7.- Justificación .....	11
1.8.- Alcance .....	11
1.9.- Hipótesis .....	11
1.8.- Organización del documento .....	12
Capítulo 2.....	13
2.- Marco teórico.....	13
2.1.- Principios biológicos.....	14
2.2.- Generador central de patrones (gcp) .....	14
2.3.- Redes neuronales celulares (rnc) .....	15
2.3.1.- Célula .....	16
2.2.2.- Vecindad .....	16

2.3.3.- Topologías de conexión .....	17
2.3.4.- Modelo matemático clásico de una rnc .....	19
2.4.- Robótica bio-inspirada (cuadrúpedos) .....	20
2.4.1.- Definición y clasificación .....	20
2.4.2.- Locomoción en robots cuadrúpedos.....	21
2.4.3.- Tipos de locomoción .....	21
2.4.4.- Mecanismos para la locomoción.....	22
2.4.5.- Configuración de piernas en robots móviles cuadrúpedos.....	23
2.4.6.- GCP para locomoción en cuadrúpedos .....	24
2.5.- El enfoque de la supervisión y gestión de fallas .....	25
Capítulo 3.....	29
3.- Diseño de la rnc para generar locomoción.....	29
3.1.- RNC-RD para el diseño de patrones de locomoción artificial.....	30
3.1.1.- GCP basado en una rnc .....	31
3.2.- Diseño de la rnc .....	32
3.2.1.- Dispositivos eléctricos .....	36
3.2.2.- Patrones de locomoción .....	36
3.3.- Acoplamiento de la rnc a un cuadrúpedo.....	39
3.4.- Modelo matemático de la rnc.....	40
Capítulo 4.....	43
4.- Control tolerante a fallas en la locomoción de un robot cuadrúpedo. ....	43
4.1.- Supervisión y gestión de fallas .....	44
4.1.1.- Supervisión del proceso y condición de monitoreo .....	46
4.1.2.- Detección de fallas basado en conocimiento .....	46
4.1.3.- Selección de umbrales.....	48
4.2.- Esquema de tolerancia a fallas.....	49
4.2.1.-Eventos de falla .....	50
4.3.- Gestión de fallas, acción de reconfiguración .....	54
Capítulo 5.....	60
5.- Conclusiones.....	60

5.1.- Conclusiones .....	61
5.2.- Aportaciones .....	62
5.3.- Comparaciones.....	63
5.4.-Trabajos futuros .....	64
Referencias.....	65
Anexos .....	69
Anexo A (modelo matemático extendido de la rnc) .....	69
Anexo B (amplificadores operacionales) .....	71
Anexo C (propiedades emergentes) .....	73



## **RESUMEN EJECUTIVO**

El control tolerante a fallas aplicado en la robótica móvil ha sido un tema de interés durante los últimos años. Cabe destacar que muchas investigaciones se han concebido acerca de robots, los cuales poseen la capacidad de caminar y desplazarse a través de una superficie determinada y donde la tolerancia a fallas es un elemento activo de estos trabajos.

Como principal herramienta para garantizar la locomoción en un cuadrúpedo se utilizó el paradigma de las redes neuronales celulares, las cuales explotan la capacidad de los amplificadores operacionales como osciladores, posteriormente bajo consideraciones de diseño y de arquitectura para robots cuadrúpedos se incorporó el enfoque de control tolerante a fallas basado en un esquema de supervisión con el fin de otorgar a la plataforma de un robot cuadrúpedo la capacidad de continuar el proceso de locomoción pese a la presencia de fallas.

En este documento se presenta la base teórica para el desarrollo de los temas, como también los resultados terminales en simulación y todas las consideraciones de diseño.

## LISTA DE FIGURAS

### Capítulo 1

Figura 1- 1: Planteamiento del problema .....	3
Figura 1- 2: Conexión entre células para diferentes tipos de marchas .....	5
Figura 1- 3: Realización de una neurona como generador de auto-ondas (Wu & Tang, 2005).....	6
Figura 1- 4: Brazo robótico de un pulpo (Kim et al, 2013).....	8
Figura 1- 5: Método de solución. ....	10

### Capítulo 2

Figura 2- 1: Neurona biológica. ....	14
Figura 2- 2: Sistema motor.....	15
Figura 2- 3: RNC de 2 dimensiones en matriz de 4x4. Los enlaces muestran la interacción . ....	16
Figura 2- 4: Circuito clásico de una célula.....	17
Figura 2- 5: Diferentes topologías de conexión, A) Matriz, B) Anillo, C) Rectangular .....	18
Figura 2- 6: Locomoción con tres piernas de apoyo. ....	21
Figura 2- 7: Locomoción con dos piernas de apoyo. ....	22
Figura 2- 8: Elemento de soporte en contacto con el suelo.....	23
Figura 2- 9: Mecanismo sub-actuado de una extremidad. ....	23
Figura 2- 10: Disposición de las extremidades de un cuadrúpedo. ....	24
Figura 2- 11: Esquema de un proceso influenciado por fallas. ....	25
Figura 2- 12: Monitoreo y Protección Automática (Isermann. 2013).....	26

### Capítulo 3

Figura 3- 1: Problema de locomoción.....	32
Figura 3- 2: Circuito de una célula basado en amplificadores operacionales. ....	33
Figura 3- 3: Estados del circuito de una célula. ....	34
Figura 3- 4: Salidas del circuito de una célula. ....	34
Figura 3- 5: Diseño de la RNC.....	35
Figura 3- 6: Conexión entre células. ....	35
Figura 3- 7: Patrón de locomoción de un perro.....	36
Figura 3- 8: Patrón de locomoción de un elefante. ....	37
Figura 3- 9: Salidas de la RNC (locomoción del perro).....	38
Figura 3- 10: Salidas de la RNC (patrón de locomoción del elefante).....	38
Figura 3- 11: Acoplamiento de la RNC a un cuadrúpedo caminado de un perro. ....	39
Figura 3- 12: Acoplamiento de la RNC a un cuadrúpedo caminado de un elefante. ....	39
Figura 3- 13: Estados obtenidos del modelo matemático. ....	41
Figura 3- 14: Salidas obtenidas del modelo matemático.....	41

### Capítulo 4

Figura 4-1: Ejemplos del desarrollo de los eventos de falla, descompostura .....	45
Figura 4- 2: Esquema general de la supervisión del proceso. ....	46
Figura 4- 3: Detección de fallas. ....	47
Figura 4- 4: Acondicionamiento de señal para ajuste de un umbral. ....	48
Figura 4- 5: Verificación de limite.....	49
Figura 4- 6: Esquema para la tolerancia a fallas. ....	50
Figura 4- 7: Falla en patrón de locomoción sin acoplamiento. ....	51
Figura 4- 8: Evento de falla considerando acoplamientos. ....	51

Figura 4- 9: Corriente para acoplamientos en extremidades (I2, D1) sin falla. ....	52
Figura 4- 10: Corriente para acoplamientos con extremidades (I2,D1) con falla. ....	53
Figura 4- 11: Falla sin acoplamiento con extremidades con reconfiguración.....	54
Figura 4- 12: Patrón de locomoción con falla. ....	55
Figura 4- 13: Locomoción a partir de reconfiguración falla en C(2,1). ....	55
Figura 4- 14: Locomoción después de la falla en C(2,1). ....	56
Figura 4- 15: RNC con tolerancia a fallas.....	56
Figura 4- 16: Locomoción a partir de reconfiguración falla en C(4,1). ....	57
Figura 4- 17: Locomoción después de la falla en C(4,1). ....	58
Figura 4- 18: Reconfiguración a partir de falla en actuador. ....	58
Figura 4- 19: RNC con tolerancia a fallas.....	59
<b>Anexo B</b>	
Figura B- 1: Amplificador diferencial.....	71
Figura B- 2: Amplificador inversor.....	71
Figura B- 3: Amplificador no inversor.....	72
Figura B- 4: Amplificador sumador no inversor.....	72
<b>Anexo C</b>	
Figura C- 1: Robustez intrínseca para una falla en célula 2. ....	73
Figura C- 2: Robustez intrínseca para una falla en X2 de la célula 2. ....	74

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Ejemplos de protección automática. ....	27
Tabla 2: Parámetros de simulación motor CD para acoplamientos. ....	53
Tabla 3: Comparaciones con otros trabajos de investigación. ....	63

## NOMENCLATURA

**RNA:** Red Neuronal Artificial

**RNC:** Red Neuronal Celular

**GCP:** Generador Central de Patrones

**NC:** Neurona Comando

**NLGM:** Neuronas Locales Generadoras de Movimiento

**RNC-RD:** Red Neuronal Celular Reacción Difusión

**C.G.:** Centro de gravedad

**CTF:** Control Tolerante a Fallas

**GND:** Conexión a tierra

$i - j$ :  $i, j$ -ésima neurona

$k, l \in N_r(i, j)$ :  $k, l$ -ésima neurona con vecindad de radio  $r$  de la  $i, j$ -ésima neurona

$N_r$ : Vecindad de radio  $r$

$N$ : Número de columnas de la red neuronal

$M$ : Número de filas de la red neuronal

$C(i, j)$ : Célula  $i, j$ -ésima

$C$ : Capacitor lineal

$R_x$ : Resistor lineal

$I$ : Fuente de corriente independiente

$A$ : Plantilla de retroalimentación

$B$ : Plantilla de Pre-alimentación

$\dot{x}_{1,2;i,j}$ : Derivada del estado de  $i, j$ -ésima neurona

$x_{1,2;i,j}$ : Estado de la  $i, j$ -ésima neurona

$u_{1,2;i,j}$ : Entrada de la  $i, j$ -ésima neurona

$y_{1,2;ij}$ : Salida de la  $i$ - $j$ -ésima neurona

$U(t)$  : Entrada para sistemas de control

$Y(t)$ : Salida para sistemas de control

$N(t)$ : Ruido

$\Delta\Theta(t)$ : Variación en los parámetros del proceso

$\Delta X(t)$ : Variación de la variable de estado

$\Delta Y(t)$ : Variación de la salida

$D_{1,2}$ : Coeficientes de difusión

$\mu$ : Constante que modifica la salida de la célula

$\varepsilon$ : Constante que modifica la salida de la célula

$s$ : Constante que modifica la salida de la célula

$I_{xy}(i, j; k, l)$ : Fuente de corriente controlada por voltaje

$I_{xu}(i, j; k, l)$ : Fuente de corriente controlada por voltaje

$I_{yx}$ : Fuente de corriente controlada por voltaje lineal por partes

$F_i$ : Falla interna

$F_e$ : Falla externa

$I1$ : Extremidad izquierda delantera

$I2$ : Extremidad izquierda trasera

$D1$ : Extremidad derecha delantera

$D2$ : Extremidad derecha trasera

$u$ : Vector de dos o más elementos

$F(u)$ : Parte reactiva

$\nabla^2 u$ : Operador laplaciano

# CAPÍTULO 1

---

## 1.-INTRODUCCIÓN

En la vida diaria el ser humano depende cada día más de la automatización de diferentes sistemas y procesos, los avances científicos permiten que estos alcancen niveles óptimos de operación garantizando siempre los resultados deseados que se consideraron en el momento del diseño donde siempre se busca llegar al estado ideal de funcionamiento.

Dentro de estos sistemas y procesos se toma como referencia aquellos que pertenecen al mundo de la robótica, donde la tolerancia a fallas es esencial cuando se trata de robots móviles los cuales trabajan en áreas remotas o en ambientes peligrosos donde es imposible para el usuario llevar a cabo reparaciones o donde incluso es difícil alcanzar la ubicación de estos, por lo tanto la presencia de fallas implicaría que el robot es incapaz de cumplir su objetivo. A través de los años se han propuesto diferentes tipos de soluciones para este problema, como lo pueden ser esquemas de marcha tolerante a fallas.

## **1.1.-ANTECEDENTES**

La robótica ha alcanzado su mayor éxito hoy en día, en el mundo de la manufactura industrial con los brazos robóticos o manipuladores, comprendiendo una derrama económica por 2 billones de dólares (Siegwart & Nourbakhsh, 2004). Fijado a una posición específica en la línea de ensamblaje, el brazo robot puede moverse con gran velocidad y exactitud para desarrollar tareas repetitivas como soldar o pintar. A pesar del éxito de este tipo de robots, estos sufren de una gran desventaja asociada a las limitaciones de movilidad inherentes a su diseño, esto provoca que diversas investigaciones se centren en explotar las bondades de la robótica móvil para cumplir diversas tareas, como, poder trasladarse autónomamente por la línea de ensamblaje para flexiblemente aplicar sus talentos donde sea más efectivo.

Uno de los principales obstáculos que tienen los robots móviles es asegurar el proceso de locomoción, el cual consiste solo en tener la habilidad de producir movimientos en sus extremidades (Pérez Machorro, 2009). Diversas investigaciones se han enfocado en buscar formas para garantizar el proceso de locomoción en robots móviles, a partir del uso de diferentes herramientas. Una de las más utilizadas ha sido el paradigma de las redes neuronales celulares, utilizadas con el fin de resolver el problema de control de locomoción basadas en un generador central de patrones (P. Arena & Fortuna, 2000) (Wu & Tan, 2005).

Con el fin de resolver el problema de locomoción en robots móviles existen diferentes enfoques, cada uno con características particulares, como lo es el enfoque clásico y el enfoque biológico. El enfoque clásico es definido por las leyes de la física y las ecuaciones de cinemática inversa, con el fin de obtener los parámetros que intervienen en el sistema, como la posición y la velocidad. Por su parte, el enfoque biológico, se basa en un conjunto de células especializadas capaces de producir salidas rítmicas sin la presencia de algún estímulo que las excite. Estas células son comunes en los sistemas nerviosos de los animales y existen gran variedad, cada una enfocada a una operación específica. Entre ellos está el generador central de patrones (GCP), definido como un conjunto de células capaces de producir salidas rítmicas, las cuales se encargan de producir el movimiento en las extremidades de los animales (Torres, 2015).

## 1.2.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Hoy en día la sociedad depende en gran parte de diversos procesos tecnológicos complejos, de su correcto funcionamiento y de su capacidad de operar ininterrumpidamente. Procesos donde las fallas no tienen lugar y si estas se presentan tiene un impacto generalizado en el desempeño general de todo el sistema (Blanke et al, 2006).

En general una falla en un proceso puede ser vista como una condición que lo aleja de su estado de operación nominal, si ésta falla es concebida dentro del contexto de las conductas locomotoras descritas por un robot móvil a base de extremidades, implicaría que este sería incapaz de realizar algún tipo de desplazamiento quedando totalmente inoperante. Ésta situación representa un problema de mucha relevancia, pues ocasiona que un robot móvil pierda su principal característica, la capacidad de desplazarse a partir del uso de extremidades.

Habiendo mencionado lo anterior y con la información presentada previamente en este documento, se pueden resaltar los siguientes problemas. El primero será reproducir artificialmente los movimientos rítmicos o patrones oscilatorios que las células biológicas son capaces de producir naturalmente, con el fin de estimular los músculos y extremidades de un ser vivo. Posteriormente el problema por solucionar, será, encontrar estructuras que permitan aplicar un enfoque de control tolerante a fallas, es decir, el sistema deberá ser capaz de compensar la presencia de fallas de tal forma que no se pierda la locomoción y donde la figura 1-1 muestra el planteamiento del problema por etapas.

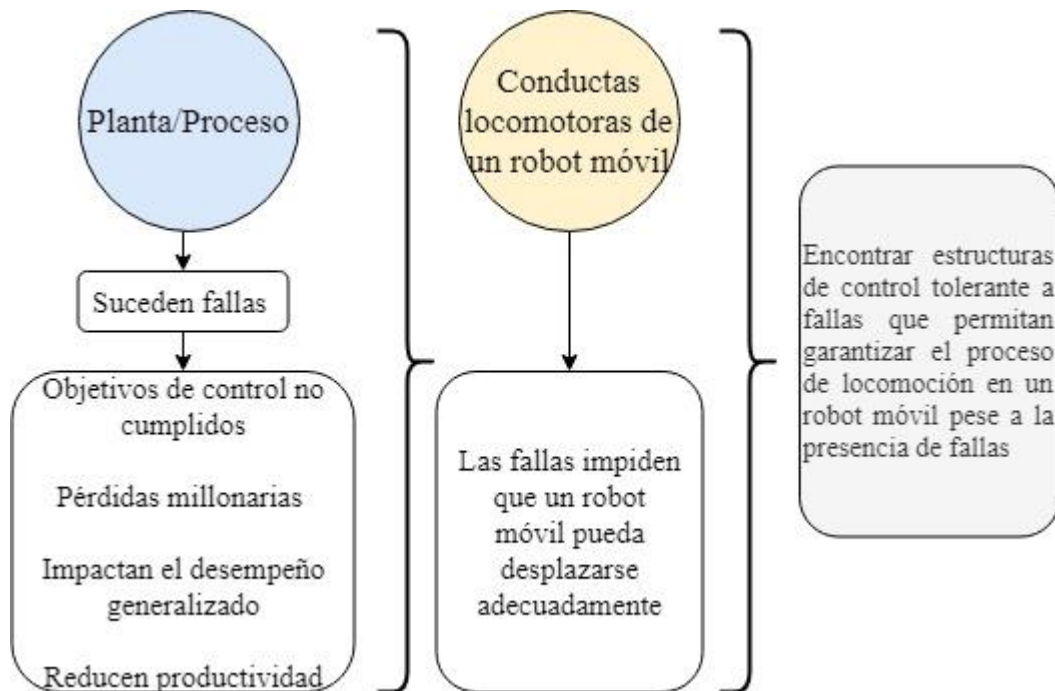


Figura 1- 1: Planteamiento del problema.



### **1.3.- OBJETIVOS GENERALES Y PARTICULARES**

**Objetivo general:** Evaluar el desempeño de un control tolerante a fallas en la locomoción de un robot cuadrúpedo al presentarse una falla en el actuador de una de sus patas.

**Objetivos particulares:**

- 1° Evaluar el desempeño de patrones biológicos en la locomoción del robot cuadrúpedo.
- 2° Diseñar y simular un modelo de un generador central de patrones para producir locomoción.
- 3° Seleccionar y simular una falla.
- 4° Diseñar un esquema de control tolerante a fallas que garantice la locomoción en el robot cuadrúpedo.

### **1.4.- METAS**

- 1° Diseño y simulación de los osciladores para generar patrones biológicos.
- 2° Aplicación de un esquema de control tolerante a fallas en la locomoción del robot cuadrúpedo.

## 1.5.- ESTADO DEL ARTE

### 1.5.1.- GENERACIÓN DE LOCOMOCIÓN

En el año 2000 se planteó el uso de las redes neuronales celulares con el fin de generar y controlar locomoción en robots caminantes de inspiración biológica, donde el flujo de señal analógica producido por las cadenas de circuitos no lineales análogos que interactúan localmente reveló características emergentes de auto planeación, cuyo modelo se describe por las ecuaciones 1.1 y 1.2.

$$\dot{x}_{1,ij} = -x_{1,ij} + (1 + \mu + \epsilon)y_{1,ij} - s_1y_{2,ij} + i_1 \quad (1.1)$$

$$\dot{x}_{2,ij} = -x_{2,ij} + s_2y_{1,ij} + (1 + \mu - \epsilon)y_{2,ij} + i_2 \quad (1.2)$$

En este enfoque el problema de locomoción se resuelve en tiempo real a través de la emulación de circuitos de soluciones de ecuaciones diferenciales no lineales. Esto hace contraste con la locomoción biológica que puede ser vista como un fenómeno espacio temporal complejo. Por lo tanto bajo esta perspectiva las redes neuronales celulares pueden ser consideradas como herramientas poderosas para estudiar fenómenos complejos en tiempo real y con un costo bajo (P. Arena & Fortuna, 2000).

Otro tipo de investigaciones han estado más enfocadas al estudio de los aspectos biológicos de los seres vivos con el fin de conocer más acerca del Generador Central de Patrones (GCP), el cual es una red neuronal ubicada en la médula espinal capaz de producir movimientos rítmicos tales como nadar, saltar y brincar incluso cuando es aislado del cerebro y de entradas sensoriales (MacKay-Lyons, 2002).

Otras formas de generar locomoción abarcan la introducción de las redes neuronales celulares de arquitectura analógica.

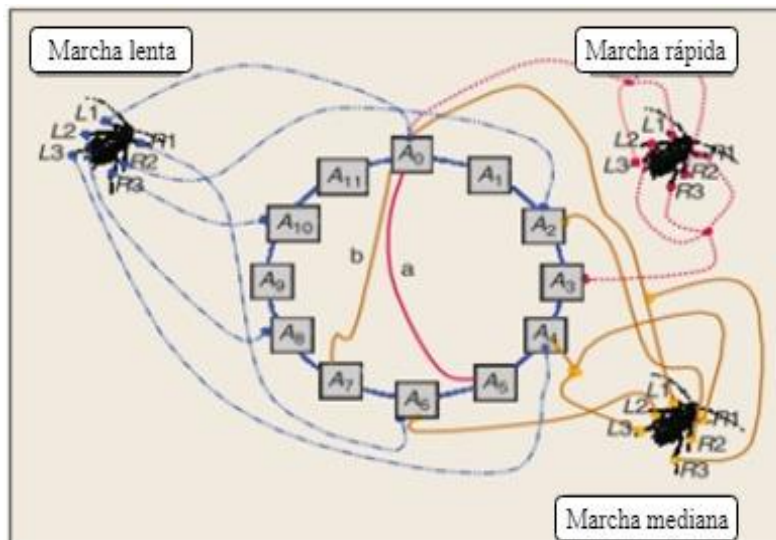


Figura 1- 2: Conexión entre células para diferentes tipos de marchas (P. Arena & Fortuna, 2002).

La figura 1-2 muestra las posibles conexiones realizadas para generar locomoción en un robot hexápodo. Otra parte medular era mostrar que la biología es capaz de proveer ideas atractivas para nuevos esquemas de control y también se discutió acerca del potencial de las ecuaciones de difusión de reacción para generar auto-ondas así como de patrones de control adecuados y su implementación en circuitos reales (P. Arena & Fortuna, 2002).

En 2005 se investigó acerca del uso del GCP, el cual es usado ampliamente para la generación de locomoción en robots, se destacó que la mayoría de sus aplicaciones se da bajo el uso de algoritmos y de procesadores digitales los cuales consumen altas potencias y ocupan espacio considerables, debido a esto los GCP basados en circuitos analógicos han despertado mayor interés, como el caso de la figura 1-3 donde se muestra el circuito analógico de una neurona para la generación de auto-ondas (Wu & Tan, 2005).

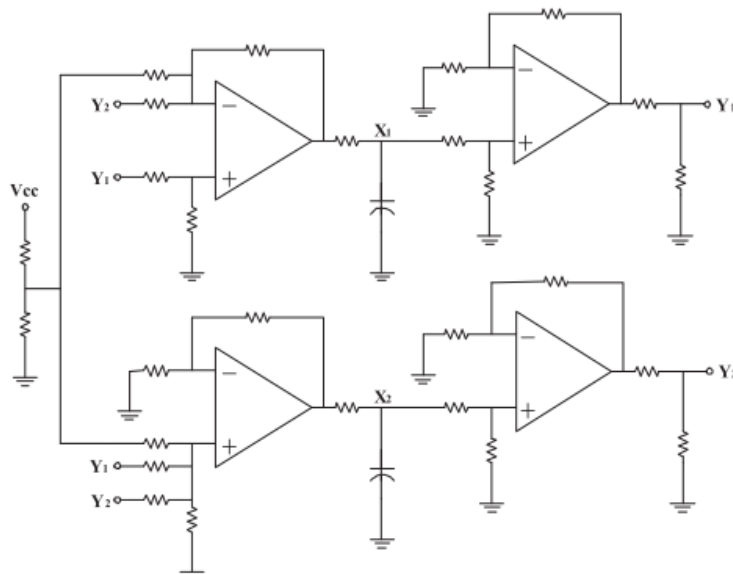


Figura 1- 3: Realización de una neurona como generador de auto-ondas (Wu & Tang, 2005).

En 2008 se diseñó un generador central de patrones incorporando retroalimentación sensorial, se hizo mediante el diseño de un oscilador para el control de locomoción en el cual se controlaba independientemente la duración de las fases de balanceo y estancia, donde el modelo del oscilador queda de la siguiente forma:

$$\dot{x} = \alpha(\mu - r^2)x - \omega y \quad (1.3)$$

$$\dot{y} = \beta(\mu - r^2)y + \omega x \quad (1.4)$$

$$\omega = \frac{\omega_{estancia}}{e^{-by} + 1} + \frac{\omega_{balanceo}}{e^{by} + 1} \quad (1.5)$$

Donde  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ,  $\omega$  es la frecuencia de oscilación dada por  $rad * seg^{-1}$ ,  $\mu$  es la amplitud de las oscilaciones,  $\omega_{estancia}$  y  $\omega_{balanceo}$  son las frecuencias de la fase de estancia y balanceo, junto con  $\alpha$  y  $\beta$  que son constantes positivas que controlan la velocidad de convergencia del ciclo límite.

En este caso el CPG es capaz de modular en línea la generación de trayectoria para el control de locomoción y finalmente se aplicó el método con tres robots diferentes y donde la locomoción es más rápida y estable desde un punto de vista mecánico con la estructura de retroalimentación (Righetti & Ijspeert, 2008).

Para 2014 se propuso un novedoso diseño de un GCP para controlar robots cuadrúpedos generando cualquier forma de onda deseada, donde las salidas del CPG tenían estabilidad garantizada implementando un ciclo de estabilización interno (Tran et al., 2014).

Otras investigaciones realizadas en años más recientes acerca del GCP dentro de la robótica ofrecen nuevos patrones de desplazamiento sofisticado, para que un robot pueda describir diferentes comportamientos al andar, y al mismo tiempo se desarrollaron múltiples generadores para sobreponerse a los problemas ocasionados por las fallas en una o más patas (Ren et al., 2015).

### **1.5.2.- ROBÓTICA BIO-INSPIRADA**

Los investigadores en robótica cada vez concuerdan más que las ideas provenientes de la biología y la auto-organización puede beneficiar fuertemente el diseño de robots autónomos. Trabajos recientes acerca de la robótica bio-inspirada mostraron que la auto-organización y la materialización (robot con forma de seres vivos) son conceptos poderosos en el diseño de sistemas autónomos adaptables, esto tiene su fundamento en que los organismos biológicos han evolucionado en ambientes caracterizados por cambios rápidos, alta incertidumbre y una cantidad limitada de información disponible. Características ausentes en el ambiente de desarrollo de un robot, por lo tanto es de interés dotarlos de estas características (Pfeifer et al, 2007).

En 2009 se desarrolló una nueva metodología para la creación de actuadores ideales para el desarrollo de robots con estructuras suaves, donde las estructuras suaves plantean imitar la flexibilidad que poseen los organismos, en los cuales el estiramiento y la contracción son características fundamentales (Cianchetti et al, 2009).

Por otra parte algunas investigaciones se enfocan en explotar las estructuras suaves de los animales con el fin de moverse más eficientemente en ambientes naturales complejos, esta es la razón que ha inspirado a los ingenieros a incorporar estructuras suaves en diseños

de robots. Donde la figura 1-4 muestra un brazo robótico biológicamente inspirado en las extremidades flexibles de un pulpo (Kim et al, 2013).



**Figura 1- 4: Brazo robótico de un pulpo (Kim et al, 2013).**

En 2017 se desarrolló un controlador de tres niveles (Control de alto nivel-cabeza, SNC-sistema nervioso central-espinal y bajo-nivel efector final- extremidad) para realizar la marcha de un robot cuadrúpedo inspirado por el método de control biológico de los mamíferos, se introdujo el modelo de un CPG para imitar el sistema nervioso central de un leopardo, aplicados en un prototipo biónico basado en el modelo virtual de este mamífero (Wang et al, 2017).

En el mismo año se hicieron avances acerca de la generación aleatoria de cualquier tipo de marcha a través de un algoritmo para un patrón de giro de un robot hexápodo tomando a un escarabajo como inspiración.

Este algoritmo también proporciona una base teórica para evitar obstáculos, caminado todo terreno, navegación autónoma y transición de la marcha de robots en campo y donde los resultados en simulación indicaron que el algoritmo es eficiente para realizar el giro del robot, además que le otorga estabilidad al momento de girar (Zhu et al, 2017).

### **1.5.3.- TOLERANCIA A FALLAS EN LA LOCOMOCIÓN DE ROBOTS MÓVILES**

En Japón durante 2012 se publicó un artículo acerca del caminado en tres patas de un robot cuadrúpedo asumiendo que no se cuenta con una extremidad, un nuevo patrón de locomoción en trípede y la marcha patada y balanceo (kick-and-swing) fueron propuestas junto con un método activo de absorción de impactos (Lee & Hirose, 2012).

En 2015 en China investigando sobre la marcha que describen los animales se propuso un esquema de tolerancia a fallas para un robot móvil, en este caso un robot que describía el movimiento de un elefante bebé, cuya característica principal era la disposición de sus patas las cuales asemejaban a un elefante y cuya falla se describía como una articulación bloqueada, cabe destacar que se construyó el robot y se modelo matemáticamente de acuerdo a los grados de libertad que poseían cada una de sus patas (Chen et al, 2015).

Más recientemente, se realizó investigación sobre un robot hexápodo donde se considera una falla en base a una pata quebrada, se analizó la movilidad restante del cuerpo y se propuso un método de planificación de movimiento a través de una matriz jacobiana tolerante a fallas. Utilizando los actuadores normales restantes en las patas quebradas, el robot podría caminar continuamente al igual que un animal herido o como un humano tambaleándose. El robot también mantuvo su mejor movilidad restante y mejor capacidad de movimiento hasta cierto punto (Du & Gao, 2016).

En 2017 se presentó el proceso de desarrollo de un robot cuadrúpedo como una guía para el desarrollo de robots cuadrúpedos, se mostró experimentalmente una estrategia para fallas por uniones bloqueadas a través de reconfiguración usando redundancia material, misma estrategia que fue probada en simulación. En general el desarrollo del robot se deja como plataforma para estudios diversos como estrategias de control, control de posturas, control tolerante a fallas y estrategias de reconfiguración para otros tipos de fallas en uniones o múltiples fallas en uniones (Gor et al., 2018).

En 2018 se propuso una estrategia para hacer frente a una falla por articulación libre en balanceo de un robot cuadrúpedo, la estrategia toma inspiración a partir de la forma en que un infante gatea, este tipo de estrategia se adapta sobre la marcha y permite la locomoción del robot incluso después de detectar la falla. La simulación del modelo del robot se realizó en situaciones con falla y sin falla a partir del método bond graph (Gor et al, 2018).

En lo particular a lo que comprende el estado del arte, se demuestra cómo es que existe un desarrollo científico y que se ha mantenido el interés por varios años en temas que abarcan la bio-inspiración para la generación de locomoción, el desarrollo de robots móviles y estrategias de control tolerante a fallas desarrolladas con el objetivo de garantizar locomoción en robots móviles.

## 1.6.- PROPUESTA DE SOLUCIÓN

De acuerdo a lo que ya se ha mencionado previamente, el camino escogido para el método de solución de este trabajo de tesis se engloba como sigue:

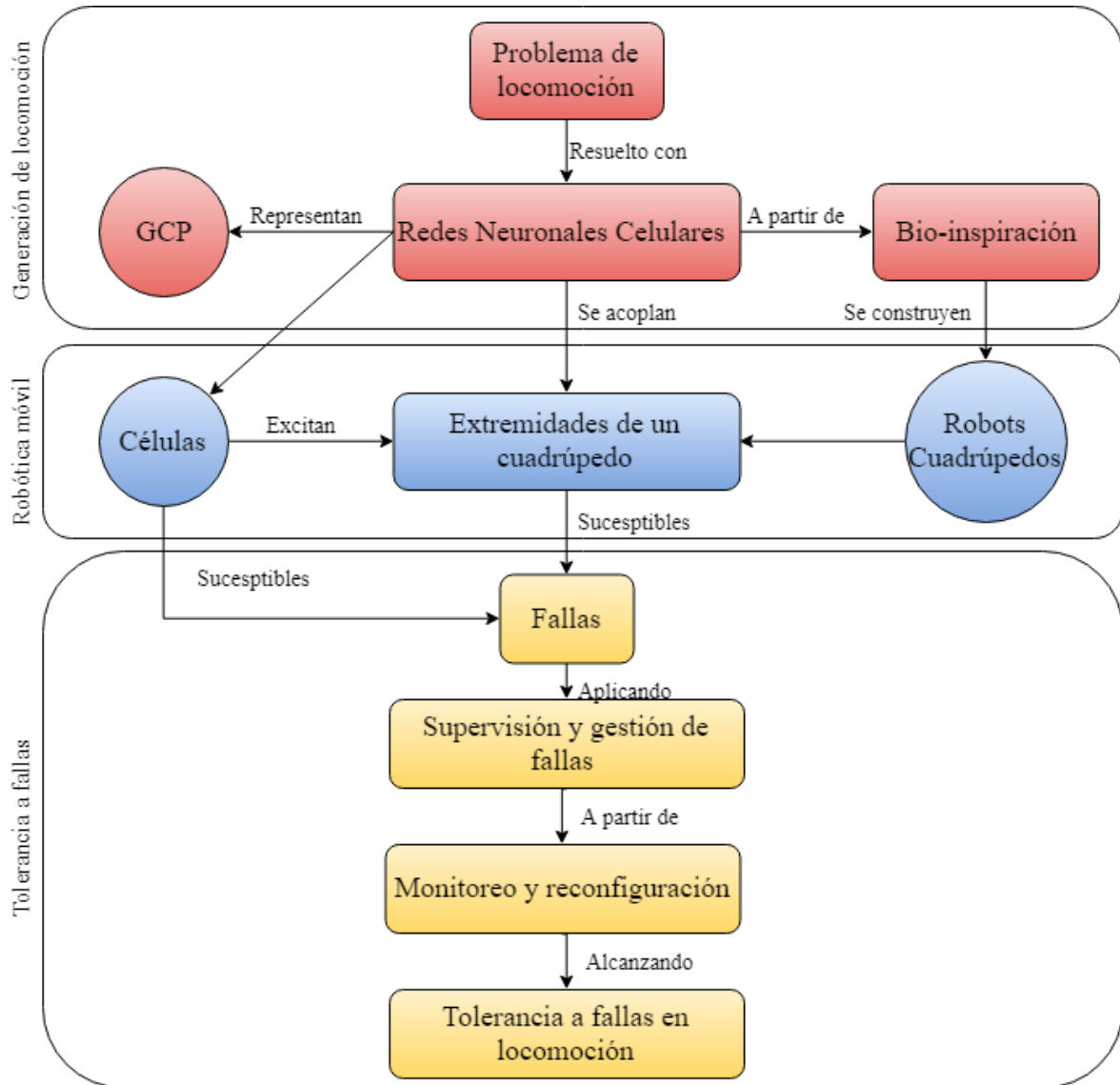


Figura 1- 5: Método de solución.

Donde la figura 1-5 muestra cómo interactúan distintas áreas de la ciencia con el fin de darle solución al problema presentado.

## **1.7.- JUSTIFICACIÓN**

Hoy en día el ser humano encuentra inspiración en la naturaleza frecuentemente, pues ésta nos ofrece soluciones diversas a problemas complejos.

En el mundo de la robótica es común encontrar soluciones basadas en conceptos biológicos. El problema de locomoción en un robot móvil basado en extremidades, es solucionado fácilmente a partir de reproducir artificialmente diferentes comportamientos característicos de la vida animal. Donde la solución óptima será aquella que pueda consumir menor cantidad de recursos y otorgue ventajas técnicas y teóricas.

Con el fin de obtener un aporte científico más amplio para la robótica móvil, se agrega el enfoque de control tolerante a fallas, con el fin de garantizar la movilidad de un robot pese a la presencia de fallas.

## **1.8.- ALCANCE**

1° Se diseñará y se simulará un generador central de patrones para poder producir los patrones oscilatorios necesarios que se basen en principios biológicos con el fin de generar locomoción.

2° Basado en las señales otorgadas por el generador central de patrones se representará una falla en un actuador en nivel simulación.

3° A través del monitoreo de la falla se diseñará y se aplicará un esquema de control tolerante a fallas en nivel simulación.

4° Se compararán los resultados con lo que ya se encuentra reportado en la literatura.

## **1.9.- HIPÓTESIS**

Es posible garantizar la locomoción en un robot cuadrúpedo, la cual se basa en principios biológicos a pesar de la presencia de fallas en el actuador de alguna de sus patas a partir del análisis de las señales presentes, con un esquema de control tolerante a fallas que sea capaz de llevar al sistema a una condición de desempeño degradado.



## **1.8.- ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO**

El siguiente trabajo de tesis se compone de 5 capítulos englobando en el primer capítulo todos los aspectos correspondientes a la concepción y justificación del trabajo, inmediatamente introduciendo en el capítulo 2 los conceptos más importantes englobados en el marco teórico que invocan los conocimientos fundamentales para el entendimiento de los capítulos posteriores. Después se presenta el diseño de la red neuronal celular, su modelo y más simulaciones correspondientes que muestran el comportamiento de la red en el capítulo 3.

Posteriormente se presenta el capítulo 4 que incluye todos los aspectos de control tolerante a fallas involucrados en este trabajo de tesis junto con los resultados de simulación pertinentes, después en el capítulo 5 se presentan las conclusiones, las aportaciones y se mencionan los trabajos futuros, inmediatamente las referencias utilizadas y los anexos.

# CAPÍTULO 2

---

## 2.- MARCO TEÓRICO

El sistema nervioso central es capaz de coordinar en los seres vivos que extremidad tiene que moverse, que tan lejos y por cuanto tiempo. Tales movimientos solo pueden ser hechos propiamente si un conjunto de requerimientos biomecánicos se combinan usando un patrón de señales eléctricas enviadas a través de los nervios para activar el conjunto de músculos apropiados. Además los movimientos locomotores son continuamente adaptados cuando hay presencia de obstáculos, asegurando así una progresión suave del curso de movimiento.

Fuera de la consideración de la gran cantidad de entradas sensoriales provenientes del ambiente, el sistema es capaz de seleccionar información específica de forma óptima e incorporar esta información dentro de los movimientos ejecutados. Esta es simplificada por la remarcable organización de las redes neuronales, especializadas en repetir acciones particulares una y otra vez. Para muchas especies los patrones cíclicos necesarios para caminar, respirar, comer u otras actividades rítmicas son generadas por tales redes neuronales, para locomoción, el término generador central de patrones (GCP) se refiere a un conjunto de neuronas responsables de la creación de patrones motrices (Duysens & de Crommert, 1998).

## 2.1.- PRINCIPIOS BIOLÓGICOS

El cerebro en los seres vivos es uno de los órganos más complejos, realiza tareas tan complicadas como controlar los órganos internos y coordinar el movimiento de extremidades.

El elemento principal del cerebro es la neurona, la cual es una unidad anatómica, funcional e independiente, integrada por un cuerpo celular del que salen ramificaciones llamadas dendritas capaces de recibir información procedente de otras neuronas, poseen un axón que conduce información a base de señales eléctricas. Las neuronas se conectan entre sí por contactos separados por unos estrechos espacios denominados sinapsis. La transmisión de las señales se realiza a través de sustancias químicas llamadas neurotransmisores.

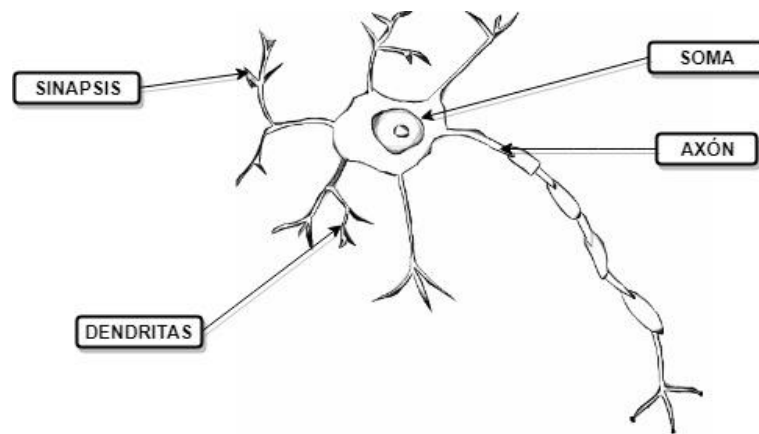


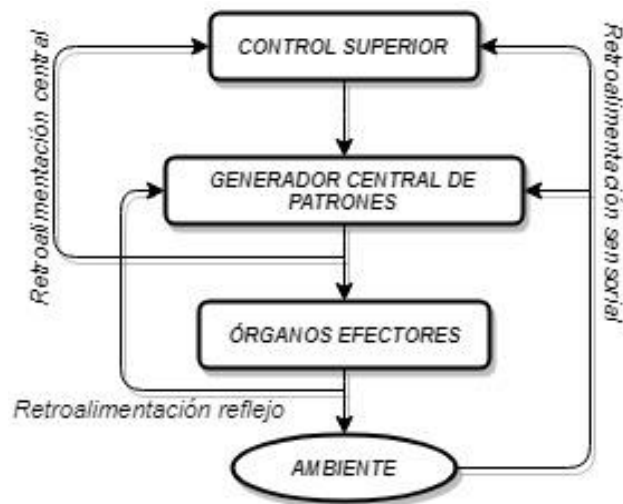
Figura 2- 1: Neurona biológica.

La figura 2-1 muestra la configuración básica de una neurona biológica, conformada por dendritas, sinapsis, soma y axón.

## 2.2.- GENERADOR CENTRAL DE PATRONES (GCP)

El componente clave del sistema motor es el generador central de patrones (GCP), un circuito neural que puede producir salidas en forma de patrones rítmicos, sin la necesidad de una retroalimentación sensorial o de un control inferior.

El generador central de patrones incluye todos los mecanismos neurales esenciales para generar neuronas motoras rítmicas coordinadas, y por lo tanto, salidas musculares. Señales provenientes del generador central de patrones controlan directamente los órganos efectores (extremidades) de muchos seres vivos (Cohen & Wallén, 1980).



## **SISTEMA MOTOR**

**Figura 2- 2: Sistema motor.**

La figura 2-2 muestra los componentes que forman al sistema motor, compuesto por tres niveles de retroalimentación, central, sensorial y reflejo. Éste tiene la función de coordinar el movimiento en los músculos de las extremidades, esto es, habrá señales que salgan de él las cuales excitan a los músculos y producirán algún tipo de movimiento. A fin de cuentas el GCP se encuentra en todos los animales, desde algunos organismos microscópicos, como en seres vivos de biología más compleja, en vertebrados como invertebrados, siempre con el fin de generar movimientos rítmicos, en general es una parte fundamental que compone a una gran diversidad de organismos (Mattia et al, 2004).

### **2.3.- REDES NEURONALES CELULARES (RNC)**

Las redes neuronales celulares son sistemas de procesamiento de información, que, como una red neuronal son circuitos analógicos no lineales de gran escala que procesan señales en tiempo real. Como un autómata celular, las redes neuronales celulares se constituyen de un agregado masivo de circuitos idénticos regularmente espaciados llamados “células”, que se comunican unas con otras únicamente a través de sus vecinos más cercanos.

Las redes neuronales celulares comparten cualidades de dos mundos, sus características en tiempo continuo permiten el procesamiento de señales en tiempo real y sus características de interconexión local las hace ideal para implementación en gran escala (L.O. Chua & Yang, 1988).

### 2.3.1.- CÉLULA

La unidad de circuito básica de una red neuronal celular llamada “célula”. Esta contiene elementos de circuitos lineales y no lineales, los cuales típicamente son capacitores lineales, resistores lineales, fuentes controladas lineales, no lineales y fuentes independientes. En una red neuronal celular, cada célula que procesa los valores continuos de una señal está continuamente interactuando con las demás dentro de una vecindad finita. El patrón de interacción llamado “plantilla de clonación”, que es equivalente a los pesos sinápticos en una red neuronal celular.

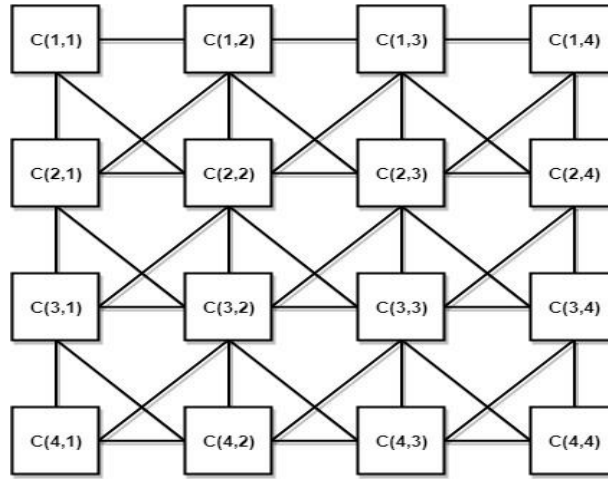


Figura 2- 3: RNC de 2 dimensiones en matriz de 4x4. Los enlaces muestran la interacción entre células.

La figura 2-3 muestra cómo se relacionan entre sí diferentes células dentro una red neuronal celular, esta configuración se conoce como matriz.

### 2.2.2.- VECINDAD

Cada célula interactúa con las demás dentro de una vecindad finita, considerando un arreglo de dimensión  $M \times N$ , con  $M$  filas y  $N$  columnas se puede llamar a una célula de la  $i$ -ésima fila y de la  $j$ -ésima columna y denotarse como  $C(i, j)$ . El vecindario de  $C(i, j)$  se conoce como el  $r$ -vecindario de una célula  $C(i, j)$  y que se puede definir por la ecuación 2.1.

$$N_r(i, j) = \{C(k, l) | \max\{|k - i|, |l - j|\} \leq r, 1 \leq k \leq M; 1 \leq l \leq N\} \quad (2.1)$$

Donde  $r$  es un número entero positivo,  $k, l$  son las coordenadas de otra célula, y la magnitud de la diferencia entre  $i, k$  y  $j, l$  no excede el valor de  $r$  y el ejemplo típico del circuito de una célula se muestra por la figura 2-4.

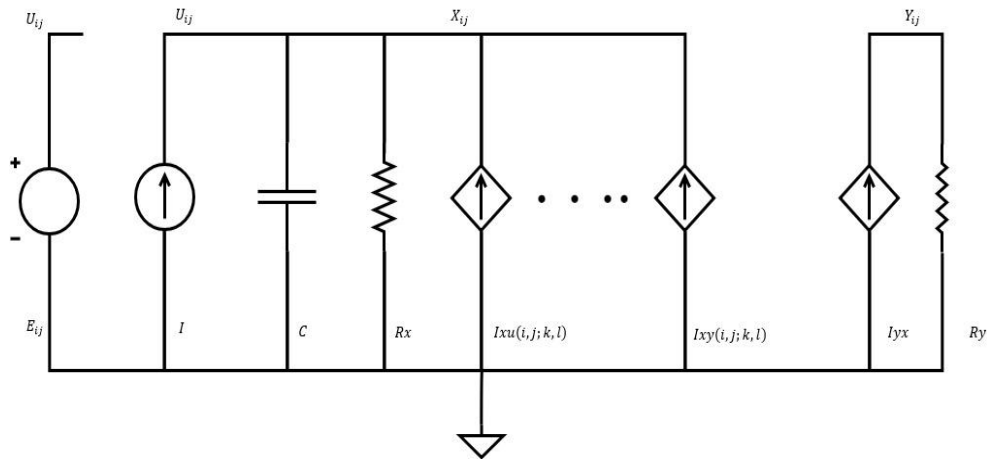


Figura 2- 4: Circuito clásico de una célula presentado en 1988.

Los sub-índices  $u, x, y$  denotan la entrada, el estado y la salida respectivamente. El nodo de voltaje  $X_{ij}$  es conocido como el estado de la célula, y su condición inicial se asume para tener una magnitud menor o igual que 1.

El nodo de voltaje  $U_{ij}$  llamado como la entrada de  $C(i, j)$ , se asume constante con una magnitud menor o igual que 1. El nodo de voltaje  $Y_{ij}$  es la salida.

Cada célula contiene una fuente independiente de voltaje  $E_{ij}$ , una fuente de corriente independiente  $I$ , un capacitor lineal  $C$ , dos resistores lineales  $R_x$  y  $R_y$ , al menos dos fuentes de corriente controladas por voltaje acopladas a las células vecinas a través de las entradas controladas de voltaje  $I_{xu_{ukl}}$  y de la retroalimentación de la salida de voltaje  $I_{xy_{kl}}$  de cada célula vecina.

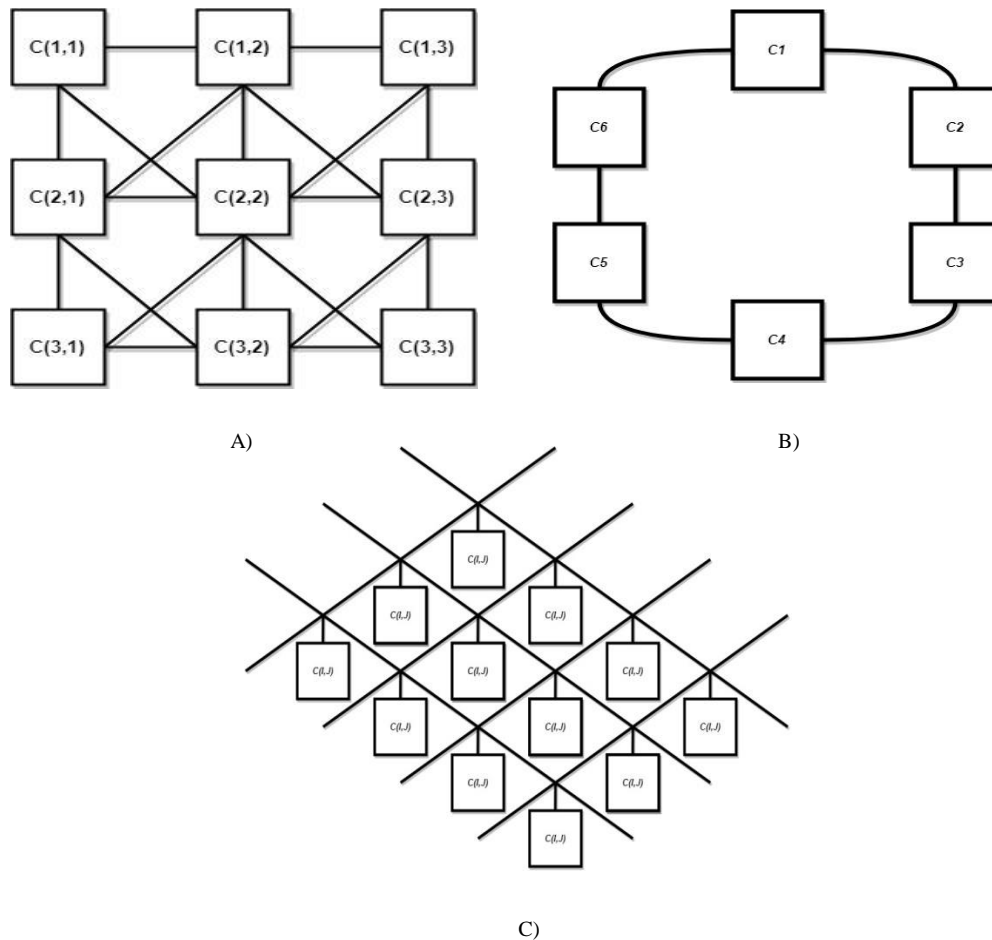
Todas las fuentes controladas lineales y lineales-por partes puede ser implementadas con el uso de amplificadores operacionales (L.O. Chua & Yang, 1988).

Este circuito evoluciono con el tiempo hasta poder ser implementado a partir de amplificadores operacionales como se muestra en la figura 3-2 capítulo 3.

### 2.3.3.- TOPOLOGÍAS DE CONEXIÓN

Una red neuronal celular es un circuito dinámico no lineal de alta dimensión que tiene principalmente una topología de circuito localmente recurrente, llamada, una interconexión local de unidades básicas de circuito conocidas como células o neuronas artificiales. La red resultante o arreglo puede tener diferentes arquitecturas, incluyendo, rectangular, hexagonal, toroidal, esférica, anillo, etc.

En la mayoría de aplicaciones, todas las células y sus interconexiones se asumen idénticas, por lo tanto el concepto original dado por Chua y colaboradores en 1988 incluyen la posibilidad de variar las interconexiones y los parámetros de circuito (L.O. Chua et al, 1995).



**Figura 2- 5: Diferentes topologías de conexión, A) Matriz, B) Anillo, C) Rectangular.**

Donde la figura 2-5 muestra algunas de las diversas conexiones presentes en la literatura, cada una con características diferentes dependiendo el objetivo que se desea cumplir, para la formación de patrones biológicos de locomoción una configuración en anillo será la ideal.

Cabe mencionar que las redes neuronales celulares sirven como procesadoras de información y que pueden ser utilizadas para fines de procesamiento de imágenes, donde redes de dos capas funciona como filtro usando procesamiento paralelo del espacio de la imagen de entrada y entregando su salida en tiempo continuo (L. O. Chua & Yang, 1988).

### 2.3.4.- MODELO MATEMÁTICO CLÁSICO DE UNA RNC

Con la aplicación de las leyes de voltaje y corriente de Kirchhoff al circuito básico de una célula se obtienen las siguientes ecuaciones, las cuales representan al modelo introducido por Chua y Yang (L. O. Chua & Yang, 1988).

**Ecuación de estado:**

$$C \frac{dv_{xij}(t)}{dt} = -\frac{1}{R_x} v_{xij}(t) + \sum_{c(k,l) \in N_r(i,j)} A(i,j;K,l) v_{ykl}(t) + \sum_{c(k,l) \in N_r(i,j)} B(i,j;k,l) v_{ukl} + I \quad (2.2)$$

$$1 \leq i \leq M; 1 \leq j \leq N$$

**Ecuación de salida:**

$$v_{yij}(t) = \frac{1}{2} (|v_{xij}(t) + 1| - |v_{xij}(t) - 1|) \quad (2.3)$$

$$1 \leq i \leq M; 1 \leq j \leq N$$

**Ecuación de entrada:**

$$v_{uij} = E_{ij} \quad (2.4)$$

$$1 \leq i \leq M; 1 \leq j \leq N$$

**Restricciones:**

$$|v_{xij}(0)| \leq 1 \quad (2.5)$$

$$|v_{uij}| \leq 1$$

**Remarcaciones:**

- A) Todas las células internas de una red neuronal celular tienen los mismos circuitos estructurales y valores de elementos. La célula interna es la que tiene  $(2r + 1)^2$  células vecinas, con  $r$  definido por la ecuación 1. Las células restantes son llamadas “células límite”. Una red neuronal celular es completamente caracterizada por un conjunto de todas las ecuaciones diferenciales no lineales asociadas con las células en el circuito, comprendidas por 2, 3,4 y 5.
- B) Cada célula de la red neuronal tendrá al menos tres nodos (En algunas ocasiones se escogerá  $E_{ij} = 0$  si  $B(i,j;k,l) = 0$  para todas las células en una red neuronal. En este caso, solo habrá dos nodos por célula). Dado que todas las células tienen el mismo nodo de referencia, y dado que todos los elementos del circuito son controlados por voltaje, la red neuronal es ideal para un análisis nodal.



- C) La dinámica de una red neuronal celular tiene mecanismos de retroalimentación de salida y control de entrada. El efecto de retroalimentación de salida depende del parámetro interactivo  $A(i, j; k, l)$ , y el efecto de control de entrada depende de  $B(i, j; k, l)$ .
- D) Los valores para los elementos de circuito pueden ser escogidos convenientemente durante la práctica.  $R_x$  y  $R_y$  determinan la disipación de potencia en el circuito y son escogidas usualmente para valores entre  $1k\Omega$  y  $1M\Omega$ .  $CR_x$  es la constante de tiempo de las dinámicas del circuito.

## **2.4.- ROBÓTICA BIO-INSPIRADA (CUADRÚPEDOS)**

El reino animal, permite obtener muchas ideas para encontrar una cantidad vasta de soluciones a problemas típicos de los seres humanos; algunos ejemplos son la visión nocturna, el movimiento o traslado en lugares de difícil acceso, adaptar la apariencia de su entorno, etc.(Eddie et al, 2014). Como estos ejemplos, algunas soluciones son aplicadas al mundo de la robótica móvil, esto es el reino animal sirve como inspiración para el diseño de robots.

### **2.4.1.- DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN**

Los robots actuales son obras de ingeniería y como tales concebidos para producir bienes y servicios o explotar recursos naturales. Desde esta perspectiva son máquinas con las que se continua una actividad que parte de los propios orígenes de la humanidad, y que desde el comienzo de la edad moderna se fundamenta esencialmente en conocimientos científicos (Ollero, 2001).

Los robots móviles son aquellos que brindan la posibilidad de navegar en distintos terrenos y superficies, tienen aplicaciones como: exploración minera, exploración planetaria, misiones de búsqueda y rescate de personas, limpieza de desechos peligrosos, automatización de procesos, vigilancia, reconocimiento de terreno, y también pueden ser utilizados como plataformas móviles que incorporan un brazo manipulador (Silva Ortigoza et al, 2007).

Estos se pueden clasificar por el tipo de locomoción que describen, y en general sólo existen tres principales categorías.

- Locomoción por ruedas.
- Locomoción por patas.
- Locomoción por orugas.

## 2.4.2.- LOCOMOCIÓN EN ROBOTS CUADRÚPEDOS

Una de las tareas más difíciles por realizar en cualquier robot con extremidades es dotarlo de movilidad, con el objetivo de que éste se pueda desplazar a partir de caminar o correr. Al final el desarrollo de controladores de locomoción para robots con extremidades es un problema que ha sido estudiado por cerca de 20 años con una gran variedad de grupos de investigación (Kitano, 1998).

## 2.4.3.- TIPOS DE LOCOMOCIÓN

La locomoción mediante patas permite aislar del terreno empleado únicamente puntos discretos de soporte. Esto implica que es posible adaptar el polígono de soporte para mantener la estabilidad y pasar sobre obstáculos. Por consiguiente, obtiene mejores propiedades con respecto de un esquema basado en ruedas para atravesar terrenos difíciles llenos de obstáculos. Asimismo, mediante patas, es posible conseguir omnidireccionalidad y el deslizamiento en la locomoción es mucho menor.

Para el caso específico de un robot cuadrúpedo resaltan dos tipos de locomoción, el primero se basa en mantener la estabilidad al colocar en todo momento el centro de gravedad del robot sobre el “triángulo de apoyo”, que se forma por tener tres pies en contacto con el suelo por un periodo de transición (Aguilar & Vivas, 2009). Su principal desventaja yace en el hecho de que mover una sola pierna a la vez vuelve lento al robot.

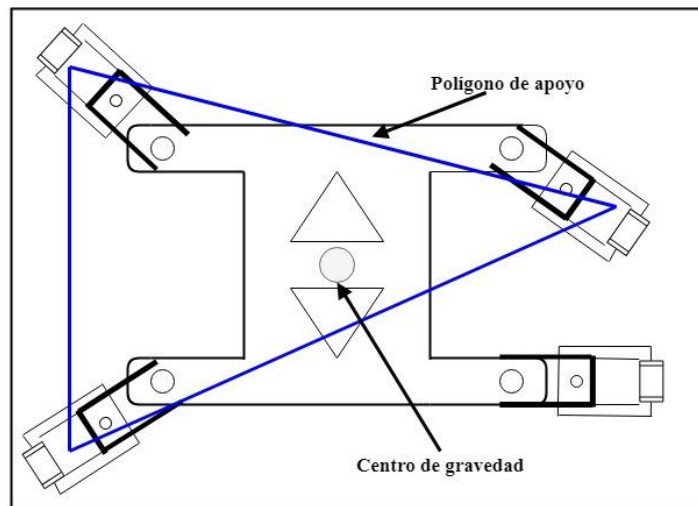


Figura 2- 6: Locomoción con tres piernas de apoyo.

La figura 2-6 muestra cómo se forma el triángulo de apoyo para un robot cuadrúpedo, garantizando el centro de gravedad siempre dentro del polígono.

El segundo tipo de locomoción se enfoca en mantener la estabilidad en todo momento al colocar el centro de gravedad del robot sobre una línea de apoyo formada por dos piernas en contacto con el suelo por un periodo de transición. Su desventaja yace en la inestabilidad que provoca poner el centro de gravedad sobre la línea, como lo muestra la figura 2-7.

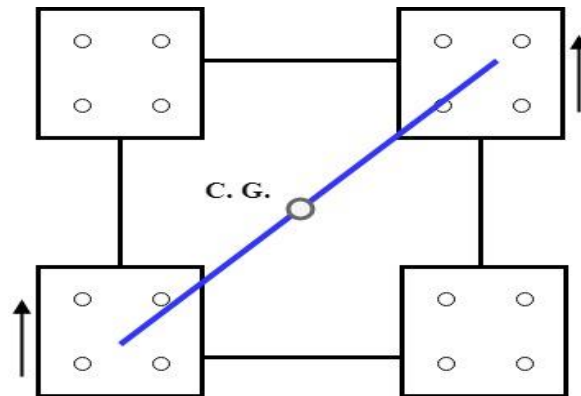


Figura 2- 7: Locomoción con dos piernas de apoyo.

#### 2.4.4.- MECANISMOS PARA LA LOCOMOCIÓN

Algunos de los mecanismos presentes para la locomoción de robots cuadrúpedos tienen las siguientes características:

**Estabilidad dinámica garantizada.-** Para realizar el proceso de simulación, se plantea que el robot móvil cuadrúpedo tiene estabilidad dinámica garantizada desde un punto de vista mecánico (es decir, el diseño mecánico de sus extremidades permiten un movimiento libre de balanceos) y donde Wikstrom y colaboradores definieron la estabilidad dinámica como la habilidad individual para mantener la estabilidad mientras se pasa de un estado dinámico a un estado estático (Wikstrom et al, 2005).

Esto es, luego de cada acción dinámica, se requiere de rápidas adaptaciones corporales y segmentarias para lograr establecer una posición estable, que entre otras cosas posibilite una base de soporte firme y estable en donde poder aplicar fuerza para una nueva acción dinámica, y así mantener una acción en condiciones de estabilidad dinámica, en este caso durante el proceso de locomoción, debido a la disposición de sus extremidades y al diseño de los elementos de apoyo que están en contacto con el suelo, como lo muestra la figura 2-8.

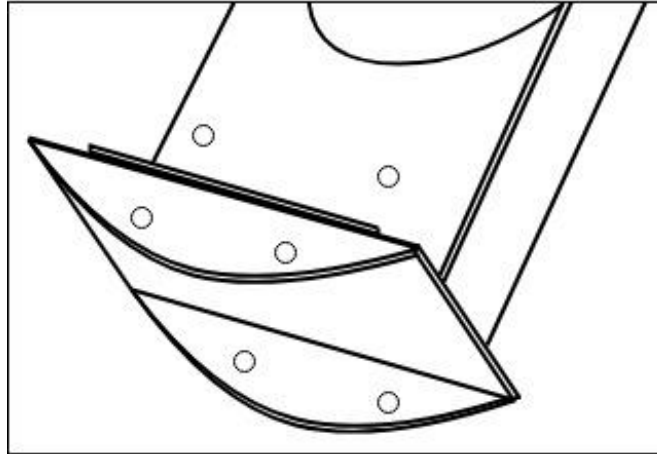


Figura 2- 8: Elemento de soporte en contacto con el suelo.

**Mecanismos sub-actuados.-** Otro de los elementos planteados para poder simular implica establecer mecanismos sub-actuados en las extremidades del robot, que dependen de un eslabón principal, con el fin de hacer el proceso de locomoción más sencillo y eficaz, como se hizo en (Bustos, 2011) y como lo muestra la figura 2-9.

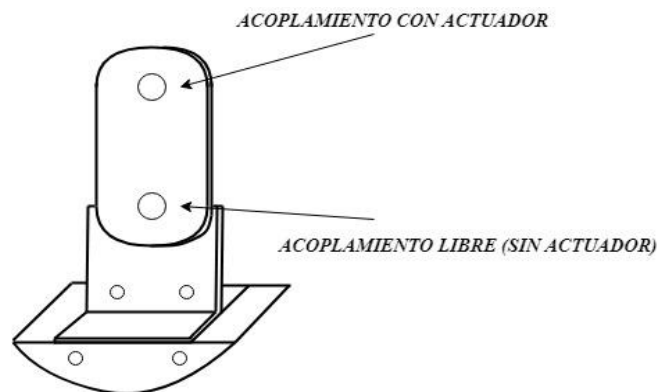
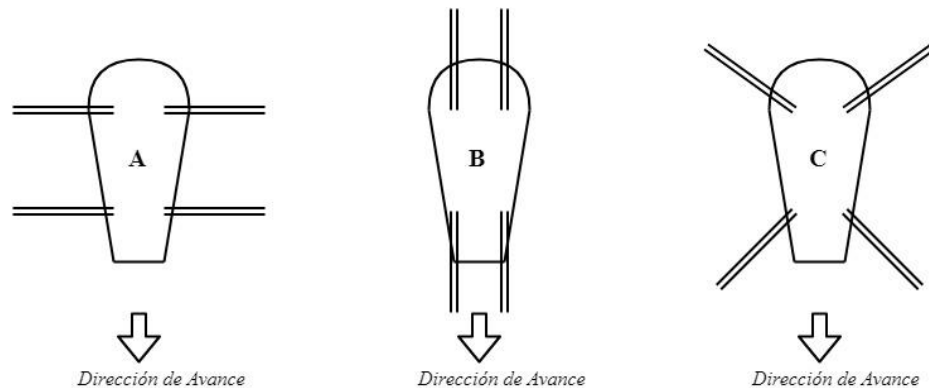


Figura 2- 9: Mecanismo sub-actuado de una extremidad.

#### 2.4.5.- CONFIGURACIÓN DE PIERNAS EN ROBOTS MÓVILES CUADRÚPEDOS

El diseño y la construcción de robots móviles han sido posibles gracias a la información extraída de los comportamientos que describen los animales al caminar. De esta forma la disposición de las piernas, por ejemplo en los reptiles, suministra una base estable, adecuada para realizar desplazamientos sobre superficies lodosas y pantanosas. Caso diferente a la situación presente en los mamíferos, los cuales requieren de estabilidad, pero con un menor consumo de potencia para soportar el cuerpo.

Los robots móviles se clasifican por el número de piernas y por la disposición que estas presentan en su cuerpo, esto es, la localización de los puntos de fijación de las extremidades con respecto al cuerpo, así como la orientación que presentan, como se muestra en la figura 2-10 (Bustos, 2011) (Soto, 1994).



**Figura 2- 10: Disposición de las extremidades de un cuadrúpedo.**

Donde para la figura 2-10 se tienen las siguientes características:

- A) Disposición frontal.- El plano principal de las piernas se encuentra perpendicular a la dirección del avance del robot.
- B) Disposición Sagital.- el plano principal de las piernas se encuentra situado paralelo a la dirección de avance del robot.
- C) Disposición Circular.- Las piernas se sitúan alrededor del cuerpo, de forma radial facilitando el desplazamiento en cualquier dirección. Esta disposición no se encuentra en la naturaleza.

#### **2.4.6.- GCP PARA LOCOMOCIÓN EN CUADRÚPEDOS**

Muchos estudios han intentado demostrar la organización y el funcionamiento del GCP en vertebrados e invertebrados. La hipótesis central es que existe un generador de patrones neural dentro del sistema nervioso central, que produce los programas básicos motores.

Específicamente, los movimientos rítmicos que controlan los sistemas de actuación (músculos), son controlados por Neuronas Locales Generadoras de Movimiento (NLGM), estas son a su vez controladas por Neuronas Comando (NC), que configuran un esquema particular de locomoción basado en las señales provenientes de las NC y de las señales sensoriales, de tal forma que la salida del patrón generador de locomoción pueda ser modificado para adaptarse al medio ambiente (Calabrese, 1995). Desde el punto de vista del comportamiento, todo el sistema locomotor GCP, por tanto parece ser un sistema espacio temporal complejo Activador-Inhibidor, caracterizado por una organización jerárquica, en la cual un grupo de neuronas NC, debido al sistema de sensores o a la

excitación central activa otro grupo de neuronas NLGM que genera las señales apropiadas en tiempo para un tipo de locomoción inducido por las NC (Pérez Machorro, 2009), (Stein, 1978).

## 2.5.- EL ENFOQUE DE LA SUPERVISIÓN Y GESTIÓN DE FALLAS

La supervisión de procesos técnicos está enfocada a mostrar el estado actual, indicando estados indeseados o no permitidos, y tomando las acciones adecuadas para evitar daños o accidentes. Las desviaciones del comportamiento normal del proceso resultado de fallas y errores, las cuales se pueden atribuir a diversas causas podrían resultar en periodos cortos o largos de malfuncionamientos o fallas si no se toma alguna acción de corrección. Una de las razones que alimenta la necesidad de supervisión es poder evitar estas fallas y malfuncionamientos (Isermann, 2006).

**Tarea básica de supervisión.** Un proceso o producto determinado  $P$  operando en lazo abierto, donde  $U(t)$  y  $Y(t)$  son las variables medidas de entrada y salida, respectivamente, y donde fallas pueden aparecer debido a causas internas o externas, (ejemplos de causas externas pueden ser influencias ambientales como humedad, polvo, químicos, radiación, corrosión, altas temperaturas, contaminación, y ejemplos de causas internas pueden ser falta de lubricación, fricción, uso, sobrecalentamiento, fugas, cortocircuitos). Donde estas fallas  $F(t)$  pueden afectar los parámetros internos del proceso  $\Theta$  a través de  $\Delta\Theta(t)$  como cambios de resistencias, capacitancias o rigidez y/o variables de estado internas  $X(t)$  a través de  $\Delta X(t)$  como cambio de flujos másicos, corrientes o temperaturas, las cuales frecuentemente no son medidas. De acuerdo a la dinámica del comportamiento del proceso de transferencia, las fallas influyen la salida medida  $Y(t)$  a través de un cambio  $\Delta Y(t)$ , de cualquier forma se debe tomar en cuenta que las perturbaciones naturales y el ruido  $N(t)$  y también los cambios de la variable manipulada  $U(t)$  modifican la salida medida  $Y(t)$ .

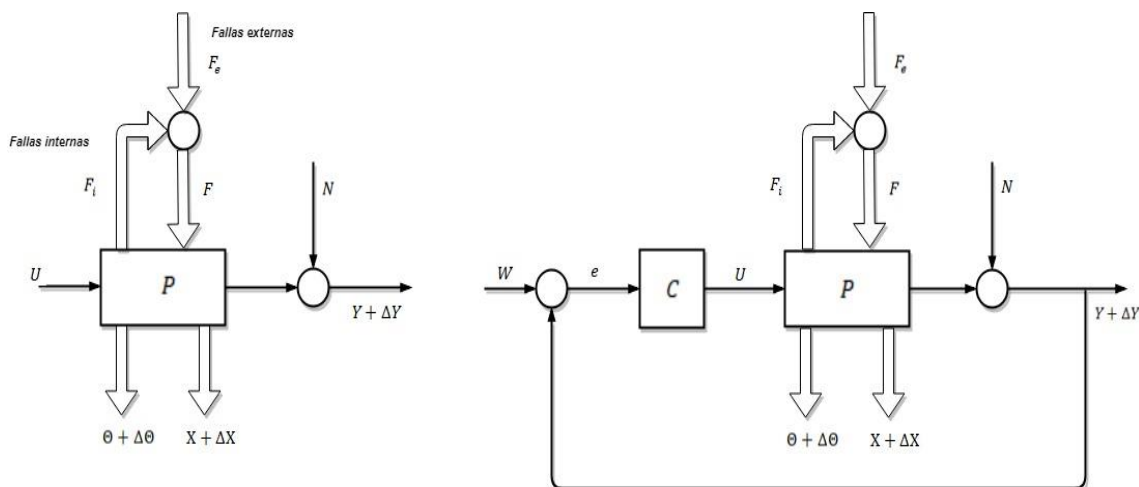


Figura 2- 11: Esquema de un proceso influenciado por fallas.

La supervisión de procesos técnicos en operación normal o el control de calidad de productos en áreas de manufactura es usualmente llevado a cabo por una “verificación de límite” o “verificación de umbrales” de algunas variables de salida medibles  $Y(t)$ , como presiones, fuerzas, niveles, temperaturas, oscilaciones, velocidades. Esto significa revisar si las cantidades están dentro de una zona de tolerancia.

$$Y_{min} < Y(t) < Y_{max} \quad (2.6)$$

Posteriormente una alarma señala si se excede la zona de tolerancia. Por lo tanto una primera tarea de supervisión es:

**1.- Monitoreo:** Las variables medidas son verificadas con respecto a las tolerancias, y las alarmas son generadas para el operador. Después de que una alarma es disparada el operador debe tomar las acciones de corrección correspondientes.

De cualquier forma al excederse un umbral se accede a un estado de proceso peligroso y por lo tanto las acciones de corrección deberían ser generadas automáticamente. Esto da partida a una segunda tarea de supervisión.

**2.- Protección automática:** En el caso de un estado de proceso peligroso, la función de monitoreo deberá iniciar automáticamente una acción de corrección apropiada. Usualmente, el proceso será comandado a un “estado de falla segura”.

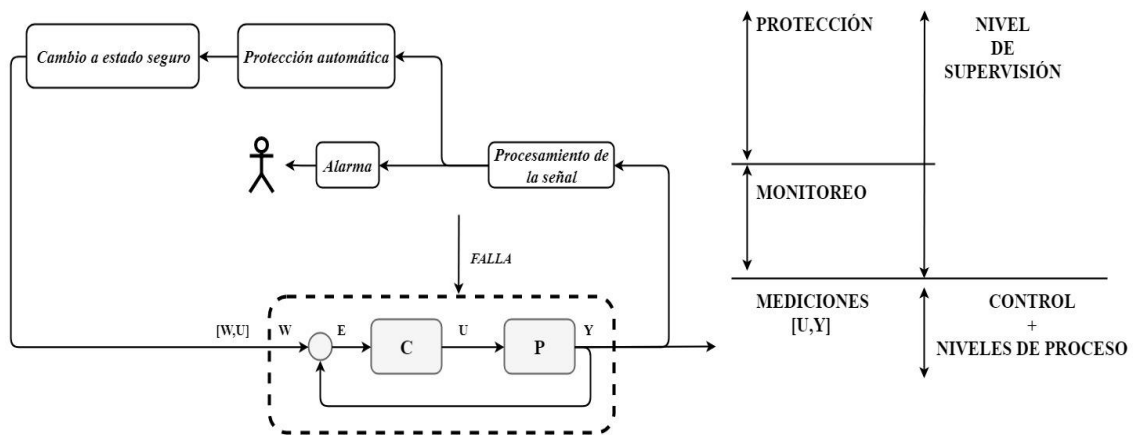


Figura 2- 12: Monitoreo y Protección Automática (Isermann. 2013).

La figura 2-12 muestra como un nivel de supervisión para un proceso determinado engloba una función de monitoreo de las señales disponibles en el sistema y una acción de protección, con la cual se busca de llevar al sistema a un estado de falla segura, donde esta pueda continuar su operación de forma degradada.

Los métodos clásicos de monitoreo y protección automática son adecuados para la supervisión general de diversos procesos. De acuerdo a lo reportado en la literatura para configurar las tolerancias (niveles de detección, límites, umbrales), se deben hacer compromisos entre el tamaño de la detección de las fallas para conocer desviaciones anormales y falsas alarmas debido a las fluctuaciones normales del sistema (Isermann, 2013).

Tabla 1: Ejemplos de protección automática.

PROCESO	FALLA	ACCIÓN DE CORRECCIÓN	DISPOSITIVO DE PROTECCIÓN
Cable eléctrico	Corto-circuito	Interrupción de corriente	Fusible eléctrico
Motor eléctrico	Sobrecalentamiento	Interrupción de corriente	Protector de temperatura
Turbina de vapor	Sobre velocidad	Válvulas cierran muy rápido	Protector de exceso de velocidad
Caldera de calefacción	Sobrecalentamiento	Interrupción del suministro de combustible	Interruptor de temperatura de seguridad
Motor de combustión de avión	Ruptura de enlace flexible	Máxima potencia	Muelle de aceleración
Motor automotriz	Ruptura de enlace flexible	Mínima potencia	Muelle de aceleración

Donde la tabla 1 muestra algunos ejemplos básicos de procesos con acciones de protección configuradas para ciertos casos de fallas. La ventaja de los métodos de supervisión basados en tolerancias, es su simplicidad y rentabilidad para situaciones en estado estable. Únicamente será posible reaccionar después de un cambio relativamente largo de alguna de las características del proceso, es decir, después de una gran falla repentina o una falla progresiva de larga duración.

Para mejorar la supervisión de procesos técnicos y del control de calidad, un primer paso debería ser implementar sensores adicionales que estén relacionados con las fallas esperadas, sin embargo realizar estas operaciones implica volver más complicado al proceso.

**3.- Supervisión con diagnóstico de fallas:** Esta tarea incluye:

A) Generación de características. Valores característicos asociados a fallas particulares, por ejemplo, estimación de estados, relaciones de paridad, estimación de parámetros.

B) Detección de fallas y generación de síntomas



C) Diagnóstico de fallas. La tarea del diagnóstico de falla consiste en determinar el tipo, el tamaño y la localización de la mayor cantidad de fallas posibles, como también el tiempo de detección. A través de la generación de síntomas heurísticos y analíticos y de su relación con las fallas, consta de determinar el tipo, la magnitud y la localización de la falla, por ejemplo métodos de clasificación y razonamiento a partir de árboles de síntomas (Isermann, 2006).

D) Evaluación de fallas. Clasificación de fallas respecto a diferentes clases de peligro

E) Decisiones sobre acciones. Dependiendo de la clase de riesgo y el grado de daño

Basado en información a profundidad acerca de la condición del proceso, tareas más específicas podrían ser necesarias con el fin de garantizar disponibilidad o seguridad, dando a paso a una cuarta tarea de supervisión,

**4.- Acciones de supervisión y gestión de fallas:** Dependiendo de las clases de peligro de las fallas diagnosticadas, las siguientes acciones pueden ser tomadas:

A) Operación segura: Acciones de apagado, p. ej. Apagado si hay un peligro inminente para el proceso o el ambiente.

B) Operación confiable: Impidiendo una nueva expansión de fallas a través de cambios de estado de operación p.ej. operación con menor carga, velocidad, presión, temperatura.

C) Reconfiguración: Selección de una nueva estructura donde se seleccionan entradas y salidas alternativas. P.ej. usando otros sensores, actuadores o componentes redundantes para mantener el proceso en operación y bajo control con una estructura reconfigurada

D) Inspección: Para desarrollar un diagnóstico detallado a través de mediciones adicionales.

E) Mantenimiento: Se entiende como una acción tomada para retener un sistema o devolver un sistema a su condición operativa diseñada. Por ejemplo, de forma instantánea o por la próxima posibilidad de ajustar los parámetros del proceso o intercambiar piezas gastadas

F) Reparación: Se entiende como una acción tomada después de la presencia de una falla o descompostura con el fin de regresar al sistema a su estado de operación nominal. Por ejemplo, instantáneamente para remover una falla o en la próxima posibilidad (revisión).

# CAPÍTULO 3

---

## 3.- DISEÑO DE LA RNC PARA GENERAR LOCOMOCIÓN

Recientemente la comunidad técnica y científica ha puesto su atención en las ciencias de la vida, en particular en biología y neurobiología, esto debido al descubrimiento de que tareas como la generación adaptativa y el control de locomoción en robots caminantes requieren un esfuerzo computacional considerable desde la concepción del diseño, hasta calcular e implementar. De hecho se requiere una generación de trayectoria ( a partir de algoritmos, generadores, etc.) y planificación de trayectorias para todas las extremidades de un robot. Es fácilmente visible que este esfuerzo tiende a ser insostenible conforme la cantidad de extremidades va en aumento. Esta clase de problemas sirve como un fuerte sustento para la construcción de robots basados en ruedas, sin embargo las extremidades (piernas, brazos) son el resultado de la evolución debido a la adaptación que ofrecen a diversas situaciones de terreno.

En la actualidad mucha atención ha sido puesta en encontrar algoritmos eficientes para lidiar con el control autónomo de locomoción, una de las soluciones que más destacan son las basadas en redes neuronales artificiales (RNA), cuyas estructuras tienen la poderosa habilidad de aproximar mapeos arbitrarios en tiempo continuo de tipo no lineal a través de algoritmos de aprendizaje eficientes y cuyo cuello de botella yace en la implementación en hardware debido a la conexión masiva sobre neuronas. Para sobreponerse a este problema sobresalen las redes neuronales celulares (RNC) debido a sus características de conexión local (P. Arena et al, 1999).

### 3.1.- RNC-RD PARA EL DISEÑO DE PATRONES DE LOCOMOCIÓN ARTIFICIAL

El fenómeno de Reacción-Difusión (RD) ocurre en muchos sistemas (biológicos, químicos, físicos)(Murray, 2004), pero todos obedecen las mismas leyes que pueden ser representadas bajo la siguiente ecuación general de reacción-difusión:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = F(u) + D \cdot \nabla^2 u \quad (3.1)$$

Donde  $u$  es un vector de al menos dos elementos. Por ejemplo  $u$  puede representar las dinámicas de un sistema activador/inhibidor difundiendo en un medio no lineal y mostrando formación de patrones. Otro ejemplo es la propagación de auto-ondas en un medio no lineal, las cuales representan una clase particular de ondas no lineales las cuales se propagan sin forzar en medios activos no lineales.

Las auto-ondas poseen características especiales diferentes de otro tipo de ondas en sistemas conservativos, su forma se mantiene constante durante la propagación, la reflexión y la interferencia no se hacen presentes, mientras que la difracción es una propiedad entre las ondas clásicas y las auto-ondas, estas auto-ondas son la base para la ecuación de reacción-difusión (Mattia et al., 2004).

Una RNC es capaz de mostrar fenómenos complejos surgiendo en campos de espacio distribuido tales como el fenómeno de reacción-difusión en dos dimensiones (P. Arena et al, 1997). Una RNC puede mapear la ecuación 3.2 si el término de difusión representado por el operador laplaciano  $\nabla^2 u$  es discretizado:

$$\nabla^2 u = u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1} \quad (3.2)$$

En cuanto a la parte reactiva de la ecuación 3.1, llamada  $F(u)$  se asume que implementa la dinámica de una célula de una RNC. Esto permite establecer una analogía con el caso biológico, la parte reactiva de la ecuación 3.1,  $F(u)$  modela los potenciales de acción generados por una célula neural biológica.

En esta analogía el término difusivo es el equivalente a la sinapsis entre neuronas, además una RNC realiza una red difusiva de neuronas acopladas en las cuales se propagan pulsos nerviosos. Esta clase de acoplamiento representa a un equivalente en sinapsis eléctricas dentro de una red neural biológica.

El punto clave es que las neuronas de la red muestran un comportamiento en estado estable consistiendo en un ciclo límite de baja velocidad estable, mientras que la RNC correspondiente genera auto-ondas. Si las variables de salida de las neuronas constituyen las señales que controlan los actuadores de un sistema de locomoción, la RNC tiene el mismo rol que un generador central de patrones en un sistema biológico de locomoción.

La propagación de ondas en una RNC, se parece a las ondas que caracterizan diversos patrones de locomoción en la naturaleza.

**Definición 1:** Una RNC-RD para locomoción es la aproximación de la RNC de la ecuación de reacción difusión, donde algunas de las variables de estado se usan para manejar los actuadores de un sistema de locomoción.

La parte reactiva de las ecuaciones 3.3 y 3.4 corresponden a las dinámicas de las neuronas de la RNC, mientras que la parte difusiva indica la forma en que las neuronas están conectadas. Se encuentran conectadas a través de las salidas de sus vecinos más cercanos.

Muchos patrones de locomoción se implementan usando la estructura de la RNC-RD. La forma en que se modifica el patrón de locomoción consta de usar diferentes números de células que constituyen la red y reacomodar las conexiones entre los actuadores y las neuronas-motoras (células de la RNC). Esto en términos biológicos corresponde a una gran reorganización topológica de una red neuronal y que permite obtener una sincronización de los órganos efectores de tal forma que éstos dependen del número de células en el anillo.

### 3.1.1.- GCP BASADO EN UNA RNC

El diseño de un generador central de patrones para un patrón de locomoción específico debe tomar en cuenta algunas consideraciones. En general, debe ser posible concentrarse en las distintas fases que forman un patrón: en cada fase del movimiento de una pierna, los movimientos sincronizados entre dos o más extremidades e incluso que ninguna extremidad se mueva son consideraciones permisibles.

**Definición 2:** Un anillo de neuronas es un arreglo de  $n$  neuronas con condiciones de frontera periódicas, con cada neurona siendo conectada a un vecino con una sinapsis excitatoria o inhibitoria en una dirección bien definida (sentido de las manecillas del reloj o viceversa).

### 3.2.- DISEÑO DE LA RNC

De acuerdo a lo planteado previamente en este documento, es evidente notar que el primer problema por solucionar, es el problema de locomoción. Existen diversas formas de otorgar a un robot móvil cuadrúpedo la capacidad de moverse, de acuerdo a lo reportado en la literatura se puede realizar mediante el uso de procesadores digitales, algoritmos de control, redes neuronales, osciladores, etc. Y donde el esquema de la figura 3-1 muestra cómo se soluciona el problema de locomoción.

Para el caso específico que nos compete se optó por seguir el camino de la bioinspiración, como muchos de los trabajos mencionados previamente, el generador central de patrones (GCP) un mecanismo biológico encargado de producir salidas rítmicas para estimular los músculos y las extremidades de los seres vivos con el objetivo de producir locomoción (P. Arena & Fortuna, 2002), es el camino a seguir, y cuya ventaja yace en que este puede ser reproducible artificialmente mediante el uso de las redes neuronales celulares que explotan el potencial de los amplificadores operacionales como osciladores.

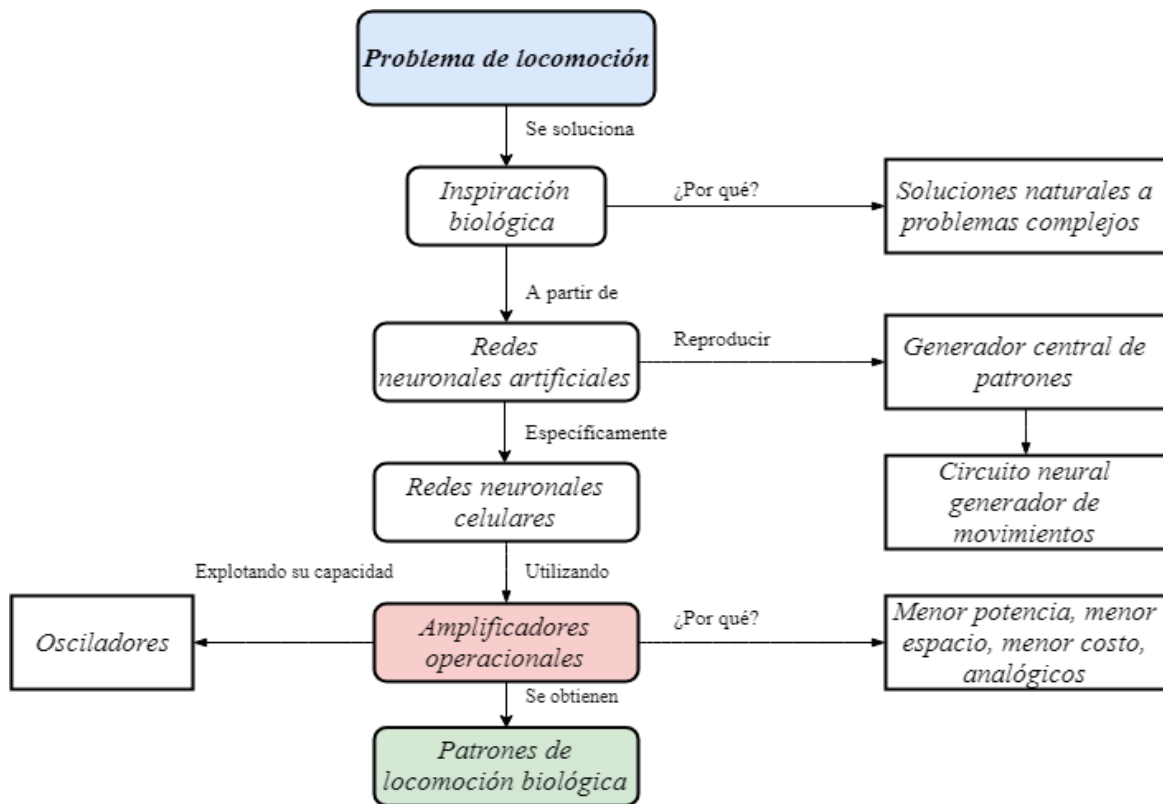


Figura 3- 1: Problema de locomoción.

Y donde el modelo matemático que representa al elemento básico de una red neuronal celular está determinado por las ecuaciones 3.3, 3.4 y 3.5.

$$\dot{x}_{1;i,j} - x_{1;i,j} + (1 + \mu + \varepsilon)y_{1;i,j} - s_1 y_{2;i,j} + i_1 \quad (3.3)$$

$$\dot{x}_{2;i,j} - x_{2;i,j} + s_2 y_{1;i,j} + (1 + \mu - \varepsilon)y_{2;i,j} + i_2 \quad (3.4)$$

$$y_{l;i,j} = 0.5(|x_{l;i,j} + 1| - |x_{l;i,j} - 1|) \quad (3.5)$$

Las ecuaciones 3.3, 3.4 y 3.5 se representan a través del uso de amplificadores operacionales. El elemento de base será una célula, conformada por diferentes modos de conexión de los amplificadores, como lo son derivador, sumador y no inversor con el fin de producir patrones oscilatorios los cuales son asociados con la locomoción biológicamente inspirada.

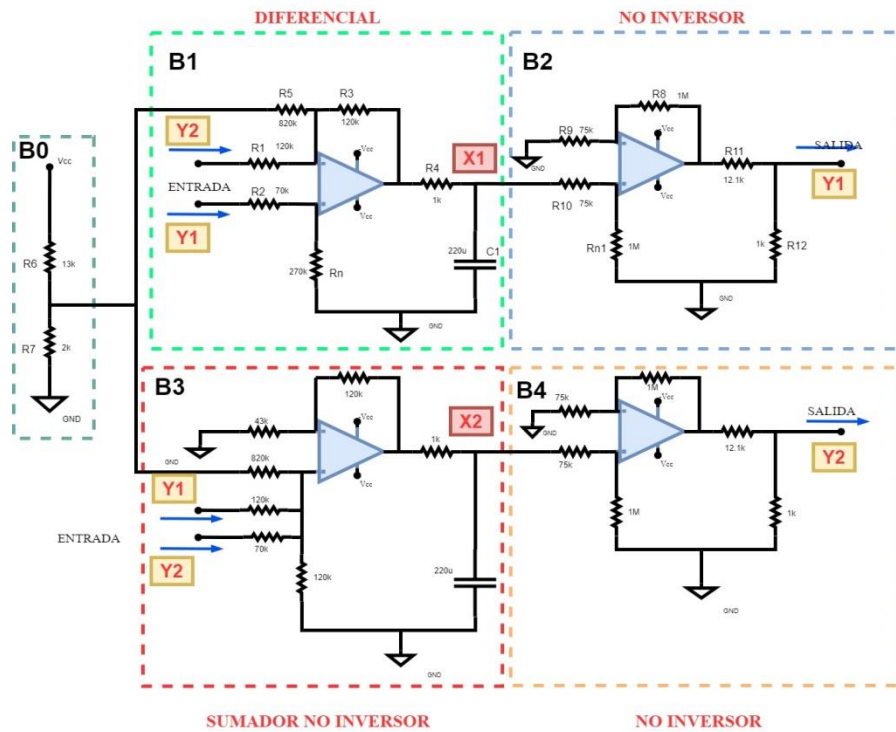


Figura 3- 2: Circuito de una célula basado en amplificadores operacionales.

La figura 3-2 muestra la realización de una sola célula aislada de su vecindario, donde los valores de los componentes son adecuados para la formación de patrones oscilatorios. Los bloques B1 y B3 realizan las dos ecuaciones diferenciales de primer orden con la adición de los dos términos del Bias  $i_1 = i_2$ . Los bloques B2 y B4 (idénticos) realizan la salida no lineal por cada uno de los estados  $x_1$  y  $x_2$  a través de la explotación de las características de saturación natural de los amplificadores operacionales y por la adición de un divisor de voltaje de salida en B0 para escalar los niveles de saturación (Wu & Tan, 2005).

Con el circuito de la figura 3-2 se puede obtener la siguiente respuesta para los estados y salidas  $x$ ,  $y$  como se muestra a continuación.

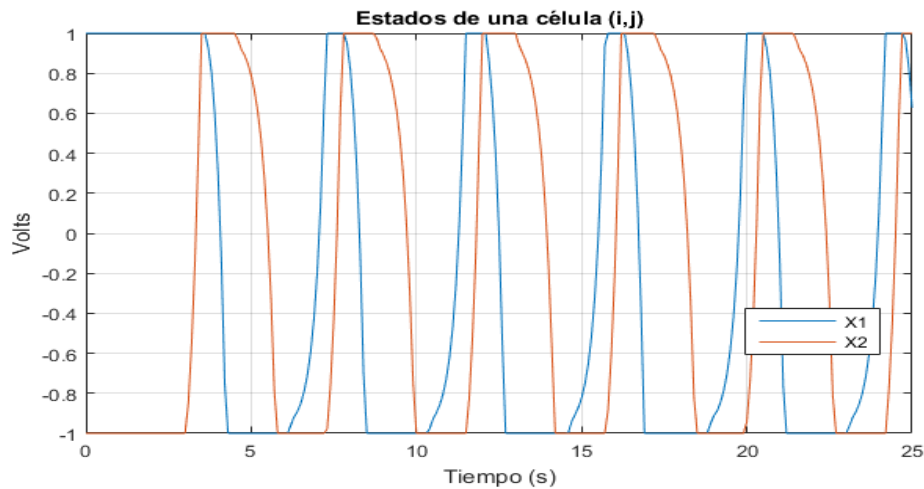


Figura 3- 3: Estados del circuito de una célula.

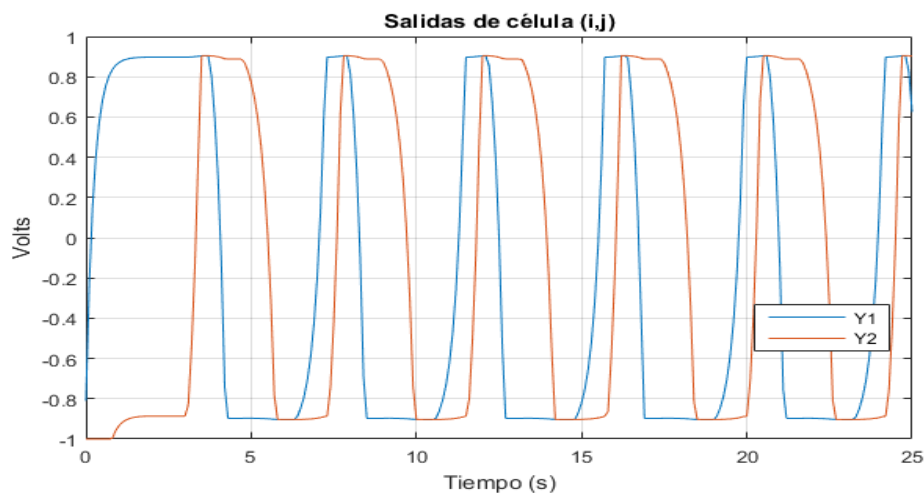


Figura 3- 4: Salidas del circuito de una célula.

Como se muestra en la figura 3-3 y 3-4 una sola célula por sí misma es capaz de generar patrones oscilatorios aprovechando las capacidades de saturación de los amplificadores operacionales en diferentes configuraciones, sin embargo no es suficiente para producir un patrón de locomoción que sea útil, por lo tanto, es conveniente el diseño completo de una red neuronal que tenga un número de células necesarias para producir el patrón requerido.

Posteriormente la RNC propuesta para este trabajo consta de un arreglo en anillo con 8 células conectadas entre sí. Un anillo de  $n$ -neuronas no es más que un arreglo de  $n$  neuronas con condiciones de frontera periódicas, donde cada neurona es conectada a un vecino con una sinapsis (excitatoria o inhibitoria) en una dirección definida (en sentido a las manecillas del reloj o en contra sentido) (Mattia et al., 2004).

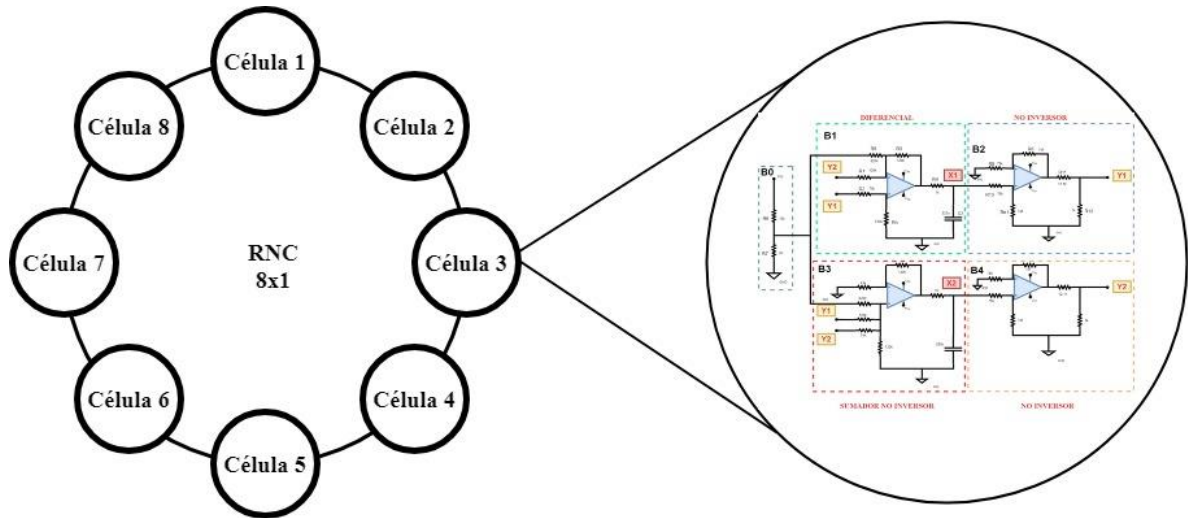


Figura 3- 5: Diseño de la RNC.

La figura 3-5 muestra el diseño de la red neuronal propuesta el esquema configurado sigue el formato de conexión en anillo, cabe mencionar que para conectar las células entre sí, se necesita configurar un parámetro de conexión, con el fin de que las señales se puedan propagar a través de la red neuronal celular de forma correcta, la idea siempre es, imitar las conexiones sinápticas que se dan a través de un medio químico en las neuronas biológicas (Wolpert, 2000), para este caso se conecta una resistencia de  $1\text{ M}\Omega$  en el espacio intermedio entre cada célula, como se muestra en la figura 3-6.

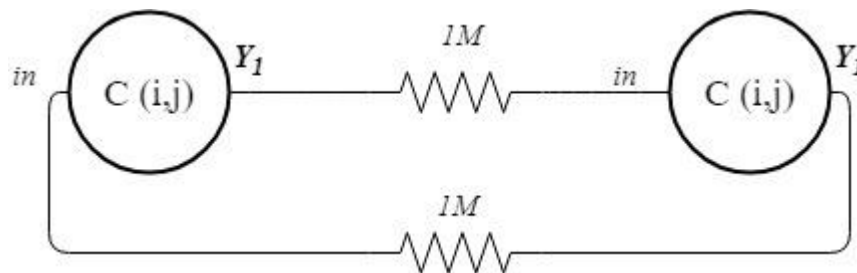


Figura 3- 6: Conexión entre células.

La conexión entre células permite que las señales se propaguen a través de la red hasta finalmente irse formando el patrón oscilatorio deseado, (Doñate et al, 2018) esto es, la célula anterior disparará a la célula posterior hasta recorrer todo el camino de la red neuronal pasando por todas las células que la conforman, para el arreglo propuesto de red neuronal el tiempo de propagación de las señales no supera los 5 segundos. Para nuestro caso bastó con la aplicación de 8 células en una configuración de anillo para obtener el patrón deseado.



Existirán casos donde el número de células sea mayor o menor y donde se ocupen arreglos con más capas, dependerá del objetivo que se busca alcanzar, como el ejemplo de la red propuesta por P. Arena y Fortuna en 1999 (P. Arena et al., 1999)(Bustos, 2011).

### 3.2.1.- DISPOSITIVOS ELÉCTRICOS

Para el caso de la figura 3-2, se pueden expresar las relaciones matemáticas que involucran los dispositivos eléctricos que conforman a la célula. Donde, en particular  $R_8, R_{10}, R_{11}$  y  $R_{12}$  son escogidas tal que la salida del amplificador operacional se sature cuando  $|x| > 1$  y donde la siguiente relación explícitamente representa el comportamiento dinámico de los bloques B1 y B2.

$$C_1 \dot{x}_1 = -\frac{1}{R_4} x_1 + \frac{R_3}{R_4 R_2} Y_1 - \frac{R_3}{R_4 R_1} Y_2 + \frac{R_3}{R_4 R_5} \frac{R_7}{R_6 R_7} V_{cc} \quad (3.6)$$

$$Y_1 = \frac{R_{12}}{R_{11} + R_{12}} \frac{R_8}{R_{10}} x_1 \quad \text{para } -1 < x_1 < 1 \quad (3.7)$$

### 3.2.2.- PATRONES DE LOCOMOCIÓN



Figura 3- 7: Patrón de locomoción de un perro.

#### Perro:

T1: En el tiempo uno las cuatro piernas (extremidades) se encuentran en el suelo.

T2: El segundo se mueve I1 y D2, mientras que I2 y D1 están en el suelo.

T3: I2 y D1 está en el aire, mientras I1 y D2 se encuentran en el suelo.

El caminado del perro es colocar dos piernas en el suelo formando una línea transversal entre las extremidades, mientras que las restantes se encuentran suspendidas en el aire.

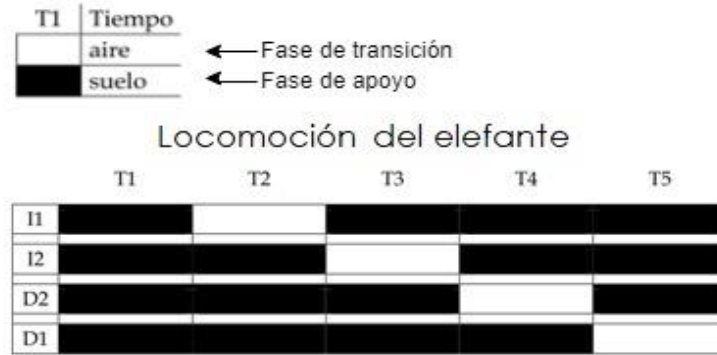


Figura 3- 8: Patrón de locomoción de un elefante.

**Elefante:**

T1: En el tiempo uno, las cuatro piernas (extremidades) se encuentran en el suelo.

T2: El segundo tiempo es mover I1, mientras que las demás están en el suelo.

T3: I2 está en el aire mientras I1, D1 y D2 se encuentran en el suelo.

El caminado del elefante es colocar en todo momento tres piernas en el suelo formando un triángulo, mientras que la otra se encuentra suspendida en el aire.

Las figura 3-7 y 3-8 muestran los esquemas de locomoción deseados para la red neuronal diseñada, esto es, los blancos indican un tiempo de transición (extremidad en el aire) y los negros indican el tiempo de apoyo (extremidad en el suelo) durante el periodo que el robot describe cierto patrón de locomoción, en este caso se escogieron el patrón de locomoción de un perro y el de un elefante por ser de los más representativos para robots cuadrúpedos, posteriormente se presenta en las figuras 3-9 y 3-10 como la RNC es capaz de producir estos patrones de locomoción.

Basados en las respuestas del circuito de una sola célula mostrado por la figura 3-2 es evidente concluir que pese a la capacidad de la célula de producir un patrón oscilatorio por sí misma, éste no es de utilidad para generar un patrón de locomoción útil que se pueda acoplar a las extremidades de un robot, por lo tanto es de interés observar cómo se comportan las señales al construirse una red neuronal con una configuración determinada, y donde el patrón de locomoción del perro obtenido por la RNC es presentado en la figura 3-9.

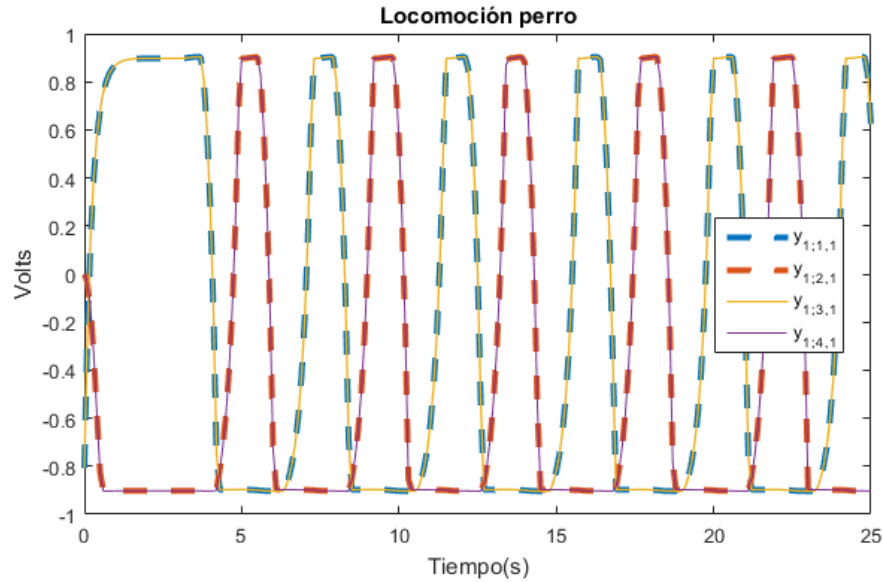


Figura 3- 9: Salidas de la RNC (locomoción del perro).

Los valores positivos de la figura 3-9 indican la fase de transición y los negativos la fase de apoyo. Para el caso del patrón de locomoción del perro la red neuronal celular se configura tal que el par de señales conformadas por  $y_{1;1,1}$ ,  $y_{1;2,1}$  junto con  $y_{1;3,1}$ ,  $y_{1;4,1}$  estén desfasadas  $90^\circ$  entre sí, para este caso solo es necesario utilizar 4 células de la red.

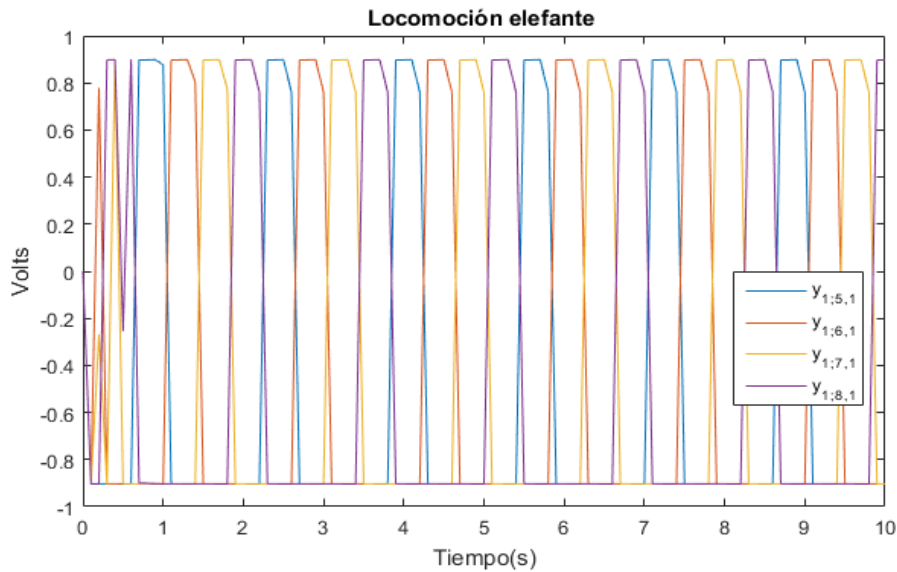


Figura 3- 10: Salidas de la RNC (patrón de locomoción del elefante).

Para el caso correspondiente a la locomoción del elefante mostrado por la figura 3-10, la idea es describir un movimiento por cada unidad de tiempo, entonces la condición primordial será un desfase de  $90^\circ$  entre cada una de las señales de la red, las cuales son  $y_{1;5,1}$ ,  $y_{1;6,1}$ ,  $y_{1;7,1}$ ,  $y_{1;8,1}$ , estas son las células restantes que no se usaban en el patrón anterior.

### 3.3.- ACOPLAMIENTO DE LA RNC A UN CUADRÚPEDO

La red neuronal celular se acopla a la plataforma de un robot móvil de cuadrúpedo, con el fin de producir algún patrón oscilatorio que permita desplazar al robot móvil de forma bio-inspirada, resolviendo así el problema de locomoción.

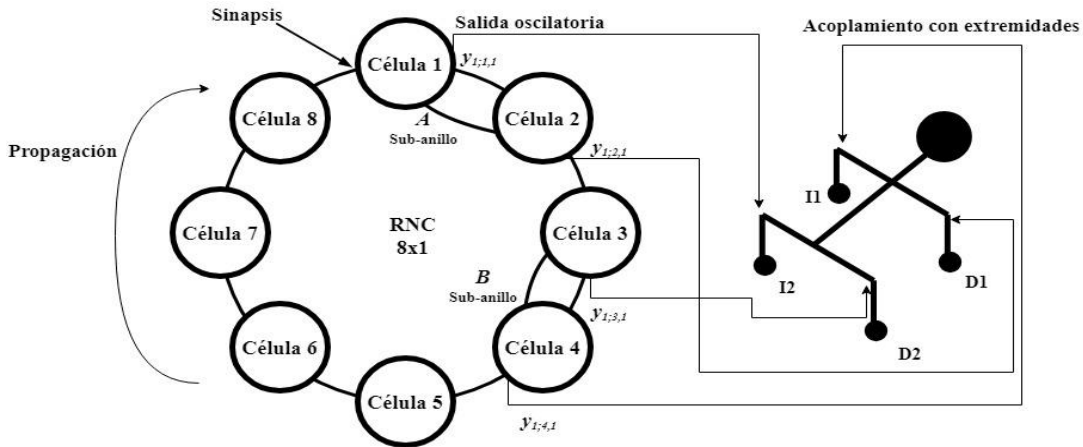


Figura 3- 11: Acoplamiento de la RNC a un cuadrúpedo caminado de un perro.

La figura 3-11 muestra la configuración aplicada, los sub-anillos producen el desfase deseado, las salidas oscilatorias serán las entradas para los actuadores del robot con el fin de excitar sus extremidades y producir movimiento.

Cabe mencionar que la RNC es libre para representar diferentes configuraciones y reproducir diferentes caminados, según sea el caso se necesitara de una cantidad mayor o menor de células involucradas, otro ejemplo es mostrado por la figura 3-12, esta conexión es para obtener el patrón de locomoción de un elefante, como se muestra en (Bustos, 2011), mientras que las células 1 a 4 ya están ocupadas .

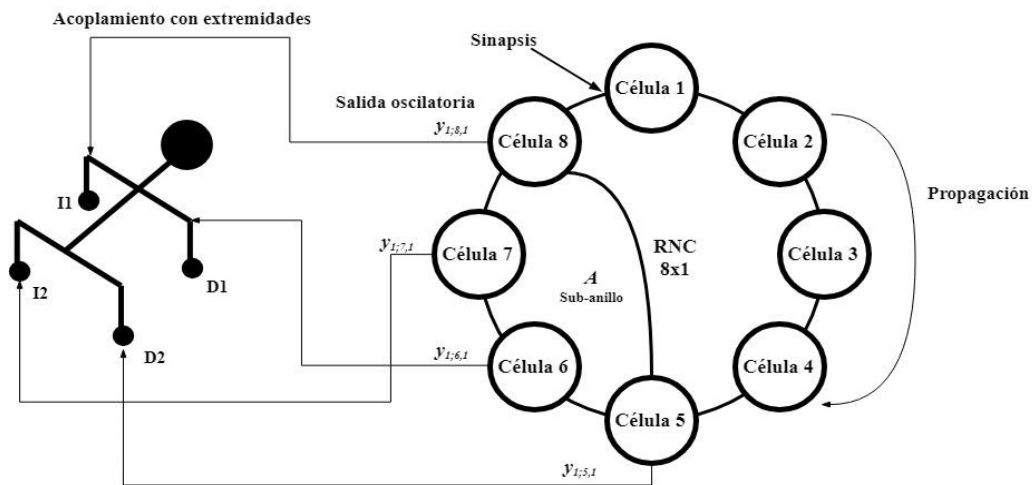


Figura 3- 12: Acoplamiento de la RNC a un cuadrúpedo caminado de un elefante.

### 3.4.- MODELO MATEMÁTICO DE LA RNC

Algunos de los teoremas provistos por (P. Arena et al, 1998) muestran que el sistema provisto por las ecuaciones 3.3, 3.4 y 3.5 mientras son usados como célula en un arreglo de red neuronal celular de dimensión  $M \times N$ , junto con una selección idónea de sus parámetros, son ideales para la formación de patrones y auto-ondas, en especial si:

$$\mu = 0.7, \varepsilon = 0, s_2 = s_1 = s = 1, i_1 = 0.3, i_2 = 0.3 \quad (3.8)$$

Y cuyas condiciones pueden ser satisfechas tal que la célula muestre dinámicas de estado estable consistiendo en un ciclo límite estable de tipo lento-rápido, mientras que se pueden generar auto-ondas.

Para:

$$\mu = -0.6, \varepsilon = 1.82, s_2 = 2.5, s_1 = 2, s = 1, i_1 = i_2 = 0 \quad (3.9)$$

La célula satisface con los valores en la expresión 3.9 todas las condiciones para la formación de patrones (P. Arena et al, 1998). Para la formación de patrones biológicos se seleccionan los valores de la expresión 3.8.

Donde una auto-onda indica “ondas autónomas” las cuales representan una clase particular de ondas no lineales las cuales se propagan sin forzar funciones en medios activos fuertemente no lineales. Esto es, la propagación de la onda toma lugar a expensas de la energía almacenada en un medio activo, tal energía es usada para disparar un proceso en regiones adyacentes. En general estos fenómenos pueden ser encontrados en ondas de combustión o en reacciones químicas, como también en muchos procesos biológicos, tales como la propagación en las fibras nerviosas o excitaciones del corazón (P. Arena & Fortuna, 2000). Si tal célula está conectada con sus vecinos a través de una plataforma de difusión discretizada, como se propone en (L. O. Chua et al., 1995) se deriva la siguiente RNC con plataformas constantes:

$$\dot{x}_{i,j} = -x_{i,j} + A * y_{i,j} + B * u_{i,j} + I \quad (3.10)$$

Donde  $x_{i,j} = [x_{1;i,j}, x_{2;i,j}]'$ ,  $y_{ij} = [y_{1;i,j}, y_{2;i,j}]'$ , y  $u_{i,j} = [u_{1;i,j}, u_{2;i,j}]'$  son el estado, la salida y la entrada de la RNC respectivamente, mientras que  $A, B$  e  $I$  son las plataformas de retroalimentación, control y bias. Las plataformas de clonación son:

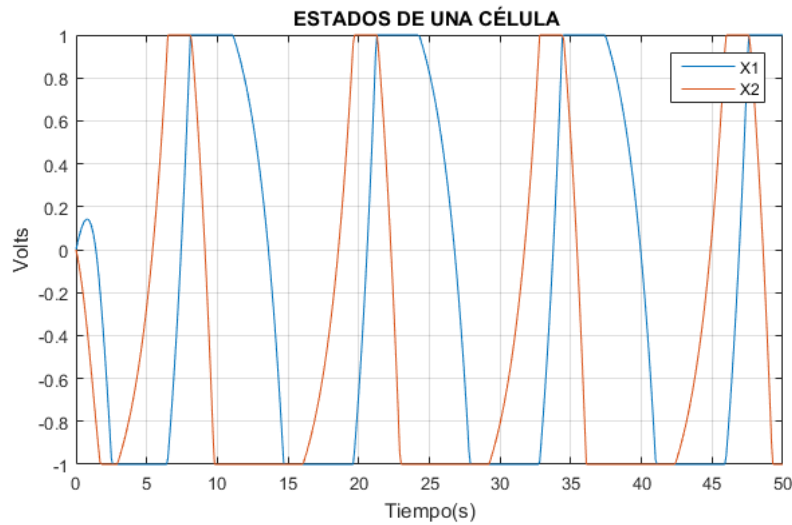
$$A = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}, B = 0 \quad I = \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

Dónde:

$$A_{11} = [D_1 \quad -2D_1 + \mu + \varepsilon + 1 \quad D_1] \quad A_{12} = [0 \quad -s_1 \quad 0]$$

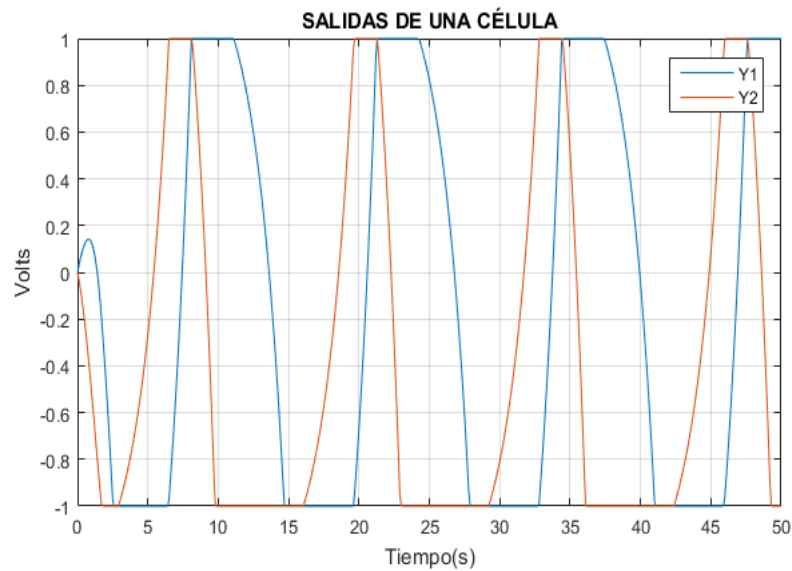
$$A_{21} = [0 \quad s_1 \quad 0] \quad A_{22} = [D_2 \quad -2D_2 + \mu - \varepsilon + 1 \quad D_2]$$

En particular para la formación de auto-ondas para generar locomoción se tiene  $D_1 = D_2 = 0.1$ , mientras que para la formación de patrones  $D_1 = 0.01$  y  $D_2 = 1$  (P. Arena & Fortuna, 2000). Las ecuaciones 3.3, 3.4 y 3.5 representan el modelo de una célula aislada de cualquier vecindad, este modelo matemático es útil como base para expresar la dinámica completa de una red neuronal celular.



**Figura 3- 13: Estados obtenidos del modelo matemático.**

La figura 3-13 muestra los estados obtenidos del modelo expresado por las ecuaciones 3.3, 3.4 y 3.5, claramente se observa una correspondencia con el estado obtenido del circuito de la célula de la figura 3-2.



**Figura 3- 14: Salidas obtenidas del modelo matemático.**

En la figura 3-14 se muestran las salidas expresadas por la ecuación 3.5, se obtiene al igual que con el circuito de una célula salidas oscilatorias ideales para la formación de patrones de locomoción, con esto se demuestra que el circuito de una célula es equivalente al modelo matemático.

Cabe mencionar que para el desarrollo de este trabajo solo se utilizó la salida  $y_1$  de todas las células, sin embargo de acuerdo a lo observado en la literatura es posible utilizar la salida  $y_2$  e incluso los estados para la formación de patrones (P. Arena & Fortuna, 2002).

Posteriormente para expresar la dinámica de la RNC presentada por las figura 3-5 y junto con las ecuaciones 3.3 y 3.4, son expandidas de la siguiente forma, mientras que la ecuación 3.5 de salida se mantiene igual. Cada trio de ecuaciones se multiplica por la cantidad de células presentes en la red neuronal celular, en este caso la red completa será descrito por un total de 24 ecuaciones que describen la dinámica de cada una de las células posición por posición dentro de la red (Ver anexo A).

$$\dot{x}_{1;i,j} = -x_{1;i,j} + (1 + \mu + \varepsilon)y_{1;i,j} - sy_{2;i,j} + i_1 + D_1(y_{1;i-1,j} - 2y_{1;i,j} + y_{1;i+1,j}) \quad (3.12)$$

$$\dot{x}_{2;i,j} = -x_{2;i,j} + s_2y_{1;i,j} + (1 + \mu - \varepsilon)y_{2;i,j} + i_2 + D_2(y_{2;i-1,j} - 2y_{2;i,j} + y_{2;i+1,j}) \quad (3.13)$$

$$y_{l;i,j} = 0.5 (|x_{l;i,j} + 1| - |x_{l;i,j} - 1|) \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} 1 &\leq i \leq M \\ 1 &\leq j \leq N \end{aligned}$$

Donde los términos a la derecha de las ecuaciones 3.12 y 3.13 indican las relaciones que tiene una célula dada con las que la rodean, esto es, el efecto de la salida derivada de la célula anterior más el efecto derivado de la célula posterior, con la ecuación de salida descrita en 3.14 (se mantiene igual), menos dos conexiones, la anterior y la posterior de una célula determinada y tomando en cuenta el caso de estudio de un robot móvil en configuración de cuatro patas el diseño de la red neuronal entonces será un arreglo de dimensión  $M \times N$  de  $8 \times 1$  y con  $N_r(i, j) = 1$ .

# CAPÍTULO 4

---

## **4.- CONTROL TOLERANTE A FALLAS EN LA LOCOMOCIÓN DE UN ROBOT CUADRÚPEDO.**

En general un sistema de control tolerante a fallas es un sistema de control específicamente diseñado teniendo en cuenta las posibles fallas de los componentes del sistema. Ciertamente, un control tolerante a fallas no ofrece un desempeño óptimo en el estricto sentido de la operación nominal de un sistema, pero generalmente puede mitigar los efectos de las fallas de los componentes de un sistema sin poner en peligro la misión o poner en riesgo a los usuarios / público (N. Hassan, 2009).

La filosofía del diseño de sistemas de control tolerante a fallas es diferente de otras metodologías de diseño, consecuentemente, su comportamiento bajo los efectos de fallas en los componentes también será diferente.

Bajo el contexto de las conductas locomotoras que describe un robot cuadrúpedo a base de extremidades el diseño de un esquema de control tolerante a fallas toma gran importancia, pues se busca garantizar la continuidad de un proceso con el fin de evitar que el robot móvil pierda movilidad y termine su misión antes de haber alcanzado su objetivo debido a la presencia de alguna falla.



## 4.1.- SUPERVISIÓN Y GESTIÓN DE FALLAS

Dentro de los métodos de supervisión y gestión de fallas las acciones son conocidas como “gestión de fallas” o “gestión de activos orientada a procesos”, estas incorporan acciones intermedias en el caso de sistemas redundantes si el proceso se encuentra en un estado peligroso, por ejemplo en aviación, plantas de energía, plantas químicas o vehículos autónomos (Isermann, 2013).

Los siguientes términos son válidos para los esquemas de supervisión y gestión de fallas:

**Falla.**- Una falla es una desviación no permitida de al menos una característica propia del sistema de un estándar de condición aceptable.

Remarcaciones:

- Una falla es un estado dentro del sistema.
- La desviación no permitida es la diferencia entre el valor de la falla y el umbral violado de una zona de tolerancia para un valor nominal.
- Una falla es una condición anormal que puede causar una reducción en, o pérdida de, la capacidad de una unidad funcional para desarrollar una función específica.
- Existen diferentes tipos de fallas, p.ej. fallas de diseño, fallas de manufactura, fallas de ensamblado, fallas en operación normal (desgaste), fallas de operación incorrecta (sobrecarga), fallas de mantenimiento, fallas de hardware, fallas de software, fallas por el operador.
- Una falla en el sistema es independiente de si el sistema está en operación o no.
- Una falla indica una descompostura o un malfuncionamiento.
- Frecuentemente las fallas, son difíciles de detectar, especialmente si son pequeñas.
- Las fallas pueden desarrollarse abruptamente o incipientemente.

**Descompostura.**- Una descompostura es una interrupción permanente de la habilidad de un sistema para desarrollar una función bajo condiciones de operación específica.

Remarcaciones:

- Una descompostura es la terminación de la habilidad de una unidad funcional para desarrollar una función específica.
- Una descompostura es un evento.
- Una descompostura es el resultado de una o más fallas.
- Normalmente se da lugar a una descompostura después de iniciada la operación del proceso o al ponerlo bajo una condición de estrés.

**Malfuncionamiento.**- Un malfuncionamiento es una regularidad intermitente en el cumplimiento de una función del sistema.

Remarcaciones:

- Un malfuncionamiento es una interrupción temporal de la función de un sistema.
- Un malfuncionamiento es un evento.
- Un malfuncionamiento es resultado de una o más fallas.
- Normalmente se da lugar a un malfuncionamiento después de iniciada la operación del proceso o al ponerlo bajo una condición de estrés.

Donde en la figura 4-1 muestra la relación entre fallas, descompostura y malfuncionamiento, las fallas se desarrollan abruptamente, como en un escalón o incipientemente como en una rampa.

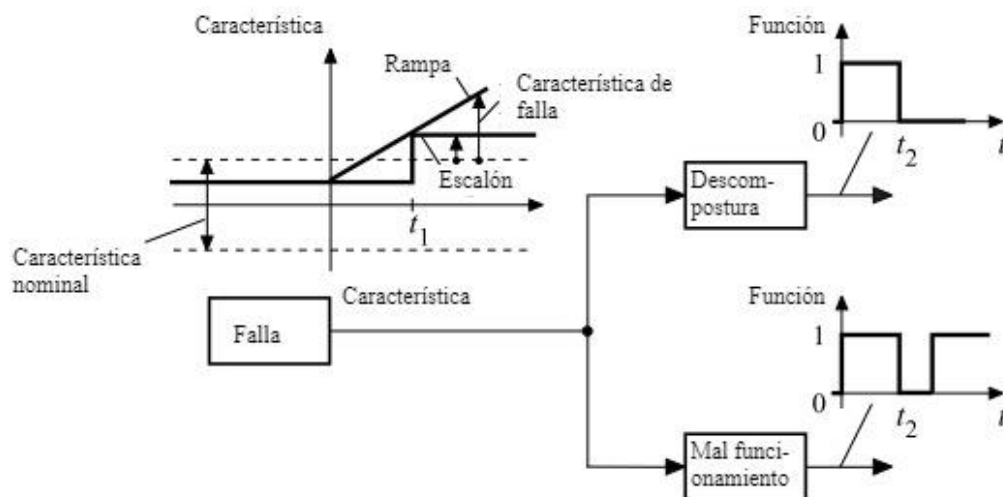


Figura 4- 1: Ejemplos desarrollo de los eventos de falla, descompostura y malfuncionamiento (Iserman, 2013).

#### 4.1.1.- SUPERVISIÓN DEL PROCESO Y CONDICIÓN DE MONITOREO

La supervisión de un proceso se realiza a través de verificaciones de límite de las variables más importantes del proceso, en este caso voltajes y corrientes provenientes de mediciones continuas del estado del sistema.

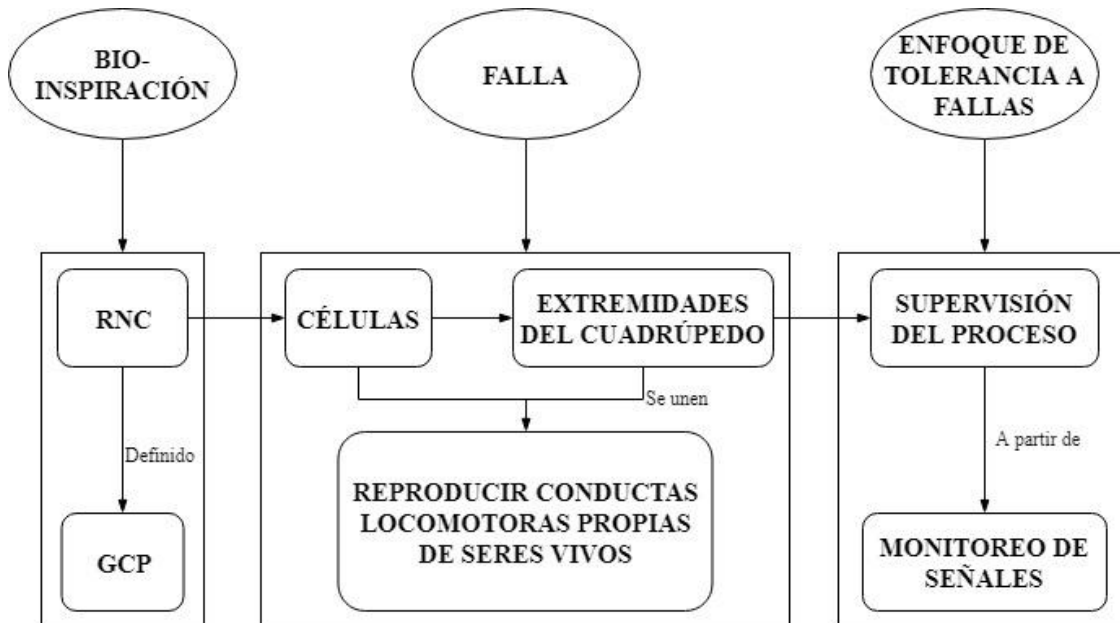


Figura 4- 2: Esquema general de la supervisión del proceso.

Donde la figura 4-1 representa un esquema generalizado de la supervisión del proceso a base del monitoreo de los límites de las señales disponibles.

#### 4.1.2.- DETECCIÓN DE FALLAS BASADO EN CONOCIMIENTO

La detección de fallas es fundamental para los métodos de supervisión y gestión de fallas, la detección de fallas generalmente es basada en mediciones de las variables a través de instrumentos y de estados y variables observadas por operadores humanos. El procesamiento automático de las variables medidas para la detección de fallas requiere conocimiento humano experto, conocido como conocimiento heurístico, por lo tanto la detección de fallas es considerado dentro de un enfoque basado en conocimiento (Isermann, 2013).

El conocimiento analítico acerca del proceso es usado para producir información analítica cuantificable. Para hacer esto el procesamiento de datos basado en las variables medidas del proceso se desarrolla para generar los primeros valores característicos, ya sea por el uso de:

- **Control del límite de un valor de las señales medidas.** Los valores característicos son las tolerancias de señal violadas.
- **Análisis de señal.** A partir de las señales medidas mediante el uso de modelos de señal como, funciones de correlación, espectros de frecuencia, promedio móvil auto regresivo (ARMA) o valores característicos, por ejemplo, variancias, amplitudes, frecuencias, o modelos paramétricos.
- **Análisis de proceso a través de modelos de procesamiento matemático.** Se da a través de estimación de parámetros, estimación de estados y ecuaciones de paridad. Los valores característicos son los parámetros, variables de estados o residuos.

Donde la figura 4-3 muestra el método de detección de fallas a partir del control de límite de las señales medidas del sistema (voltajes/corrientes).

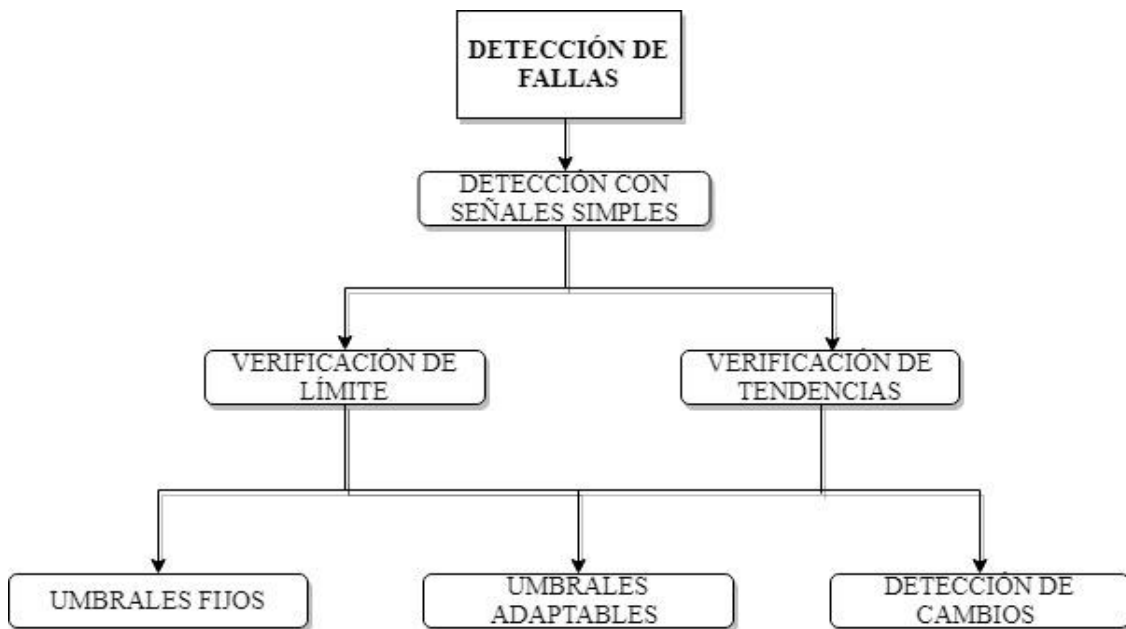


Figura 4- 3: Detección de fallas.

Donde se seleccionaron los umbrales fijos debidos a las características oscilatorias y de frecuencia de las señales obtenidas de la RNC las cuales deben aprovechar las capacidades de saturación de los amplificadores operacionales y cuya forma de onda es característica para la formación de patrones, por lo cual configurar umbrales fijos ayuda a detectar cambios en las señales debido a fallas, de igual forma se evita el seguimiento de tendencias y configurar umbrales adaptables que dificultarían la detección de fallas para este caso particular.

#### 4.1.3.- SELECCIÓN DE UMBRALES

Con el fin de aplicar una acción de reconfiguración, se fijan umbrales o límites para las señales medidas, esto cuando las señales superen estos umbrales o límites la RNC será capaz de conocer que se encuentra en un estado de falla y ejecutar la acción correspondiente.

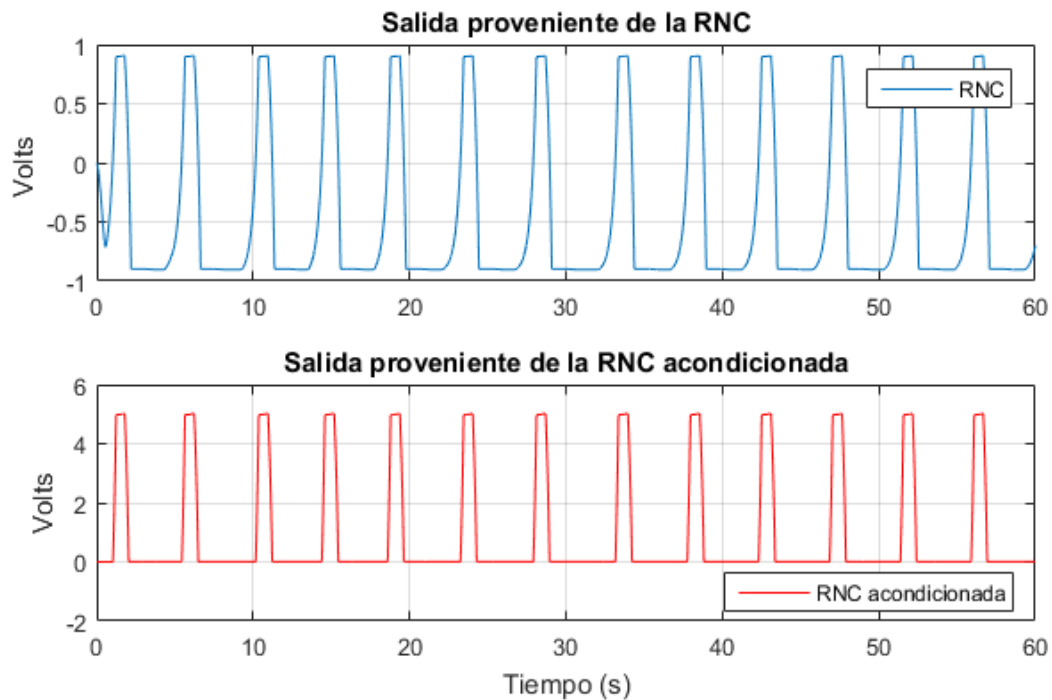


Figura 4- 4: Acondicionamiento de señal para ajuste de un umbral.

La señales provenientes de la RNC fueron amplificadas y recortadas desde su parte negativa para evitar discrepancia entre umbrales establecidos para la parte negativa y positiva, esto es la señal original esta interpolada dentro de una señal nueva con el fin de configurar un solo umbral y hacer más sencilla la verificación de limite.

Este caso expresado por la figura 4-4 sucede para todas las señales proveniente de la RNC, todas se acondicionan de la misma forma para poder efectuar la verificación de límite y poder detectar las fallas y efectuar la acción de protección.

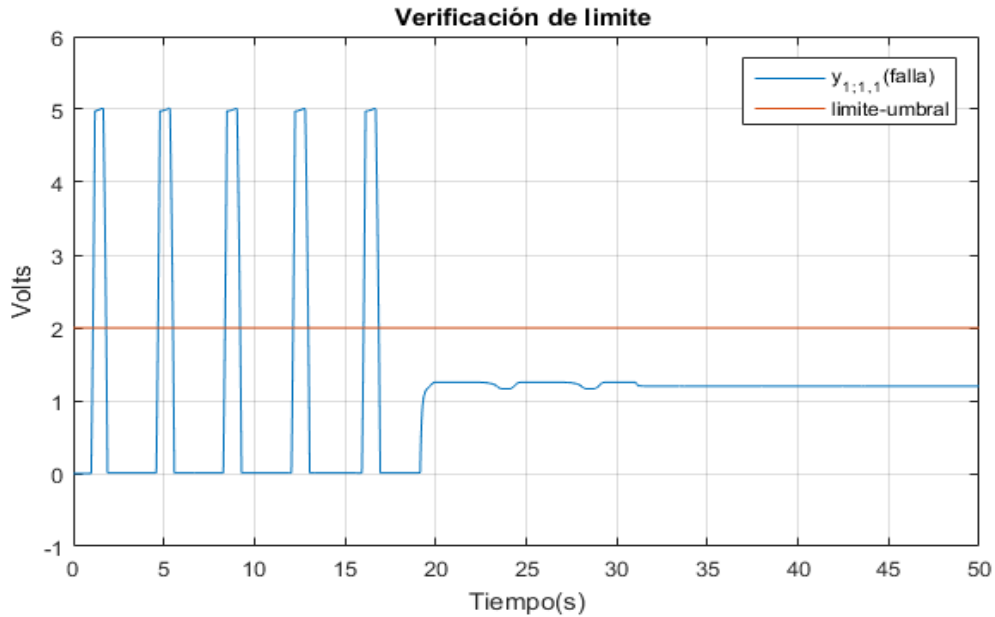


Figura 4- 5: Verificación de límite

Para configurar un umbral en la señal que proviene de la RNC, se le dio un tratamiento a la señal, es decir, se cortó la parte negativa y se amplificó la señal a un valor que oscila dentro de 0v-5v con el objetivo de tener un margen más amplio para trabajar con las señales, en este caso el umbral tiene un valor de 2v, y donde la señal cae por debajo de este valor por un periodo de tiempo superior al cambio de la señal oscilatoria en estado nominal activando la acción de protección correspondiente.

## 4.2.- ESQUEMA DE TOLERANCIA A FALLAS

Existen diferentes enfoques de control tolerante a fallas, para este caso, por sus ventajas técnicas, el enfoque basado en supervisión y gestión de fallas ofrece una solución adecuada.

Como lo indica la literatura, después de una acción de monitoreo se debe realizar una acción de protección adecuada al tipo de falla y que permita llevar al sistema a un estado seguro (Isermann, 2006), para este caso se hacen las siguientes consideraciones:

- Fallas únicas y no simultáneas.
- La falla que se asocia a una de las extremidades no impide el proceso de locomoción con las extremidades restantes.
- El equilibrio está garantizado durante todo el proceso de locomoción.

A su vez la concepción mecánica del robot para la cual es válida este trabajo de investigación incluye que el robot pueda desarrollar los siguientes tipos de locomoción:

- Locomoción con dos piernas de apoyo

- Locomoción con tres piernas de apoyo

Ejemplos de estos tipos de locomoción se encuentran en las figuras 2-6 y 2-7, capítulo 2 de este documento.

De igual forma se consideran los siguientes aspectos con el fin de crear los medios idóneos para que se genere un proceso de locomoción.

- Estabilidad garantizada
- Mecanismos sub-actuados

El objetivo del esquema de tolerancia a fallas será entonces, garantizar en todo momento el proceso de locomoción, esto se llevara a cabo a través de la acción de protección que considera reconfigurar la red neuronal celular, esto es, cambiar sus conexiones automáticamente para producir un patrón de locomoción basado en las extremidades restantes del cuadrúpedo, junto con un número de células determinado, como se muestra en el esquema a bloques de la figura 4-3.

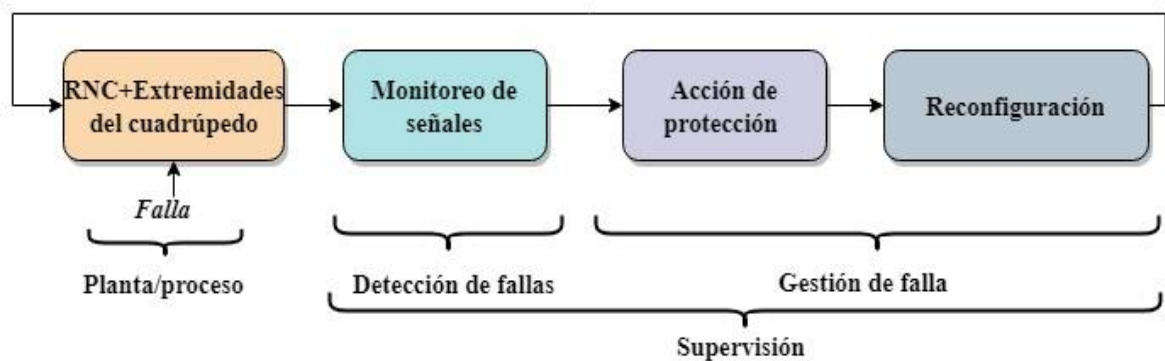


Figura 4- 6: Esquema para la tolerancia a fallas.

#### 4.2.1 EVENTOS DE FALLA

Con el diseño de la red neuronal celular terminado y tomadas las consideraciones de acoplamiento con un cuadrúpedo y las consideraciones de diseño para las cuales es válido este enfoque se analiza el comportamiento del sistema en general bajo la presencia de fallas.

**Evento de falla 1:** El primer evento considera una falla en los elementos internos del circuito de una célula, el estado  $x_1$  de la célula 2 de la red conformado por un filtro RC cambia su resistencia interna, no se consideran acoplamientos con las extremidades del cuadrúpedo. El evento de falla sucede bajo el contexto del caminado del perro dentro del sub-anillo A, como se muestra en la figura 3-7, capítulo 3.

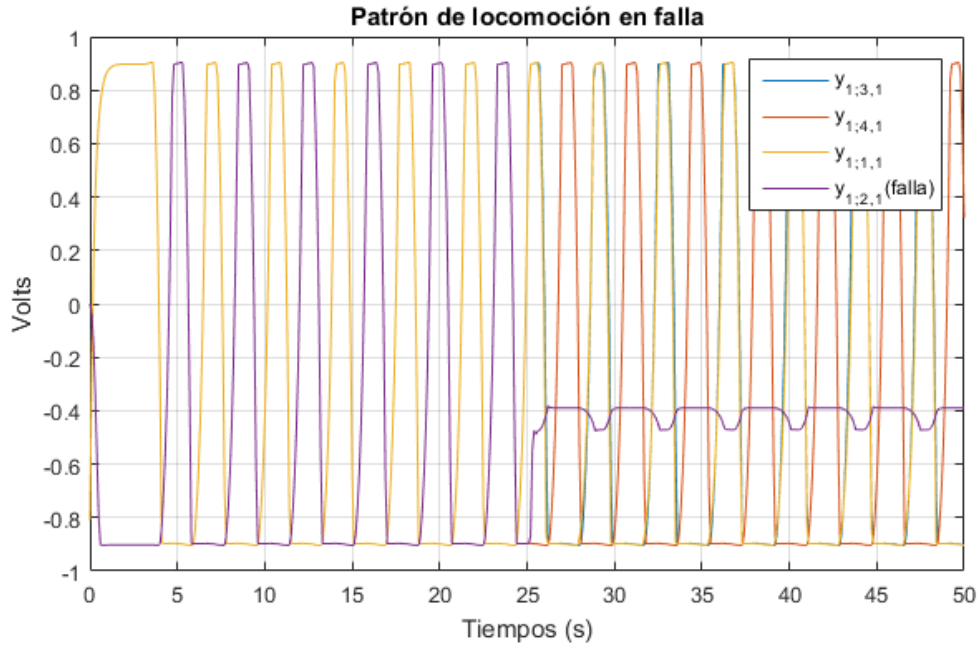


Figura 4- 7: Falla en patrón de locomoción sin acoplamiento.

Donde la figura 4-7 muestra como la falla en la célula 2 repercute en la forma de onda de la salida de la célula, si se tuvieran acoplamiento con las extremidades de un cuadrúpedo es evidente notar que este no podría trasladarse (la extremidad quedaría en la fase de transición), pues se rompe con las características del patrón de locomoción, el esquema de tolerancia a partir de este caso de falla deberá buscar que la red vuelva a construir el mismo patrón que se tenía originariamente.

**Evento de falla 2:** Posteriormente se consideran un evento de falla a partir del acoplamiento de las señales de la red neuronal celular con las extremidades de un robot, esto es se considera que si se pierde una célula se pierde una extremidad, por lo tanto el objetivo será producir un nuevo patrón de locomoción basado en tres extremidades.

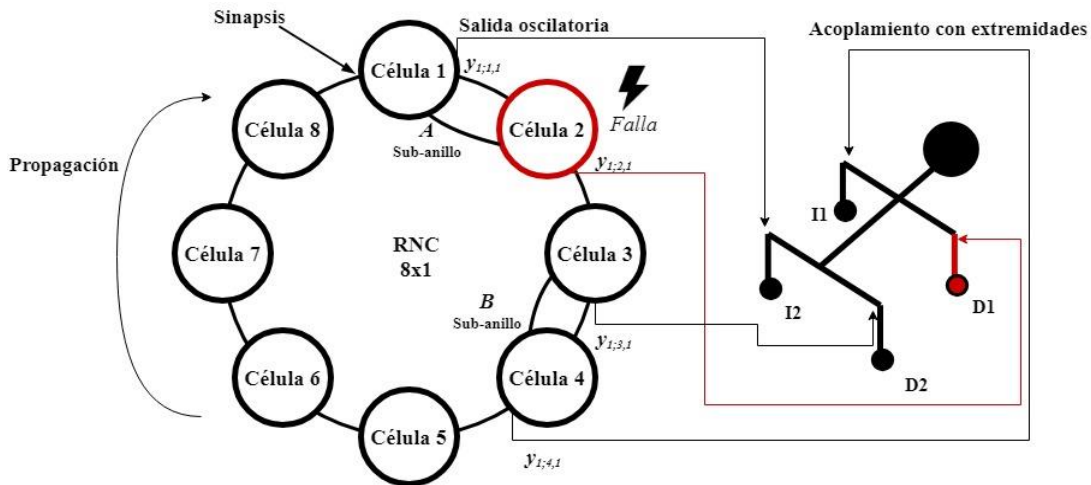


Figura 4- 8: Evento de falla considerando acoplamientos.



La figura 4-8 muestra el acoplamiento de la RNC, la célula 2 en falla afecta el proceso de locomoción, debido a esto la red deberá efectuar la acción de protección correspondiente para producir un patrón de locomoción dejando de lado la célula en falla y utilizar las células vecinas dentro del anillo.

**Evento de falla 3:** El siguiente evento de falla será considerar directamente el actuador que es comandado por las salidas de la RNC, en este caso se considera la falla para la extremidad D1, a partir de mediciones de las corrientes en los actuadores, en este caso motores de corriente directa.

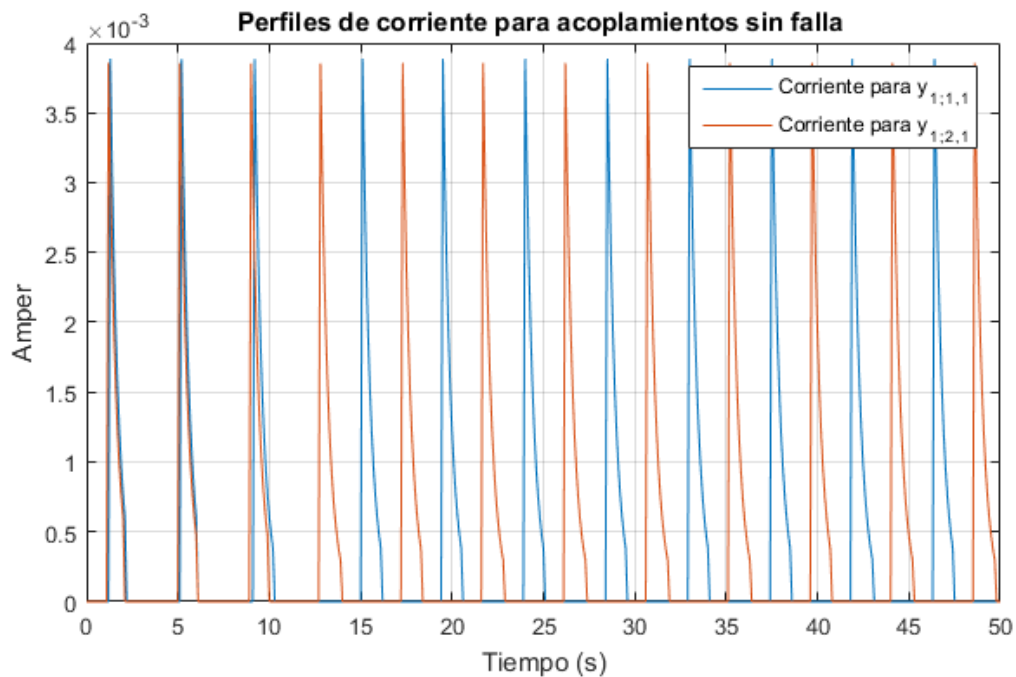
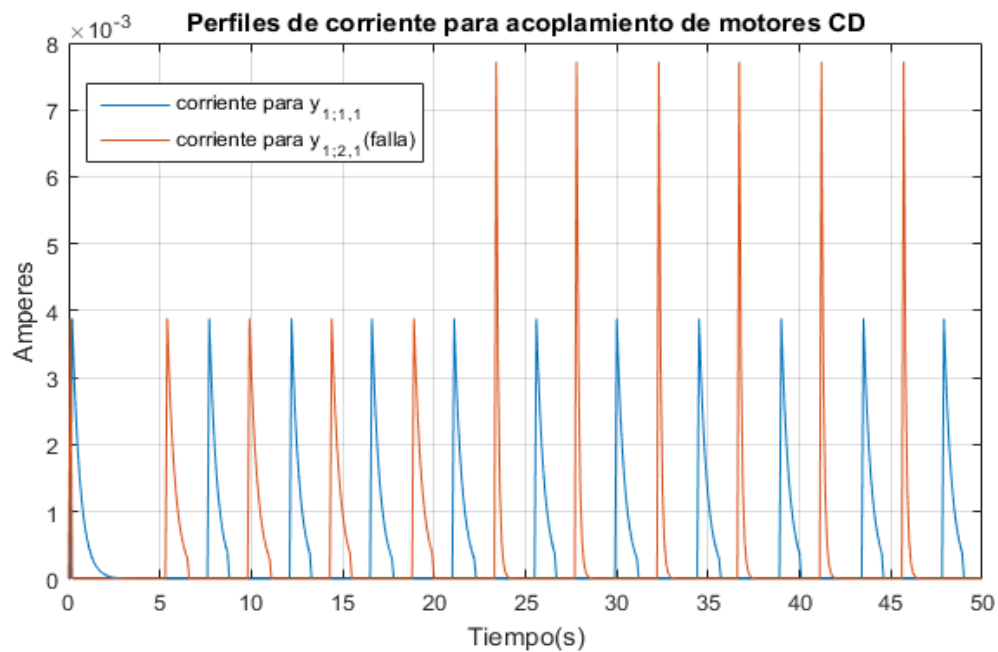


Figura 4- 9: Corriente para acoplamientos en extremidades (I2, D1) sin falla.

Donde la figura 4-9 muestra un comportamiento nominal sin falla, cuya peculiaridad en las corrientes proviene de la oscilación de las señales de referencia provenientes de la red neuronal celular, bajo este contexto es evidente notar que los picos de corriente indican periodos de activación y desactivación de los actuadores, en este caso motores de corriente directa, y donde un comportamiento anormal relacionado con alguna falla se muestra posteriormente en la figura 4-10.

La figura 4-9 muestra el comportamiento de demanda de corriente de un par de motores de corriente directa acoplados al sub-anillo A de la RNC.



**Figura 4- 10: Corriente para acoplamientos con extremidades (I2,D1) con falla.**

La figura 4-10 muestra un comportamiento anormal para los perfiles de corriente de acoplamiento de actuadores, en este caso el acoplamiento se entre el sub-anillo A y un par de motores de corriente directa con las siguientes características:

**Tabla 2: Parámetros de simulación motor CD para acoplamientos.**

Resistencia de armadura	2.5 $\Omega$
Inductancia de armadura	0.00002 H
Inercia del rotor	0.01 g * cm <sup>2</sup>

Los sobre picos de corriente indican comportamientos no deseados, que en este caso son asociados con fallas, por lo tanto es ideal implementar un esquema de tolerancia a fallas, para el desarrollo de esta simulación se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

1° El motor sufre de un bloqueo mecánico, por lo cual el rotor no es capaz de girar.

2° El momento de la falla físicamente se interpreta como un estado alto de la señal de referencia, esto implica que el miembro al cual esta acoplado estará en la etapa de transición, levantado del suelo.

3° Una falla por bloqueo puede desencadenar en roturas del eje del rotor o en los anillos finales debido al estrés mecánico bajo el que se encuentra (Nandi et al, 2005).

### 4.3 GESTIÓN DE FALLAS, ACCIÓN DE RECONFIGURACIÓN

Definidos los distintos casos de falla, el objetivo entonces es ver cómo se comporta el esquema de control tolerante a fallas propuesto basado en la supervisión del proceso de locomoción.

**Gestión de falla 1:** Para el caso del primer evento de falla donde no se consideran acoplamientos con extremidades, el objetivo es que la red neuronal celular continúe con el mismo patrón de señales que producía en su estado de operación nominal.

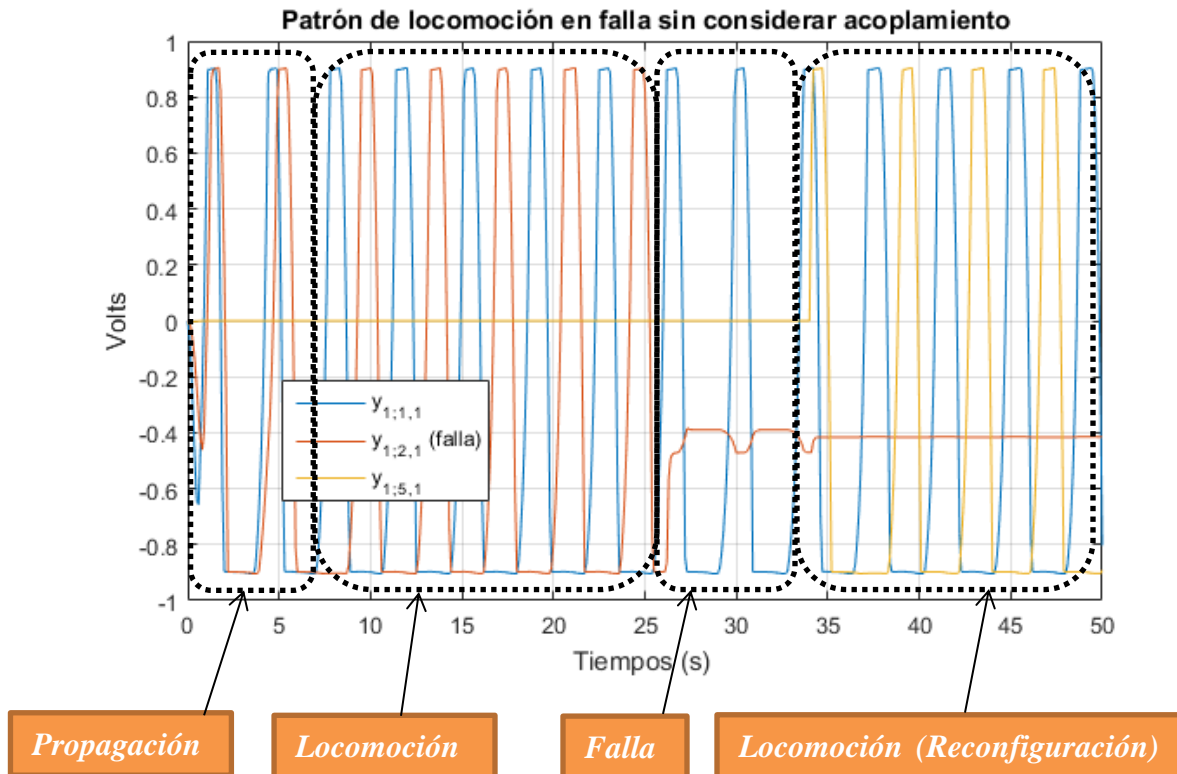


Figura 4- 11: Falla sin acoplamiento con extremidades con reconfiguración.

Donde la figura 4-11 muestra como la variación en los parámetros de la célula 2 afecta la señal de salida  $y_{1;2,1}$ . En específico sucede lo siguiente, durante los primeros segundos se mantiene el patrón de locomoción del perro, en el segundo 26 ocurre la falla y la RNC crea nuevas conexiones, a partir del segundo 35 se hacen presentes nuevas señales  $y_{1;5,1}$ , se pasa nuevamente por un tiempo de propagación para las conexiones recientes y se pasa a recuperar nuevamente el mismo patrón de locomoción que ya se tenía.

La RNC bajo una acción de reconfiguración dejó de lado la célula que presentaba la falla y realizó nuevas conexiones para seguir produciendo el mismo patrón de salida.

**Gestión de falla 2:** El segundo evento de falla considera el acoplamiento de las células con las extremidades, la figura 4-9 muestra un ejemplo de como se ve afectado el caminado del perro por una falla, es evidente notar que el cuadrúpedo no podrá moverse con este patrón, por lo que es esencial que la RNC produzca un patrón en tres extremidades.



Figura 4- 12: Patrón de locomoción con falla.

Tomando en cuenta que la célula en falla esta acoplada al actuador que permite el movimiento de una extremidad del robot, se considera que sí, se pierde la célula se pierde la extremidad, por lo tanto es de interés que la red neuronal celular utilice las demás células que están en buen estado para producir un patrón de locomoción basado en tres extremidades, una reconfiguración de las conexiones entre células se hace presente para compensar la falla y continuar con el proceso de locomoción, como se muestra en las señales de la figura 4-13.

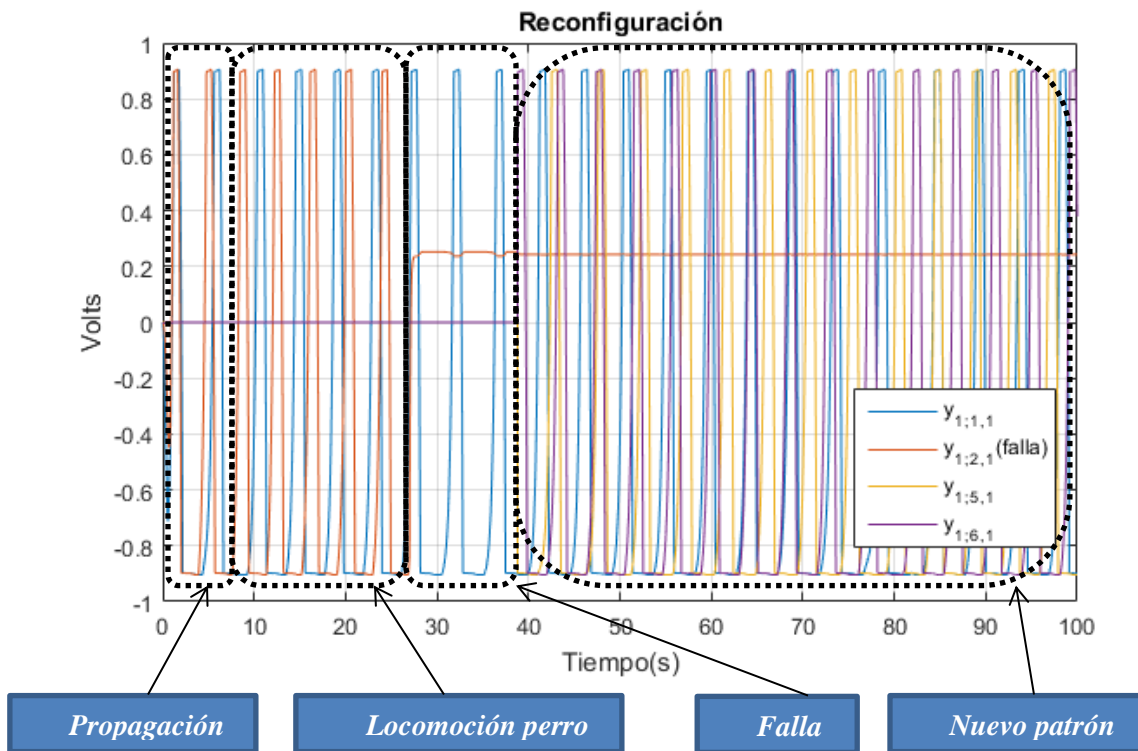


Figura 4- 13: Locomoción a partir de reconfiguración falla en C(2,1).

Durante los primeros segundos se mantiene el patrón de locomoción del perro, en el segundo 27 ocurre la falla y la RNC crea nuevas conexiones, a partir del segundo 43 se hacen presentes nuevas señales  $y_{1;5,1}$  y  $y_{1;6,1}$ , se pasa nuevamente por un tiempo de propagación para las conexiones recientes y se procede a desarrollar un patrón de locomoción basado en tres extremidades, con tres señales presentes que comandaran a los actuadores restantes.

En un periodo de 100 segundos el robot es capaz de mantener el movimiento y seguirse desplazando a pesar de la presencia de alguna falla, donde el caminado propuesto para analizarse mediante un esquema de blancos y negros después de la falla queda de la siguiente forma.

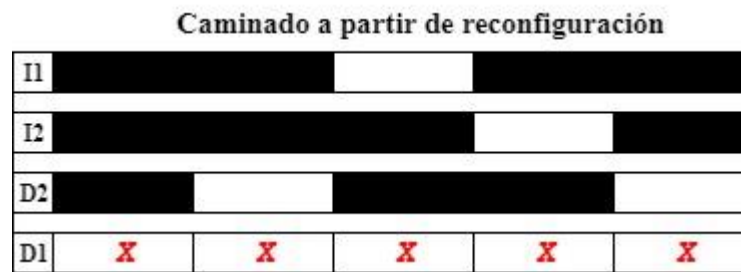


Figura 4- 14: Locomoción después de la falla en C(2,1).

La figura 4-11 muestra el caminado en tres extremidades después de la falla, su principal característica proviene del caminado del elefante el cual consta de mover una extremidad por unidad de tiempo mientras que las demás extremidades están en el suelo, al proponer este tipo de caminado se busca mantener la estabilidad mecánica. La RNC con tolerancia a fallas quedará de la siguiente forma:

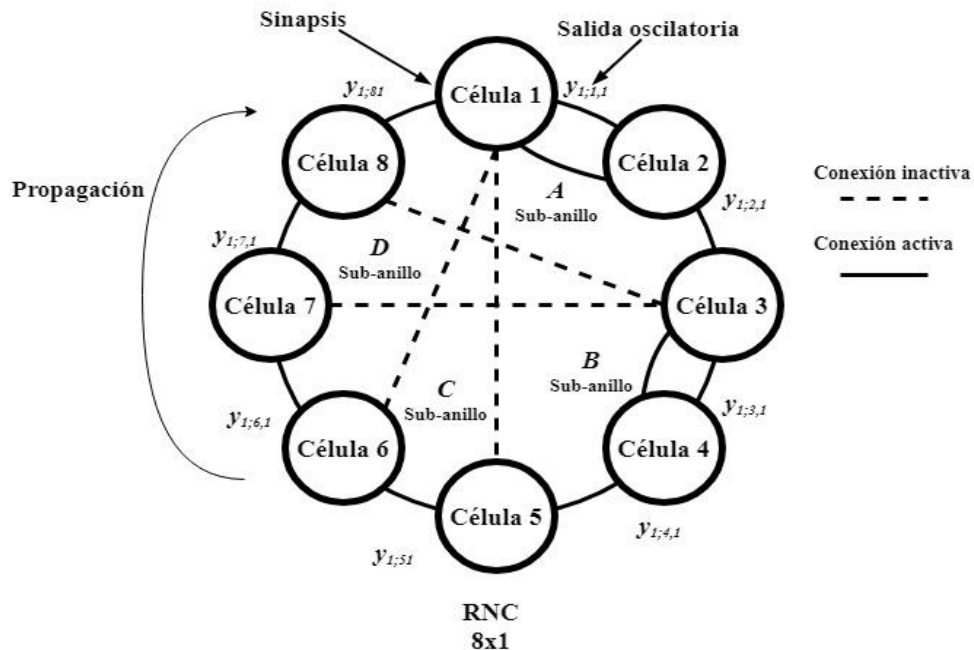


Figura 4- 15: RNC con tolerancia a fallas.

Como se muestra en la figura 4-15 para fallas de aquellas células relacionadas con las extremidades frontales del cuadrúpedo. Las conexiones de los sub-anillos C y D son las que comandaran las extremidades una vez se presenten las fallas. El sub-anillo C entra en conexión para el caso de la figura 4-13, con el fin de compensar la falla y comandar los movimientos de las extremidades del robot a partir del patrón de locomoción del elefante para un caminado en tres extremidades, estos se seleccionaron a voluntad de acuerdo a la cercanía entre células (las combinaciones dentro del anillo se dan a voluntad del diseñador).

De igual forma se realizó otra prueba para una falla en la célula 4, la RNC automáticamente optará por el sub-anillo que represente la mejor opción para continuar con el proceso de locomoción, en este caso la falla sucede en la célula 4 del sub-anillo B, afectando una extremidad delantera, por lo tanto el sub-anillo D será el encargado de comandar el patrón de locomoción.

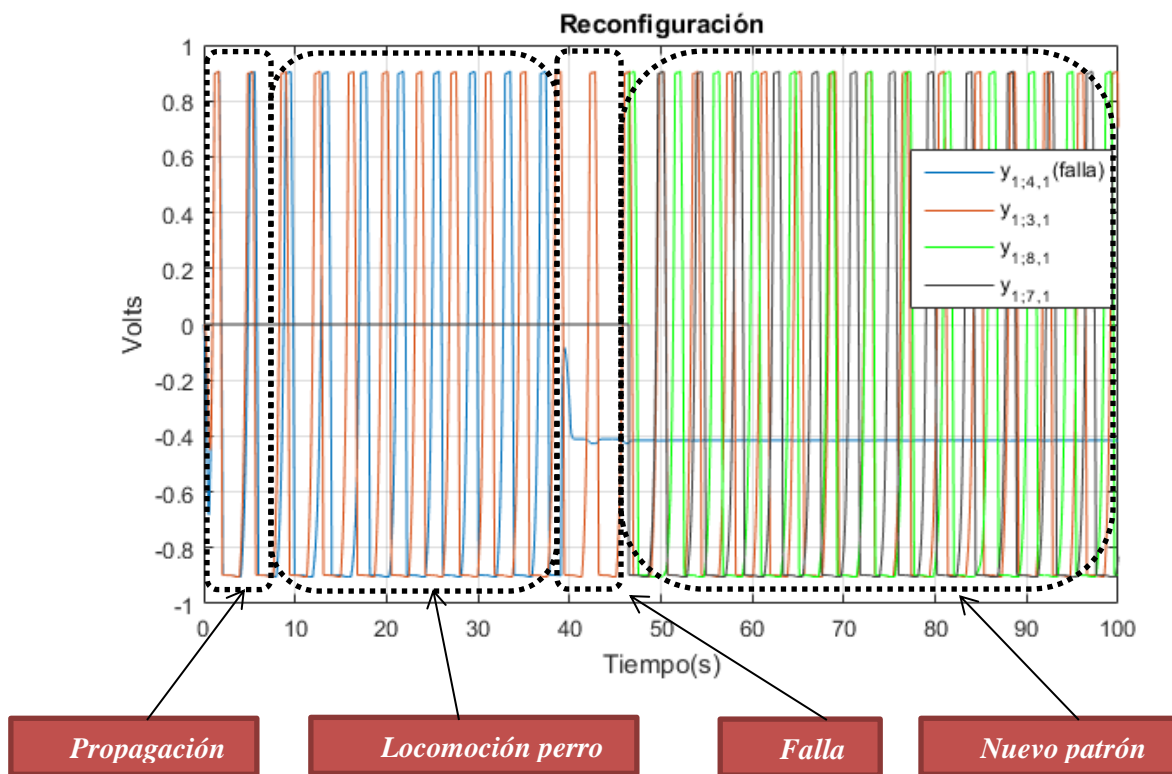


Figura 4- 16: Locomoción a partir de reconfiguración falla en C(4,1).

Se muestra un resultado parecido al de la figura 4-10, la RNC crea nuevas conexiones para compensar la falla y crear un nuevo patrón de locomoción. Hasta este punto la RNC ha sido efectiva para fallas dentro de su estructura y considerando acoplamientos, sin embargo falta abordar el punto de vista de las fallas dentro de un actuador real y como la RNC se comporta.

El caminado para la falla en la célula 4 queda de la siguiente forma:

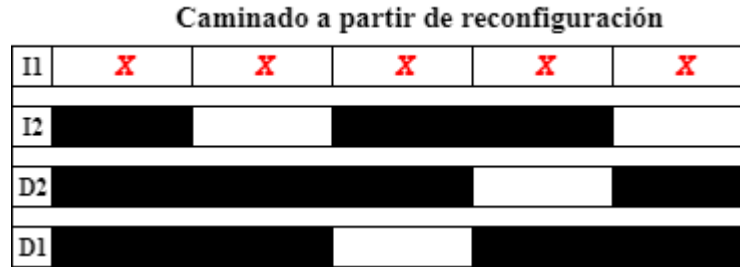


Figura 4- 17: Locomoción después de la falla en C(4,1).

La figura 4-17 muestra el caminado propuesto para la falla descrita por la figura de blancos y negros 4-9, se mantienen las mismas características que con el patrón de la figura 4-11, cuya única diferencia será que la secuencia se da manera inversa.

**Gestión de falla 3:** El evento de falla 3 expone una sobredemanda de corriente debido a un bloqueo que impide al motor girar adecuadamente, es aquí donde el enfoque de control tolerante a fallas aplica una acción de protección, que constará como en los casos anteriores de reconfigurar la RNC para adaptar el patrón original y producir uno nuevo con los actuadores restantes.

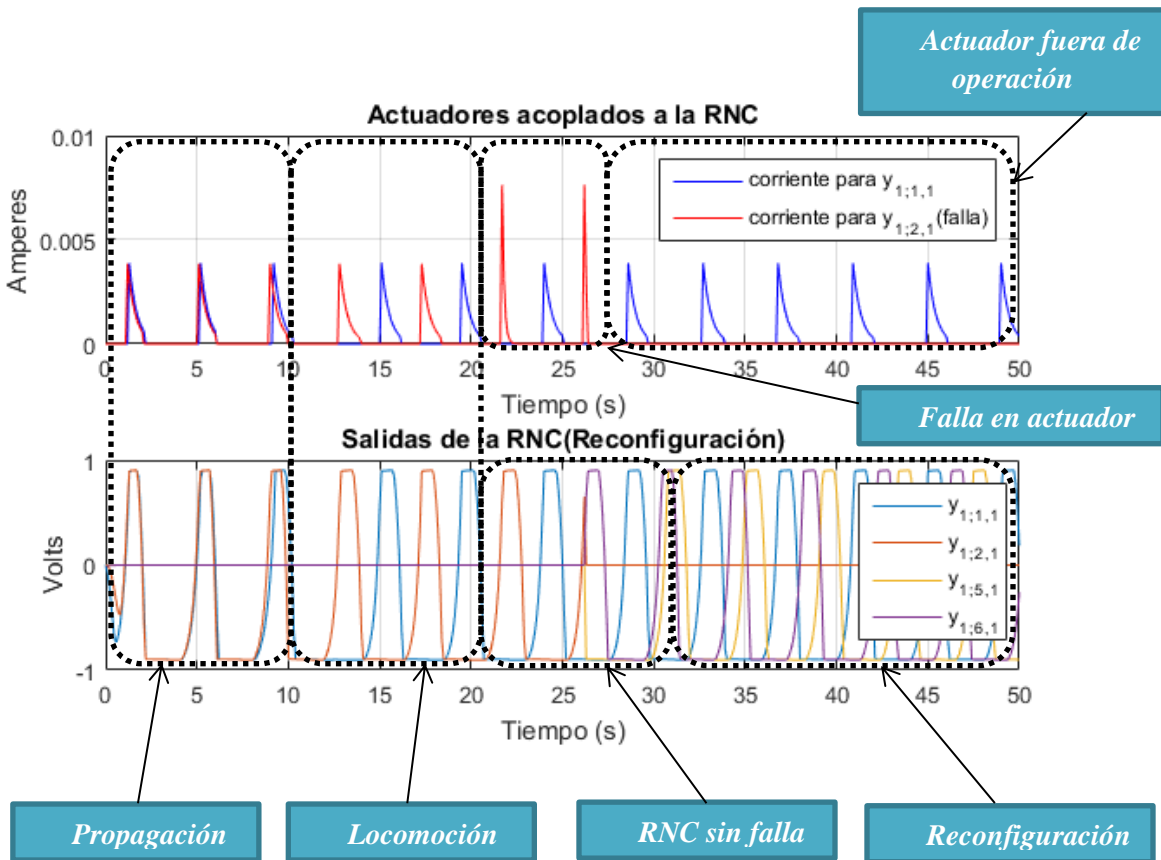


Figura 4- 18: Reconfiguración a partir de falla en actuador.

Durante los primeros segundos para la figura 4-18 se muestra como las señales de la RNC procedentes del sub-anillo A comandan las extremidades del robot, excitando los actuadores, en este caso motores de corriente directa, el evento de falla no sucede en la red, si no en el actuador, durante el segundo 22 un comportamiento anormal que no es deseado se hace presente, por lo que la red se reconfigura creando conexiones con el anillo preseleccionado, inhibiendo la célula acoplada al actuador con falla, debido a esto el actuador sale de operación al deja de recibir señales de excitación proveniente de la RNC.

La RNC crea un patrón basado en tres extremidades para comandar los actuadores restantes. En general el esquema completo de tolerancia a fallas en la red neuronal celular junto acoplamiento de extremidades queda de la siguiente forma:

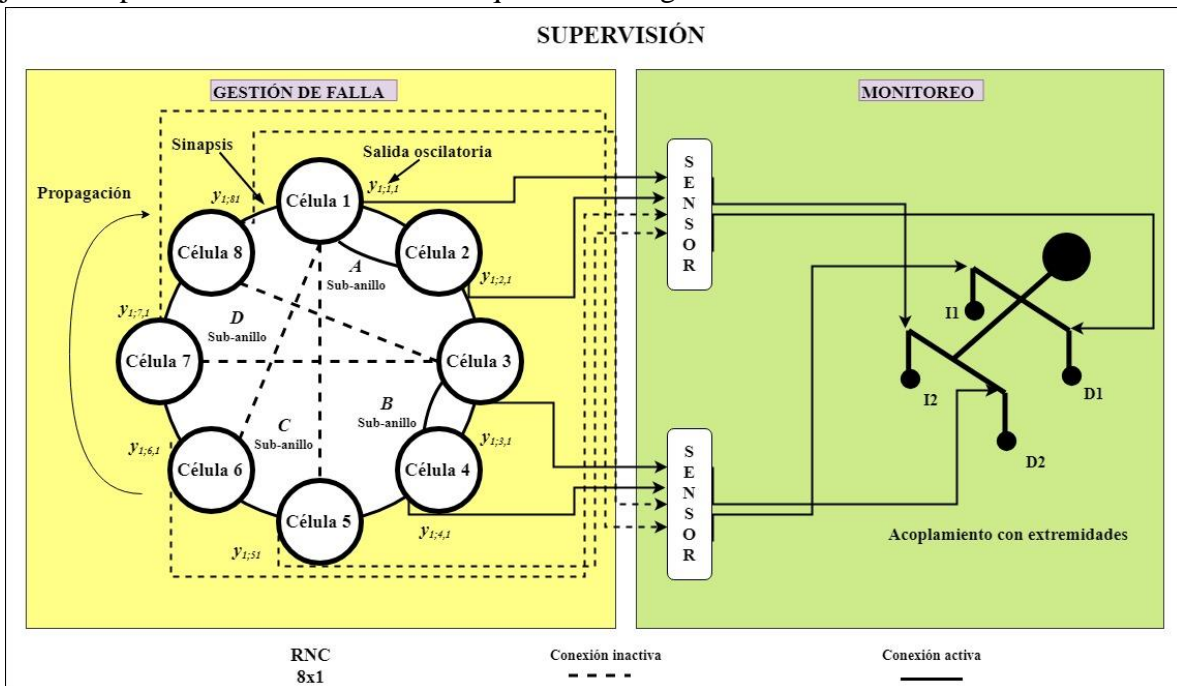


Figura 4- 19: RNC con tolerancia a fallas.

Donde la figura 4-16 muestra cómo se implementa un esquema de tolerancia a fallas basado en supervisión, a partir del monitoreo de las señales presentes en el sistema, corrientes y voltaje los cuales son medidos a través de sensores, y donde se configuró una verificación de límite, cuando las señales salen de los límites permitidos se establece una acción de reconfiguración, esto se da a través del uso de componentes redundantes (células idénticas sustituibles entre sí), esto es, la red crea conexiones nuevas después de la falla.

Los sub-anillos D y C comandaran las extremidades del robot después de la falla, las conexiones inactivas se vuelven activas después del evento de falla, así garantizando la continuidad del proceso de locomoción. Se realizaron pruebas diversas considerando la RNC sin acoplamiento solo con fallas internas, después fallas considerando acoplamiento con las células de la red y posteriormente se analizó el comportamiento de la red cuando la falla se encuentra en un actuador.



# CAPÍTULO 5

---

## 5.- CONCLUSIONES.

Este capítulo introduce las conclusiones pertinentes acerca del diseño de la red neuronal celular, esta proviene de inspiración biológica y se escogió por su capacidad para resolver el problema de locomoción en robots móviles, una herramienta muy útil reportada en diversas investigaciones científicas (L. O. Chua & Roska, 1993)(Peña et al., 2008) junto con el diseño de un esquema de control tolerante a fallas basado en supervisión que busca garantizar la locomoción de un cuadrúpedo a pesar de la presencia de fallas.

Se introducen algunas comparaciones, las aportaciones y se mencionan algunos trabajos futuros con el fin de dar una perspectiva más amplia al lector de la potencialidad del enfoque explotado por este trabajo.

## 5.1.- CONCLUSIONES

Las redes neuronales celulares representan una fuerte herramienta dentro del mundo de la robótica, pues son capaces de imitar artificialmente segmentos del sistema neural de un ser vivo. Estas capacidades encajan perfectamente en cuanto a lo que la robótica bioinspirada engloba, pues su potencial es explotado cuando lo que se requiere es que un robot móvil demuestre las dinámicas de movimiento presentes solo en seres vivos, vertebrados o invertebrados.

Se explotó la capacidad de los amplificadores operacionales como osciladores no lineales para producir salidas rítmicas, iguales a las producidas por las neuronas biológicas presentes en muchos seres vivos produciendo diversos patrones de locomoción. Se agregó el enfoque tolerante a fallas a partir del monitoreo de señales, cuando estas se alejan de su estado normal impiden que el patrón de locomoción original se mantenga, por lo que la red neuronal ante la presencia de estas fallas fue capaz de reconfigurarse. Además, se logró que se produjera un nuevo patrón de locomoción en tres extremidades basado en el caminado del elefante, que consta de una extremidad por ciclo de tiempo.

En general se copia la capacidad de las neuronas biológicas para crear nuevas conexiones de forma automática ante situaciones nuevas y diversas.

El agregar esquemas de control tolerante a fallas a lo que en la literatura se conoce como el problema de locomoción es un gran avance pues ofrece estructuras poco vistas acopladas a las redes neuronales celulares, esto es, la supervisión y gestión de fallas probó ser una herramienta útil, pues conceptualmente se lograron cumplir todos los requisitos que este tipo de esquemas de control tolerante a fallas describe. A final de cuentas se alcanzó el objetivo en nivel simulación de que un robot cuadrúpedo siga en movimiento a pesar de la presencia de alguna falla, esto es fácilmente observable en las salidas de la red neuronal, pues como ya se mencionó antes, las células se asocian con las extremidades, si falla una célula, falla una extremidad y viceversa.

Por lo tanto que la RNC se pueda reconfigurar por si sola cuando detecte una falla, y que esta sea capaz de formar nuevas conexiones con sus células internas, no es más que el mismo proceso cognitivo que sucede en los seres vivos, este es un resultado importante pues se le dota de autonomía a un robot móvil.

## 5.2.- APORTACIONES

La principal aportación por el uso de las redes neuronales celulares tiene que ver con la potencialidad que estas tienen para explotar a los amplificadores operacionales y su capacidad como osciladores, de entre sus principales ventajas destaca las siguientes:

- Baja potencia de consumo.
- Espacio de trabajo reducido.
- Bajos costos.
- Implementación en diseño sencilla.

Estas ventajas tienen que ver principalmente con que otras estructuras que persiguen el mismo fin acerca de garantizar locomoción, se basan bajo el uso de procesadores digitales y algoritmos de control complejos implementados en tarjetas de alto costo. Por su parte el uso de un esquema de control tolerante a fallas basado en la supervisión y la gestión de fallas, se destaca por ser un paso hacia adelante dentro del mundo de la robótica, pues es un enfoque que no se ha aprovechado actualmente acoplándose a las RNC y que no se encuentra reportado en la literatura. Esto es, se unen las ventajas de las RNC para producir locomoción junto con las que ofrece este enfoque de tolerancia a fallas, el cual implica:

- Fácil aplicación.
- Detección de fallas.
- Acciones de corrección ante fallas.
- Desempeño degradado.

La unión de ambos enfoques representa una aportación importante para la ciencia, pues explota lo mejor de dos líneas de investigación diferentes, con el único objetivo de garantizar la continuidad de un proceso y evitar las consecuencias producidas por el detenimiento del mismo.

### 5.3.- COMPARACIONES

Con el fin de dar al lector una visión más amplia del impacto de este trabajo de investigación se presentan los trabajos más importantes que se encuentran dentro de la misma escena científica junto con sus características más importantes.

**Tabla 3: Comparaciones con otros trabajos de investigación.**

TRABAJO/AUTOR	LOCOMOCIÓN	TIPO DE FALLA	ALGORITMO DE CTF
(L. Doñate, Trabajo de tesis, cenidet, 2018)	RNC x 8 celdas analógicas	Fallas internas de la RNC, falla en actuador	Algoritmo de detección de falla y generación de un nuevo de tipo de marcha.
(Bustos, 2011)	RNC x 2 celdas analógicas- Cuadrúpedo	No se contempla	No se contempla
(Paolo Arena & Fortuna, 2002)	RNC x 12 celdas analógicas-Hexápodo	No se contempla	No se contempla
(Ren et al., 2015)	CPG caótico múltiple basado en entrenamiento de RN- Hexápodo(Adaptable a diferentes robots)	Malfuncionamiento en extremidad	El algoritmo permite al robot encontrar automáticamente una combinación adecuada de periodos (frecuencia) para cada extremidad.
(Chen, Gao, Qi, & Tian, 2014)	Se controla a partir de una computadora PC104, 7 módulos A/D, 7 drivers, 12 sensores de desplazamiento, 12 sensores de presión, 1 giroscopio-Cuadrúpedo.	Actuador en falla, reducción del grado de libertad.	Algoritmo para controlar activamente las orientaciones del cuerpo a un nivel de velocidad tal que la trayectoria planeada se pueda realizar a pesar de la reducción del actuador
(Mehul M. Gor et al., 2018)	Generación de marcha a partir de procesadores digitales- Cuadrúpedo	Articulación libre durante el balanceo de la extremidad.	Algoritmo de detección y aislamiento de fallas con generación de una marcha nueva basado en el gateo de un bebé.
(Zhu et al., 2017)	Algoritmo de generación de locomoción arbitraria generado por computadora- Hexápodo.	No se contempla.	No se contempla.

En general se puede concluir que hoy en día sigue habiendo interés por parte de la comunidad científica mundial en cuanto a tópicos relacionados con la locomoción en robots y las distintas formas que existen para dotar a un robot con esta capacidad. Trabajos diversos se basan en el uso de componentes analógicos hasta aplicaciones en procesadores digitales.

## **5.4.-TRABAJOS FUTUROS**

Los trabajos futuros que se contemplan con el fin de obtener nuevos resultados de investigación y también con el objetivo de mejorar la aportación científica son los siguientes:

- Acoplamiento de módulos de detección y aislamiento de fallas para las extremidades del robot.
- Experimentación real en base a la construcción de un robot cuadrúpedo.
- Extensión del algoritmo con pruebas en hexápodos y/o bípedos.
- Generación de locomoción en base a redes neuronales artificiales basadas en entrenamiento.
- Incorporar estrategias que incluyan la planeación de trayectoria con el fin de esquivar objetos.

De igual forma se puede plantear la reducción de la cantidad de celdas analógicas buscando excitar diferentes extremidades con la misma señal de entrada.

## REFERENCIAS

- Aguilar, D., & Vivas, A. (2009). Modelado y control de un robot bípedo de nueve grados de libertad. *VIII Congreso de La Asociación Colombiana*. Retrieved from [http://www.unicauca.edu.co/ai/publicaciones/Aguilar\\_ACA09.pdf](http://www.unicauca.edu.co/ai/publicaciones/Aguilar_ACA09.pdf)[17/05/2018]
- Arena, P., Baglio, S., Fortuna, L., & Manganaro, G. (1998). Self-organization in a two-layer CNN. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 45(2), 157–162. <https://doi.org/10.1109/81.661681>
- Arena, P., Branciforte, M., & Fortuna, L. (1998). CNN-based experimental frame for patterns and autowaves. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 26(6), 635–650. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-007X\(199811/12\)26:6<635::AID-CTA37>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-007X(199811/12)26:6<635::AID-CTA37>3.0.CO;2-U)
- Arena, P., Caponetto, R., Fortuna, L., & Manganaro, C. (1997). Cellular neural networks to explore complexity. *Soft Computing*, 1(3), 120–136. <https://doi.org/10.1007/s005000050013>
- Arena, P., & Fortuna, L. (2000). Collective behaviour in cellular neural networks to model the central pattern generator. *International Journal of Systems Science*, 31(7), 827–841. <https://doi.org/10.1080/002077200406561>
- Arena, P., & Fortuna, L. (2002). Analog Cellular Locomotion Control of Hexapod Robots. *IEEE Control Systems*, 22(6), 21–36. <https://doi.org/10.1109/MCS.2002.1077783>
- Arena, P., Fortuna, L., & Branciforte, M. (1999). Realization of a Reaction-Diffusion CNN Algorithm for Locomotion Control in an Hexapode Robot. *Signal Processing*, 280, 267–280.
- Blanke, Mogens, Michel Kinnaert, J. L. (2006). *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Control (2nd Edition). Berlin, Germany: Springer.
- Bustos, E. S. (2011). *Locomoción de un Robot Cuadrúpedo: Un Enfoque a Celdas Neuronales Analógicas*. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatronica. Centro Nacional de Investigacion y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos.
- Calabrese, R. L. (1995). Oscillation in motor pattern-generating networks. *Current Opinion in Neurobiology*, 5(6), 816–823. [https://doi.org/10.1016/0959-4388\(95\)80111-1](https://doi.org/10.1016/0959-4388(95)80111-1)
- Chen, X., Gao, F., Qi, C., & Tian, X. (2014). Gait planning for a quadruped robot with one faulty actuator. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 28(1), 11–19. <https://doi.org/10.3901/CJME.2014.1107.167>
- Chen, X., Gao, F., Qi, C., Tian, X., & Wei, L. (2015). Kinematic analysis and motion planning of a quadruped robot with partially faulty actuators. *Mechanism and Machine Theory*, 94, 64–79. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2015.05.010>
- Chua, L. O., Hasler, M., Neiryneck, J., & Moschytz, G. S. (1995). Autonomous Cellular Neural Networks: A Unified Paradigm for Pattern Formation and Active Wave Propagation. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 42(10), 559–577. <https://doi.org/10.1109/81.473564>
- Chua, L. O., & Roska, T. (1993). The CNN Paradigm. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 40(3), 147–156. <https://doi.org/10.1109/81.222795>

- Chua, L. O., & Yang, L. (1988). Cellular neural networks: applications. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 35(10), 1273–1290. <https://doi.org/10.1109/31.7601>
- Chua, L. O., & Yang, L. (1988). Cellular neural networks: theory. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 35(10), 1257–1272. <https://doi.org/10.1109/31.7600>
- Cianchetti, M., Mattoli, V., Mazzolai, B., Laschi, C., & Dario, P. (2009). A new design methodology of electrostrictive actuators for bio-inspired robotics. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 142(1), 288–297. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2009.08.039>
- Cohen, A. H., & Wallén, P. (1980). The neuronal correlate of locomotion in fish - “Fictive swimming” induced in an in vitro preparation of the lamprey spinal cord. *Experimental Brain Research*, 41(1), 11–18. <https://doi.org/10.1007/BF00236674>
- Doñate Alcázar, L. A., Vela Valdés, L. G., & Quintero-Mármol Márquez, E. (2018). Control Tolerante a Fallas en la Locomoción Biológicamente Inspirada de un Robot Cuadrúpedo. In *Ira jornada de ciencia y tecnología aplicada* (p. 5). Cuernava, Mor.
- Du, H., & Gao, F. (2016). Fault tolerance properties and motion planning of a six-legged robot with multiple faults. *Robotica*, (April), 1–18. <https://doi.org/10.1017/s0263574716000175>
- Duysens, J. E., & de Crommert, H. W. Van. (1998). Neural Control of Locomotion: The Central Pattern Generator from Cats to Humans. *Gait & Posture*, 7(2), 131–141.
- Eddie, A., Carbo, P., Hernandez, J. L., & Rocha-rangel, E. (2014). *Ingeniería bioinspirada*. OmniaScience. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.3926/oms.235>
- Gor, M. M., Pathak, P. M., Samantaray, A. K., Alam, K., Kumar, P., Anand, D., ... Kwak, S. W. (2018). Development of a compliant legged quadruped robot. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 43(7). <https://doi.org/10.1007/s12046-018-0918-7>
- Gor, M. M., Pathak, P. M., Samantaray, A. K., Yang, J. M., & Kwak, S. W. (2018). Fault-tolerant control of a compliant legged quadruped robot for free swinging failure. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 232(2), 161–177. <https://doi.org/10.1177/0959651817743410>
- Isermann, R. (2006). *Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*. *Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*. <https://doi.org/10.1007/3-540-30368-5>
- Isermann, R. (2013). *Fault-Diagnosis-Applications-Model-Based-Condition-Monitoring-Actuators-Drives-Machinery-Plants-Sensors-and-Fault-tolerant-Systems*. *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Kim, S., Laschi, C., & Trimmer, B. (2013). Soft robotics: A bioinspired evolution in robotics. *Trends in Biotechnology*, 31(5), 287–294. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2013.03.002>
- Kitano, H. (1998). Development of an Autonomous Quadruped Robot. *Autonomus Robots*, 18, 7–18.
- Lee, Y., & Hirose, S. (2012). Three-legged walking for fault-tolerant locomotion of demining quadruped robots. *Advanced Robotics*, 16, No. 5(October 2013), 37–41. <https://doi.org/10.1163/15685530260182918>

- MacKay-Lyons, et al. (2002). Central Pattern Generation of Locomotion: A review of the Evidence. *Physical Therapy*, 82(1), 69–83. Retrieved from [http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=PubMed&dopt=Citation&list\\_uids=11784280](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=PubMed&dopt=Citation&list_uids=11784280)[15/06/2018]
- Mattia, F., Fortuna, L., & Arena, P. (2004). BIO -INSPIRED EMERGENT CONTROL OF LOCOMOTION SYSTEMS. *World Scientific Series On Nonlinear Science*, 48.
- Murray, J. D. (2004). *Mathematical Biology: I: An Introduction. Third Edition. Interdisciplinary Applied Mathematics* (Vol. 79). <https://doi.org/10.1086/421587>
- Nandi, S., Toliyat, H. A., & Li, X. (2005). Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors - A review. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20(4), 719–729. <https://doi.org/10.1109/TEC.2005.847955>
- Noura Hassan, Theilliol Didier, Ponsart Jean-Christophe, C. A. (2009). *Fault Tolerant Control Systems: Desing and Practical Applications* (Springer-V). LONDON,ENGLAND: Advances in indsutrial control.
- Ollero, A. (2001). *ROBÓTICA: Manipuladores y Robots Móviles. Robotica Manipuladores y robots moviles*. Sevilla, España: Marcombo editores.
- Peña, E. M., Melchor, W., Rosado, A., Vicente, G., Ramírez, G., Gerardo, L., & Valdés, V. (2008). Control de un robot usando redes neuronales analógicas. In *Memorias del Congreso Nacional de Control Automático*.
- Pérez Machorro, J. (2009). “Generación de locomoción de un robot hexápodo usando dos células neuronales analógicas.” *Tesis de Maestría En Ciencias En Ingeniería Mecatronica*. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Mor.
- Pfeifer, R., Lungarella, M., & Lida, F. (2007). Self-organization, embodiment, and biologically inspired robotics. *Science*, 318(5853), 1088–1093. <https://doi.org/10.1126/science.1145803>
- Ren, G., Chen, W., Dasgupta, S., Kolodziejcki, C., Wörgötter, F., & Manoonpong, P. (2015). Multiple chaotic central pattern generators with learning for legged locomotion and malfunction compensation. *Information Sciences*, 294, 666–682. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.05.001>
- Righetti, L., & Ijspeert, A. J. (2008). Pattern generators with sensory feedback for the control of quadruped locomotion. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 819–824. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2008.4543306>
- Robert L. Boylestad, L. N. (1995). *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos* (Octava edición). PRENTICE HALL, INC.
- Sieghart, R., & Nourbakhsh, I. R. (2004). Introduction to autonomus mobile robots. In *Introduction to autonomus mobile robots* (p. 337). LONDON,ENGLAND: The MIT press.
- Silva Ortigoza, R., García Sánchez, J. R., Barrientos Sotelo, V. R., & Molina Vilchis, M. A. (2007). Una Panorámica De Los Robots Móviles. *Revista Electrónica de Estudios Telemáticos*, 6(3), 208–222.
- Soto, J. E. V. (1994). *Diseño y Realizacion de Algoritmos de Locomoción Libre para Robots Caminantes de Cuatro Patas*. Complutense de Madrid.



- Stein, P. S. G. (1978). Motor Systems, with specific reference to the control of locomotion. *Annual Reviews Neuroscience*, 61–81. Retrieved from [www.annualreviews.org](http://www.annualreviews.org)[01/03/2018]
- Torres, A. P. (2015). Estudio de la locomoción de un robot cuadrúpedo mediante la generación de patrones biológicos. Retrieved from <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/3803> [05/06/2018]
- Tran, D. T., Koo, I. M., Lee, Y. H., Moon, H., Park, S., Koo, J. C., & Choi, H. R. (2014). Central pattern generator based reflexive control of quadruped walking robots using a recurrent neural network. *Robotics and Autonomous Systems*, 62(10), 1497–1516. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2014.05.011>
- Wang, C., Zhang, T., Wei, X., Long, Y., & Wang, S. (2017). Bio-inspired control strategy study for the quadruped robot with a segmented spine. *Industrial Robot*, 44(1), 85–93. <https://doi.org/10.1108/IR-05-2016-0149>
- Wikstrom, E. A., Tillman, M. D., Smith, A. N., & Borsa, P. A. (2005). A new force-plate technology measure of dynamic postural stability: The dynamic postural stability index. *Journal of Athletic Training*, 40(4), 305–309. <https://doi.org/10.1038/nbt1094>
- Wolpert, S. O. F. W. (2000). A Silicon Model of the Hirudo Swim Oscillator. *Engineering in Medicine and Biology*, 64/75.
- Wu, D., & Tan, W. (2005). A Comparison of Several Hardware-Realized Central Pattern Generators (CPGs). *Department of Electrical and Computer Engineering, National University of Singapore*, (January), 1–23. Retrieved from [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=5290482%5Cnhttp://www-scf.usc.edu/~dongruiw/files/CPG.pdf](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5290482%5Cnhttp://www-scf.usc.edu/~dongruiw/files/CPG.pdf)[13/04/018]
- Zhu, Y., Guo, T., Liu, Q., Li, Q. R., & Yan, R. (2017). A study of arbitrary gait pattern generation for turning of a bio-inspired hexapod robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 97, 125–135. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2017.08.012>

## ANEXOS

### ANEXO A (MODELO MATEMÁTICO EXTENDIDO DE LA RNC)

Las ecuaciones 3.3, 3.4 y 3.5 representan el modelo generalizado de la RNC, las cuales pueden desglosarse en un total de 24 ecuaciones para poder representar toda la dinámica de la red neuronal celular en configuración anillo con una dimensión de  $8 \times 1$ .

Donde cada trio de ecuaciones representa por posición a cada una de las células y donde los términos a la derecha de los coeficientes de difusión que, imitan las plataformas químicas por los cuales se establece el medio para la comunicación entre un conjunto de neuronas biológicas, establecen las relaciones que existen entre las células, es la relación con la salida de la célula anterior más la relación con la salida de la célula posterior.

$$\dot{x}_{1;8,1} = -x_{1;8,1} + (1 + \mu + \varepsilon)y_{1;8,1} - sy_{2;8,1} + i_1 + D_1(y_{1;8-1,1} - 2y_{1;8,1} + y_{1;8+1,1}) \quad (\text{A.1})$$

$$\dot{x}_{2;8,1} = -x_{2;8,1} + s_2y_{1;8,1} + (1 + \mu - \varepsilon)y_{2;8,1} + i_2 + D_2(y_{2;8-1,1} - 2y_{2;8,1} + y_{2;8+1,1}) \quad (\text{A.2})$$

$$y_{1;8,1} = 0.5(|x_{1;8,1} + 1| - |x_{2;8,1} - 1|) \quad (\text{A.3})$$

$$\dot{x}_{1;7,1} = -x_{1;7,1} + (1 + \mu + \varepsilon)y_{1;7,1} - sy_{2;7,1} + i_1 + D_1(y_{1;7-1,1} - 2y_{1;7,1} + y_{1;7+1,1}) \quad (\text{A.4})$$

$$\dot{x}_{2;7,1} = -x_{2;7,1} + s_2y_{1;7,1} + (1 + \mu - \varepsilon)y_{2;7,1} + i_2 + D_2(y_{2;7-1,1} - 2y_{2;7,1} + y_{2;7+1,1}) \quad (\text{A.5})$$

$$y_{1;7,1} = 0.5(|x_{1;7,1} + 1| - |x_{2;7,1} - 1|) \quad (\text{A.6})$$

$$\dot{x}_{1;6,1} = -x_{1;6,1} + (1 + \mu + \varepsilon)y_{1;6,1} - sy_{2;6,1} + i_1 + D_1(y_{1;6-1,1} - 2y_{1;6,1} + y_{1;6+1,1}) \quad (\text{A.7})$$

$$\dot{x}_{2;6,1} = -x_{2;6,1} + s_2y_{1;6,1} + (1 + \mu - \varepsilon)y_{2;6,1} + i_2 + D_2(y_{2;6-1,1} - 2y_{2;6,1} + y_{2;6+1,1}) \quad (\text{A.8})$$

$$y_{1;6,1} = 0.5(|x_{1;6,1} + 1| - |x_{2;6,1} - 1|) \quad (\text{A.9})$$

$$\dot{x}_{1;5,1} = -x_{1;5,1} + (1 + \mu + \varepsilon)y_{1;5,1} - sy_{2;5,1} + i_1 + D_1(y_{1;5-1,1} - 2y_{1;5,1} + y_{1;5+1,1}) \quad (\text{A.10})$$

$$\dot{x}_{2;5,1} = -x_{2;5,1} + s_2y_{1;5,1} + (1 + \mu - \varepsilon)y_{2;5,1} + i_2 + D_2(y_{2;5-1,1} - 2y_{2;5,1} + y_{2;5+1,1}) \quad (\text{A.11})$$

$$y_{1;5,1} = 0.5(|x_{1;5,1} + 1| - |x_{2;5,1} - 1|) \quad (\text{A.12})$$

$$\dot{x}_{1;4,1} = -x_{1;4,1} + (1 + \mu + \varepsilon)y_{1;4,1} - sy_{2;4,1} + i_1 + D_1(y_{1;4-1,1} - 2y_{1;4,1} + y_{1;4+1,1}) \quad (\text{A.13})$$

$$\dot{x}_{2;4,1} = -x_{2;4,1} + s_2y_{1;4,1} + (1 + \mu - \varepsilon)y_{2;4,1} + i_2 + D_2(y_{2;4-1,1} - 2y_{2;4,1} + y_{2;4+1,1}) \quad (\text{A.14})$$

$$y_{1;4,1} = 0.5(|x_{1;4,1} + 1| - |x_{2;4,1} - 1|) \quad (\text{A.15})$$

$$\dot{x}_{1;3,1} = -x_{1;3,1} + (1 + \mu + \varepsilon)y_{1;3,1} - sy_{2;3,1} + i_1 + D_1(y_{1;3-1,1} - 2y_{1;3,1} + y_{1;3+1,1}) \quad (\text{A.16})$$

$$\dot{x}_{2;3,1} = -x_{2;3,1} + s_2 y_{1;3,1} + (1 + \mu - \varepsilon)y_{2;3,1} + i_2 + D_2(y_{2;3-1,1} - 2y_{2;3,1} + y_{2;3+1,1}) \quad (\text{A.17})$$

$$y_{1;3,1} = 0.5(|x_{1;3,1} + 1| - |x_{2;3,1} - 1|) \quad (\text{A.18})$$

$$\dot{x}_{1;2,1} = -x_{1;2,1} + (1 + \mu + \varepsilon)y_{1;2,1} - s y_{2;2,1} + i_1 + D_1(y_{1;2-1,1} - 2y_{1;2,1} + y_{1;2+1,1}) \quad (\text{A.19})$$

$$\dot{x}_{2;2,1} = -x_{2;2,1} + s_2 y_{1;2,1} + (1 + \mu - \varepsilon)y_{2;2,1} + i_2 + D_2(y_{2;2-1,1} - 2y_{2;2,1} + y_{2;2+1,1}) \quad (\text{A.20})$$

$$y_{1;2,1} = 0.5(|x_{1;2,1} + 1| - |x_{2;2,1} - 1|) \quad (\text{A.21})$$

$$\dot{x}_{1;1,1} = -x_{1;1,1} + (1 + \mu + \varepsilon)y_{1;1,1} - s y_{2;1,1} + i_1 + D_1(y_{1;1-1,1} - 2y_{1;1,1} + y_{1;1+1,1}) \quad (\text{A.22})$$

$$\dot{x}_{2;1,1} = -x_{2;1,1} + s_2 y_{1;1,1} + (1 + \mu - \varepsilon)y_{2;1,1} + i_2 + D_2(y_{2;1-1,1} - 2y_{2;1,1} + y_{2;1+1,1}) \quad (\text{A.23})$$

$$y_{1;1,1} = 0.5(|x_{1;1,1} + 1| - |x_{2;1,1} - 1|) \quad (\text{A.24})$$

## ANEXO B (AMPLIFICADORES OPERACIONALES)

**Amplificador diferencial:** El diferenciador ofrece una relación útil, donde la ecuación resultante para el circuito es:

$$V_o(t) = -RC \frac{dv_1(t)}{dt} \quad (\text{B.1})$$

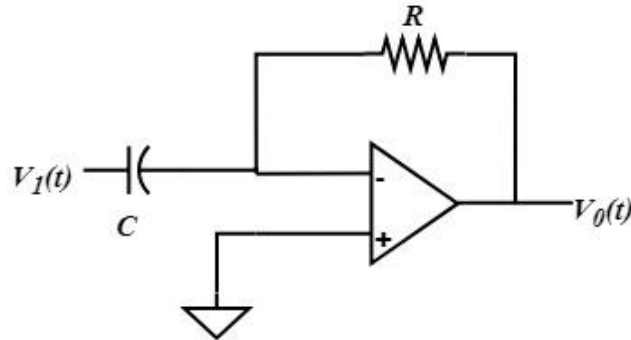


Figura B- 1: Amplificador diferencial.

La figura B-1 muestra la configuración de un circuito diferencial, es común encontrar este tipo de circuitos en instrumentación o en aplicaciones industriales.

**Amplificador inversor:** El circuito amplificador con ganancia constante que se utiliza más comúnmente es el amplificador inversor.

$$V_o = -\frac{R_f}{R_1} V_1 \quad (\text{B.2})$$

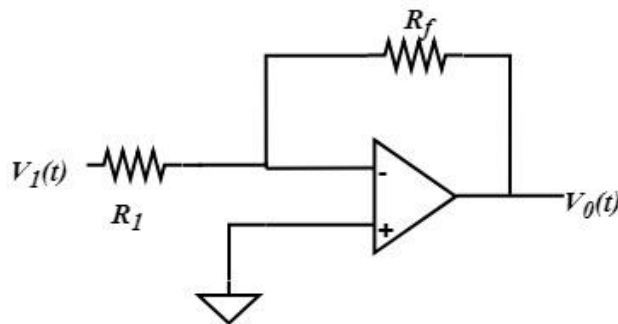


Figura B- 2: Amplificador inversor.

La salida se obtiene al multiplicar la entrada por una ganancia fija o constante, establecida por el resistor de entrada ( $R_1$ ) y por el resistor de retroalimentación ( $R_f$ ) (esta salida también se invierte a partir de la entrada).

**Amplificador no inversor:** La conexión del amplificador inversor es generalmente la más utilizada, ya que cuenta con una mejor estabilidad de frecuencia.

$$V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_f} V_o \quad (\text{B.3})$$

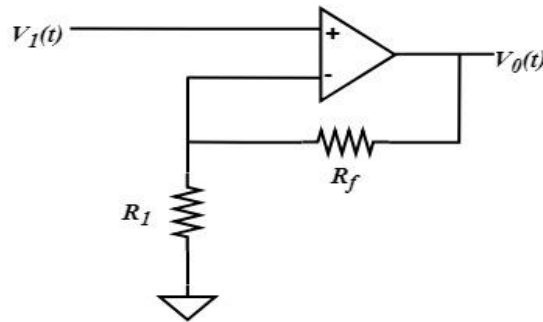


Figura B- 3: Amplificador no inversor.

En esta configuración de la figura B-3 se asume que la corriente en la terminal inversora es cero, de tal forma que el voltaje entre la terminal inversora y no inversa es cero, por este motivo la corriente que pasa por  $R_f$  es igual que la corriente que pasa por  $R_1$ .

**Sumador no inversor:** El amplificador sumador proporciona un medio para la suma de tres voltajes, cada uno multiplicado por un factor de ganancia constante.

$$V_o = \frac{R_f}{R_1} V_1 + \frac{R_f}{R_2} V_2 + \frac{R_f}{R_3} V_3 \quad (\text{B.4})$$

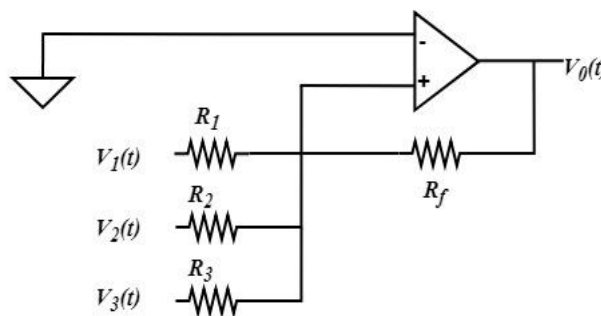


Figura B- 4: Amplificador sumador no inversor.

En otras palabras, cada entrada suma un voltaje a la salida multiplicada por su multiplicador de ganancia constante separado. Si se utilizan más entradas, cada una de ellas añadirá un componente adicional a la salida (Robert L. Boylestad, 1995).

## ANEXO C (PROPIEDADES EMERGENTES)

La robustez intrínseca del fenómeno oscilatorio da lugar a propiedades emergentes no esperadas. Uno podría pensar que la configuración de la red neuronal es sensible a fallas en los circuitos, es decir, una división, un corte en el circuito o daño a alguna célula podría destruir la propagación de las ondas. Este no es exactamente el caso, en realidad solo se pierde el ritmo de locomoción en el sentido del tipo de marcha, esto es, el tiempo final de cada ciclo y el comienzo del siguiente puede variar. Debido a su diversidad, cada célula desconectada oscilara con su propio periodo.

La conexión de anillo que se logra a partir de la plataforma de difusión, sincroniza todos los osciladores a un solo ritmo. Cuando el anillo es afectado por fallas, este ritmo de oscilación es más o menos afectado. Otro fenómeno detectado es que se pueden presentar ondas o patrones oscilatorios falsos, es decir, la red neuronal celular normalmente es exitosa al producir patrones de locomoción, pero el orden de propagación de las ondas cuando el anillo está intacto es perdido (P. Arena & Fortuna, 2002).

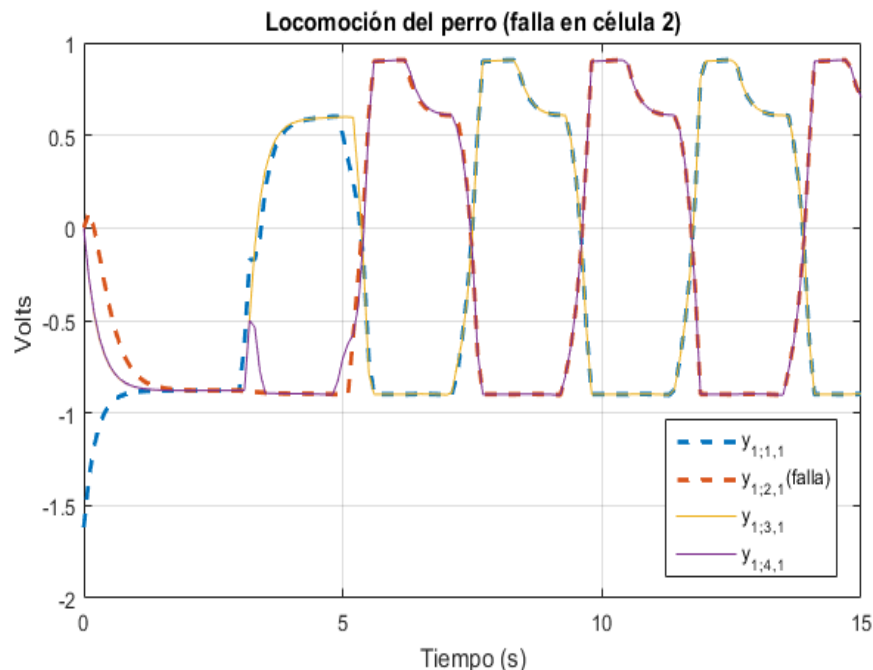
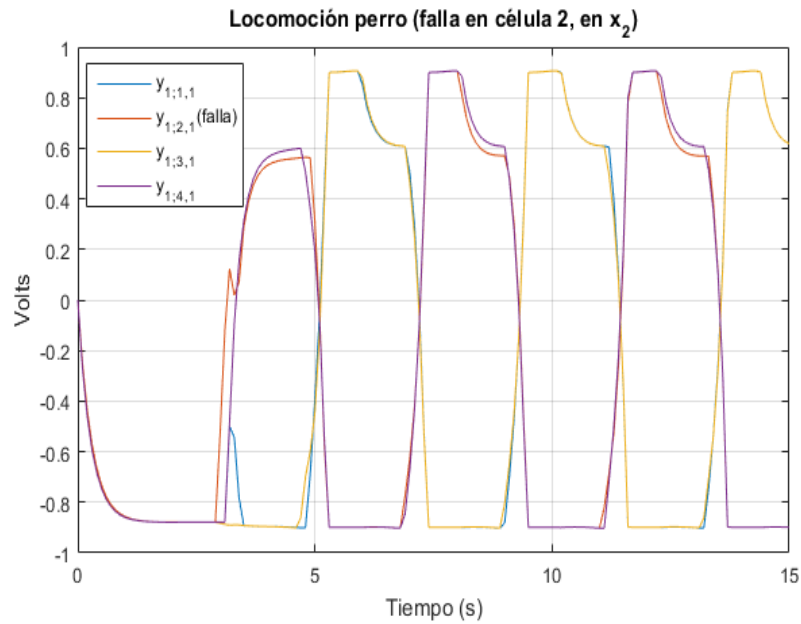


Figura C- 1: Robustez intrínseca para una falla en célula 2.

La figura C-1 muestra el resultado de un cambio en el valor de resistencia en la célula 2, es decir la señal de entrada de la célula se multiplica por un factor de 100KΩ desde el inicio de la simulación provocando que los valores de la señal oscilaran cerca de los +/- 1.5 volts durante el tiempo de propagación de las señales, sin embargo la red neuronal fue capaz por si misma de compensar esa falla y seguir produciendo el patrón de locomoción del perro.

Posteriormente se realiza una prueba para una variación de los parámetros dentro del estado  $x_2$  de la célula 2.



**Figura C- 2: Robustez intrínseca para una falla en X2 de la célula 2.**

La figura C-2 muestra otro ejemplo de robustez intrínseca para variaciones en los parámetros del estado  $x_2$  compuesto por un filtro RC, en este caso tal variación provocó un pequeño desfase entre las señales, sin embargo el patrón de locomoción se mantuvo reconocible y sigue siendo igualmente utilizable.