

SISTEMA DE MONITOREO RF Y CONTROL DE FRENO DE UN AEROGENERADOR LUCAS-NÜLLE DE 370 WATTS

Rosales López Rosendo, Rosales Ruiz María de los Ángeles, Mateos Mendoza Carlos Alberto

Instituto Tecnológico de Salina Cruz, Departamento Eléctrica-Electrónica

Salina Cruz, Oaxaca, México

rosales_oaxaca2024@hotmail.com

angelesitsal15@gmail.com

carlos.mm@salinacruz.tecnm.mx

RESUMEN.

En este estudio se describe el desarrollo de un sistema de monitoreo y control de freno para el aerogenerador Lucas-Nülle de 370 watts, haciendo uso del módulo NRF24L01. El objetivo consiste en la implementación de un sistema para supervisar y regular el rendimiento del aerogenerador. El control desempeña un papel importante al actuar como un dispositivo de seguridad electrónico para el frenado automático en condiciones de velocidades altas de viento, salvaguardando así al aerogenerador de posibles daños de esfuerzos mecánicos. Se aprovecha la tecnología de comunicación inalámbrica NRF24L01 para la transmisión de datos, como la velocidad del viento y el voltaje generado. Adicionalmente, se ha diseñado una interfaz de usuario utilizando LabVIEW, el enfoque proporciona una mayor visibilidad en la operación de generación de energía y una capacidad de intervención en el control, mejorando significativamente la eficiencia y del sistema en su conjunto.

Palabras Clave: aerogenerador, voltaje, control, RF.

ABSTRACT.

This study describes the development of a brake monitoring and control system for the 370 Watts Lucas-Nülle wind turbine, utilizing the NRF24L01 module. The objective is to implement a system to monitor and regulate the wind turbine's performance. The control system plays a crucial role by acting as an electronic safety device for automatic braking under high wind speed conditions, thereby safeguarding the wind turbine from potential mechanical stress damage. The NRF24L01 wireless communication technology is leveraged for data transmission, such as wind speed and generated voltage. Additionally, a user interface has been designed using LabVIEW, providing greater visibility into the power generation operation and intervention capability in control, significantly enhancing the overall efficiency and system performance.

Keywords: wind turbine, voltage, control, RF.

1. INTRODUCCIÓN

Los aerogeneradores de baja potencia en la actualidad son una solución viable y sostenible para la generación de energía en aplicaciones domésticas y áreas remotas de difícil acceso para la electrificación convencional.

En este artículo de investigación se estudia la realización de un sistema de frenado de cortocircuito entre las bobinas del

generador de la turbina eólica, enviando la señal de disparo por radiofrecuencia, con el módulo NRF24L01, propiciando a una mayor durabilidad de los elementos del sistema. La energía eólica se ha consolidado como una de las fuentes de energía renovable más importantes y prometedoras en el mundo actual.

2. DESARROLLO

2.1. Generalidades de los aerogeneradores de baja potencia.

La energía eólica se ha consolidado como una de las fuentes de energía renovable más importantes y prometedoras en el mundo actual. Los aerogeneradores, gigantes mecánicos con enormes aspas que giran al viento, son los encargados de capturar la energía cinética del viento y convertirla en electricidad, detrás de esta aparente simplicidad, existe una compleja ingeniería que garantiza la eficiencia y seguridad de estos dispositivos. En los aerogeneradores de grande potencia, cuentan con un regulador de potencia mecánica en las palas que giran sobre su propio eje (sistema pitch), además de un sistema yaw que hace que el rotor eólico se oriente buscando la mayor incidencia de viento, y cuando sobre pase las velocidades de viento, peste mismo se desorienta brindando así una operación segura y efectiva.

Los aerogeneradores de baja potencia son sistemas diseñados para generar energía eléctrica a partir del viento, con una capacidad de generación generalmente inferior a 100 kW. Estos dispositivos son esenciales para aplicaciones residenciales, rurales y pequeñas empresas, ofreciendo una fuente de energía renovable y sostenible. Su implementación ha aumentado debido a la creciente demanda de soluciones energéticas limpias y la necesidad de reducir la dependencia de los combustibles fósiles. En los aerogeneradores de pequeña escala, la capacidad de generación de estos aerogeneradores varía desde unos pocos watts hasta 100 kilowatts, los aerogeneradores de aplicación residencial van desde 300 W a 10 kW, en la Tabla 1 se puede ver una clasificación de los mismos.

Tabla 1. Clasificación de los aerogeneradores [1,2,3,4].

Categoría	Generación (kW)	Aplicación
Micro Aerogeneradores	< 1	Iluminación y dispositivos pequeños
Pequeños Aerogeneradores	1 – 10	Residencial, rural
Aerogeneradores Comerciales Pequeños	10 – 50	Pequeñas empresas, áreas remotas
Aerogeneradores Comunitarios	50 – 100	Comunidades rurales, aplicaciones agrícolas

Los aerogeneradores de estas categorías son fabricados con materiales como fibra de vidrio, aluminio y compuestos de carbono, para poder aprovechar la máxima eficiencia de los componentes, buscando una durabilidad de los elementos que lo conforman.

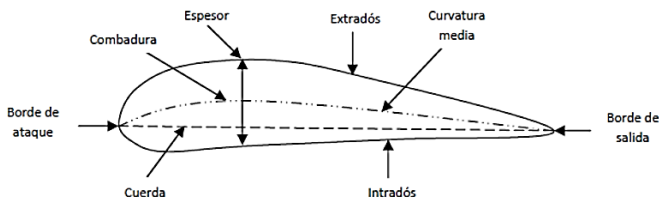


Figura 1. Partes que conforman el perfil de una pala [5].

Las velocidades típicas de arranque se encuentran entre 2 y 3 m/s. El diseño de las palas depende de la orientación del eje que va acoplado con el generador eléctrico (vertical u horizontal), además del lugar en donde se instalaría para obtener la máxima captación de energía (Figura 2).

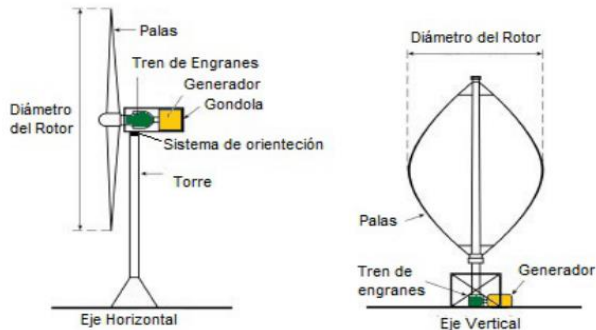


Figura 2. Aerogeneradores (Eje Horizontal/Eje Vertical) [6].

El tipo de control de estos tipos de turbinas son mediante diseño mecánico, tales como Stall control, Yaw pasivo, freno aerodinámico, control de carga, control de frenado mecánico, en la Tabla 2, podemos observar cada una de estas clasificaciones.

Tabla 2. Clasificación de control de regulación de potencia en aerogeneradores de pequeña potencia [7,8,9].

Método de Control	Descripción	Operación	Ventajas
Control de Estol Pasivo	Diseño aerodinámico de las palas.	Palas entran en pérdida de sustentación vientos fuertes.	Sin actuadores electrónicos
Control de Yaw Pasivo	Cambia la orientación del rotor con respecto al viento.	Veleta que ajusta automáticamente la orientación del rotor.	Solución mecánica simple sin necesidad de control electrónico.
Control de Frenado Aerodinámico	Mecanismos aerodinámicos para frenar el rotor.	Aletas o flaps se despliegan para aumentar la resistencia al viento.	Efectivo para proteger en vientos fuertes.
Control de Carga	Regulación de la carga eléctrica para controlar velocidad y potencia.	Controlador ajusta la carga conectada al generador.	Control sin actuadores mecánicos adicionales.
Control de Frenado Mecánico	Frenos mecánicos para detener o reducir la velocidad del rotor.	Frenos aplicados manual o automáticamente en vientos fuertes.	Proporciona una medida de seguridad adicional, fácil.

En esta tabla podemos observar que, por lo general, los sistemas de generación eléctricos a partir de turbinas eólicas de pequeña escala, no tienen un sistema de regulación de potencia electrónica, en este trabajo de investigación se evalúa la interacción del sistema de frenado mediante la tecnología NRF24L01.

2.2. Descripción del aerogenerador Lucas-Nülle.

Este aerogenerador de pequeña escala de 370 Watts, es adecuado tanto para demostraciones en laboratorio como para uso en exteriores. Su generador síncrono de campo permanente incorporado produce corriente continua, que luego puede almacenarse mediante una batería recargable. Las palas del rotor se pueden ajustar de manera similar al ajuste de paso utilizado en plantas de energía eólica a gran escala.



Figura 3. Aerogenerador Lucas-Nülle 370 Watts [10].

En la Tabla 3, se puede observar las características del sistema de generación eólico, analizando que este modelo solamente cuenta con la desorientación del rotor a vientos fuertes para la regulación de potencia mecánica, por lo cual el propósito del trabajo fue la implementación de un sistema de control electrónico para el frenado del generador eléctrico

Tabla 3. Características del aerogenerador Lucas-Nülle 370 W de potencia [10].

Características	Descripción
Potencia de Salida	370 W
Diámetro del rotor	1.2 m
Generador del campo	Trifásico rectificado
Voltaje de salida	12 V DC (Max 24 V DC)
Altura del eje del generador	1.5 m
Peso	18.3 Kg

2.3. Diseño del sistema de medición de viento.

Se describe la selección de los componentes a utilizar, la realización de la interfaz para la visualización de datos de los sensores de voltaje generado y de viento, para hacer una relación del estado de operación. Dentro de las tecnologías que se implementó la plataforma de uso y código abierto Arduino [11] el cual tiene un microcontrolador y librerías para el uso de diferentes elementos en este caso además de ellos sensores las antenas de RF para realizar la transmisión entre la sección emisora y receptora del sistema, y la plataforma de desarrollo LabVIEW [12] que es el software en donde se realizó la interfaz

gráfica, comunicando las lecturas de los sensores mediante el protocolo de comunicación serial, por lo cual la importancia de la realización de la programación, lectura, y prueba de funcionamiento.

El módulo RF basado en el chip Nordic NRF24L01, es ultra compacto y de muy bajo consumo. Trabaja a frecuencias de 2.4GHz (frecuencia libre) y es ideal para proyectos de telemetría, control de periféricos, industria y afines. Incorpora un transceiver RF de 2.4GHz, un sintetizador RF, algoritmos de control de errores y un acelerador para trabajar con interfaz SPI. El módulo NRF24L01 ha sido implementado y analizado en diversos sistemas, demostrando su confiabilidad y eficiencia en comunicación inalámbrica y transmisión de datos. En la Figura 4 se muestra una imagen representativa del módulo NRF24L01 y sus terminales.

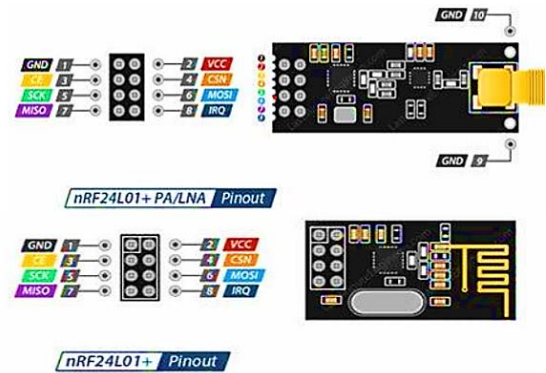


Figura 4. Terminales del NRF24L01 [13].

Para obtener las lecturas de las variables de estudio se implementó un sensor de medición de velocidad de viento tipo copas, donde la señal puede ser procesada a través de la lectura de datos adquiridos (lectura analógica). En la Figura 5, se muestra el anemómetro y el código para la lectura del voltaje dentro de la memoria interna del microcontrolador de la tarjeta usando el monitor serial.



Figura 5. Anemómetro y código [14].

Este sensor nos ayuda a obtener los datos para el análisis de producción de potencia mecánica, en donde la velocidad del viento nominal es de $12.5 \frac{m}{s}$. En cuanto a la presentación de los datos de medida de la potencia eólica, se relaciona con la fórmula de potencia extraíble del viento, como se puede analizar en la Ecuación 1.

$$P = \frac{1}{2}(\rho * A * v^3 * cp) \quad \text{(Ecuación 1)}$$

P = Potencia eólica extraíble del aerogenerador (Watts)

ρ = Densidad del viento ($1.225 \frac{Kg}{m^3}$ aproximadamente).

A = Área de barrido ($1.130 m^2$).

v = Velocidad del viento (Nominal = $12.5 \frac{m}{s}$).

cp = Coeficiente de potencia (idealizando $cp = 27\%$).

Como resultado de este cálculo nos aproxima a la potencia mecánica del aerogenerador (365 W), por lo cual multiplicándolo por una relación del 6.5% obtenemos el voltaje directo aproximado del generador eléctrico rectificado 24 V. Para la medición del voltaje, se seleccionó el módulo sensor de voltaje FZ0430, es un módulo bastante simple que consiste en un divisor de voltaje que consta de dos resistencias, una de $7.5 K\Omega$ y otra de $30 K\Omega$, podremos bajar el voltaje medido por un factor de 0.2, por lo que podremos medir una tensión máxima de 25 V con un procesador de 5 V en voltaje directo (VDC), la programación se muestra a continuación en la Figura 6.



Figura 6. Sensor de voltaje y código [14].

En el caso de la interfaz de monitoreo, se obtuvo las lecturas de las variables físicas como son el voltaje de generación y la velocidad del viento de operación, y el módulo RF (emisor receptor) acoplaron una interacción en el control de freno del rotor, ayudando al estudio para el uso de sistemas de acoplamiento de energía y/o elementos que ayuden a mejorar en este mismo u otros sistemas aprovechando la tecnología de comunicación.

Se realizaron las pruebas pertinentes, por ejemplo, prueba de comunicación entre el módulo (Receptor-Emisor) del NRF24L01, en donde se enviaba datos por un joystick en el lado del emisor y un servo motor del lado del receptor, logrando manipular al servomotor en dirección de giro, así pudimos tener una conexión desde el primer piso en el laboratorio de electrónica al techo del edificio multiusos de talleres, teniendo una distancia de 10 m de altura, como se puede ver en la Figura 7.

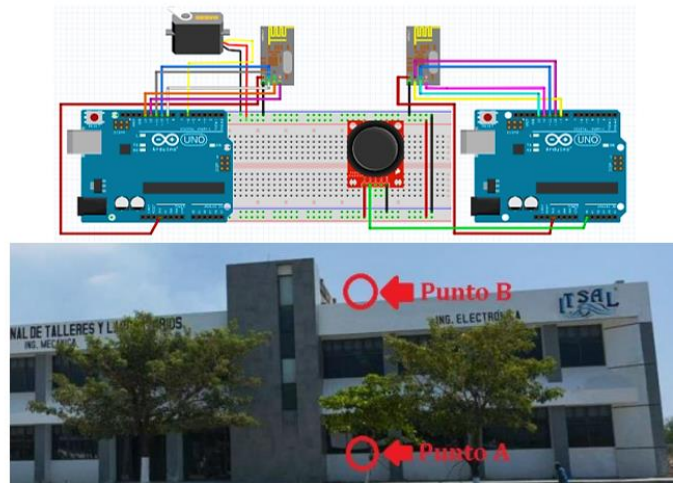


Figura 7. Conexión del sistema emisor receptor con NRF24L01 localización de prueba [14].

Teniendo ya la prueba de conexión, se desarrolló la parte que mandará la señal que activará el freno electromecánico en el generador de sistema eólico, en la Figura 8 podemos ver el diagrama del circuito que consta del Arduino Nano y el módulo NRF24L01 que reciben la señal del emisor y lo ejecutan al módulo relé. Para alimentar el sistema creamos un sistema de alimentación con paneles y baterías, ya que al estar en el aerogenerador es la única manera de suministrarle energía, se usaron baterías de litio y ambas nos dan 8V suficientes para alimentar todo el sistema.

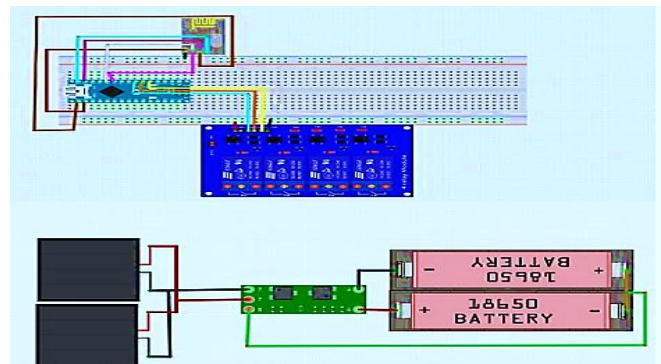


Figura 8. Alimentación y diagrama de conexión de la parte receptora [14].

Para la parte del sistema emisor, se puede ver en la Figura 9. El sistema consta de un Arduino UNO con el módulo NRF24L01 este circuito será el encargado de mandar las variables correspondientes para la comunicación con el receptor (velocidad de viento y voltaje generado), las cuales estarán dadas por el anemómetro y la conexión a la sección que generará una unión en las fases del generador dependiendo la velocidad del viento dada en m/s o un interruptor el cual activará o desactivará el freno y un led que nos indicará cuando este encendido o apagado el freno del rotor eólico.

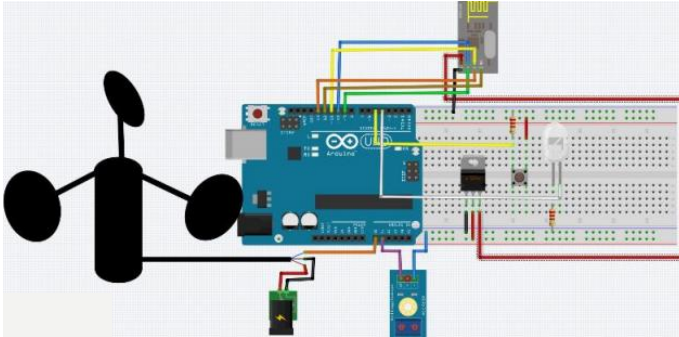


Figura 9. Diagrama del circuito emisor [14].

En la Figura 10, se observa la puesta a prueba de los dispositivos, se puede observar la obtención de los datos, que dependen de las condiciones climáticas en donde se encuentre el sistema de captación. Se realizó una comprobación con el dispositivo implementado donde se sacó el aerogenerador a fuera del edificio para que el aire moviera las palas del aerogenerador y probar si el sistema funcionaba y reaccionaba a distancia para activar y desactivar el freno electromagnético. La distancia de prueba fue de 15 m entre la entrada del edificio al medio de la explanada, como se puede observar en la Figura 10.

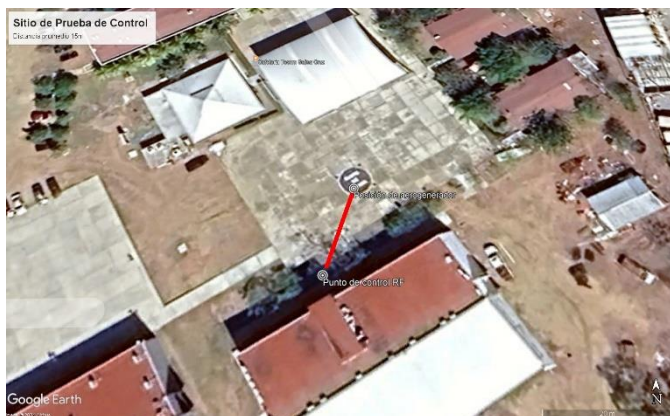


Figura 10. Prueba del sistema [14].

El tiempo de respuesta fue casi instantáneo al no haber ninguna interferencia cerca y probando que nuestro sistema funciona totalmente habilitando y deshabilitando el freno magnético por medio de un interruptor y el módulo NRF24L01.

En la presentación de los datos en la interfaz gráfica, podemos verla en la Figura 11, en donde nos muestra un aspecto de comportamiento del sistema, parecido como se comentó al presentar la ecuación de potencia mecánica del aerogenerador. Se puede observar la velocidad de viento y la producción del voltaje DC (rectificado). Cabe destacar que la velocidad de viento no alcanzó a generar a respuesta deseada para probar el freno automático, ya que la configuración era $30 \frac{m}{s}$.

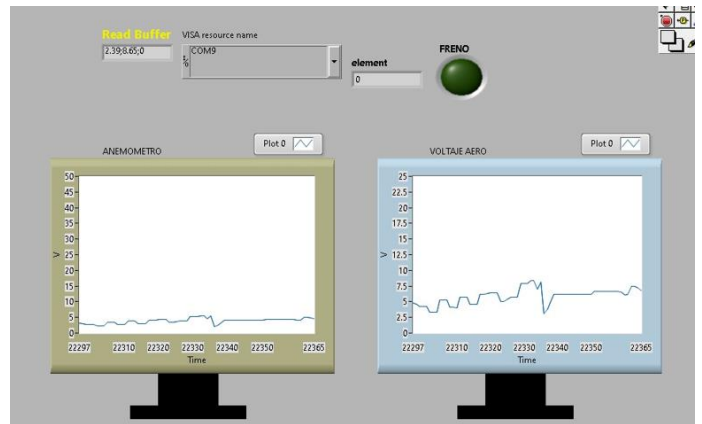


Figura 11. Gráfica de Velocidad de viento y voltaje [14].

En la segunda prueba se ocupó dos elementos externos, una bomba de aire para el anemómetro para alcanzar la lectura y así verificar la activación del freno de rotor, y un ventilador de grande potencia utilizado para hacer girar el aerogenerador de manera constante y verificar la lectura correcta en la interfaz de LabVIEW. Esto se puede ver en la Figura 12, es por ello que el voltaje generado es cero por que, al activarse el freno, el rotor deja de girar y no hay voltaje producción Figura 13.



Figura 12. Aerogenerador frente a ventilador.



Figura 13. Gráfica obtenida con la bomba de aire [14].

3. CONCLUSIONES

En conclusión, el proyecto de investigación ha sido un logro significativo al implementar con éxito la tecnología de radiofrecuencia, específicamente con el módulo NRF24L01, para activar un paro electromagnético en el aerogenerador Lucas-Nülle. Esta aplicación ha permitido mejorar de manera efectiva los protocolos de seguridad del sistema, asegurando una respuesta rápida y precisa en situaciones críticas. Además, la integración de un sistema de monitoreo que utiliza el módulo NRF24L01 para la transmisión de datos ha demostrado ser crucial.

El monitoreo en tiempo real del voltaje del aerogenerador y la velocidad del viento, obtenidos a través de un anemómetro, proporciona una visión detallada del rendimiento y las condiciones ambientales. Esta información es esencial para tomar decisiones informadas y mantener un funcionamiento eficiente del aerogenerador.

La combinación de la activación del paro electromagnético y el monitoreo en tiempo real representa un avance significativo en la seguridad y la eficiencia operativa de los aerogeneradores de pequeña potencia, estos resultados subrayan la importancia de la innovación tecnológica para abordar desafíos críticos en la industria de las energías renovables para su análisis y comprensión de funcionamiento.

3.1. Referencias.

- [1] Manwell, J. F., McGowan, J. G., y Rogers, A. L. "Wind Energy Explained: Theory, Design and Application." *John Wiley & Sons*, 2010.
- [2] Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., y Bossanyi, E. "Wind Energy Handbook." *John Wiley & Sons*, 2011.
- [3] Gipe, P. "Wind Power: Renewable Energy for Home, Farm, and Business." *Chelsea Green Publishing*, 2004.
- [4] Hau, E. "Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics." *Springer*, 2013.

- [5] Andrés Ramirez Martínez, "Diseño de Álabes, Rotor y Transmisión de un Generador Eólico de Eje Horizontal de 500 W", Pachuca de Soto, Hidalgo, Instituto Tecnológico de Pachuca, 2019.
- [6] Luis Arturo Soriano Avendaño, "Modelación de aerogenerador con compensación difusa", Departamento de Control Automático.
- [7] Heier, Siegfried. "Grid Integration of Wind Energy: Onshore and Offshore Conversion Systems." 3rd Edition. John Wiley & Sons, 2014.
- [8] Hansen, Morten. "Aerodynamics of Wind Turbines." 3rd Edition. Routledge, 2015.
- [9] Ackermann, Thomas, ed. "Wind Power in Power Systems." 2nd Edition. John Wiley & Sons, 2012.
- [10] <https://www.lucas-nuelle.us/2769/pid/32273/apg/16920/Small-scale-wind-turbine-370W,-with-demonstration-mast.htm>. Activa
- [11] <https://arduino.cl/que-es-arduino/>. Activa
- [12] <https://www.ni.com/es/shop/labview.html>. Activa
- [13] <https://avelectronics.cc/producto/transceptor-nrf24l01/>. Activa
- [14] Diseño u obtención propia.