



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

***MONITORIZACIÓN DE UN
AEROGENERADOR CON REDES
INALAMBRICAS DE SENSOES***

TESIS FIN DE MASTER

**Autor: Eduardo Rodriguez Gimeno.
Director: José Carlos Campelo Rivadulla.
Director: Juan José Serrano Martin.**

Valencia, Septiembre 2012

Resumen

Esta tesis de máster, de orientación profesional, trata del diseño e implementación de un sistema de sensorización para generadores eólicos savonius. La aplicación de estos generadores la encontramos en la obtención de energía eléctrica de una forma no contaminante y no nociva para las aves por su diseño.

Con el objetivo de caracterizar su funcionamiento y obtener sus variables de funcionamiento principales, que nos ayudarán a estudiar y maximizar la eficiencia del aerogenerador, en esta tesis se realiza el diseño del sistema de sensorización necesario para obtener estas variables y comunicarlas a través de una red de sensores inalámbricas.



ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN A LA ENERGÍA EÓLICA.	04
1.1	La energía eólica.	04
1.2	Aerogeneradores.	05
1.2.1	Energía accesible.	05
1.2.2	Historia de los aerogeneradores.	05
1.2.3	Distintas clases de aeromotor.	06
1.2.4	Aerogenerador Savonius.	12
1.2.5	Constitución de un aeromotor.	17
1.2.6	Dispositivos De Almacenamiento.	22
1.2.7	Control del estado de la carga de la batería de acumuladores. circuitos asociados (Control manual).	26
1.2.8	Valores de las tensiones de final de carga y descarga.	27
1.3	Utilización de la energía eólica para usos domésticos.	28
2	INTRODUCCIÓN A LAS REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS.	30
2.1	Introducción.	30
2.2	Redes Inalámbricas de sensores.	30
2.3	Arquitectura del sistema.	31
2.3.1	Nodo inalámbrico.	32
2.3.1.1	Procesador.	33
2.3.1.2	Alimentación.	34
2.3.1.3	Comunicación inalámbrica.	34
2.3.1.4	Sensores.	36
2.3.1.5	Memoria.	37



2.3.2	Puerta de enlace.	37
2.3.3	Estación Base.	37
2.4	Redes ad-hoc y tecnología inalámbrica.	38
2.4.1	Redes ad-hoc.	38
2.4.1.1	Protocolos.	38
2.4.2	Tecnología inalámbrica.	40
2.4.2.1	ZIGBEE	42
2.5	Aplicaciones.	43
2.5.1	Automoción.	44
2.5.1.1	Proyecto capstone de ford.	45
2.5.2	Control domótico de un edificio.	45
2.5.2.1	Sistema inteligente de control de luz.	45
2.5.3	Monitorización ambiental.	45
2.5.3.1	Isla great duck.	46
2.5.3.2	Monitorización de un glaciar.	46
2.5.4	Control de almacenes.	47
2.5.4.1	Control de transporte y logística.	47
2.5.5	Control de procesos industriales .	48
2.5.5.1	Control de un tanque de petróleo en una plataforma petrolífera (bp).	48
2.5.6	Agricultura y ganadería.	48
2.5.6.1	Viñedos camalie.	49
2.5.6.2	Seguimiento de rutinas en ganado porcino.	49
2.5.7	Control del tráfico.	50
2.5.7.1	Distribución del tráfico mediante redes adhoc en vehículos.	50
2.5.8	Monitorización de estructuras.	50



2.5.8.1	Control de vibraciones de un puente.	50
2.5.8.2	Monitorización de la salud de una infraestructura civil (puente golden gate).	51
3	OBJETIVOS.	52
4	INSTRUMENTACIÓN.	53
4.1	Hardware.	53
4.2	Software.	59
5	DESARROLLO.	63
6	CONCLUSIÓN.	77
7	BIBLIOGRAFIA.	78
8	REFERENCIAS.	78
9	ANEXOS.	79
	i) anexo1----- Manual_de_usuario_wsn-nk01-1	
	ii)anexo 2----- manual_de_usuario_wsn-sum-usb	
	iii)anexo 3----- datasheet AS5045	



1. INTRODUCCIÓN A LA ENERGÍA EÓLICA

La revista de la Academia de Ciencias de EEUU ha publicado recientemente un estudio explicando los **beneficios de la energía eólica**. En éste se asegura que gracias a la tecnología disponible hoy en día y con el viento que se genera en EEUU, se podría cubrir hasta 16 veces la demanda eléctrica del país.



Al cargo de este estudio se encuentra el profesor Michael B. McElroy, del Departamento de Ciencias Planetarias y de la Tierra de la Universidad de Harvard. McElroy afirma que la energía eólica es la alternativa más beneficiosa para países en vías de desarrollo como China o La India, causantes de la mayoría de emisiones de gases de efecto invernadero del planeta.

Para José Ignacio Pérez Arriaga, investigador del Instituto de Investigación Tecnológico de la Universidad Pontificia de Comillas, **la energía eólica es el complemento perfecto a otro tipo de energías**. Según Arriaga, la eólica compondría "el 20% del mix energético", pero no sería un sustitutivo de las no renovables debido a su "producción intermitente". No obstante, McElroy se muestra en desacuerdo y afirma que para paliar este inconveniente bastaría con tener una red integrada.

A pesar de esta diversidad de opiniones dentro de la comunidad científica, sí que existe algo en lo que los científicos están de acuerdo: **la energía eólica es una de las tecnologías que más ha crecido en los últimos años**. Por este motivo, cada vez se cuenta más con ella en el mercado energético.

1.1. La Energía eólica.

El perfeccionamiento del tradicional molino de viento ha dado lugar a modernos aeromotores que aprovechan la energía eólica para generar electricidad. Estos aeromotores pueden instalarse aislados o bien en agrupaciones que aportan energía a las redes de distribución. Sin embargo, el viento tiene dos características que lo diferencia de otras fuentes energéticas: su imprevisible variabilidad y su dispersión. Ello obliga a sutiles perfeccionamientos en el diseño de las palas y el sistema de control que regula las revoluciones por minuto, para evitar velocidades, excesivas durante los vendavales y orientar el rotor hacia la posición más favorable. La fuente de energía eólica es el viento, o mejor dicho, la energía mecánica que, en forma de energía cinética transporta el aire en movimiento. El viento es originado por el desigual calentamiento de la superficie de nuestro planeta, originando movimientos conectivos de la masa atmosférica. La Tierra recibe una gran cantidad de energía procedente del Sol. Esta energía, en lugares favorables, puede ser del orden de 2.000 Kwh/m² anuales. El 2 por ciento de ella se transforma en energía eólica con un valor capaz de dar una potencia de 10E+11 Gigavatios. En la antigüedad no se conocían estos datos, pero lo que sí es cierto, es que intuitivamente conocían el gran potencial de esta energía. Las formas de mayor utilización son las de producir energía eléctrica y mecánica, bien sea para autoabastecimiento de electricidad o bombeo de agua. Siendo un aerogenerador los que accionan un generador eléctrico y un aeromotor los que accionan dispositivos, para realizar un trabajo mecánico.



En un aerogenerador tenemos diferentes partes, empezando por los cimientos, generalmente constituidos por hormigón en tierra, sobre el cual se atornilla la torre del aerogenerador. La torre, fijada al suelo por los cimientos, proporciona la altura suficiente para evitar turbulencias y superar obstáculos cercanos; la torre y los cimientos son los encargados de transmitir las cargas al suelo. El chasis, es el soporte donde se encuentra el generador, sistema de frenado, sistema de orientación, equipos auxiliares (hidráulico), caja de cambio, etc. Protege a estos equipos del ambiente y sirve, a su vez, de aislante acústico. El buje, pieza metálica de fundición que conecta las palas al eje de transmisión. Las palas, cuya misión es la de absorber energía del viento; el rendimiento del aerogenerador depende de la geometría de las palas, interviniendo varios factores:

- Longitud
- Perfil
- Calaje
- Anchura

Sistemas de un aerogenerador:

Orientación, mantiene el rotor cara al viento, minimizando los cambios de dirección del rotor con los cambios de dirección de viento; Estos cambios de dirección provocan pérdidas de rendimiento y genera grandes esfuerzos con los cambios de velocidad.

Regulación, controla la velocidad del rotor y el par motor en el eje del rotor, evitando fluctuaciones producidas por la velocidad del viento.

Transmisión, utilizados para aumentar la velocidad de giro del rotor, para poder accionar un generador de corriente eléctrica, es un multiplicador, colocado entre el rotor y el generador.

Generador, para la producción de corriente continua (DC) dinamo y para la producción de corriente alterna (AC) alternador, este puede ser síncrono o asíncrono.

1.2. Aerogeneradores

1.2.1 Energía accesible.

Los aerogeneradores, tienen diversas aplicaciones específicas, ya sea eléctricas o de bombeo de agua, mediante el aprovechamiento y transformación de energía eólica en energía mecánica. Se entiende por energía eólica a los vientos que existen en el planeta.

Esta energía, es inagotable, no contamina; y aunque la instalación de uno de estos aparatos es relativamente costosa y morosa, a la larga se sentirán los resultados positivos, especialmente en el campo económico. Un punto que vale hacer notar, es la autonomía frente a la fuente más cercana accesible, que en este caso es la Empresa Nacional de Energía (ENDE. Esta última no siempre se presenta en los pueblos alejados, por el costo que supone instalar una red hacia aquellos).

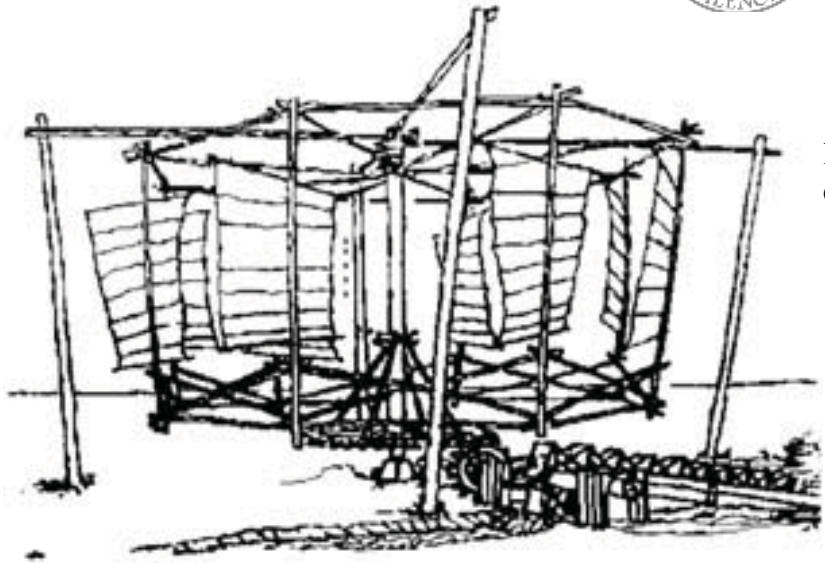
1.2.2 Historia de los aerogeneradores.

Es importante destacar e interesante además, algunas fechas dentro de la tecnología eólica y de la utilización de aeromotores. En el s. V a. C. se encuentran los primeros aeromotores en Asia: son máquinas de eje vertical iguales a las denominadas panemonas de algunas islas griegas. Más o menos por la misma época, en Egipto se utilizaban molinos de eje vertical para moler grano y

bombear agua, también en la zona de Sijistán entre Irán y Afganistán.

Todos estos molinos tenían el mismo principio: transformar energía eólica en energía para bombeo de agua y la molturación del grano entre otras.

En el siglo VII d.C. se da origen a los primeros modelos rústicos de los clásicos molinos holandeses que hoy en día son mecánicamente sofisticados. O los aeromotores para el bombeo de agua que progresa con la invención de las



la
el

multipalas en 1870 por los americanos. Fue en el año 1802 cuando Lord Kelvin trató de asociar un generador eléctrico a un aeromotor para la producción de energía eléctrica.

Hacia el año 1920 la energía eólica obtiene cierto éxito, pues habían trescientos constructores de estos aparatos. El estudio en los campos de la aerodinámica permitió alcanzar enormes progresos en los aeromotores, esto hasta el año 1961; desgraciadamente en ese año el precio del petróleo bajó, poniendo al kilowatt "eólico" a precios inaccesibles. Todas las máquinas fueron desmontadas y vendidas al precio de chatarra.

Desde el año 1973 ocurre el proceso inverso, impulsando programas de estudio y realización de aerogeneradores. La demanda en países industrializados es mínima. Pero no obstante la demanda en países tercermundistas aumentó de nivel, esto por el obvio bajo costo de producción e instalación de estos aparatos en comparación a las ganancias retribuidas.

1.2.3. Distintas clases de aeromotor.

Las máquinas eólicas han sido estudiadas por el hombre en forma intensiva y dentro de ellas existen en la actualidad diferentes tipos que van desde pequeñas potencias, a las grandes máquinas americanas y alemanas de varios MW.

Son numerosos los dispositivos que permiten el aprovechamiento de la energía eólica, pudiéndose hacer una clasificación de los mismos según la posición de su eje de giro respecto a la dirección del viento.

En las máquinas eólicas de eje horizontal, para obtener en las palas una velocidad angular regular y uniforme ω , para una determinada velocidad del viento V se requiere que tanto la dirección del viento, como su velocidad, se mantengan constantes con respecto a las palas.

Por el contrario, en las máquinas eólicas de eje vertical, manteniendo las mismas condiciones regulares en la velocidad del viento y en la velocidad angular de las palas, resulta que éstas pueden estar sometidas a un viento aparente de dirección y velocidad continuamente variables, por lo que en estas máquinas, el flujo aerodinámico resulta ser muy complicado, ignorándose en muchas ocasiones las verdaderas posibilidades de las mismas.

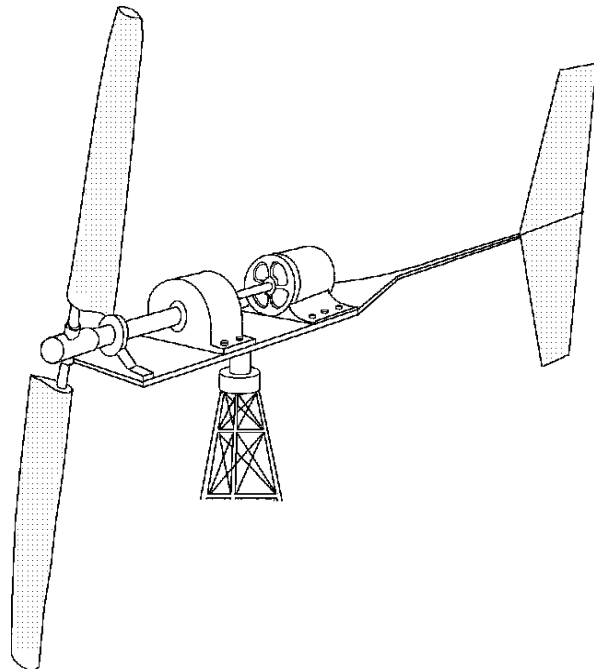
Las máquinas eólicas se pueden clasificar en:

Aeroturbinas de eje horizontal y de eje vertical

Sistemas giromill (eje vertical y palas verticales, con o sin distribuidor)

Sistemas especiales.

Dentro de ellas las aeroturbinas de eje horizontal se encuentran más desarrolladas, tanto desde el punto de vista técnico como comercial.



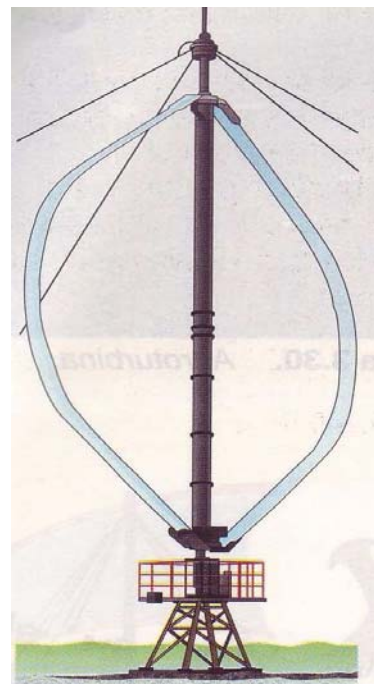
Aeromotores de eje horizontal.

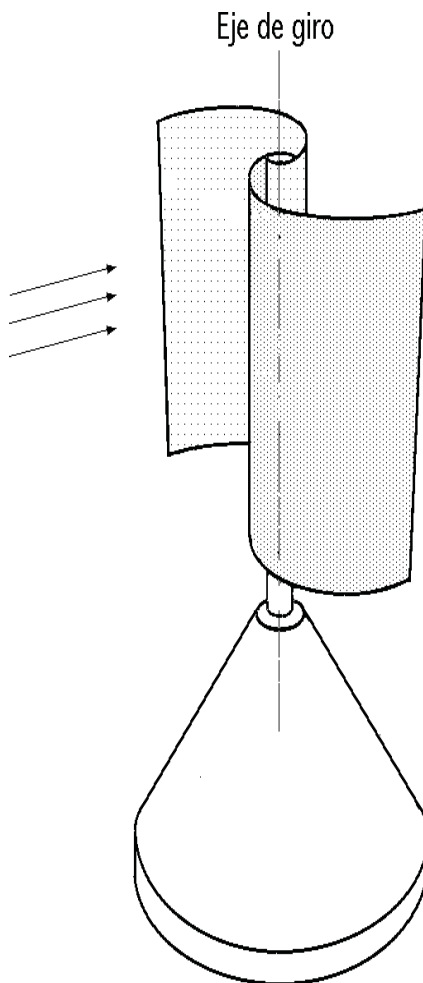
Eje paralelo a la dirección del viento. Son las máquinas más difundidas, y con rendimiento superior a las demás. Incluyen aquellas de 1,2,3 o 4 palas, además de las típicas multipalas para el bombeo de agua. Debemos distinguir aquellas de "para el viento" y aquellas que tiene sus palas situadas de "espalda al viento". Los aerogeneradores, generalmente van provistos de rotores bipala o tripala (cara al viento), para potencias inferiores a 1 kW ($P < 1$ kW). Y de espaldas al viento para potencias superiores a 1 kW ($P > 1$ kW). Eje horizontal perpendicular a la dirección del viento. Los aerogeneradores más significativos de eje perpendicular a la dirección del viento, son los de perfil oscilante y el sistema de captación con palas batientes. Estos sistemas se han estudiado ampliamente, también se construyeron prototipos; pero presentan más

inconvenientes que ventajas; en especial necesitan sistemas de orientación igual a los de eje horizontal paralelo al viento. La recuperación de energía es en general complicada y no presenta un buen rendimiento.

Aeromotores de eje vertical.

Son presumiblemente, las primeras máquinas que se utilizaron para la captación de energía eólica, ya que son más sencillas que las de eje horizontal; no necesitan ningún sistema de orientación. Lo que constituye una ventaja constructiva. En funcionamiento las palas, los rodamientos y los ejes, no están sometidos a esfuerzos importantes por cambios de orientación. Son de fácil construcción. El rendimiento es mediocre (el rotor Savonius un 20% del límite de Betz). No se experimentó un gran desarrollo en estos aparatos.





Existen 3 grandes familias de aeromotores de eje vertical.

Aeromotores Savonius.

Esencialmente utilizan el arrastre diferencial creado por las palas que pueden ser de diversas formas. El par de arrastre es levado, pero la velocidad máxima es claramente inferior a la de los rotores de eje horizontal.

Aeromotores Darrieus.(patente/1931)

Emplea la sustentación de las palas y están caracterizados por débil par de arranque y velocidad de rotación elevada que permite la recuperación de una gran potencia.

Mixto.

Para mejorar el par de arranque se pueden acoplar otro tipo de rotores haciéndolo mixto (Savonius-Darrieus). Este tipo de máquinas es susceptible de competir con los aeromotores rápidos, bipalas y tripalas de eje horizontal; son objeto de estudio y desarrollo.

Rotor Savonius

Razón de elección de aeromotor de eje vertical:

Las ventajas de estos aerogeneradores frente a los de eje horizontal, son:

- a) *No necesitan sistemas de orientación*
- b) *Los elementos que requieren un cierto mantenimiento pueden ir situados a nivel del suelo*
- c) *No requieren mecanismos de cambio de revoluciones, por cuanto no suelen emplearse en aplicaciones que precisen una velocidad angular constante.*

Las desventajas:

- a) *Menor rendimiento*
- b) *Menor velocidad de giro (multiplicadores más complicados)*
- c) *Mayor superficie de pala S a igualdad de área barrida A*
- d) *No se pueden instalar a tanta altura, donde la velocidad del viento es más intensa*



Tendencias actuales en la altura de la torre y diámetro del rotor.

Los factores que influyen en el aprovechamiento de la energía eólica son el emplazamiento y el aerogenerador, y sólo mediante una adecuada combinación de ambos se puede alcanzar un buen rendimiento en un parque eólico.

Los emplazamientos difieren unos de otros no sólo en la velocidad media anual del viento, sino también en la distribución de frecuencias de esa velocidad (cuántas horas sopla el aire en cierto rango de velocidades), la turbulencia del lugar, y el perfil de velocidades del viento con la altura. La orografía del lugar y la rugosidad del suelo juegan un papel importante.

Con este panorama parece sencillo admitir que tiene que existir una cierta adecuación de la turbina al emplazamiento. Si existe una cierta flexibilidad a la hora de elegir parámetros como la

altura de torre o el diámetro del rotor, se puede diseñar un prototipo único de góndola para una turbina que aproveche al máximo los recursos de cada emplazamiento.

Las diferentes alturas de la torre permiten jugar con ciertos compromisos como:

Una mayor altura permite captar vientos con flujo más laminar, en principio (salvo orografía complicada) de mayor velocidad media y con menor diferencia entre la velocidad del viento en la parte superior e inferior de la circunferencia barrida).

Lógicamente el costo es superior, y en ciertos emplazamientos, como las crestas de los montes, puede existir una inversión del perfil de vientos con lo que no siempre es cierto que a mayor altura la velocidad del viento es mayor.

Por otra parte, para un mismo tipo de turbina se pueden ofertar diversos diámetros del rotor; por ejemplo, para una turbina de 600 kW se pueden ofertar rotores de 39, 42 y 44 m de diámetro.

Un rotor mayor (más caro) permite captar más energía del viento, disminuyendo la velocidad nominal del viento a la que se genera la potencia nominal.

Sin embargo la velocidad de corte del viento, a la que la turbina se detiene por cuestiones de seguridad, es menor con lo que existe el riesgo de desaprovechar horas de vientos fuertes. En principio, cuanto menor es la velocidad media anual del viento en un emplazamiento se debe elegir un rotor más grande, siempre que la turbulencia del viento en el lugar se mantenga en niveles aceptables.

torres flexibles y torres rígidas

Si la orografía no es compleja, a mayor altura, mayor es la velocidad del viento puesto que el efecto de fricción de las capas contra el suelo disminuye. Este hecho, junto con el de aumento de la potencia de las turbinas (y por consiguiente del diámetro del rotor), hace que los diseños tiendan a torres más altas.

Existe el problema de que cuando la frecuencia propia de la torre, junto con el peso de la góndola y palas, coincide con la frecuencia a la que gira el rotor, que origina un movimiento vibratorio peligroso en la torre, ambas frecuencias entran en resonancia y pueden destruir el aparato.

Torres rígidas.- Las torres rígidas, que son las que se han construido hasta la fecha, se lastran para aumentar la frecuencia propia del sistema y alejarlas así del punto de operación. Como la frecuencia propia de la torre disminuye tanto al aumentar la altura, como al aumentar el peso de la góndola y palas de diseños de mayor potencia, el material a añadir para rigidizar la torre aumenta



excesivamente.

Torres flexibles.- Para paliar el efecto de lastrado o sobrecarga de la torre se ha tomado una solución opuesta a la anterior, es decir, construir torres flexibles para que la frecuencia de resonancia del sistema sea menor que la frecuencia de operación del rotor, lo cual se puede conseguir a partir de una potencia y altura dadas; esta solución supone un ahorro de material y también de costos.

paso variable y paso fijo.

Los diseños actuales de aerogeneradores se pueden clasificar en aerogeneradores de pala de paso fijo y aerogeneradores de pala de paso variable.

Los de paso fijo presentan un ángulo de inclinación de la pala constante cara al viento.

Los de paso variable permiten adaptar dicha inclinación de pala en función de la velocidad del viento, rotando alrededor del eje longitudinal de la pala, y modificando las propiedades del perfil aerodinámico en su confrontación frente al viento incidente.

Aerogeneradores de paso fijo.- Sus ventajas fundamentales son la simplicidad del equipo y costo, por lo que se utilizan mayoritariamente en sistemas de baja potencia.

Por el contrario, a velocidades de viento altas no aprovechan óptimamente las propiedades aerodinámicas de las palas, con la consiguiente pérdida de energía captada. Al ser un diseño fijo, a velocidades de viento altas los esfuerzos mecánicos son considerablemente altos, con lo que las palas se deben construir de tal manera que soporten tales tensiones, y el coste de la pala aumenta.

No disponen de un autofrenado, con lo que en caso de embalamiento hay que instalar un freno que sea capaz de absorber toda la energía cinética de las palas. Este tipo de control tiene problemas de par de arranque del rotor, con lo que a veces el arranque es motorizado (utilizando el generador como motor).

Aerogeneradores de paso variable.- En sistemas de alta potencia es rentable instalar un mecanismo de giro de inclinación de las palas, que supone una mayor complejidad y costo del equipo, pero que se justifica por las ventajas que a continuación se exponen:

a) Al variar el ángulo de inclinación de las palas se consigue optimizar el aprovechamiento de la energía

del viento en todo el rango de velocidades, muy particularmente por encima de la velocidad nominal de la turbina.

b) Con paso variable, las cargas mecánicas sobre las palas y el resto del aerogenerador son menores, permitiendo un diseño más ligero y de menor coste de la pala. Las cargas horizontales sobre la turbina se reducen, minimizando también la cimentación.

c) Al poder orientar la pala se resuelve de forma aerodinámica el frenado de la turbina en caso de embalamiento.

Por ésto, el freno hidráulico de emergencia de la turbina se puede diseñar más pequeño sin comprometer la seguridad de la operación. En ciertas turbinas de paso fijo se incluyen ciertos frenos aerodinámicos como control de punta de pala, alerones, etc, para evitar el embalamiento. En las turbinas de paso variable la pala es un elemento estructural único, con la consiguiente simplicidad. El par de arranque de la turbina es bueno puesto que el ángulo de paso de las palas se regula, consiguiéndose el óptimo par de arranque (ángulo de paso de 45°), y con posibilidad de



arranque a velocidades inferiores de viento.

d) En zonas donde el ruido generado es un problema, el paso variable ayuda a disminuir a altas velocidades de viento o incluso limitar la generación de ruido mediante paso variable a cualquier velocidad de viento (en Alemania existen turbinas en zonas habitadas que se desconectan si el nivel de ruido excede cierto valor).

e) La turbina se puede ajustar, mediante un software adecuado, a trabajar a una potencia inferior a la establecida normalmente en caso de redes muy débiles, o para realizar ciertos ensayos, consiguiéndose además evitar el problema de la sensibilidad del momento de entrada en pérdida de la pala ante ciertos parámetros, como la densidad del aire o la suciedad en la pala.

El único parámetro a la hora de diseñar una pala es optimizar la captación de energía y no el punto de entrada en pérdida del perfil.

VELOCIDAD VARIABLE Y VELOCIDAD FIJA

Dentro de las máquinas de paso variable, se pueden comparar las diferentes opciones de regulación de velocidad, desde los diseños menos sofisticados a los más complejos.

Aerogenerador de velocidad fija.- La estructura del aerogenerador de velocidad fija es básicamente un sistema multiplicador y un generador asíncrono directamente acoplado a red por su estator, con unas baterías de condensadores para compensar la energía reactiva.

La mayoría de los aerogeneradores de gran potencia que operan hoy en día en parques eólicos son de este tipo. Incorporan un generador asíncrono de rotor bobinado estándar, gracias a lo cual se consigue un precio ajustado.

Los inconvenientes de funcionar a velocidad fija son las sobrecargas mecánicas que se generan debido a las ráfagas de viento. Estas fluctuaciones de potencia en el viento se traducen, aunque filtradas, en fluctuaciones de potencia eléctrica generada. La inestabilidad del viento supone por ello un problema para la maquinaria del aerogenerador y para la red eléctrica de distribución.

El generador asíncrono demanda energía reactiva, lo cual es otro inconveniente desde el punto de vista de la red eléctrica, y se corrige con baterías de condensadores.

Deslizamiento variable.- La estructura de deslizamiento variable consta de un sistema multiplicador, generador asíncrono y unas resistencias del rotor variables.

Al variar la resistencia del rotor se varía el deslizamiento (entre un 1% y 10%), lo que permite a los aerogeneradores absorber los golpes de viento, reduciendo las cargas extremas sobre el multiplicador, a la vez que se genera una potencia eléctrica sin fluctuaciones; este sistema está patentado bajo el nombre de Opti-Slip(R).

La energía de la ráfaga de viento se elimina mediante un ligero aumento de la velocidad de la cadena mecánica y mediante la disipación en resistencias en el rotor. El sistema necesita compensación de energía reactiva mediante baterías de condensadores, al igual que en el caso anterior.

El control es relativamente sencillo, el aumento de precio es pequeño y el generador sigue siendo un generador estándar de rotor bobinado, al que se le añade un módulo de resistencias variables en la parte trasera.

Velocidad variable con generador de doble inducción.- Este sistema, del que existen algunos prototipos en estado de experimentación, está formado por un sistema multiplicador y un

generador asíncrono cuyo estator está conectado directamente a la red y cuyo rotor lo está a través de dos convertidores de frecuencia. Con esta estructura se consigue regular la velocidad del sistema en un rango alrededor de la velocidad nominal.

Los convertidores no deben soportar toda la potencia de la máquina, sino sólo una fracción de ella, resultando de esto un equipo electrónico más sencillo. Al poder variar la velocidad, nos acercamos más a puntos de rendimiento aerodinámico más altos. El generador asíncrono es estándar, de rotor bobinado. A velocidades altas del viento se genera energía también por el rotor.

La potencia de salida no tiene fluctuaciones. La potencia reactiva se puede controlar, como en el caso de un generador síncrono. Las ráfagas no implican sobrecargas en el multiplicador, sino que es una energía que se emplea en aumentar la velocidad.

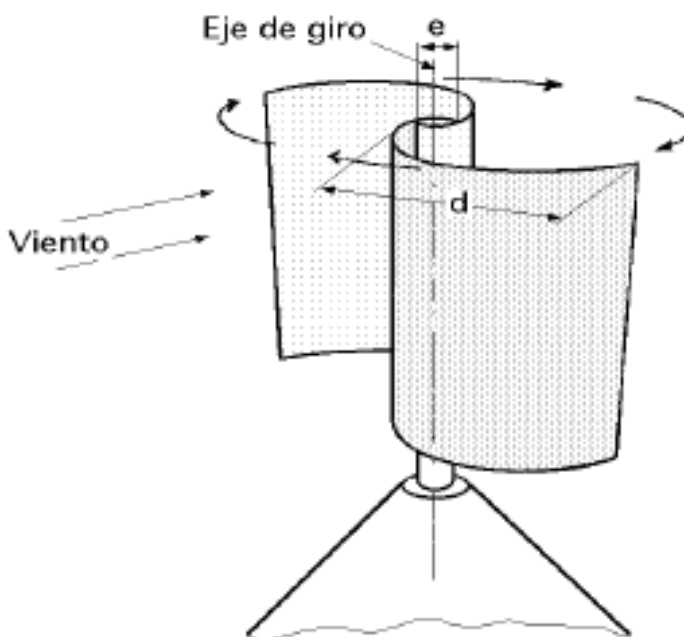
El inconveniente es el aumento de precio debido a la utilización de un control más sofisticado y de los equipos electrónicos de conversión de potencia en el rotor.

Velocidad variable con generador síncrono multipolo.- Este sistema es el más complejo de todos. El sistema multiplicador se elimina merced a un generador síncrono multipolo, empleándose para variar la velocidad en el estator dos convertidores que manejan toda la potencia de la máquina.

Las ventajas del sistema son la mejora del rendimiento aerodinámico, la potencia de salida sin fluctuaciones, el control de la energía reactiva, y, fundamentalmente, la eliminación del sistema multiplicador.

Sin embargo, este sistema puede tener grandes inconvenientes ya que la eliminación del multiplicador implica la construcción de un generador muy complicado, que ya no es estándar y, por lo tanto, caro. Además como los equipos electrónicos de conversión de potencia manejan toda la potencia, aumentan más el precio.

1.2.4. AEROGENERADOR SAVONIUS



Después de ver las diferencias y clasificaciones de los aerogeneradores ahora vamos a ver en más detalle, el estudio del generador utilizado en esta tesis.

El aerogenerador Savonius fue inventado por el finlandés de igual nombre en el año 1924 y

patentado en 1929. Se compone de dos semicilindros de igual diámetro, de ejes paralelos acoplados al eje de giro y separados una cierta distancia.

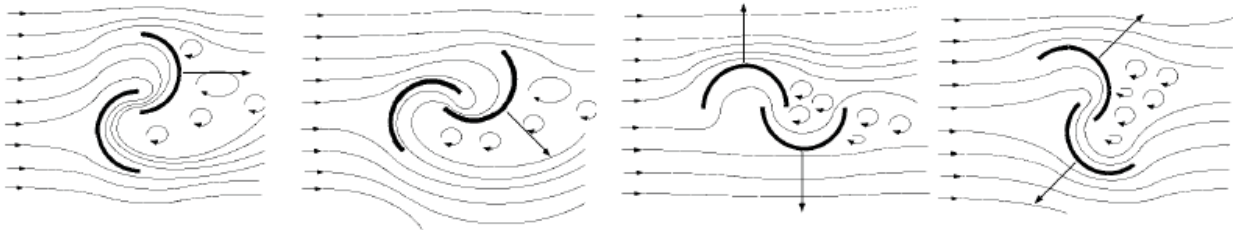
Las fuerzas que ejerce el viento en la parte cóncava y convexa son diferentes y ello hace que el conjunto gire alrededor de un eje.

Para el rotor Savonius de dos palas o canales, el coeficiente de arrastre es aproximadamente la unidad para el



curvado cóncavo (intradós), y oscila entre 0,12 y 0,25 para la parte opuesta (extradós) a donde sopla el viento. El rotor siempre está sometido a un par aerodinámico suplementario debido a las dos desviaciones sucesivas que experimenta el viento, formando un ángulo de 180° por efecto de las palas.

Con estos datos se puede calcular fácilmente la fuerza de arrastre, resultante de la diferencia de las fuerzas de arrastre correspondientes a los dos flancos, así como el par motor neto del aparato.



Hay que tener presente que hay que utilizar la velocidad $(v + u)$ en lugar de $(v - u)$ en la pala que está, en un momento determinado, en la parte en que sopla el viento presentando al mismo su parte cóncava (intradós) y $(v - u)$ en la parte convexa (extradós).

CALCULOS

La expresión de la *fuerza de arrastre* es:

$$F_{arr} = \frac{1}{2} \rho S \{ (v + u)^2 - 0,2 (v - u)^2 \}$$

y la de la potencia:

$$N_{útil} = \frac{1}{2} \rho S \{ (v + u)^2 - 0,2 (v - u)^2 \} u$$

que en primera aproximación puede ponerse en la forma:

$$N_{útil} = \frac{1}{2} \rho S C_y u^3$$

siendo C_y del orden de 0,3.

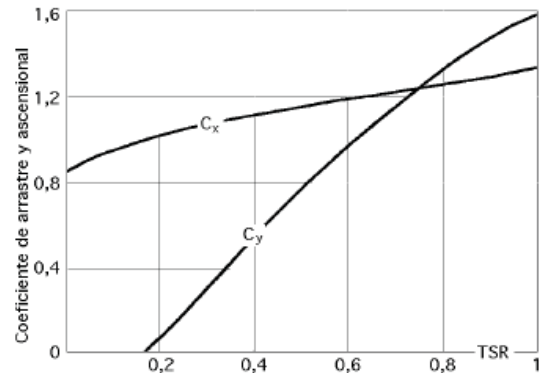
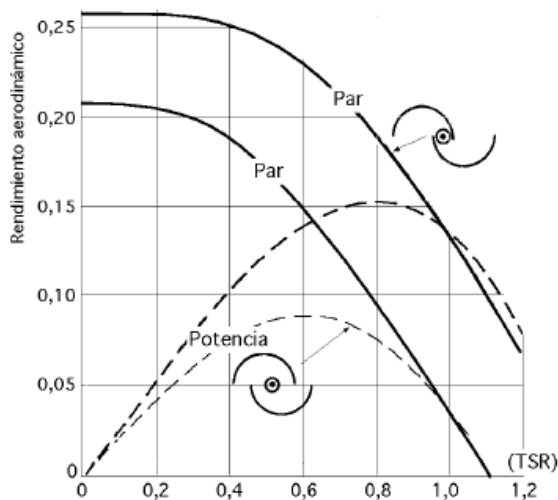
Otra expresión para la potencia útil en función del factor de conversión de la energía del viento k es:

$$N_{útil} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \eta k$$

en la que, para v en m/seg, A en m^2 , $k = 0,00136$, obteniéndose la potencia en kW.

La potencia alcanza un valor máximo para velocidades r u próximas a $v/6$; el valor de S es:

$$S = h(2d - e)$$



Rendimiento del rotor Savonius **Coeficientes del rotor Savonius**

El rendimiento del rotor viene dado por la gráfica, para un valor dado del TSR; si el TSR es igual a 0,8 (que se corresponde con la potencia máxima), el valor del rendimiento es del orden de 0,15.

Si se supone que las dimensiones del rotor son: Altura, $h = 3$ m; diámetro, $d = 0,5$ m el área frontal es:

$$A = h \times 2d = 3 \text{ m}^2$$

La potencia útil generada es:

$$N_{\text{útil}} \text{ (kW)} = \frac{10^{-3}}{2} \times 1,25 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times v^3 \left(\frac{\text{m}}{\text{seg}}\right)^3 \times 3 \text{ m}^2 \times 0,15 = 0,2812 v^3$$

Las fuerzas de sustentación y de arrastre aparecen por efecto Magnus; el rotor frena al viento por una parte (sotavento), mientras lo acelera por la contraria (barlovento).

La fuerza ascensional empuja lateralmente al rotor mientras que la fuerza de arrastre lo empuja hacia abajo.

Estas fuerzas se pueden expresar en la forma,

$$\begin{cases} F_{\text{as}} = 1,08 C_y \rho A v^2 \\ F_{\text{arr}} = 1,08 C_x \rho A v^2 \end{cases}$$

obteniéndose los coeficientes C_x y C_y a partir de la Fig IV.15, en función del TSR.

Para un TSR igual a 0,8 se obtiene, $C_y = 1,4$; $C_x = 1,2$, por lo que suponiendo una velocidad del viento $v = 10$ m/seg, se tiene:

$$\begin{cases} F_{as} = 1,08 \times 1,4 \times 1,25 \times 3 \cdot 10^2 = 567 \text{ kg} \\ F_{arr} = 1,08 \times 1,2 \times 1,25 \times 3 \cdot 10^2 = 486 \text{ kg} \end{cases}$$

y la fuerza total:

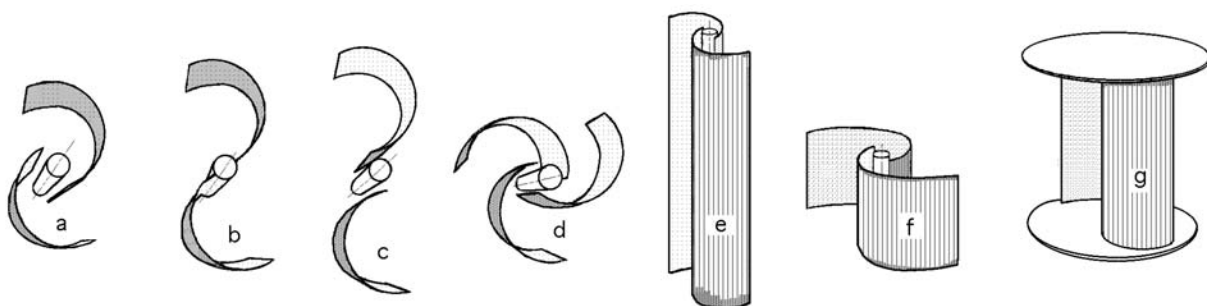
$$F_{total} = \sqrt{F_{as}^2 + F_{arr}^2} = \sqrt{567^2 + 486^2} = 746,8 \text{ Kg}$$

que es la carga total que tiene que absorber el soporte de la estructura.

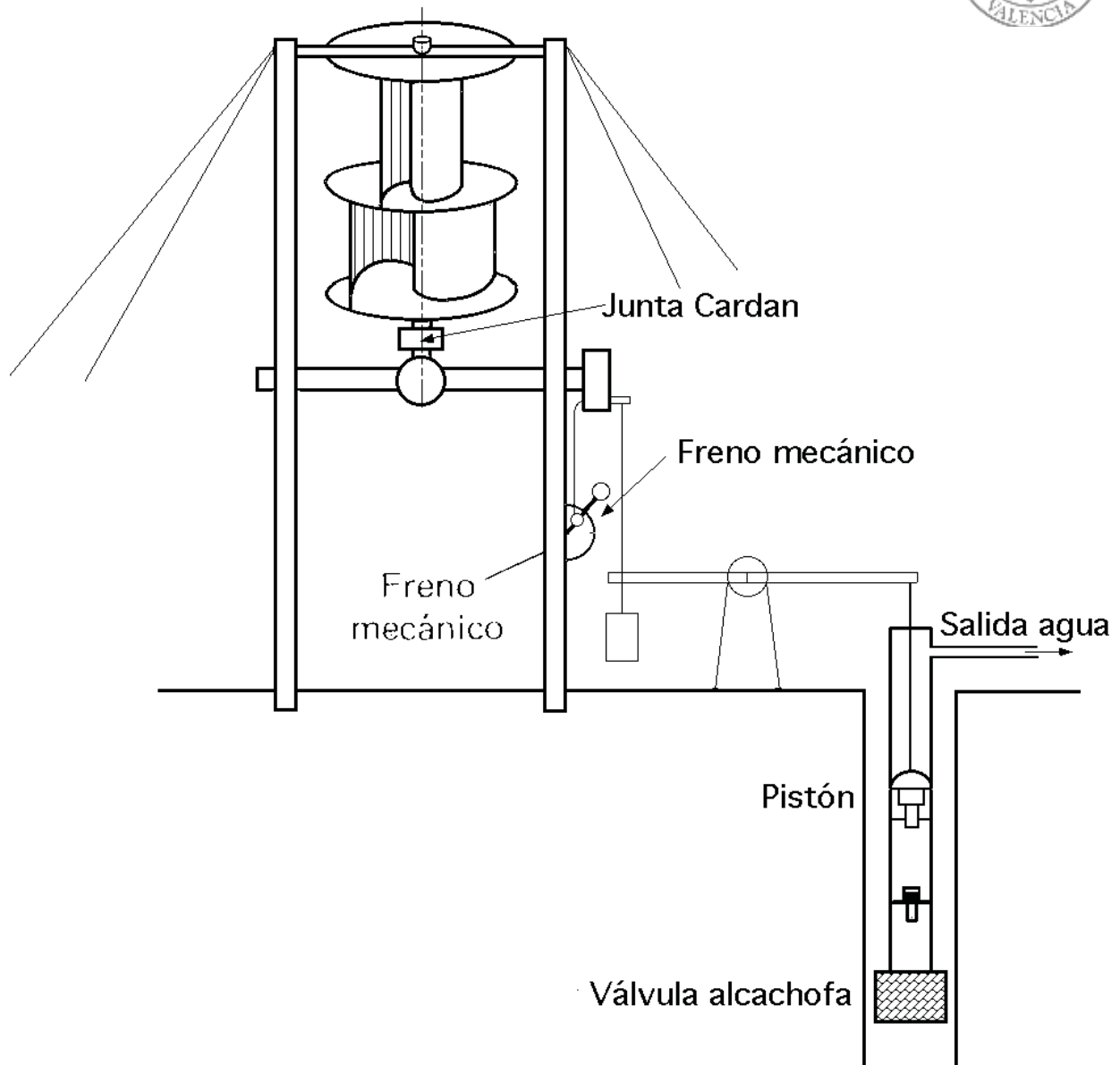
DISEÑO.- Para diseñar un rotor Savonius hay que conocer de antemano las opciones que pueden existir, que incluyen espaciados entre palas, número de palas, esbeltez y posicionamiento de las mismas y discos laterales que conforman las bases de apoyo, como se observa en las figuras de mas abajo, presentando diversas opciones; se observa que la e tiene una mayor esbeltez que la f, mientras que la g mejora el rendimiento del rotor a bajas rpm, así como la energía liberada para un determinado campo de velocidades del viento.

REGULACIÓN.- Por lo que respecta a la regulación sabemos que para un rotor de palas se utilizan formas de orientación y gobierno que actúan en el sentido de preservar a la máquina de la acción del viento para no encontrarse bajo estas fuerzas acelerativas.

Cuando el rotor Savonius se embala es muy difícil de gobernar; si para disminuir la velocidad de rotación se le aplica un freno, el par ejercido sobre el rotor aumenta y puede llegar a averiarle, por lo que este sistema de frenado no es muy adecuado.



Diversas opciones de diseño de un rotor Savonius

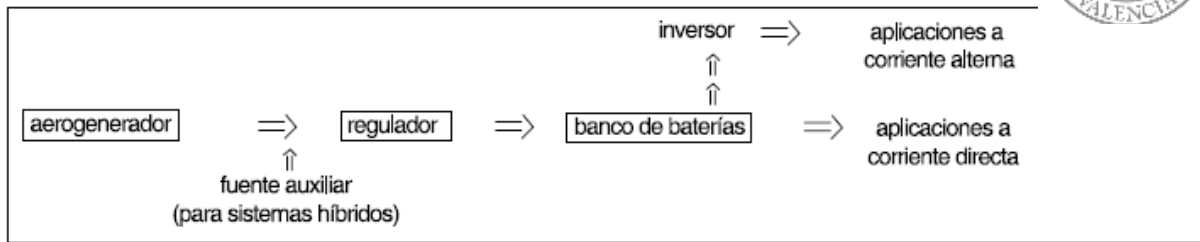


Instalación de bombeo mediante un rotor Savonius

Si las palas (canaletas) se mueven de forma que el rotor Savonius se convierta en un cilindro, la superficie resultante, cilíndrica, no estaría en condiciones de realizar un trabajo y, por lo tanto, ésta es la forma más usual de regulación en este tipo de rotores; en esta situación, por lo tanto, dejaría de comportarse como tal máquina eólica.

Configuración de una estación eólica.

Cualquier estación eólica destinada a la producción de energía eléctrica tiene según el siguiente organigrama esta configuración:



1.2.5. Constitución de un aeromotor.

Un aeromotor está constituido por las siguientes partes:

Un aeromotor de dos palas (o tres), provisto de un sistema de monitorización para ver el aprovechamiento de la energía.

Un generador eléctrico que puede estar:

Directamente acoplado al aeromotor. En el caso más sencillo las palas van directamente montadas en el eje del generador. Acoplado a un multiplicador, o no, colocado entre el aeromotor y el generador. Se verá que la velocidad de rotación depende del diámetro del rotor y disminuye cuando el diámetro aumenta.

Mecanismo de giro, en caso de ser necesario (no es nuestro caso) que permita a la máquina estar siempre orientada en la dirección del viento, cualquiera que sea esta. La energía producida en la parte móvil, se transmite por medio de un dispositivo colector asociado al mecanismo de rotación.

Cárter o armazón, que envuelva y proteja a todas las piezas del conjunto de los factores climáticos. Además (como en nuestro caso) para protección de la fauna. Una cola, en el caso de que la máquina funcione de cara al viento, para obtener una orientación según los movimientos de la masa de aire.

Torre de soporte del aerogenerador.

Es importante su construcción por varias razones, la cual es mecánicamente sencilla.

Su altura. El aerogenerador debe estar situado por encima de las perturbaciones causadas por el terreno. Como por ejemplo en una azotea.

Su frecuencia. Cualquier máquina giratoria es siempre asiento de vibraciones; es por tanto, esencial que la frecuencia propia de la torre sea muy diferente a la frecuencia de las vibraciones (fundamentales y armónicas), engendradas por el aerogenerador.

Mantenimiento. El acceso a la torre debe ser fácil para su buen mantenimiento. En nuestro caso la torre abatible es la que mejores bondades presenta. Robustez. La torre deberá resistir las sobrecargas producidas, como ser: esfuerzos ocasionados por funcionamiento anormal, ráfagas de viento, y turbulencias. Forma. Preferiblemente no angular, para evitar esfuerzos innecesarios en la misma torre mejorando así el flujo de corrientes de aire.

Dispositivo Para El Almacenamiento De La Energía Producida.

La estación eólica deberá disponer de un medio para el almacenamiento de la energía producida, esto con el fin de abastecimiento en períodos de calma atmosférica. En general el medio más accesible para este propósito son los acumuladores de plomo.

Vale hacer notar que una parte importante de la inversión está dirigida a este campo. Aproximadamente de un 20% a 50% del total del costo.



Fuente energética de apoyo.

Según la capacidad del aerogenerador, su utilización y los regímenes de viento, puede ser necesario el uso de fuentes de apoyo. Para garantizar el funcionamiento continuo de la instalación en caso de fallo en el aerogenerador. Para disminuir el uso de almacenadores.

Dispositivo Para Vigilar El Estado De Las Baterías De Acumuladores.

A pesar de ser los acumuladores de plomo el medio más barato y fácil de instalar, necesitan una vigilancia muy severa. Los acumuladores de plomo, son extremadamente sensibles a regímenes de descarga y sobrecarga prolongados. Por lo tanto es indispensable instalar un sistema manual o automático de vigilancia.

Este dispositivo deberá asegurar prioritariamente:

El corte de la corriente de carga de la batería cuando está completamente cargada.

La conmutación del circuito de utilización hacia la fuente de apoyo, si existe, cuando la batería esté descargada. La protección de los distintos elementos de la instalación mediante fusibles.

Los medios para medir el buen funcionamiento de la estación (valor de la corriente de carga, de la tensión dada por aerogenerador, etc).

Complementos para la utilización de energía eólica.

El generador eléctrico y el multiplicador.

El aeromotor puede accionar directamente o indirectamente (a través de un multiplicador), dos tipos de generador eléctrico:

1. Generador de corriente continua (dínamo).
2. Generador de corriente alterna (alternador).

Estos transformarán la energía mecánica en energía eléctrica, teniendo en cuenta las pérdidas ocurridas dentro el generador.

La fórmula de la transformación de energía es:

$$Cu \cdot 2\pi \cdot n$$

Cu: par del aeromotor (N*m)

n : velocidad de rotación (rpm)

i : Corriente proporcionada por el aerogenerador a una tensión U

Generador de corriente continua. (Dínamo).

La máquina está formada por dos partes bien diferenciadas:

El circuito magnético (bobina de inducción) que crea un campo de inducción en el entrehierro y recibe el nombre de inductor.

El bobinado de inducido en el que se recupera la energía eléctrica producida por la rotación del rotor accionado por el aeromotor.



Para recuperar esta energía, el inducido va provisto de un colector, que en la mayoría de los casos va provisto por dos sectores aislados de 180°.

Dos escobillas, situadas una frente a otra, se ponen en contacto sucesivamente con el sector A después con el sector B, lo que permite que la corriente circule siempre en el mismo sentido en la utilización. En realidad, el colector consta de un gran número de sectores, que corresponden a otros tantos conductores, pero su papel es el mismo: hacer circular una corriente de igual sentido por todos los conductores de un mismo polo.

Si se considera que ese flujo producido por la bobina de excitación es constante (máquina compensada), la corriente proporcionada es proporcional a la velocidad de rotación. La relación entre la tensión en bornes de la máquina y la corriente es:

1. $u = E - R \cdot i$
2. E: fuerza electromotriz de la máquina.
3. R: resistencia de inducido.
4. i: Corriente suministrada a la carga.

Generador sincro de corriente alterna.

La máquina consta de las siguientes partes. La bobina de excitación que crea el campo magnético en el cual el entrehierro es móvil, es el rotor accionado por el aeromotor. Puede ser de dos tipos:

Rotor bobinado alimentado por dos colectores continuos en los que la corriente circula siempre en el mismo sentido. Rotor de imanes permanentes, con lo que se suprimen escobillas y colectores, que pueden ser causas de averías. El inducido, en el que se recupera la energía, solidario a la carcasa, y conectado a la utilización. Este al estator, y puede ser monofásico o trifásico. El trifásico permite obtener una tensión alterna casi sinusoidal (curva representativa de los valores del seno) y, por tanto, mejor rendimiento.

Ventajas e inconvenientes.

El principal inconveniente de la máquina es la presencia de escobillas y colectores, que requieren un mantenimiento periódico. Por otra parte, la máquina es más pesada y cara que un generador de corriente alterna. Pero no necesita ningún dispositivo complicado para la carga de baterías. Un simple diodo, (válvula de vacío termoiónica formada por dos electrodos; conectada a un circuito permite el paso de la corriente en un solo sentido), que soporte la intensidad nominal de la máquina, será suficiente para evitar que la batería pueda ser cortocircuitada por el inducido, cuando esté parado.

El alternador, principalmente del tipo de rotor de imanes permanentes, presenta muchas ventajas. Su mantenimiento es nulo debido a la total ausencia de piezas en rozamiento. Para una misma potencia es más ligero y económico. Pero debe girar a una velocidad más elevada y más estable que la máquina (en general 3000 rpm) y además requiere un rectificador para la carga de baterías. A pesar de los inconvenientes propios de alternador, su utilización está generalizada, excepto para aeromotores de pequeña potencia, en los que la estabilidad de la velocidad de rotación no es suficiente. En general, se utilizan alternadores trifásicos de imanes permanentes.



El multiplicador.

Efectivamente, los rotores de diámetro superior a los 5 metros, tienen velocidades de rotación demasiado bajas ($<200\text{rpm}$) para poder accionar directamente un alternador clásico. Por tanto, para estas máquinas, es imprescindible intercalar un multiplicador entre el aeromotor y el generador. Hay tres tipos de multiplicador que pueden utilizarse con los aeromotores: El más sencillo es el multiplicador de engranajes, de uno o varios ejes de ruedas dentadas cilíndricas. Es económico, pero de construcción embarazosa para conseguir relaciones de multiplicación elevadas.

El empleo de trenes planetarios permite obtener multiplicaciones elevadas en un espacio reducido. La repartición de pares y esfuerzos entre varios satélites, así como la disposición coaxial, (perteneciente al eje o concerniente a él), de los ejes de entrada y salida facilitan una construcción compacta y relativamente ligera. Los satélites, arrastrados por un tren, engranan por una parte con el piñón colocado en el eje de salida, y por otra con una corona exterior fija. El eje de entrada es solidario con el tren que mueve satélites.

El reductor de acoplamiento cónico, permite disponer el eje de salida perpendicular al de entrada. En todos los casos, las dientes helicoidales aseguran un mejor rendimiento y también un funcionamiento más silencioso.

Tipos de multiplicadores.

Recuperación De La Energía En El Soporte Fijo.

Máquinas sin multiplicador

El generador eléctrico está siempre colocado en la parte móvil de la máquina. La energía eléctrica se transmite al soporte fijo mediante un conjunto de colectores y escobillas, generalmente sobredimensionados para evitar pérdidas inútiles por resistencia en los contactos demasiado elevada.

Máquinas con multiplicador.

En este caso, puede estudiarse la solución del multiplicador colocado en la base, sobre todo para la recuperación de la energía mecánica. El multiplicador tiene entonces dos ejes perpendiculares, el eje horizontal y el vertical. Pero los problemas de estancamiento en el eje vertical son graves. En el caso de recuperación de energía eléctrica, interesa siempre utilizar el sistema de colectores escobillas.

Protección Contra Los Rayos.

Los aerogeneradores se colocan generalmente en puntos elevados, y además deben ser más altos que los obstáculos de sus alrededores. Por tanto, frecuentemente constituyen los puntos de descarga de electricidad estática durante las tormentas.

Aunque, por propia constitución el generador está protegido contra las descargas eléctricas, por estar encerrado en una estructura metálica conectada a tierra (caja de Faraday), la instalación a la que está conectada puede ser destruida por las sobre tensiones que se propagan por el cable eléctrico de alimentación colocado entre el aerogenerador y la utilización. El generador eléctrico



puede resultar dañado por contracorriente, en caso de que la utilización quede en cortocircuito.

Soporte para aerogeneradores.

Los aeromotores de pequeña y mediana potencia, pueden estar colocados en dos tipos de soporte:

Soportes autoportantes:

- Estructura metálica.
- Tubulares.
- De hormigón.
- Soportes atirantados
- Estructura metálica.

Los soportes atirantados abatibles.

El empuje en la parte superior del soporte es debido principalmente al arrastre del rotor, sobre todo si el sistema de regulación empleado es de arrastre máximo, cuyo valor es:

T: Empuje en la parte superior del soporte (newton)

- m: Masa volumétrica o densidad del aire (1,25 kg/m³)
- S: Superficie barrida por el rotor (m²)
- V: Velocidad del viento (m/s)
- Cx: Coeficiente de empuje.

Reemplazando:

- $S = 0,7375 \text{ m}^2$
- $V = 7 \text{ m/s}$
- $Cx = 0,025$
- Resultado:
- $T = 0,56 \text{ nt}$

Siempre que el terreno lo permita, es aconsejable utilizar un soporte atirantado basculante, que facilite el mantenimiento del aeromotor y del mismo soporte, en el suelo y por tanto con una mayor comodidad y sin peligro.

Empleando elementos tubulares, muy utilizados en los circuitos de distribución, y las bridas de unión normalizadas, la construcción de un soporte de hasta 15 m es simple y menos costoso que el soporte autoportante.

Cualquiera que sea el tipo de soporte utilizado, hay que tener en cuenta:



- la protección contra la corrosión;
- la facilidad de montaje y desmontaje de la máquina;
- los riesgos de la formación de hielo.

Nivelación de los puntos de anclaje al suelo,

Nos referimos aquí a los cables que se emplean para las maniobras de elevación y abatimiento de la torre soporte. Se emplean dos cables laterales para guiar la trayectoria de bajada y otros dos para subir o bajar el soporte.

Los tensores permiten variar ligeramente la longitud de los cables, pero es insuficiente, y por tanto es indispensable colocar los cables laterales en el mismo plano horizontal que el pie del soporte, y alinearlos con el eje de basculamiento de dicho pie.

La posición del anclaje de los otros dos cables es menos importante. en terreno inclinado, debe colocarse el anclaje correspondiente al dispositivo de elevación (torno de tambor o cabría de fricción) en el punto menos elevado de los dos, ya que así se disminuirá el esfuerzo inicial.

1.2.6. Dispositivos De Almacenamiento.

Dado que una característica esencial del viento es su discontinuidad en el tiempo, se han realizado diversos estudios destinados a desarrollar sistemas que permitan almacenar la energía producida por el viento y no utilizada directamente durante los períodos de producción a fin de restituir una parte, la mayor posible, durante los días de calma.

Este aspecto de la energía eólica es, aún hoy, uno de los que más frenan su desarrollo, ya que este almacenamiento, tanto más importante cuanto más irregular sea el régimen de vientos, constituye frecuentemente una parte importante (> 20%) del costo de una instalación de producción de energía eléctrica a partir del viento.

En esta obra daremos, sólo a título informativo, una breve descripción de los dispositivos de almacenamiento, exceptuando las baterías de acumuladores clásicos, que trataremos con más detalle ya que siguen siendo el sistema más fácil y a menudo más económico (relativamente) para almacenar energía eléctrica en pequeña cantidad.

Hay que remarcar que todos los dispositivos de almacenamiento, incluidas las baterías de acumuladores, tienen rendimientos entre el 70 y el 80%.

Acumuladores de plomo.

El tipo de acumulador de plomo que conviene utilizar, fue puesto a punto de 1860 por planté. Desde entonces no ha sufrido más modificaciones que las destinan a mejorar sus prestaciones, pero el principio de funcionamiento sigue siendo el mismo.

Construcción.

El recipiente es de material aislante, vidrio o plástico. Las placas están formadas por rejillas de



plomo-antimonio en las mallas de las cuales se encuentra la materia activa en forma de pasta.
Electrodo positivo-ánodo: 75% de minino + 25% de litargio.

Electrodo positivo-cátodo: 25% de minino + 75% de litargio.

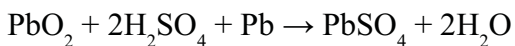
El electrolito es una solución de ácido sulfúrico cuya densidad es máxima al final de la carga (30%) y mínima al final de la descargar (16%).

Principio fundamental de funcionamiento. Durante la descarga, el ácido sulfúrico del electrodo se descompone: por una parte, se forma agua y óxido de plomo en el ánodo;

por otra, en el cátodo, se acumula sulfato de plomo insoluble.

Si la descarga es demasiado profunda, se forma sulfato de plomo incapaz de descomponerse por reacción inversa durante la carga, y las placas negativas se "sulfatan" (se vuelven blanquecinas).

Durante la carga, el fenómeno es exactamente el inverso, y cuando está del todo cargado se llega a la electrólisis del agua con desprendimiento de hidrógeno en el cátodo. Esquemáticamente tenemos:



El electrolito, pues, participa estrechamente en las reacciones.

Una particularidad del acumulador de plomo, es su sensibilidad a las reacciones secundarias: acción del ácido sulfúrico sobre el plomo y el óxido de plomo, corrientes locales ocasionadas por la constitución heterogénea de las placas, sobre todo en las placas positivas en las que la fuerza electromotriz debida al contacto plomo-óxido de plomo es elevada. El resultado de todo es el auto descarga y sulfatación progresiva de las placas.

Otra característica del acumulador de plomo es la variación de materia activa a lo largo del ciclo de carga-descarga: En la descarga, las placas casi duplican su volumen inicial, por lo cual se corre el peligro de que la materia activa se despegue en trozos y cree cortocircuitos en el acumulador. Todo lo expuesto hasta aquí tiene por objeto dejar patente la importancia de la vigilancia adecuada del estado de carga o descarga de una batería de plomo para conservarla en buenas condiciones de funcionamiento, ya que una carga o descarga excesivas provocan el rápido envejecimiento del acumulador.

El rendimiento de la batería conveniente, cuando las instalaciones se alimenten exclusivamente de la energía almacenada en las baterías, distribuir la descarga de las mismas, y no descargarlas simultáneamente siempre que sea posible (ver también las características de los fabricantes. Vida útil: 10 a 20 años según la calidad de acumulador.

Número de ciclos de carga durante la vida útil del acumulador: ~ 1500. Resistencia interna de un elemento, siendo la masa en kilogramos de un elemento de acumulador: $R_i, 0,08 \hat{U}^*1/m$ Masa: 1kg para 20 a 40 KW.

Rendimiento-capacidad: Estas dos características dependen en gran medida del régimen de carga-descarga (valor típico para cálculos: 80%).

Todos cuando antecede son cierto para los acumuladores son preferibles las baterías de tipo estacionario o semi-fijo de 2 V por elemento y no las baterías de arranque (para automóviles), que tienen una vida útil más corta, capacidad nominal más baja y sobre todo, que soportan mal los



ciclos de carga-descarga.

Conclusiones.

A pesar de los inconvenientes que presenta, en particular la necesidad de no sobrecargarlo ni descargarlo en exceso, el acumulador de plomo de tipo semifijo es actualmente el mejor adaptado y más económico para su empleo con aerogeneradores. Para minimizar las pérdidas de rendimiento debidas al paso por el sistema de almacenamiento, el usuario de energía eólica debe realizar la instalación y adaptar su funcionamiento de manera que puede utilizar el máximo de energía de salida del aerogenerador.

Ejemplo:

En las zonas en que el viento sopla regularmente cada día, puede aprovecharse el período de producción de energía eólica para bombear agua a un depósito situado por encima del nivel de utilización, de forma que ésta se distribuya después por gravedad.

Emplear los aparatos eléctricos (sierra, taladro...): Directamente desde la salida eléctrica del aerogenerador, si éste nos proporciona corriente en formato industrial (220 V o 380 V).

o bien utilizando un convertidor (giratorio o estático) conectado directamente a la salida del rectificador.

Nota: Reposición de acumuladores de plomo de tipo semifijo cuyas placas puedan sacarse del recipiente (generalmente de vidrio). Cuando las placas de una batería están sulfatadas (tono blanquecino para las placas negativas y claro para las positivas), puede conseguirse una desulfatación con una serie de cargas a baja intensidad, reemplazando el ácido por agua (destilado o de lluvia). Esta se enriquece con ácido y antes de la puesta en servicio del elemento se le añade el necesario para conseguir la concentración adecuada. Cuando se desea dejar una batería en reposo durante varios meses, es necesario guardarla en estado de plena descarga reemplazando el ácido por agua destilada.

Determinación de la capacidad de la batería de acumuladores. Para garantizar el suministro de energía en la utilización con un mínimo de discontinuidad, la batería de acumuladores deberá estar correctamente determinada. Para ello necesitamos conocer:

Los datos meteorológicos del emplazamiento. Cuanto más exactos sean estos datos, mejor será la determinación de la batería de acumuladores.

La potencia del aerogenerador de que dispone la instalación.

La potencia media consumida por la utilización (P). Esta potencia debe tener en cuenta todos los aparatos alimentados con energía eléctrica proveniente de la batería de acumuladores, y sus turnos, es decir el número de horas que funciona cada uno al día.

Todos los fenómenos que hemos citado, tienen carácter aleatorio:

la producción de energía es discontinua; el consumo varía según los días; el valor de la corriente dada por el aerogenerador, depende del estado de carga de las baterías; además, se ha visto ya que la energía restituida por la batería depende del régimen de descarga; y, por otra parte, no toda la energía producida pasa por las baterías y por tanto no queda afectada por el rendimiento de éstas. Para un dimensionado exacto, hay que recurrir a una simulación de funcionamiento de la instalación, mediante ordenador. Los datos esenciales son las velocidades de viento que proporciona el SENAMHI, en formato directamente aplicable al ordenador, siempre que estos



sean aplicables a nuestro emplazamiento. Estos métodos requieren procesos engorrosos y caros, y normalmente se recurre a cálculos más sencillos, como el que describimos a continuación:

Designemos por N1 el período más largo durante el cual el viento ha sido inferior al viento productivo ($V < V_d$). No se tendrán en cuenta aquellos períodos excesivamente largos que no se repitan más de 4 veces durante un año, ya que él hacerlo conduciría a sobredimensionar la batería, con el consiguiente sobrecosto.

Y por N2 el período más largo durante el cual el viento se ha mantenido entre el productivo (V_d) y de nominal (V_n). Cuando el viento alcanza la velocidad nominal o de regulación, el aerogenerador da su potencia nominal.

En general se toma una autonomía para las baterías, en días N, inferior o igual a $1,25 N_1$:

$N \geq 1,25 N_1$

En efecto, el coeficiente de N1 depende de la importancia de N2 frente a N1.

Si $N_1 \ll N_2$, los vientos serán débiles muy frecuentemente, y por tanto conviene tomar $N = 1,25 N_1$.

Este valor de N nos permite calcular la capacidad de la batería en watt-hora.

Capacidad de la batería:

$$C_{Wh} = N \cdot 24 \cdot P_m \quad (P_m = \text{Potencia media total}) \quad \text{Resultado: } 8649 \text{ w/h}$$

$$C_{Wh} = N \cdot E \quad (E = \text{Energía total})$$

Teniendo en cuenta la tensión U_b elegida par la batería de acumuladores, en función de los aparatos y de la tensión nominal del aerogenerador, la capacidad vendrá dada por:

$$C_{Ah} = C_{Wh} / U_b$$

Resultado:

$$C_{Ah} = 360,375 \text{ amp/h}$$

Esta capacidad debe ser compatible:

Con la intensidad de corriente máxima que puede suministrar el aerogenerador ($I_{max} = P_{max} / U_b$) que se debe ser inferior a $C_{Ah} / 10$.

$$I_{max} < C_{Ah} / 10.$$

Resultado:

$$I_{max} = 41,67 \text{ amp}$$

$$41,67 < 36,0375$$

para las baterías de plomo;

Con un coste y dimensiones aceptables para la batería de capacidad suficiente para la autonomía deseada de n días. En caso en que el valor hallado para C_{Ah} sé a demasiado elevado, será necesario disponer de una fuente de emergencia mayor, o buscar otro emplazamiento con régimen de vientos más favorables, si es que es posible.



1.2.7. Control del estado de la carga de la batería de acumuladores. circuitos asociados (Control manual).

Aerogenerador equipado con generador de corriente continua.

Contiene los siguientes dispositivos de protección, en serie con el circuito de carga de la batería de acumuladores: Obligatoriamente, un diodo de potencia que evite que la batería pueda descargarse a través del generador, cuando esté parado por la falta de viento o por estar frenado. Un interruptor y un fusible en el circuito de carga del aerogenerador, que pueden estar colocados en la misma caja. El interruptor permite abrir el circuito de carga, cuando las baterías estén totalmente cargadas. El fusible protege a los componentes en caso de falsas maniobras o de fallo de un componente; debe estar calibrado en función de la corriente máxima que puede proporcionar el aerogenerador. Un interruptor y un circuito de utilización (optativo) que proteja las baterías y el circuito eléctrico en caso de cortocircuito prolongado en la utilización.

Dispositivo de control (optativos):

Un voltímetro calibrado según la tensión de la batería y que sirve para verificar su estado de carga. Un amperímetro o testigo de carga montado en serie en el circuito de carga, que permita medir la corriente suministrada por el aerogenerador.

Empleando un amperímetro de cero central, podemos medir la corriente suministrada por el aerogenerador y la consumida por la utilización, pudiendo verificar así los cálculos de autonomía.

Aerogenerador equipado con alternador.

El diodo es sustituido por un rectificador monofásico o trifásico según el alternador utilizado. Entre el alternador y el rectificador, puede intercalarse un transformador para adaptar la tensión de salida del alternador a la de la batería de acumuladores.

En todos los casos, el estado de carga de las baterías, debe ser comprobado periódicamente, verificando la concentración del electrolito del acumulador con un ácido graduado en densidad o en grados Baumé.

Empleo De Un Contador De Amperios-Hora

Otra posibilidad, válida para cualquier tipo de generador, consiste en emplear un contador reversible que nos dé en cada instante el número de Ah almacenados en la batería. Este contador va provisto de los índices regulables que pueden colocarse en los niveles de frecuencia elegidos como umbral de carga o descarga. Estos índices, asociados a contactos, pueden gobernar:

1. -Un contador.
2. -La puesta en marcha de la fuente de energía.
3. -Una sirena...

Además, el contador está afectado por el rendimiento de la batería, cuyo valor puede elegirse en el momento de instalarlo.

Pero estos contadores presentan graves inconvenientes:

1. -Son muy caros.
2. -No se adaptan más que a una determinada capacidad de carga variables y que el rendimiento de la batería decrece al envejecer ésta.



1.2.8. Valores de las tensiones de final de carga y descarga.

Las indicaciones más importantes vienen especificadas por el fabricante: por una parte, para las tensiones y, por otra, para la densidad volumétrica.

Sin embargo, las siguientes indicaciones, permiten conseguir una regulación adaptada al tipo de utilización.

Valor de la tensión de final de carga.

El valor de la tensión cuando "hierve" un elemento acumulador de plomo de tipo semifijo es de 2,35 V aproximadamente, a 25°C. Si se elige este valor como límite de final de carga, el consumo de agua por electrólisis será verdaderamente importante en caso de largos períodos de viento. La elección del valor umbral de final de carga, dependerá de las características propias de la instalación: El régimen de vientos: un régimen de vientos regular permite acercarse al funcionamiento en flotación y el nivel final de carga se alcanzará difícilmente. Es el régimen de funcionamiento más favorable, pero desgraciadamente no el más generalizado. Un régimen de vientos irregular implica el funcionamiento de la batería en ciclos de carga-descarga. el nivel de final de carga se alcanza frecuentemente, y es importante que la regulación está bien hecha. Capacidad de la batería de acumuladores (C) con relación a la corriente de la In del generador. Cuanto mayor sea la relación C/I_n , menor será el riesgo de que la batería se sobrecargue en régimen de vientos irregulares. Tipo de utilización. Es más favorable un funcionamiento continuo que secuencial. Por tanto el funcionamiento de la instalación será más satisfactorio cuanto más regulares sean el régimen de vientos y la utilización, ya que entonces nos acercaremos más a una utilización directa de la energía producida por el aerogenerador, sin pasar por la batería de acumuladores. Regla práctica: Para los emplazamientos en los que predomine el funcionamiento por carga y descarga, se ajustará el nivel de corte de la corriente de carga al máximo en función del consumo de agua. Se ha visto que el consumo normal de agua es aproximadamente de 0,18 litros por mes para un elemento de 2 V y de 1000 Ah. Cualquiera que sea el ajuste, es importante que al final de la carga, la densidad del electrolito alcance el valor especificado por el fabricante de la batería.

Valor de la tensión de final de descarga por elemento.

Depende del tipo de acumulador empleado, pero para acumuladores plomo de tipo semifijo es importante no descender por debajo de los 1,8 V por elemento, para evitar la formación de depósitos de óxido no soluble en la recarga y, por tanto, una disminución importante de la capacidad. El valor de 1,8 citado, es un mínimo para una corriente de descarga inferior o igual a $C/10$. Este valor de tensión corresponde a una densidad volumétrica del electrolito de 1180 kg/m³. Además de los fenómenos de oxidación, el electrolito de las baterías descargadas se congela a temperaturas más altas. Según el emplazamiento, el valor elegido como umbral de descarga deberá tener en cuenta la posibilidad de congelación del electrolito, que puede provocar la rotura de los recipientes en los que están colocadas las placas y el electrolito. Por otra parte, este valor de 1,8 V por elemento puede ser incompatible con el buen funcionamiento de los aparatos de instalación; en tal caso, el final de descarga vendrá evidentemente condicionado por el nivel de no-funcionamiento de los aparatos.



1.3. Utilización de la energía eólica para usos domésticos.

En este caso el número y tipo de aparatos es muy diverso, aunque para usuarios acostumbrados a vivir en sentidos aislados puede establecerse una prioridad de necesidades en el orden que se da a continuación. Este orden tiene en cuenta criterios de control y no de consumo.

1. Iluminación de locales.
2. Suministro de agua corriente.
3. Refrigeración-Congelación.
4. Equipos musicales, receptores de radio y televisión.
5. Pequeñas herramientas de taller y motores eléctricos (circulares de calefacción).
6. Accesorios electrodomésticos.

Hay que resaltar que, excepto en emplazamientos muy favorables (lugares muy ventosos), no se considera la posibilidad de calefacción a partir de aerogeneradores.

Para satisfacer todas estas necesidades, existen dos tipos de aparatos:

Los comerciales de gran difusión, y por tanto económicos, pero mal adaptados a esta utilización y con rendimientos mediocres, y que normalmente se alimentan con corriente alterna de 220 V y 50 Hz. Los mejor adaptados, a menudo más robustos y caros, pero de difusión mucho menor. Vamos a estudiar cada una de las necesidades en el orden dado y a determinar los elementos para la elección de los aparatos.

Iluminación.

Las lámparas de incandescencia clásicas, que funcionan indistintamente con continua o alterna, se encuentran con distintos tipos de casquillo B22 (bayoneta) o E27 (rosca) y potencias comprendidas entre los 15 y 100 W para las tensiones siguientes: 12, 24, 48, 110-130, 210-230 voltios. Los tubos fluorescentes pueden alimentarse con continua a través de un convertidor o transistores a una frecuencia de 16 KHz a partir de 12 V, 24 V o 110 V.

Vemos claramente que el rendimiento luminoso es superior con tubos fluorescentes (para un mismo flujo luminoso constante, la lámpara de incandescencia consume más del doble de energía). El costo inicial de instalación es muy superior en el caso del tubo fluorescente, porque el convertidor es caro, pero el costo de emplear un tubo fluorescente es prácticamente el mismo que para la lámpara de incandescencia.

Refrigeración-Congelación.

Los armarios frigoríficos o congeladores más difundidos, van equipados de compresores alimentados con corriente alterna. En el momento del arranque se producen demandas de intensidad 4 a 10 veces superiores a la nominal, lo cual es muy perjudicial si se emplean convertidores de continua-alterna estáticos. Es mucho más interesante emplear refrigeradores-congeladores de absorción (sin motor) que se encuentran con capacidades hasta de 250 litros y que funcionan a 12, 24, 110 o 220 V de continua. Pero estos aparatos consumen mucha energía (1 KWh/ días para 250 litros). Existe finalmente otro sistema de refrigeración -congelación de



elevado rendimiento, empleando en las embarcaciones Este sistema consta de un compresor, moviendo por un motor de continua, una bomba que hace circular agua por el condensador, y la generación de fría se consigue haciendo circular un líquido por placas tipos radiador (placas frías). La ventaja esencial de este sistema es que sólo funciona 2 horas al día (una por la mañana y otra por la tarde).

Equipos musicales, receptores de radio y televisión.

El consumo de estos aparatos, actualmente de transistores, es muy bajo.

Pueden utilizarse: De continua a 9 ó 12 V, bien sea directamente o a través de un convertidor continua-continua. Es el caso de los receptores de televisión, que generalmente pueden funcionar a 12 V. O de alterna, y su bajo consumo permite alimentadores a través de un convertidor (ondulador) de continua-alterna de pequeña potencia (máximo 100W).

Pequeñas herramientas de taller, motores eléctricos y electrodomésticos.

Algunos aparatos van provistos de motores universales que pueden funcionar tanto con corriente continua como con alterna para una misma tensión, pero tienen muy poco rendimiento. Excepto para los circuladotes de calefacción que pueden encontrarse con motores de continua, es interesante que estos aparatos funcionen 220 o 380 V 50 H :

Utilizando un convertidor estático o rotativo;

Haciéndolos funcionar directamente a la salida del aerogenerador, cuando sople el viento y proporcione la tensión nominal de salida 220 V 50 H monofásica ó 380 V 50 H trifásica.

Nota: En caso de que el aerogenerador proporcione una tensión alterna de las mismas características que la de la red de distribución, y que alimente aparatos directamente a la salida de éste durante los períodos de funcionamiento, es importante:

No sobrepasar la potencia nominal del aerogenerador;

Vigilar las sobre intensidades de arranque (mínimo, 4 veces superior a la intensidad nominal para motores de pequeña potencia).

Los convertidores.

Los convertidores son de dos tipos: Continua-continua. Generalmente formados por reductores o elevadores de tensión a transistores o tiristores. Permiten adaptar la tensión de la batería a la de utilización. Continua-alterna. Pueden ser ondulares estáticos, a transistores o tiristores, o bien convertidores rotativos. Los onduladores a transistores o tiristores son: para potencias inferiores o iguales a 1000 W y a transistores; para potencias superiores se emplean tiristores. Estos onduladores tienen un rendimiento cercano al 60% y son muy sensibles a las sobrecargas. En particular, soportan mal las sobre intensidades de arranque de los motores. Además, ellos mismos presentan intensidades de arranque 5 a 6 veces superiores a la intensidad nominal, lo que implica que los dispositivos de mando (fusibles, seccionadores, contactares,...) deben estar bien dimensionados.

Los convertidores rotativos. Esencialmente constan de un motor de corriente continua acoplado a un alternador. La tendencia es sustituirlos por los estáticos. En ulizaciones con sobre intensidades de arranque frecuentes, pueden todavía emplearse con ventaja. Pudiéndose comprar fácilmente de ocasión.



2 INTRODUCCIÓN A LAS REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES

2.1 introducción

La idea de una red de sensores surge gracias a las posibilidades que nos da la tecnología de crear una red de dispositivos de captura constante, que nos permita registrar y almacenar una determinada información, transmitir datos de un dispositivo a otro, y después retransmitir toda la información para almacenarla en una localización central. Teniendo siempre en cuenta que todo ello funcionará con un gasto de energía muy reducido.

Una red de este tipo es un flexible y poderoso instrumento para poder monitorizar complejos sistemas, donde situar los sensores puede ser imposible de cualquier otra manera. El objetivo de la recolección de datos por los sensores en la monitorización, es la obtención de los datos teniendo como única limitación las características de los sensores.

Podemos crear una infraestructura sólida y barata que permita que cada sensor proporcione unas medidas y una información detallada de una zona localizada, lo cual puede ser difícil de obtener con la instrumentación tradicional. Los dispositivos son unidades autónomas que constan de un microprocesador, una fuente de energía, un radiotransceptor y un elemento sensor.

A medida que este tipo de redes sean más utilizadas y gracias también, a los avances tecnológicos constantes en las técnicas con semiconductores, los precios de los dispositivos bajarán a la vez que las prestaciones subirán. Las aplicaciones en las que podrán utilizarse se multiplicarán, así como las áreas de investigación científica.

2.2 redes inalámbricas de sensores

Una red de sensores (del inglés sensor network) es una red de diminutos dispositivos, equipados con sensores, que colaboran en una tarea común. Las redes de sensores están formadas por un grupo de sensores con ciertas capacidades sensitivas y de comunicación inalámbrica que permiten formar redes adhoc sin infraestructura física preestablecida ni administración central.

La expresión ad-hoc hace referencia a una red en la que no hay un nodo central, sino que todos los dispositivos están en igualdad de condiciones. Ad-hoc es el modo más sencillo para crear una red, un tipo de red formada por un grupo de nodos móviles que forman una red temporal sin la ayuda de ninguna infraestructura externa. Para que esto se pueda llevar a la práctica es necesario que los nodos se puedan ayudar mutuamente para conseguir un objetivo común: que cualquier paquete llegue a su destino aunque el destinatario no sea accesible directamente desde el origen. El protocolo de encaminamiento es el responsable de descubrir las rutas entre los nodos para hacer posible la comunicación.

Las redes de sensores son un concepto relativamente nuevo en adquisición y tratamiento de datos con múltiples aplicaciones en distintos campos, tales como entornos industriales, domótica, entornos militares, detección ambiental.

Esta clase de redes se caracterizan por su facilidad de despliegue y por ser autoconfigurables, pudiendo convertirse en todo momento en emisor, receptor, ofrecer servicios de encaminamiento entre nodos sin visión directa, así como registrar datos referentes a los sensores locales de cada nodo. Otra de sus características es su gestión eficiente de la energía, que les permite obtener una



alta tasa de autonomía que las hacen plenamente operativas.

La miniaturización de los dispositivos, cada día mayor, dio a luz la idea de desarrollar dispositivos extremadamente pequeños y baratos que se comunican de forma inalámbrica y se organizan autónomamente. La idea de estas redes es repartir aleatoriamente estos nodos en un territorio amplio, del cual los nodos captan cierta información hasta que sus recursos energéticos se agoten. Los adjetivos ‘pequeño’, ‘barato’ y ‘autónomo’ dieron a conocer la idea como polvo inteligente (de ingles smart dust).

Las redes de sensores es un tema muy activo de investigación en varias universidades, aunque ya empiezan a existir aplicaciones comerciales basadas en este tipo de redes. Una de las redes de sensores más grande desarrollada hasta la fecha consistió en 800 nodos y fue puesta en servicio el 27 agosto 2001, por una duración breve, en la Universidad de Berkeley para demostrar la potencia de esa técnica en una presentación.

Incluso podemos comprobar como los costos de instalación de una de estas redes son bastante menores a un sistema de adquisición tradicional.

	Tradicional	Redes de sensores inalámbricas
Coste del sensor	2000 \$	350 \$
Coste de la adquisición de datos	65 \$	0 \$
Coste del cableado	75 \$	15 \$
Coste por sensor	2140 \$	365 \$

Comparativa de precios

2.3 arquitectura del sistema

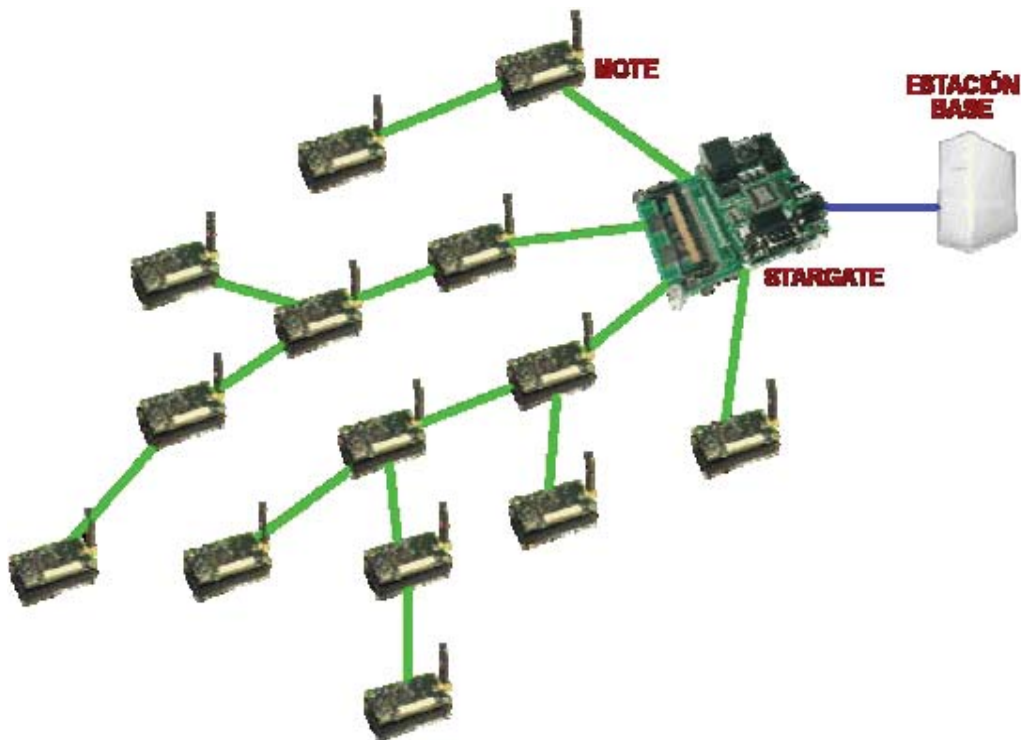
Las redes de sensores están formadas por un conjunto de pequeños dispositivos denominados nodos

sensores, con capacidad limitada de cómputo y comunicación, cuyo tiempo de vida depende de una batería adjunta al dispositivo. El tiempo de vida de la red de sensores dependerá por tanto del tiempo de vida de la batería de sus nodos. Estos dispositivos se encuentran dispersos de manera ad-hoc en una determinada área a monitorizar. En redes de comunicación, dicha expresión hace referencia a una red en la que no hay un nodo central, sino que todos los nodos están en igualdad de condiciones.

Típicamente, el modelo seguido por las aplicaciones es el siguiente: realizar una serie de mediciones sobre el medio, transformar dicha información en digital en el propio nodo y transmitirla fuera de la red de sensores vía un elemento gateway a una estación base, donde la información pueda ser almacenada y tratada temporalmente para acabar finalmente en un servidor con mayor capacidad que permita componer un histórico o realizar análisis de datos.

En una red de sensores inalámbricos, por lo tanto, podemos encontrarlos:

- nodos inalámbricos
- puertas de enlace
- estaciones base



Red inalámbrica de sensores

2.3.1. nodo inalámbrico

Los nodos inalámbricos se llaman motas, del inglés ‘mote’, por su ligereza y reducido tamaño. Son dispositivos electrónicos capaces de captar información proveniente del entorno en el que se encuentran, procesarla y transmitirla inalámbricamente hacia otro destinatario.

Diseñar un mota no se reduce a miniaturizar un ordenador personal. Hay que tener en cuenta que queremos un espacio reducido, un consumo muy bajo de energía y un coste de los dispositivos reducido.

Y en contraposición a esto una potencia de ejecución de programas elevadas y una transmisión de datos eficaz y con amplia longitud de emisión.

Estos motas son diseñados y programados para formar parte de una red con un objetivo particular, lo que quiere decir que un mota aislado tiene muy poca utilidad.

El hardware de cada uno de estos dispositivos tiene varias partes bien diferenciadas.



2.3.1.1 Procesador

Es el componente que interpreta y procesa los datos para transmitirlos a otra estación. También gestiona el almacenamiento de datos en la memoria.

Puesto que de un nodo sensor se espera una comunicación y una recogida de datos mediante sensores, debe existir una unidad de procesado, que se encargue de gestionar todas estas operaciones.

Hay muchos tipos diferentes de productos disponibles en el mercado para ser integrados en un nodo, como microcontroladores, microprocesadores y FPGA.

FPGA: Actualmente éstas presentan varias desventajas, la mayor de ellas es el consumo. A pesar de que en el mercado podemos encontrar FPGAs de bajo consumo, este consumo no es lo suficientemente bajo como debería ser para este tipo de nodos. Esto no significa que en un futuro cercano, éstas sean una buena opción si se consigue que reduzcan el consumo.

Microprocesadores: Han sido sustituidos por los microcontroladores, ya que éstos integran dentro de un mismo dispositivo, un microprocesador y memoria.

Microcontroladores: Como se ha dicho, incluyen un microprocesador y memoria, pero además tienen una interfase para ADCs, UART, SPI, temporizadores y contadores. Hay muchos tipos de microcontroladores que van desde los 4 bits hasta 64 bits, con una variación del número de temporizadores, con diferentes consumos de energía,...

Actualmente los más utilizados son los siguientes procesadores de bajo consumo:

- **ARM7:** Se denomina ARM a una familia de microprocesadores RISC diseñados por la empresa Acorn Computers y desarrollados por Advanced RISC Machines Ltd., una empresa derivada de la anterior. <http://www.arm.com/>
- **Atmel AVR:** Los AVR son una familia de microcontroladores RISC de Atmel. La arquitectura de los AVR fue concebida por dos estudiantes en el Norwegian Institute of Technology, y posteriormente refinada y desarrollada en Atmel Norway, la empresa subsidiaria de Atmel, fundada por los dos arquitectos del chip.

El AVR es una CPU de arquitectura Harvard. Tiene 32 registros de 8 bits. Algunas instrucciones



sólo operan en un subconjunto de estos registros. <http://www.atmel.com/products/avr/>

- Intel XScale: El Intel XScale es un núcleo de microprocesador, la implementación de Intel de la quinta generación de la arquitectura ARM. La tecnología fue vendida a Marvell Technology Group en junio de 2006.

Está basado en el ISA v5TE sin las instrucciones de coma flotante. El XScale usa un entero de 7 niveles y 8 niveles de memoria Superpipeline de arquitectura RISC. Es el sucesor de la línea de microprocesadores y microcontroladores Intel StrongARM, que Intel adquirió de la división de Semiconductores Digitales de DEC como efecto colateral de un pleito entre las dos compañías. <http://www.marvell.com/>

- Intel 8051: El Intel 8051 es un microcontrolador (μ C) desarrollado por Intel en 1980 para uso en productos embebidos. Es un microcontrolador muy popular.

Los núcleos 8051 se usan en más de 100 microcontroladores de más de 20 fabricantes independientes como Atmel, Dallas Semiconductor, Philips, Winbond, entre otros. La denominación oficial de Intel para familia de μ Cs 8051 es MCS 51.

Este microcontrolador está basado en una Arquitectura Harvard (es decir, existen espacios de direcciones separados para código y datos). Aunque originariamente fue diseñado para aplicaciones simples, se permite direccionar 64 KB de ROM externa y 64 KB de RAM por medio de líneas separadas chip select para programa y datos. <http://www.intel.com/design/mcs51/>

- PIC: Los 'PIC' son una familia de microcontroladores tipo RISC fabricados por Microchip Technology Inc. y derivados del PIC1650, originalmente desarrollado por la división de microelectrónica de General Instruments.

El nombre actual no es un acrónimo. En realidad, el nombre completo es PICmicro, aunque generalmente se utiliza como Peripheral Interface Controller (Controlador de Interfaz Periférico).

El PIC original se diseñó para ser usado con la nueva UCP de 16 bits CP16000. Siendo en general una buena UCP, ésta tenía malas prestaciones de E/S, y el PIC de 8 bits se desarrolló en 1975 para mejorar el rendimiento del sistema quitando peso de E/S a la UCP. El PIC utilizaba microcódigo simple almacenado en ROM para realizar estas tareas; y aunque el término no se usaba por aquel entonces, se trata de un diseño RISC que ejecuta una instrucción cada 4 ciclos del oscilador. <http://www.microchip.com/>

- TI MSP430: El MSP430 es una familia de microcontroladores producidos por Texas Instruments. Construido con una CPU de 16 bits, el MSP430 está diseñado para aplicaciones empotradas de bajo costo y bajo consumo de energía. La arquitectura tiene reminiscencias del DEC PDP-11. Desafortunadamente, el MSP430 carece de una característica muy importante del PDP11, la cual era la memoria para indexar memoria. Esta característica permitía que las rutinas de interrupción se escribieran sin utilizar registros, por lo que no requería apilamientos. El MSP430 es muy útil para aplicaciones inalámbricas o para aplicaciones de bajo consumo. <http://www.ti.com/msp430>

2.3.1.2 Alimentación

Normalmente la fuente de alimentación son baterías difícilmente sustituibles o transformadores con salida adecuada para el nodo si se dispone de toma de corriente. Para las situaciones en donde no se dispone de red eléctrica y las posibilidad de sustituir las baterías es muy complicada, se están estudiando diferentes técnicas para alimentar el sensor, como puede ser mediante placas solares.



Ante la limitación de la vida útil del dispositivo hay que realizar una gestión eficiente del consumo energético.

El consumo de energía viene dado por lo que consumen los sensores, la comunicación y el procesado. La mayor cantidad de energía es consumida en la transmisión de información, siendo menor en el procesado y uso de los sensores. Por ejemplo el coste de transmisión de 1 Kb. a una distancia de 100 metros es aproximadamente el mismo que ejecutar 3 millones de instrucciones por un procesador de 100 millones de instrucciones por segundo.

Las baterías son la principal fuente de energía de estos motes, pudiendo ser recargables o no recargables. Están clasificados según el material electroquímico usado para el electrodo como pueden ser NiCd (níquel-cadmio), NiZn (níquel -zinc), Nimh (níquel metal hidruro), y Litio-Ion.

Actualmente se están estudiando sistemas basados en energía renovables para solucionar el problema de la energía en estos nodos, basados en energía solar, termo generación, energía basada en vibraciones.

Fuente de energía	Densidad de energía
Baterías (Zinc Aire)	1050-1560 mWh/cm ³
Baterías (recargable Litio)	300 mWh/cm ³ (3-4 V)
Solar (exterior)	150 mWh/cm ³ (expuesto al sol) 0.15 mWh/cm ³ (día nublado)
Solar (interior)	0.006 mWh/cm ³ (nivel escritorio oficina) 0.57 mWh/cm ³ (< 60 W lámpara de escritorio)
Vibración	0.01-0.1 mWh/cm ³
Ruido acústico	3*10 ⁻⁶ mWh/cm ² a 75 Db 9.6*10 ⁻⁴ mWh/cm ² a 100 Db
Reacción nuclear	80 mW/cm ³ , 106 mWh/cm ³

Densidad de energía en diferentes fuentes

2.3.1.3 Comunicación inalámbrica

El dispositivo de comunicación se trata de un dispositivo vía radio que permite enviar y recibir datos para comunicarse con otros dispositivos dentro de su rango de transmisión.

Los nodos usan la banda ISM que son bandas reservadas internacionalmente para uso no comercial de radiofrecuencia electromagnética en áreas industrial, científica y médica. El uso de estas bandas de frecuencia está abierto a todo el mundo sin necesidad de licencia, respetando las regulaciones que limitan los niveles de potencia transmitida.

Los medios a elegir para realizar una comunicación inalámbrica son varios, radio frecuencia, comunicación óptica mediante láser e infrarrojos. La comunicación por láser es la que menos energía consume pero requiere de una comunicación visual entre emisor y receptor, y además también depende de las condiciones atmosféricas. Los infrarrojos como el láser, no necesitan antena, aunque es bastante limitado en su capacidad de transmisión. La radio frecuencia, RF, es la



más adecuada para usar en aplicaciones inalámbricas. Las WSN usan las frecuencias de comunicación que andan entre 433 MHz y 2.4 GHz.

Las funcionalidades de emisión y recepción se combinan en un solo aparato que es llamado transceptor.

Los estados de operación son emitir, recibir, dormir e inactividad. En los actuales modelos de transceptor, el modo inactivo consume casi igual que el modo recepción. Por lo que es mejor tener completamente apagado las comunicaciones radio, en el modo Inactivo, cuando no se esta emitiendo ni recibiendo.

También es significativa la cantidad de energía consumida cuando cambia de modo durmiente a transmisión de datos.

Los sistemas mas populares dentro de los sistemas de comunicación de radio para nodos de redes inalámbricos son:

- Chipcon CC1000 <http://www.chipcon.com/>
- Chipcon CC1020 <http://www.chipcon.com/>
- Chipcon CC2420 <http://www.chipcon.com/>
- Xemics XE1205 <http://www.semtech.com/>
- 802.15.4 Chipsets and SoC <http://www.jennic.com/>

Una comparativa de las principales características de estos dispositivos es:

	CC1000	CC1021	CC2420	TR1000	XE1205
Manufacturer	Chipcon	Chipcon	Chipcon	RFM	Semtech
Operating Frequency [MHz]	300 - 1000	402 - 470 / 804 - 940	2400	916	433 / 868 / 915
Bit Rate [kbps]	76.8	153.6	250	115.2	1.2 - 152.3
Power Supply Voltage [V]	2.1 - 3.6 (typ. 3.0)	2.3 - 3.6 (typ. 3.0)	2.1 - 3.6 (int. 1.8)	2.2 - 3.7 (typ. 3.0)	2.4 - 3.6

Características de dispositivos inalámbricos I

	CC1000	CC1021	CC2420	TR1000	XE1205
Sleep Mode [uA]	0.2 - 1 (osc. core off)	1.8 (core off)	1	0.7	0.2
Standby Mode [uA]			426 (Voltage and osc. running)		850

Características de dispositivos inalámbricos II

	CC1000	CC1021	CC2420	TR1000	XE1205
RX [mA]	9.3 (433MHz) / 11.8 (868MHz)	19.9	19.7	3.8 (115.2kbps)	14
TX Min [mA]	8.6 (-20dBm)	14.5 (-20dBm)	8.5 (-25dBm)		33 (+5dBm)
TX Max [mA]	25.4 (+5dBm)	25.1 (+5dBm)	17.4 (0dBm)	12 (+1.5dBm)	62 (+15dBm)

2.3.1.4 Sensores

Los sensores son dispositivos hardware que producen una respuesta medible ante un cambio en un estado físico, como puede ser temperatura o presión. Los sensores detectan o miden cambios físicos en el área que están monitorizando. La señal analógica continua detectada es digitalizada por un convertidor analógico digital y enviada a un controlador para ser procesada.



Las características y requerimientos que un sensor debe tener son un pequeño tamaño, un consumo bajo de energía, operar en densidades volumétricas altas, ser autónomo y funcionar desatendidamente y tener capacidad para adaptarse al ambiente.

Los sensores pueden estar clasificados en tres categorías:

- Sensores pasivos omnidireccionales: Los sensores pasivos captan los datos sin necesidad de manipular el entorno. Son autoalimentados y solo usan la energía para amplificar la señal analógica captada. No hay ninguna noción de 'dirección' involucrada en estas mediciones.
- Sensores pasivos unidireccionales: Son sensores pasivos que tienen bien definida la dirección desde donde deben captar la información. Un ejemplo típico es una cámara.
- Sensores activos: Este tipo de sensores sondan el ambiente, por ejemplo un radar o un sonar o algún tipo de sensor sísmico que generan ondas expansivas a través de pequeñas explosiones.

2.3.1.5 Memoria

Desde un punto de gasto de energía, las clases más relevantes de memoria son la memoria integrada en el chip de un microcontrolador y la memoria flash, la memoria RAM fuera del chip es raramente usada. Las memorias flash son usadas gracias a su bajo coste y su gran capacidad de almacenamiento.

La memoria flash es una forma desarrollada de la memoria EEPROM que permite que múltiples posiciones de memoria sean escritas o borradas en una misma operación de programación mediante impulsos eléctricos, frente a las anteriores que sólo permite escribir o borrar una única celda cada vez. Por ello, flash permite funcionar a velocidades muy superiores cuando los sistemas emplean lectura y escritura en diferentes puntos de esta memoria al mismo tiempo.

Las memorias flash son de carácter no volátil, esto es, la información que almacena no se pierde en cuanto se desconecta de la corriente, una característica muy valorada para la multitud de usos en los que se emplea este tipo de memoria.

Los requerimientos de memoria dependen mucho de la capacidad que necesite nuestra aplicación. Hay dos categorías de memorias según el propósito del almacenamiento:

- Memoria usada para almacenar los datos recogidos por la aplicación.
- Memoria usada para almacenar el programa del dispositivo.

2.3.2 PUERTA DE ENLACE

Elementos para la interconexión entre la red de sensores y una red de datos (TCP/IP). Es un nodo especial sin elemento sensor, cuyo objetivo es actuar como puente entre dos redes de diferente tipo.

En este tipo de aplicaciones donde se usan redes de sensores, éstas no pueden operar completamente aisladas y deben contar con alguna forma de monitoreo y acceso a la información adquirida por los nodos de la red de sensores. De aquí surge la necesidad de conectar las redes de sensores a infraestructuras de redes existentes tales como Internet, redes de área local (LAN) e intranets privadas. Los dispositivos que realizan la función de interconectar dos redes de diferente naturaleza se les llama dispositivo puerta de enlace; pero el término más conocido en el ambiente de las redes es gateway.

2.3.3 ESTACIÓN BASE



Recolector de datos basado en un ordenador común o sistema empotrado. En una estructura normal todos los datos van a parar a un equipo servidor dentro de una base de datos, desde donde los usuarios pueden acceder remotamente y poder observar y estudiar los datos.

2.4 Redes ad-hoc y tecnología inalámbrica

2.4.1 Redes ad-hoc

Las redes más usadas en las implantaciones de redes de sensores inalámbricas son las redes malladas tipo ad-hoc. Son redes sin infraestructura, flexibles en las cuales todas las estaciones ofrecen servicios de encaminamiento para permitir la comunicación de estaciones que no tienen conexión inalámbrica directa.

La principal característica de las redes móviles ad-hoc es que todos los dispositivos que forman parte de la red, además de funcionar como terminales finales, realizan también funciones de retransmisión de paquetes típicamente asociadas a routers.

Esta cualidad nos permite encaminar paquetes a destinos sin cobertura directa a través de otros nodos intermedios que se encuentren en la red. De este modo se nos ofrece la posibilidad de incrementar de una manera extraordinaria la movilidad y el tamaño de una red de datos inalámbrica. La funcionalidad principal de estas redes es la de crear de una manera rápida y eficaz una red temporal en lugares carentes de una infraestructura de red.

Las principales características de una red ad-hoc son:

- **Movilidad:** Este aspecto es la razón de ser de las redes ad-hoc. Los nodos se pueden reubicar o simplemente ser móviles, siempre que no salgan del alcance radio. Se pueden desplegar rápidamente sin la necesidad de descubrir la zona o formar grupos, es decir, cada nodo es individual y solvente.
- **Multisalto (Multihopping):** Una red multihopping es una red donde el camino de la fuente al destino atraviesa varios nodos intermedios.
- **Autoorganización:** La red de forma autónoma debe determinar sus propios parámetros de configuración: dirección, encaminamiento, clustering, indicador de posición, etc.
- **Conservación de la energía:** Los nodos móviles, tienen una batería limitada y a no ser que dispongan de algún mecanismo de carga (por ejemplo, un panel solar), no tienen capacidad de recarga. Es muy importante diseñar unos protocolos (MAC, encaminamiento) eficientes, con la finalidad de mejorar el rendimiento y prolongar la autonomía de las baterías.
- **Escalabilidad:** En algunos tipos de redes, el número de nodos puede crecer hasta llegar a varios miles. Como no existe un access point concreto, la incorporación y descarte de nodos es un proceso sencillo y transparente.
- **Seguridad:** Las redes inalámbricas son vulnerables a ataques, y las redes ad-hoc lo son especialmente. Pueden padecer tanto ataques activos como pasivos y el atacante puede emular a un nodo legítimo y capturar paquetes de datos y control, destruir tablas de encaminamiento, etc.

2.4.1.1 protocolos

Sin embargo, para que lo anterior sea viable se hace necesaria la inclusión en la red de protocolos de encaminamiento que nos permitan crear las rutas hacia los destinos deseados. Los protocolos tradicionales propios de redes fijas no se adaptan bien a este tipo de entornos tan dinámicos y, por



tanto, será necesario el diseño específico de protocolos para proporcionar un comportamiento eficiente a la red.

La principal clasificación es la que diferencia entre protocolos proactivos y reactivos (o bajo demanda):

Por una parte, en los protocolos proactivos, periódicamente se envía información de encaminamiento para que en cualquier momento cualquier nodo pueda comunicarse con cualquier otro de la red. Esta característica proporciona una rápida respuesta ante solicitudes de ruta y ofrece un buen comportamiento en situaciones donde la tasa de movilidad es alta. Sin embargo la sobrecarga que se introduce en la red con información de control es alta. Entre estos protocolos podemos destacar el protocolo DSDV (Destination-Sequenced Distance Vector). Por otra parte, los protocolos reactivos sólo crean rutas cuando es necesario. Son protocolos bajo demanda donde la sobrecarga es mucho menor, pero los retrasos de establecimiento de rutas son mayores. Podemos nombrar AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) como protocolo reactivo. Existen algunos protocolos híbridos en los que se mantiene una filosofía proactiva en un ámbito local y reactiva a nivel más global, como el protocolo ZRP (Zone Routing Protocol).

Los principales protocolos utilizados son:

- Destination-Sequenced Distance Vector (DSDV). DSDV es esencialmente una modificación del algoritmo de encaminamiento Vector Distancia Bellman-Ford, bien conocido por su utilidad en redes fijas, como por ejemplo en el protocolo RIP. En este algoritmo, los nodos vecinos intercambian periódicamente (proactivo) sus tablas de encaminamiento enteras para estimar la distancia a la que se encuentran los demás nodos no vecinos. Las modificaciones introducidas por DSDV proporcionan básicamente la obtención de rutas sin bucles mediante la introducción de números de secuencia para la determinación de las rutas más nuevas. Aunque DSDV sólo proporciona un camino para cada destino, siempre elige el camino más corto basándose en el número de saltos hacia este destino. DSDV utiliza dos tipos de mensajes de actualización, uno más grande (full-dump) y otro mucho más pequeño (incremental). Los mensajes incrementales pueden utilizarse para actualizaciones intermedias entre envíos periódicos (full-dump) de la tabla entera de encaminamiento. Además se realizan estimaciones de los tiempos de establecimientos de ruta que retrasarán el envío de mensajes incrementales para evitar envíos en cadena de estos mensajes.
- Optimized Link-State Routing Algorithm (OLSR): OLSR incorpora la filosofía utilizada en protocolos tradicionales como OSPF de 'Estado de los Enlaces'. En este algoritmo todos los nodos se intercambian mensajes para formarse una visión consistente de toda la red y así poder decidir el encaminamiento de paquetes. OLSR adolece del mismo problema que DSDV debido a la necesidad de intercambio de un gran número de mensajes periódicos (proactivo). Aquí, el problema podría llegar a ser mayor, ya que además de mensajes 'hello' a los vecinos, envía mensajes de control 'tc' (Topology Control) que se retransmiten a todos los nodos de la red. Sin embargo se ha conseguido una gran optimización en la retransmisión de estos mensajes con la incorporación de la técnica de retransmisión multipunto, a través de la cual, los mensajes sólo son retransmitidos por el mínimo número de nodos necesarios para alcanzar a todos los demás. Estos nodos son conocidos como grupo de retransmisores multipunto (MPR's).
- Dynamic Source Routing (DSR): El protocolo DSR se fundamenta en el encaminamiento desde el origen, es decir, los paquetes de datos incluyen una cabecera de información acerca de los nodos exactos que deben atravesar. No requiere ningún tipo de mensajes periódicos (reactivo), disminuyendo así la sobrecarga con mensajes de control. Además ofrece la posibilidad de obtener,



con la solicitud de una ruta, múltiples caminos posibles hacia el destino. Tampoco son un problema, a diferencia de la mayoría de protocolos de encaminamiento en este tipo de redes, los enlaces unidireccionales. Para poder realizar el encaminamiento en el origen, a cada paquete de datos se le inserta una cabecera DSR de opciones que se colocará entre la cabecera de transporte y la IP. Entre dichas opciones se incluirá la ruta que debe seguir el paquete nodo a nodo. Cada nodo mantiene una memoria caché de rutas en la que se van almacenando las rutas obtenidas a través de procesos de descubrimiento de rutas ya sean propias o obtenidas a través de escuchas en la red. En los procesos de descubrimiento de rutas se generan mensajes de solicitud, respuesta y error siendo estos mensajes 'route request', 'reply' y 'error' respectivamente.

- Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV): En el protocolo AODV los nodos mantienen una tabla de encaminamiento para los destinos conocidos (empleando el algoritmo vector distancia). Inicialmente esta tabla estará formada por sus vecinos. Solamente se le añadirán destinos nuevos cuando sea necesario, es decir, cuando un nodo necesita comunicarse con otro que no está en su tabla, inicia un proceso de descubrimiento de ruta (reactivo) hacia el destino concreto. Para ello se emiten mensajes de descubrimiento de ruta 'rreq' que se van propagando entre todos los nodos de modo similar al DSR. En cambio, aquí los nodos generan una tabla de encaminamiento inversa para que puedan regresar las contestaciones 'rrep' a las solicitudes de ruta al nodo que la originó. Se recomienda el uso de mensajes 'hello' entre vecinos para determinar la conectividad, aunque para reducir el volumen de estos mensajes, sólo debe permitirse su envío a los nodos que estén transmitiendo datos. Debemos destacar además la utilización de las técnicas de "búsqueda secuencial por anillos" y "reparación local del enlace" así como también que es capaz de proporcionar soporte multicast.

2.4.2 Tecnología inalámbrica

La comunicación vía radio usa el espectro electromagnético para enviar información. Cuando una corriente eléctrica pasa por un cable crea un campo electromagnético que envía ondas en todas direcciones, en forma parecida a la luz, que también es parte del espectro, pero a frecuencias mucho más altas. Con una antena y energía adicional es posible transmitir las señales a gran distancia. La frecuencia de onda puede modificarse de forma que las señales no interfieran entre sí, lo que permite aprovechar una mayor parte del espectro.

Las tecnologías inalámbricas pueden clasificarse en cinco grandes grupos, de acuerdo con la distancia que viaja cada tipo de señal. Primero están las comunicaciones satelitales, como el sistema de posicionamiento global (GPS, por sus siglas en inglés), formado por 24 satélites manejados por las fuerzas armadas de Estados Unidos, las cuales envían constantemente señales a dispositivos en tierra. Sin embargo, estas señales sólo viajan del satélite al aparato receptor. Otra categoría, y con señales de dos vías, están las tecnologías de telefonía celular de cobertura amplia como GSM y CDMA. Entre las versiones avanzadas de 'tercera generación' (3G) destacan HSDPA y LTE, desarrolladas por la industria de los celulares. Un contendiente prometedor es WiMax, tecnología basada en los estándares de Internet con respaldo de la industria informática.

Una tercera categoría incluye señales de menor alcance utilizadas para conectar dispositivos dentro de una habitación o un edificio, como los sistemas Wi-Fi para conectarse a Internet dentro de hoteles o aeropuertos, o Zigbee, protocolo de comunicaciones inalámbricas que sirve para interconectar sensores.

Un avance reciente es la tecnología de banda ultra ancha (UWB), que utiliza frecuencias sumamente altas de cobertura muy limitada para transmitir grandes volúmenes de información, por



ejemplo, para enviar un video desde un iPod o un dispositivo similar a un televisor.

En cuarto lugar están los protocolos para enlazar dispositivos en una "red de área personal" (PAN, personal area network). Por ejemplo Bluetooth, utilizado para enviar la señal del teléfono celular a un auricular inalámbrico.

El último tipo de comunicaciones son las que se dan cerca de una antena transmisora (NFC, near-field communications). En este caso, el dispositivo receptor debe estar cerca del sistema emisor, por ejemplo, al pasar por un edificio o en el transporte público. Una variante son las etiquetas de identificación por radiofrecuencia (RFID, por sus siglas en inglés), utilizadas por tiendas departamentales y otros usuarios.

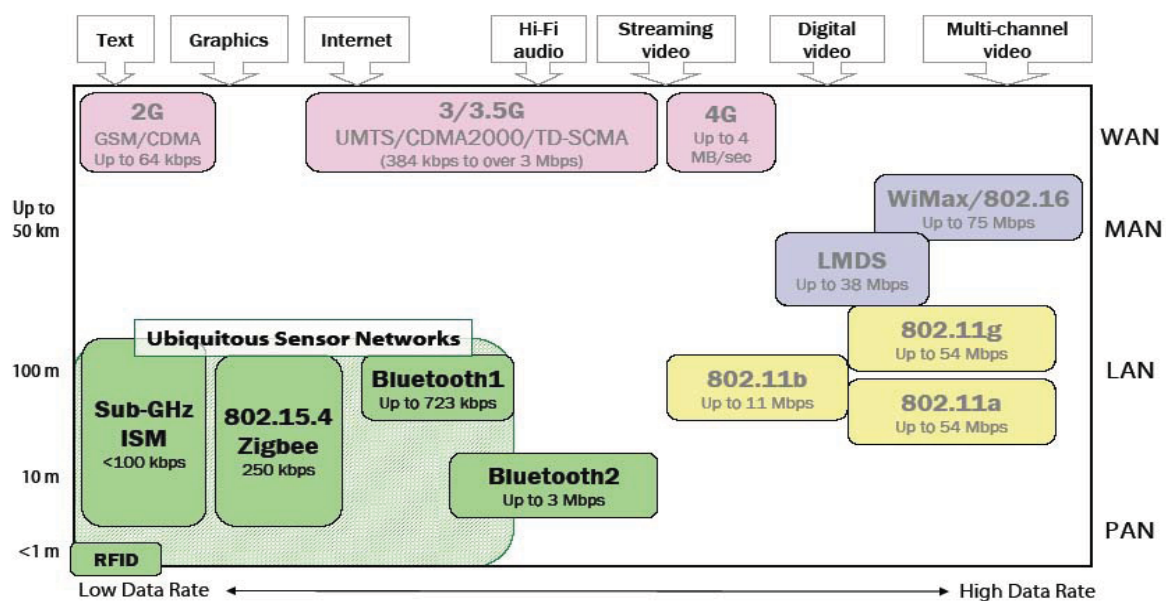
Cuando pasan por un lector, estas etiquetas envían la información que tienen almacenada. Estos sistemas de radio son tan diferentes entre sí como la luz lo es del sonido; así, los satélites no pueden rastrear etiquetas RFID, lo cual permite descartar riesgos para la intimidad.

Podemos ver como se distribuyen las diferentes tecnologías inalámbricas dependiendo de la velocidad de transmisión y de su utilización.

	Transferencia de datos por segundo	Cobertura	Costo en dólares (año 2008)
WiMax	15Mb	5 Km	8
Celular 3G	14 Mb	10 Km	6
Celular 2G	400 K	35 Km	5
Wi-Fi	54 Mb	50-100 m	4
Bluetooth	700 K	10 m	1
Zigbee	250 K	30 m	4
UWB	400 Mb	5-10 m	5
RFID	1-200 k	0.01-10 m	0.04

Principales tecnologías inalámbricas de 2 vías. Fuentes William Webb Cambridge. Consultores OCDE, Pyramid Research, Nokia, CSR, Ember y Hitachi.

También podemos estudiar éstas a través del coste que suponen comparado con la cobertura y la velocidad.





Claramente se ve que los protocolos más adecuados para ser usados en WSN son los protocolos Bluetooth y Zigbee. A pesar de que ZigBee es muy similar a Bluetooth podemos encontrar algunas diferencias que hacen más adecuado el protocolo Zigbee para las WSN:

- Una red ZigBee puede constar de un máximo de 65535 nodos distribuidos en subredes de 255 nodos, frente a los 8 máximos de una subred Bluetooth.
- Zigbee tiene un menor consumo eléctrico que el Bluetooth. En términos exactos, ZigBee tiene un consumo de 30mA transmitiendo y de 3 μ A en reposo, frente a los 40mA transmitiendo y 0.2mA en reposo que tiene el Bluetooth. Este menor consumo se debe a que el sistema ZigBee se queda la mayor parte del tiempo dormido, mientras que en una comunicación Bluetooth esto no se puede dar, y siempre se está transmitiendo y/o recibiendo.
- Zigbee tiene una velocidad de hasta 250 kbps, mientras que Bluetooth es de hasta 3 Mbps.

Debido a las velocidades de cada uno, uno es más apropiado que el otro para ciertas cosas. Por ejemplo, mientras que el Bluetooth se usa para aplicaciones como los teléfonos móviles y la informática casera, la velocidad del ZigBee se hace insuficiente para estas tareas, desviándolo a usos tales como la domótica, los productos dependientes de una batería, los sensores médicos, y en artículos de juguetería, en los cuales la transferencia de datos es menor.

2.4.2.1 ZIGBEE

La relación entre IEEE 802.15.4-2003 y ZigBee es parecida a la existente entre IEEE 802.11 y Wi-Fi Alliance. La especificación 1.0 de ZigBee se aprobó el 14 de diciembre de 2004 y está disponible a miembros del grupo de desarrollo (ZigBee Alliance).

ZigBee utiliza la banda ISM para usos industriales, científicos y médicos; en concreto, 868 MHz en

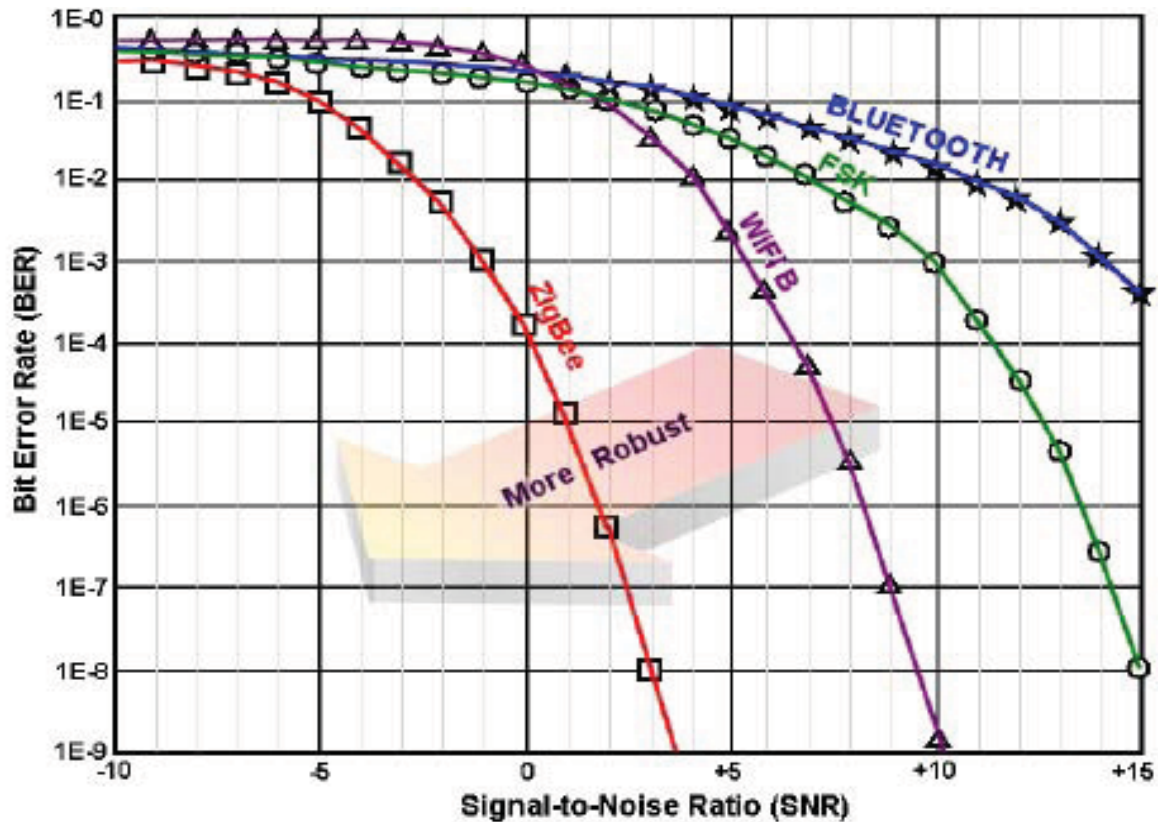
Europa, 915 en Estados Unidos y 2,4 GHz en todo el mundo. Sin embargo, a la hora de diseñar dispositivos, las empresas optan prácticamente siempre por la banda de 2,4 GHz, por ser libre en todo el mundo.

El desarrollo de la tecnología se centra en la sencillez y el bajo coste más que otras redes inalámbricas semejantes de la familia WPAN, como por ejemplo Bluetooth. El nodo ZigBee más completo, requiere en teoría cerca del 10% del hardware de un nodo Bluetooth o Wi-Fi típico; esta cifra baja al 2% para los nodos más sencillos. No obstante, el tamaño del código en sí es bastante mayor y se acerca al 50% del tamaño del de Bluetooth.

En 2006 el precio de mercado de un transceptor compatible con ZigBee se acercaba al dólar y el precio de un conjunto de radio, procesador y memoria rondaba los tres dólares. En comparación, Bluetooth tenía en sus inicios (en 1998, antes de su lanzamiento) un coste previsto de 4-6 dólares en grandes volúmenes; a principios de 2007, el precio de dispositivos de consumo comunes era de unos tres dólares.

La primera versión de la pila suele denominarse ahora ZigBee 2004. La segunda versión de junio de 2006 se denomina ZigBee 2006, y reemplaza la estructura MSG/KVP con una librería de clusters, dejando obsoleta a la anterior versión. ZigBee Alliance está trabajando con la versión de 2007 de la pila para adecuarse a la última versión de la especificación, en concreto centrándose en optimizar funcionalidades de nivel de red (como agregación de datos). También se incluyen algunos perfiles de aplicación nuevos, como lectura automática, automatización de edificios comerciales y automatización de hogares en base al principio de uso de la librería de clusters. La

tecnología Zigbee es mas robusta que las otras tecnologías como puede verse en la figura.



Comparativa de la robustez de las diferentes tecnologías inalámbricas

2.5 Aplicaciones

Las redes de sensores inalámbricas son colecciones de nodos de tamaño reducido con capacidad computacional y de un precio no muy elevado que pueden medir localmente condiciones medioambientales para luego enviar esta información a un nodo central o estación base. Las WSN pueden soportar un amplio rango de aplicaciones.

A pesar de que la mayor parte de los sensores que podemos encontrar hoy en día son todavía conectados a través de un cable, los inalámbricos ofrecen ventajas significativas sobre los cableados, como reducir el coste del sistema y hacer posible aplicaciones de otra forma imposibles de realizar. Sin embargo el mercado está fragmentado, debido sobre todo a que cada aplicación desarrollada tiene unas características únicas.

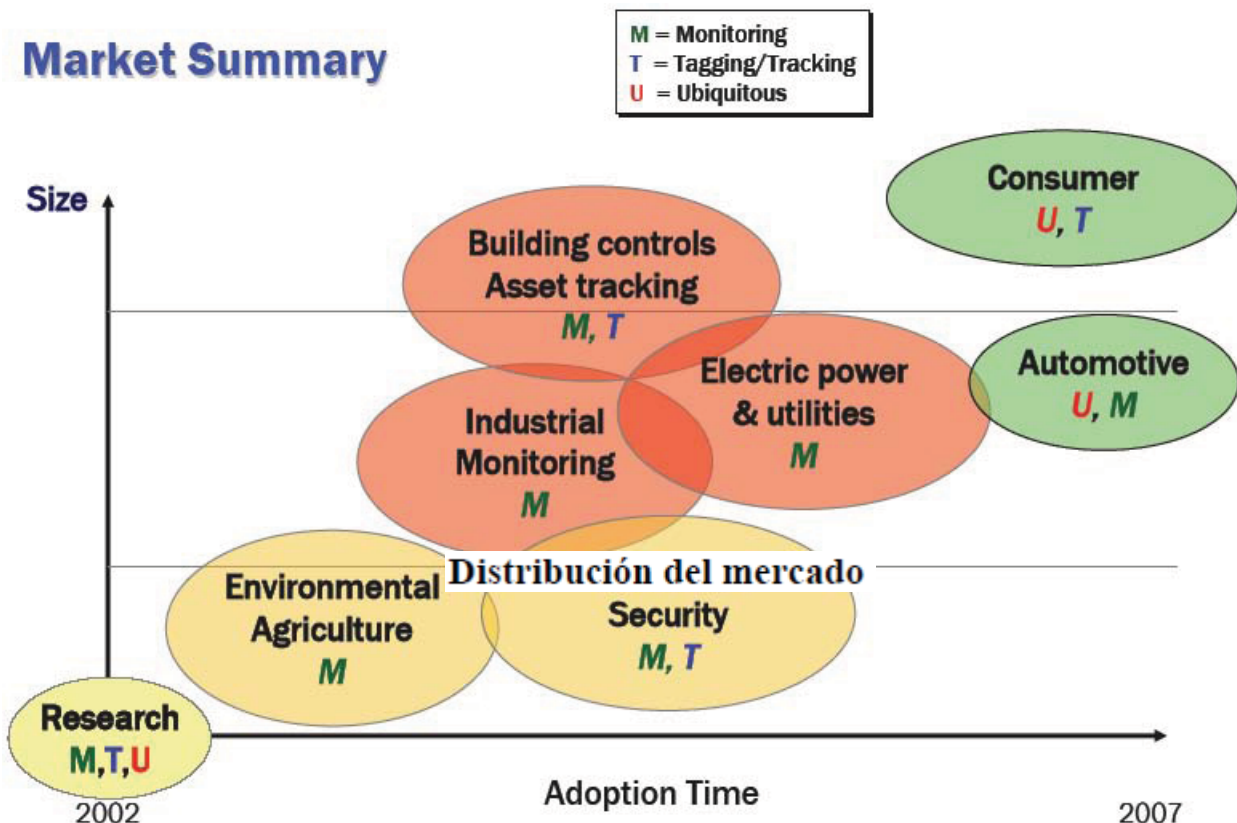
Las WSN pueden dividirse en dos tipos de redes, las redes multisalto y las monosalto. Las redes monosalto son las redes que conectan directamente con la estación base y como su propio nombre indica, la información es emitida desde el nodo directamente a la estación base. Y las redes multisalto, son las que la información es retransmitida por varios nodos antes de llegar a la estación base.

El rango potencial de aplicaciones está realmente únicamente limitado por la imaginación ya que la convergencia de las tecnologías de información y comunicaciones inalámbricas, con técnicas de miniaturización, han convertido a las WSN en un área con una capacidad de crecimiento elevada.

En este apartado se realiza un estudio de varias de las aplicaciones más destacadas dentro de este área, aunque sea un campo ilimitado y podamos encontrar aplicaciones en infinidad de casos como:

monitorización de estructuras y construcciones, sistemas de defensa, aplicaciones biomédicas, control de fronteras, detección de terremotos, monitorizaciones agrarias, monitorización y actuación industrial, control de almacenes, detección de gases, monitorización del tiempo, etc.

Market Summary



Se puede ver en la gráfica que lo que empezó como investigación en el 2002 poco a poco ha ido extendiéndose dentro del mercado. Cada vez es mayor la cantidad de redes y las aplicaciones en las que se utiliza.

2.5.1 Automoción

Con las características de las WSN, los coches podrán pronto estar disponibles para hablar unos con otros y con infraestructuras dentro de carreteras y autopistas. Los sensores pueden aplicarse en las ruedas del vehículo para dar asistencia al conductor y avisar de posibles mensajes de alerta.

Por ejemplo durante un frenazo de emergencia, un mensaje de emergencia desde el coche que frena puede enviarse a todos los coches cercanos para que éstos tomen medidas respecto a este evento. Otra aplicación interesante es la recogida de datos de tráfico en tiempo real. La información de la que puede disponer un coche que venga en dirección contraria puede ser valiosa. Un vehículo puede recibir información de otro vehículo sobre dónde están situados los atascos de tráfico, la velocidad y densidad del tráfico o información de sensores fijos.

Toda esta información puede ser transmitida de vehículo a vehículo para evitar atascos y planificar rutas alternativas.

2.5.1.1 PROYECTO CAPSTONE DE FORD

Con el 70% de los vehículos de la compañía Ford siendo remodelados es importante estar al día y conocer las nuevas opciones y lanzamientos. Ford está mirando nuevas maneras de innovar a la hora de recoger medidas de sus vehículos. Las redes de sensores están incrementando su inteligencia y además pueden obtener datos, no sólo limitados a luz, temperatura, humedad y movimiento.

Un equipo de la universidad de Michigan, junto con Ford, está diseñando y desarrollando una manera de identificar cuantas veces un vehículo es inspeccionado por un comprador potencial. Esto podría incluir cuantas veces una puerta es abierta, el capó fue levantado o el maletero fue inspeccionado. Los eventos estudiados podrían extenderse también a cuando una persona ocupó un asiento y cuanto tiempo perduró en él.

El entorno por definición, puede ser muy dinámico, haciendo de la posibilidad de conectarse en una red en malla crítico a largo plazo. [FORD2008]

2.5.2 Control domótico de un edificio

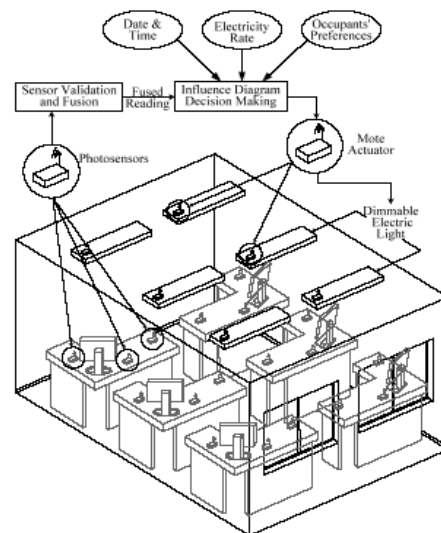
Aplicaciones de este tipo en el control de una oficina o una casa hacen que el tiempo de permanencia dentro de ésta sea mucho más agradable para el ser humano.

El uso de sensores empotrados puede reducir ampliamente los costes de una monitorización de una construcción donde tener un conocimiento de la temperatura y de la luz para poder regular los sistemas de calefacción y aire acondicionado, así como las luces.

2.5.2.1 SISTEMA INTELIGENTE DE CONTROL DE LUZ

Un control eficiente de la energía dedicada al alumbrado de comercios puede llegar a ahorrar un 40% del consumo de energía. A pesar de este ahorro estos sistemas no están nada extendidos en este tipo de construcciones.

La meta de esta investigación era reducir el consumo de energía así como crear un entorno de luminosidad ante las preferencias del usuario. Se optó por utilizar WSN ante el mayor precio y menor flexibilidad de un sistema cableado centralizado [WEN2006].



Sistema de iluminación inteligente en oficinas

2.5.3 monitorización ambiental

La monitorización ambiental es una de las primeras aplicaciones donde se utilizaron redes de sensores inalámbricas. Nos permite poder distribuir una gran cantidad de sensores en un espacio natural y obtener una gran cantidad de datos que de otra forma es imposible de obtener con la instrumentación tradicional.

2.5.3.1 ISLA GREAT DUCK

Los sensores pueden ser usados para monitorizar condiciones y movimientos de animales que vivan en estado salvaje, ya que con esta tecnología no hace falta una presencia de los seres humanos y así se molesta lo mínimo posible en su rutina. Los sensores pueden monitorizar también la calidad del aire, el nivel de polución y para detectar posibles amenazas biológicas o químicas a partir de pequeñas señales.

Un ejemplo de este tipo de aplicación es el llevado a cabo por un equipo de ingenieros de la Universidad de Berkeley en colaboración con el College of the Atlantic en Bar Harbor y el laboratorio de investigación de Intel, en la isla Great Duck en la costa del estado de Maine en el noreste de los Estados Unidos, donde se trata de conservar la fauna mediante la detección de intrusos, ya sean humanos o algún otro tipo de depredador.

De esta manera es posible que un grupo de biólogos pueda observar la actividad de las aves en dicha isla desde sus oficinas mediante un enlace que permita la comunicación de la red de sensores y su red de ordenadores. Los parámetros que son medidos en este experimento son la cantidad de luz existente en los nidos, la temperatura y la humedad dependiendo de la presencia de aves o no [POL2002].

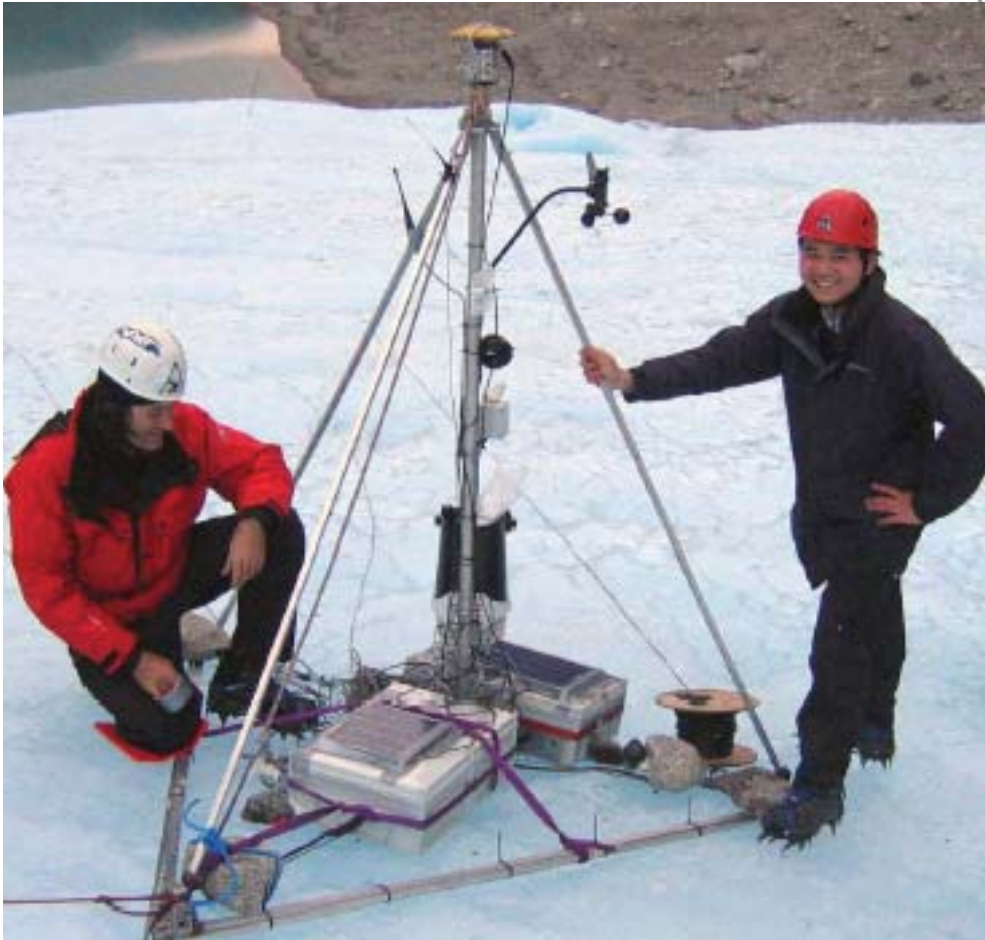


Monitorización del hábitat en Great Duck

2.5.3.2 MONITORIZACIÓN DE UN GLACIAR

Para entender el cambio climático que involucra un cambio del nivel del mar debido al calentamiento global, es importante entender como los glaciares contribuyen en la liberación de agua fresca al mar. Esto puede causar altos crecimientos del nivel del mar y grandes cambios en la temperatura y por lo tanto en las mareas marinas. El comportamiento de un glaciar y sobre todo de su movimiento puede llevarnos a predecir cambios futuros en su comportamiento.

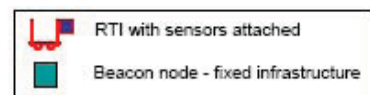
Durante el verano de 2004 fue estudiado el comportamiento del glaciar Briksdalsbreen en Noruega por medio de redes de sensores inalámbricas. El objetivo fue entender la dinámica del glaciar con respecto al cambio climático [MAR2004].



Estación base del sistema de monitorización de un glaciar

2.5.4 control de almacenes

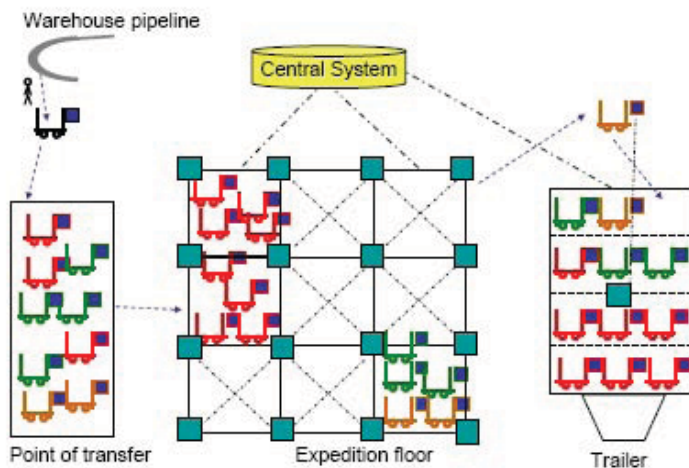
Los sensores inalámbricos pueden ser usados para monitorizar y gestionar los materiales dentro de un almacén o en el transporte desde el almacén al destino final.



2.5.4.1 CONTROL DE TRANSPORTE Y LOGÍSTICA

Las WSN son aplicables también al control de transporte y logística de mercancías, en este caso los nodos controlarán todas las actividades chequeando los posibles errores que pueden ocurrir en el proceso de entrega y distribución de bienes.

Evidentemente la cantidad de sensores





dependerá del producto a transportar, pero en el estudio realizado éstos se sitúan en los útiles retornables como pueden ser palets, que una vez hecha la entrega deben ser devueltos al proveedor.

Cada trailer puede distribuir 60 útiles retornables, cada uno de estos llevara 5 sensores midiendo diferentes

magnitudes físicas, dependiendo del contenido que se distribuya [EVER2005].

2.5.5 Control de procesos industriales

En el entorno industrial el uso de sensores es algo común y para poder acceder a zonas donde no podemos usar cableado, las WSN son la herramienta adecuada. Posibles aplicaciones en este entorno son:

telemetría en plantas, pérdidas de calidad, diagnóstico de maquinaria, monitorización,...

2.5.5.1 CONTROL DE UN TANQUE DE PETRÓLEO EN UNA PLATAFORMA PETROLÍFERA (BP)

El proyecto de BP desarrolló un nuevo sistema de mantenimiento predictivo capaz de monitorizar maquinaria rotativa crítica como bombas y motores dentro de la plataforma Loch Rannoch, captando datos vibratorios para evaluar las condiciones de operación y enviando los datos mediante comunicación inalámbrica.

Los datos vibratorios pueden darnos la información de cómo una máquina está desgastándose y nos ayudan a saber cuando debemos hacerle el mantenimiento correspondiente.

Las medidas fueron observadas por 150 acelerómetros de la casa Rockwell y la información fue gestionada por motes de la casa Crossbow [ECO2003].



Maquinaria rotativa en una plataforma petrolífera

2.5.6 Agricultura y ganadería

La agricultura y la ganadería son dos de las áreas donde puede ser importante esta tecnología, ya que una situación al aire libre donde monitorizar condiciones que ayuden a la mejora de producción y calidad en una producción agrícola o el control de cabezas de ganado en continuo movimiento puede ser muy difícil con la tecnología tradicional.

2.5.6.1 VIÑEDOS CAMALIE

Los viñedos Camalie, en Estados Unidos, tienen uno de los sistemas más avanzados de medida de la humedad del suelo. Usan la tecnología inalámbrica desarrollada por la Universidad de Berkeley en colaboración con Intel y comercializada por Crossbow.



La aplicación consiste en optimizar la irrigación, reduciendo el consumo de agua, la energía utilizada en el bombeo y mejorando la calidad de la uva. Se proporciona una monitorización del sistema de irrigación, mostrando fallos que pueden un impacto sustancial a algo plazo.

Una vez implantado el sistema se comprobó un importante crecimiento en la producción, además de un descenso en el consumo de energía a la hora de usar las instalaciones [CAM2008].

2.5.6.2 SEGUIMIENTO DE RUTINAS EN GANADO PORCINO

El doctor Philippe Bonnet en la Universidad de Copenhague desarrollo una aplicación pensada para facilitar el trabajo de los veterinarios, controlando varias variables en la rutina diaria de los cerdos en una granja.



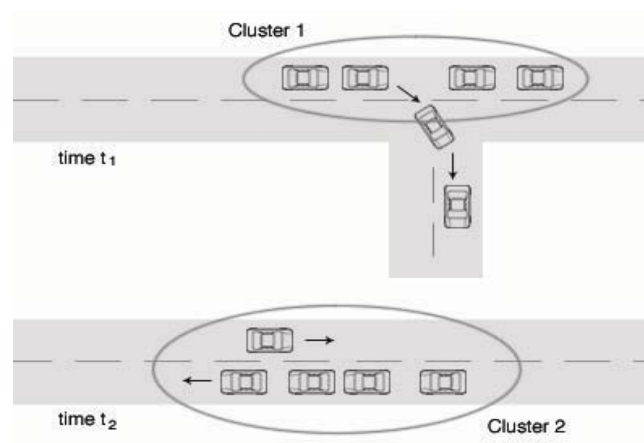
Seguimiento de rutina en ganado porcino

2.5.7 Control del tráfico

Las redes de sensores son el complemento perfecto a las cámaras de tráfico, ya que pueden informar de la situación del tráfico en ángulos muertos que no cubran las cámaras y también pueden informar a los conductores de una situación, en caso de atasco o accidente, que permita a estos tener la capacidad de reacción para tomar rutas alternativas.

2.5.7.1 DISTRIBUCIÓN DEL TRÁFICO MEDIANTE REDES ADHOC EN VEHÍCULOS

Los vehículos son considerados como un área para desarrollar aplicaciones sobre WSN. El objetivo de la investigación relatada es crear una gran red de sensores usando los vehículos como portadores de los sensores, además de sus proveedores de energía. Estos nodos irían transmitiendo información relativa a la situación, velocidad, dirección..., que permitirían poder realizar un control del tráfico en diferentes situaciones.



Gestión del tráfico

Además se tendrían varias puertas de enlace fijas que captarían información también, llegando a actuar en cruces semafóricos [THO2004].

2.5.8 Monitorización de estructuras

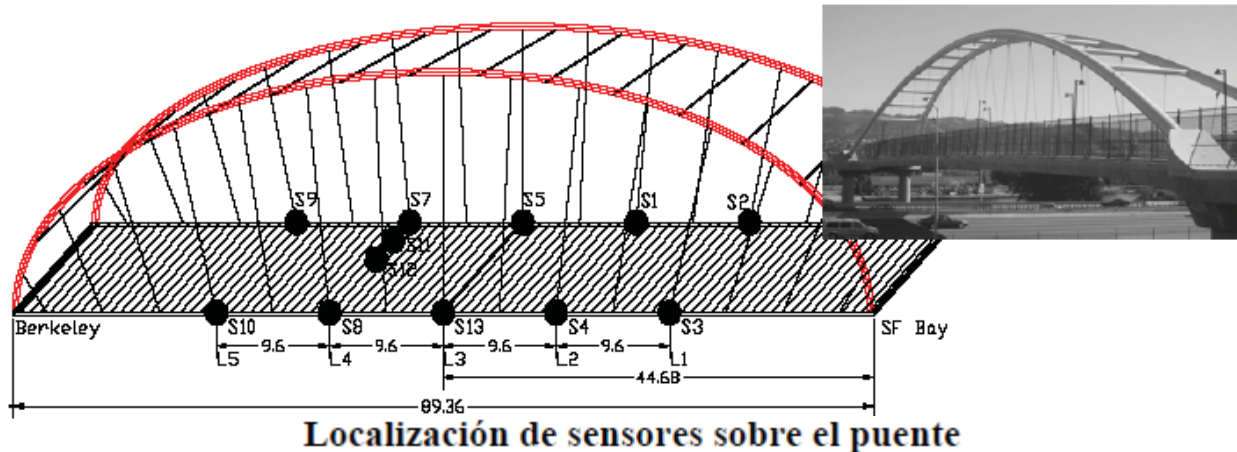
Una gran aplicación de las WSN es el monitoreo de estructuras que sobre todo se ha llevado a cabo en Estados Unidos y Canadá. Aquí se estima que tienen unos 25 trillones de dólares invertidos en estructuras civiles y ante tanta inversión se desea tener un control de las estructuras realizadas. La tecnología utilizada se llama SHM, del inglés Structural Health Monitoring, y se trabaja con la identificación y el monitoreo de comportamientos extraños. Éstos pueden ser una falla en una estructura como puentes, edificios u otras estructuras.

2.5.8.1 CONTROL DE VIBRACIONES DE UN PUENTE

Gracias a los nuevos sistemas MEMS y a que podemos tener sensores de aceleración que puedan medir inalámbricamente, podemos controlar las vibraciones en construcciones. La universidad de Berkeley en California realizó un estudio sobre un puente para peatones sobre la autopista I-80 en

Berkeley.

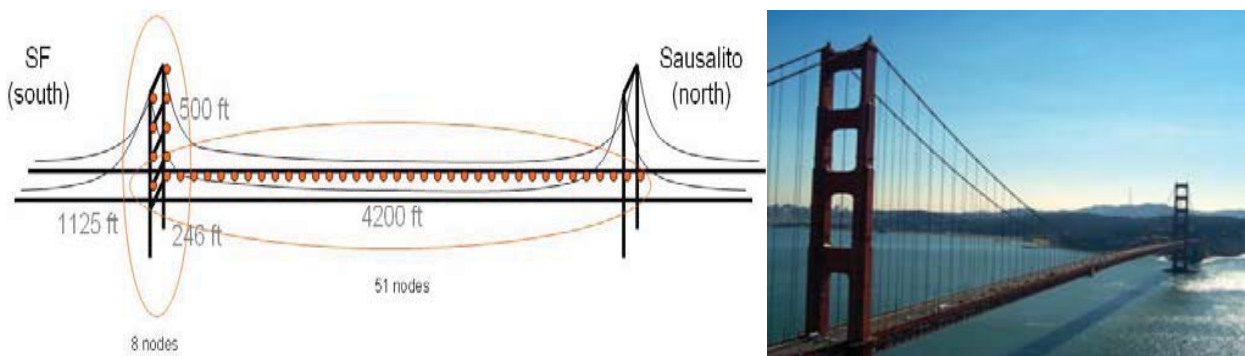
Esta aplicación da información sobre el estado de vida de la estructura, así como eventos que se produzcan en ella durante la monitorización, como puede ser un terremoto [SHA2007].



2.5.8.2 MONITORIZACIÓN DE LA SALUD DE UNA INFRAESTRUCTURA CIVIL (PUENTE GOLDEN GATE)

Otro ejemplo de aplicaciones SHM es el llevado a cabo en el puente Golden Gate en San Francisco, donde los nodos tienen la finalidad de monitorizar en varias partes de la estructura las vibraciones producidas, ya sean por el paso de vehículos o por las condiciones atmosféricas.

Se implantaron 64 nodos en un sistema de 46 saltos que median las vibraciones ambientes con una exactitud de 30G. Las vibraciones ambientes eran muestreadas a 1kHz con un tiempo de exposición menor de 10s [SUK2007].



Localización de sensores sobre el Golden Gate

3.OBJETIVOS

Tal y como se ha visto en el apartado de introducción a la energía eólica todo aerogenerador necesita de un control y de una monitorización para su correcto funcionamiento, y el generador de savonius no es una excepción, después de estudiar las principales características de este generador, hay que comprobar su correcto funcionamiento, y estudiar su eficacia, además de controlar la tensión y la carga de las baterías para evitar el rápido deterioro de estas.

Por todo ello se hace imprescindible las medida de la tensión, corriente, revoluciones por minuto de las aspas del generador, la fuerza y dirección del viento, etc.

Observando el generador real se observa la dificultad de acceder a los sensores y a sus partes principales una vez instalado y en funcionamiento, además también esta el problema de anclar los sensores ya que estos tienen que estar bien sujetos para aguantar la corriente de viento generada, por ello la mejor opción es el uso de una red de sensores inalámbricos, pequeños y que una vez instalados no sea necesario el acceso a ello para obtener la información.

El objetivo principal de esta tesis es el estudio, el diseño y el desarrollo de una red de sensores capaz de obtener los datos necesarios del aerogenerador, para su correcto funcionamiento y su estudio.

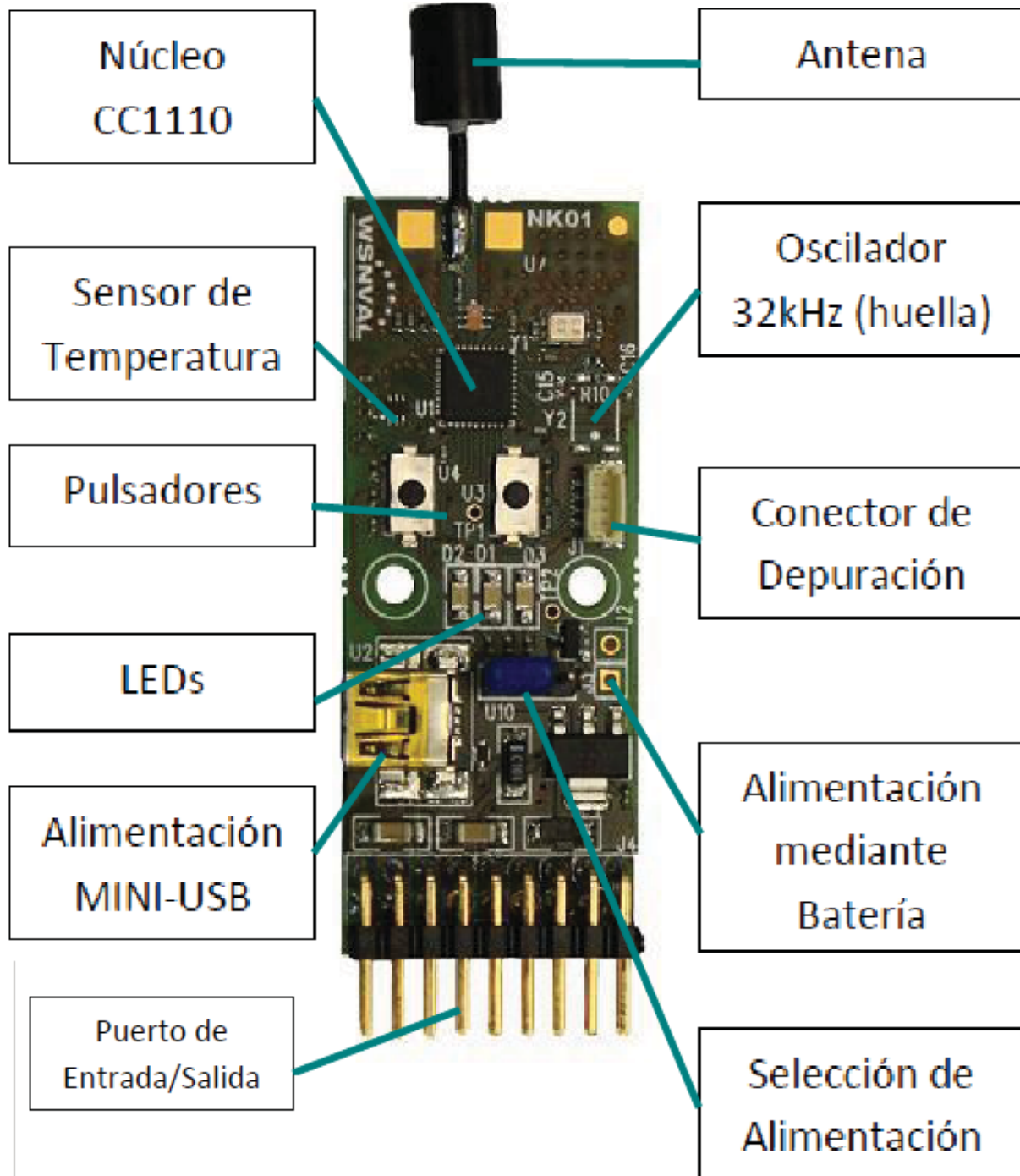
Una vez estudiado el problema, se estudiará los medios que se disponen para ello. La instrumentación necesaria y la mejor forma de resolver el problema.



4. INSTRUMENTACION

4.1. Hardware.

Nodos. NK01-En un formato 23 mm x 58 mm se integra una solución completa de RF, junto con elementos como pulsadores, LEDs, un sensor de temperatura, un conector de entrada/salida y un sistema de alimentación flexible que permite el funcionamiento a partir de baterías o a partir de un USB.



El hardware principal usado para los nodos fue el WSN-NK01 desarrollados por la empresa wsnval en el anexo 01 se incluye el manual de usuario de dicho nodo.

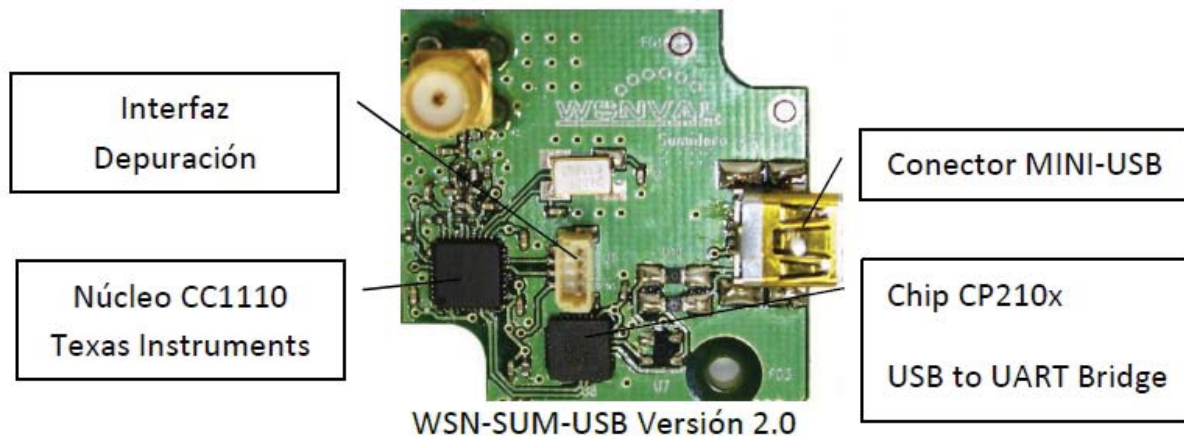
En su interior podemos encontrar un chip CC1110 de Texas Instruments, es el encargado de controlar el nodo y el dispositivo que tuvo que ser programado para el envío de los datos al sumidero.

Sumidero. Para el sumidero se uso el WSN-DBG-USB desarrollado también por wsnval, y cuyas principales características son:

El sumidero WNS-DBG-USB es una solución completa que proporciona una interfaz entre un puerto USB y las redes inalámbricas de WSNVAL.

En su interior podemos encontrar un chip CC1110 de Texas Instruments conectado a un chip CP210x de Silicon Labs (Silabs). Este último chip proporciona una comunicación serie virtual a través del bus USB.

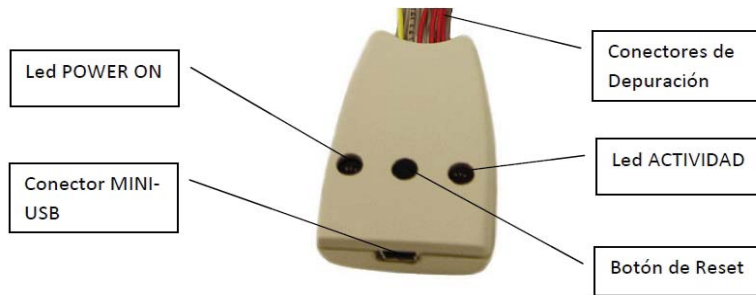
El chip CC1110 es capaz de comunicarse utilizando uno de sus periféricos integrados UART. El driver del chip de Silabs permite la recolección de los datos en el ordenador personal abriendo un puerto COM convencional con la velocidad de transmisión configurada en el CC1110. Por tanto, la comunicación extremo a extremo es equivalente a efectos prácticos de una comunicación serie convencional.



En el anexo 2 se incluye el manual de usuario de este dispositivo también.

Depurador WSN-DBG. Dispositivo que posibilita la interconexión entre un ordenador personal y los módulos de radio-comunicación de WSNVAL mediante conexión USB.

Este componente es imprescindible tanto para la programación de los módulos, así como para la depuración del software.



WSN-sniffer. Dispositivo desarrollado por WNSVAL, que sirve junto el software de radio packet sniffer proporcionado, desarrollado también por ellos para ver los paquetes que circulan entre los nodos y el sumidero.





Iman de neodimio.El neodimio es una tierra rara que compone el metal de Misch aproximadamente en un 18% siendo una de las tierras raras más reactiva. Posee un brillo metálico-plateado y brillante. Oscurece rápidamente al contacto con el aire formando un óxido. Pertenece a la familia de los elementos de transición interna y contiene en su forma estable 60 electrones y su isotopo más conocido es Nd-142 . Este imán se uso para poder contar las revoluciones por minuto y la dirección del viento.



También se dispuso de diferentes osciloscopios pertenecientes al departamento de redes de sensores inalámbricas del ITACA principalmente se uso un tektronic TDS.



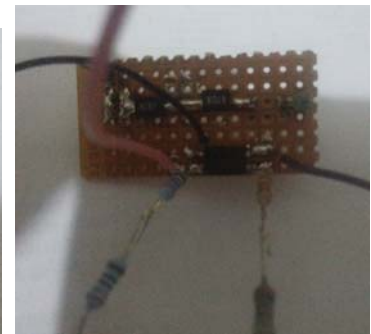
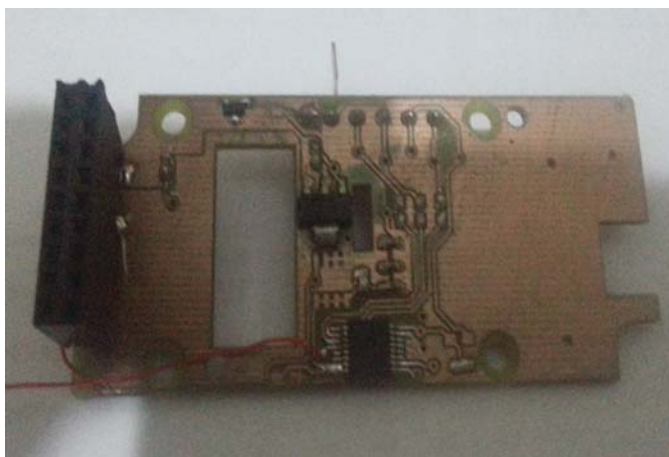
Así como de diversas fuentes de alimentación, llegando a usar incluso la fuente de alimentación de un PC y baterías que tenían en el departamento, para poder sacar la máxima corriente posible , en las pruebas.



También diversos multímetros del departamento fueron usados.

A modo de colofón se puede indicar que dichos dispositivos nos ayudarán a evitar imprevistos, ya que gracias a ellos podremos comprobar cosas como, por citar un ejemplo, que la tensión suministrada por una fuente es la correcta, que la intensidad que circula por un circuito no es superior a la tolerada por el mismo e incluso muchos de ellos incorporan un aviso acústico para indicar la presencia de un cortocircuito.

También se dispuso de las herramientas de soldadura existentes en el departamento, donde se soldaron los diferentes diseños realizados y el materias para la creación de placas, insoldadora, torno, etc. Con lo que se hicieron los prototipos de las placas diseñadas.



Algunos de los prototipos creados.





4.2. Software.

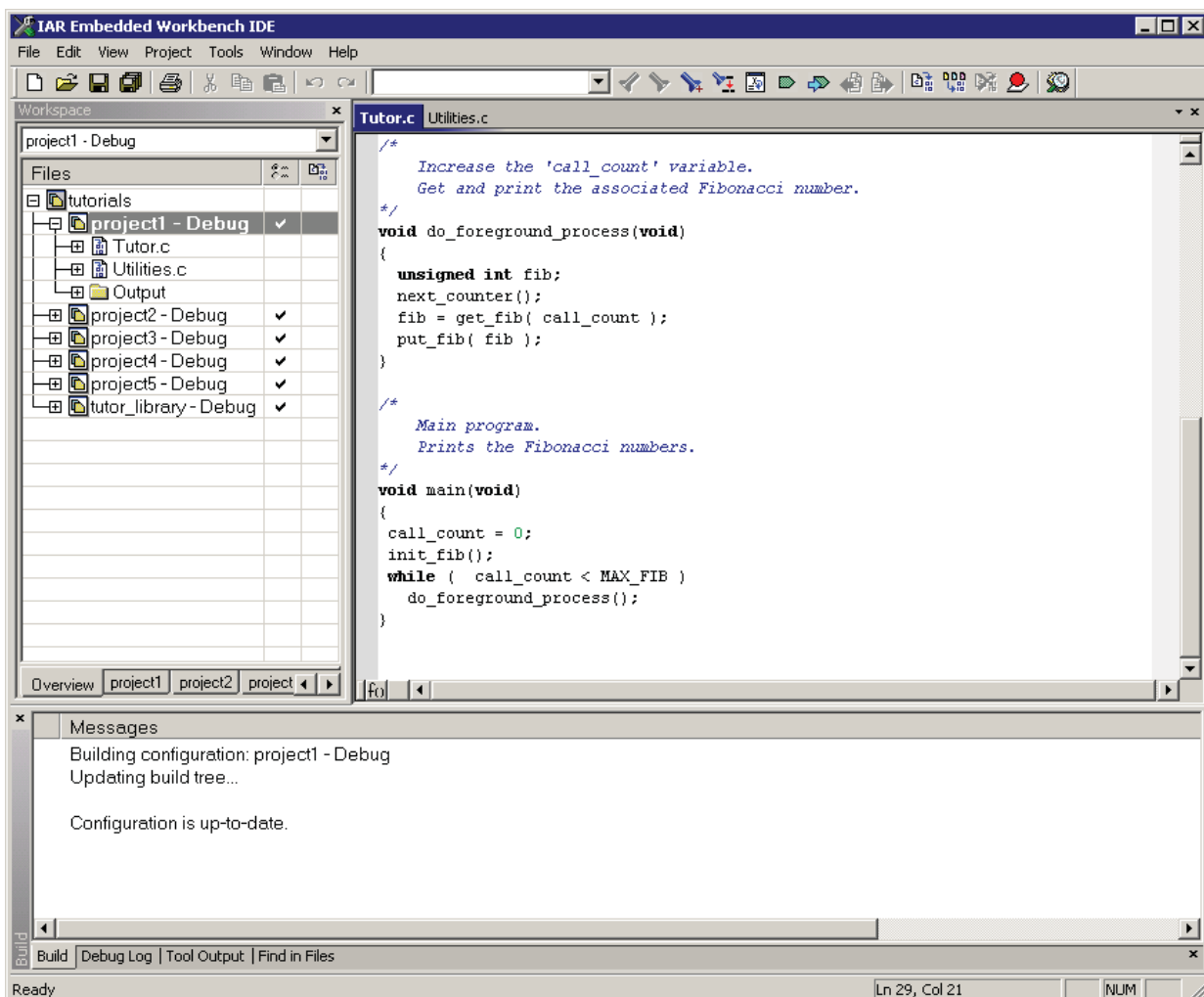
Además de las herramientas hardware fueron necesarias diversas herramientas software tanto para el diseño como para la programación.

IAR Embedded Workbench IDE, IAR Systems es una empresa dedicada en su mayoría a la creación de herramientas de software para sistemas empujados (embedded) desarrollados por las empresas más reconocidas en este ámbito, colaborando con estas empresas son capaces de ofrecer entornos de desarrollo integrado (IDE) muy potentes y flexibles.

Uno de sus objetivos es proporcionar compiladores que generen código eficiente logrando un alto grado de optimización y que sus herramientas sean agradables además de ser fáciles de usar.

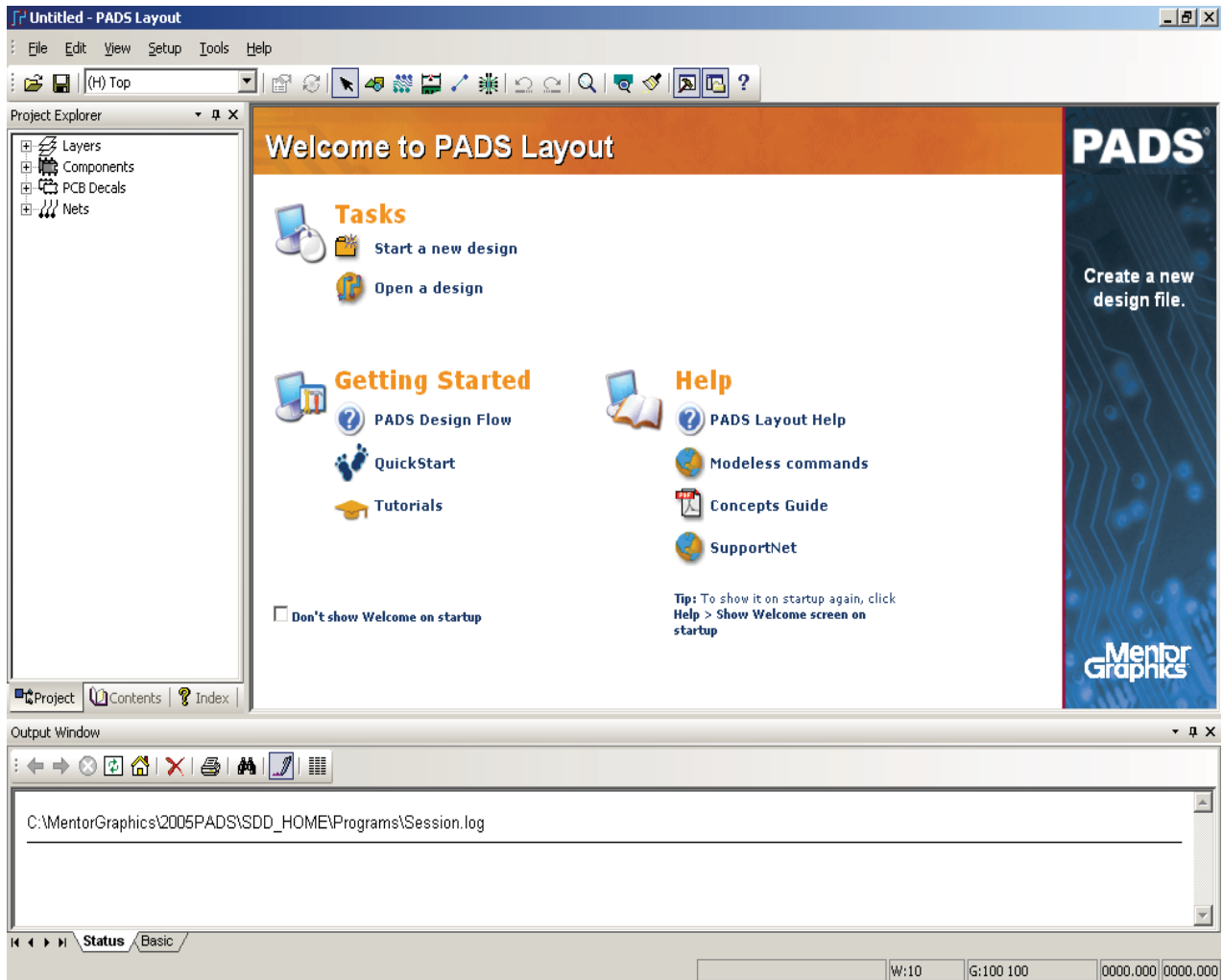
IAR Embedded Workbench es como ya lo mencionamos un entorno de desarrollo integrado el cual tiene diferentes versiones, dependiendo el tipo de microcontroladores a usar como los AVR de Atmel, HCS12 de Freescale, PIC de Microchip, MSP430™ de Texas Instruments™ y algunos más no tan conocidos.

Es el software que se ha utilizado para programar los microcontroladores CC1110 de Texas Instruments, que están dentro de los nodos y del sumidero. Se ha programado en C.



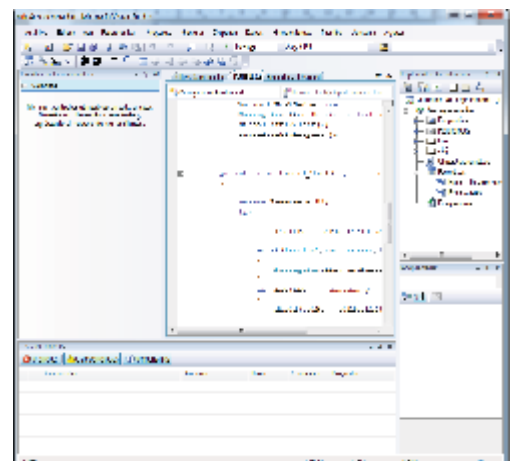


PADS. Es un software de diseño de PCB de Mentor Graphics. Fue la herramienta de diseño de pcb que se usaba en el departamento y para la cual se tenía licencia de desarrollo, así que fue la que se usó para el diseño de las placas.



Microsoft Visual Studio es un entorno de desarrollo integrado (IDE, por sus siglas en inglés) para sistemas operativos Windows. Soporta varios lenguajes de programación tales como Visual C++ , Visual C#, Visual J#, y Visual Basic .NET, al igual que entornos de desarrollo web como ASP.NET, aunque actualmente se han desarrollado las extensiones necesarias para muchos otros.

Visual Studio permite a los desarrolladores crear aplicaciones, sitios y aplicaciones web, así como





servicios web en cualquier entorno que soporte la plataforma .NET (a partir de la versión .NET 2002). Así se pueden crear aplicaciones que se intercomunican entre estaciones de trabajo, páginas web y dispositivos móviles.

Con este software se desarrollo la aplicación para visualizar las medidas obtenidas.

Software de radio packet Sniffer. Este software fue usado para ver que los paquetes que se enviaban desde el nodo al sumidero eran correctos.

The screenshot displays the Texas Instruments SmartRF Packet Sniffer Simplicii v1.0.6 interface. The main window shows a list of 10 captured packets with the following columns: P.nbr., Time (us), Length, Dest. Address, Source Address, Port (Encryption Number), Device Info (Rec.Type, Send.Type, HCount), Transaction ID, Application payload, User Port, RSSI (dBm), LQI, and FCS. Below the list, there are configuration options for 'Select connected device' (EB ID 0055, Chip type: CC1110, EB type: SmartRF04EB), 'Select packet buffer size' (20 MB), 'Select channel' (0x01), and 'Clock multiplier' (1.0). The status bar at the bottom indicates 'Packet count: 104' and 'Error count: 1'.

P.nbr.	Time (us)	Length	Dest. Address	Source Address	Port	Device Info	Transaction ID	Application payload	User Port	RSSI (dBm)	LQI	FCS
1	+0	13	10 00 00 00	10 00 00 01	NO 0x3F	CONT_LISTEN END_DEVICE 03	0x27	00 45	0x3F	-81	48	OK
2	+7190	13	10 00 00 00	10 00 00 01	NO 0x3F	CONT_LISTEN END_DEVICE 03	0x28	00 8D	0x3F	-80	45	OK
3	+7325	13	10 00 00 00	10 00 00 01	NO 0x3F	CONT_LISTEN END_DEVICE 03	0x29	00 44	0x3F	-82	52	OK
4	+7187	13	10 00 00 00	10 00 00 01	NO 0x3F	CONT_LISTEN END_DEVICE 03	0x2A	07 FF	0x3F	-81	47	OK
5	+8934095	13	10 00 00 00	10 00 00 01	NO 0x3F	CONT_LISTEN END_DEVICE 03	0x2B	00 45	0x3F	-80	49	OK
6	+7189	13	10 00 00 00	10 00 00 01	NO 0x3F	CONT_LISTEN END_DEVICE 03	0x2C	00 8D	0x3F	-79	45	OK
7	+7327	13	10 00 00 00	10 00 00 01	NO 0x3F	CONT_LISTEN END_DEVICE 03	0x2D	00 44	0x3F	-81	47	OK
8	+7188	13	10 00 00 00	10 00 00 01	NO 0x3F	CONT_LISTEN END_DEVICE 03	0x2E	07 FF	0x3F	-81	51	OK
9	+8934094	13	10 00 00 00	10 00 00 01	NO 0x3F	CONT_LISTEN END_DEVICE 03	0x2F	00 45	0x3F	-81	46	OK
10	+7187	13	10 00 00 00	10 00 00 01	NO 0x3F	CONT_LISTEN END_DEVICE 03	0x30	00 8D	0x3F	-80	51	OK

También se uso el hiperterminal de windows para la depuración del sumidero sobretodo y la visualización de las medidas previo desarrollo de la aplicación de creada con Visual Studio.



5.DESARROLLO

El primer paso del desarrollo fue desarrollo de software para los nodos y los sumideros, fue crear tanto para los nodos como para el sumidero las funciones de envío y recepción de datos.

Esta es la función para el envío de datos.

```
static bool_t frame_send (uint16_t result) {

    ioctlRawSend_t send;
    smplStatus_t  retvalue;

    // bool_t      is_12bits;
    uint8_t      fr0_values[2];

    uint8_t radioState = MRFI_GetRadioState();
    NWK_CHECK_FOR_RESTORE_STATE (radioState);

    // TMP_calculate (fr0_values, &is_12bits);           /* Get the mea

    send.addr = &Destination;
    fr0_values[0] = (uint8_t)((result & 0xFF00)>>8);
    fr0_values[1] = (uint8_t)(result & 0x00FF);
    send.msg = fr0_values;
    // send.msg[0] = result0x1B;
    // send.msg[1] = 0x4;
    // send.msg[2] = 0x39;
    send.len = 2;
    send.port = SMPL_PORT_USER_BCAST;

    /* Send the message */
    retvalue = SMPL_Ioctl (IOCTL_OBJ_RAW_IO, IOCTL_ACT_WRITE, &send);

    if (retvalue == SMPL_SUCCESS) {

        return TRUE;
    }
    return FALSE;
}
```

Esta función recibe 16 bits, los enmascara y los envía al sumidero, si el envío es correcto devuelve true si no false.



Función de Recepción:

```
static uint8_t frame_get (uint8_t * data, addr_t * from) {  
  
    ioctlRawReceive_t recv;  
  
    uint8_t radioState = MRFI_GetRadioState();  
    NWK_CHECK_FOR_SETRX (radioState);  
  
    recv.port = SMPL_PORT_USER_BCAST;  
    recv.msg = data;  
    recv.addr = from;  
  
    NWK_CHECK_FOR_SETRX(radioState);  
  
    if (SMPL_Ioctl(IOCTL_OBJ_RAW_IO, IOCTL_ACT_READ, &recv) == SMPL_SUCCESS) {  
  
        return (recv.len);  
    }  
  
    return 0;  
}
```

Esta función es la encargada de la recepción del sumidero, devuelve el numero de bytes recibidos y los datos recibidos en data.

También se creo en el sumidero una función para el envío automático de datos al USART para poder visual los datos recibidos.

```
a - HyperTerminal  
Archivo Edición Ver Llamar Transferir Ayuda  
Node = 10000001: Temp = 24.25  
Node = 10000001: Temp = 24.25  
Node = 10000001: Temp = 24.25  
Node = 10000001: Temp = 24.18  
Node = 10000001: Temp = 24.18  
Node = 10000001: Temp = 24.12  
Node = 10000001: Temp = 24.12  
Node = 10000001: Temp = 24.12  
Node = 10000001: Temp = 24.12  
Node = 10000001: Temp = 24.06  
Node = 10000001: Temp = 24.06  
Node = 10000001: Temp = 24.00  
Node = 10000001: Temp = 23.93  
Node = 10000001: Temp = 23.93  
Node = 10000001: Temp = 23.93  
Node = 10000001: Temp = 23.93  
Node = 10000001: Temp = 23.93  
Node = 10000001: Temp = 23.93  
Node = 10000001: Temp = 23.93  
Node = 10000001: Temp = 23.93  
Node = 10000001: Temp = 26.37  
Node = 10000001: Temp = 26.93  
Node = 10000001: Temp = 24.93  
-  
0:04:16 conectado Autodetect. 115200 8-N-1 DESPLAZAR MA
```



```
bool_t COM_data_frame_send (uint8_t const * frame, addr_t const * from) {

    uint16_t      dato = (uint16_t) frame[0]<<8 | frame[1];

    uint8_t      aux[8];
    uint8_t      i;

    uint8_t      * data_ptr = TxBuffer;

    uint8_as_hex (from->addr[0], aux);
    uint8_as_hex (from->addr[1], &aux[2]);
    uint8_as_hex (from->addr[2], &aux[4]);
    uint8_as_hex (from->addr[3], &aux[6]);

    data_ptr += my_private_strcpy (data_ptr, "Node = ");
    for (i = 0; i < 8; i++) {

        *data_ptr++ = aux[i];
    }

    data_ptr += my_private_strcpy (data_ptr, ": valor = ");

    int16_as_dec (dato, aux);
    *data_ptr++ = aux[0];
    *data_ptr++ = aux[1];
    *data_ptr++ = '.';
    *data_ptr++ = aux[2];
    *data_ptr++ = aux[3];

    data_ptr += my_private_strcpy (data_ptr, "\n\r");

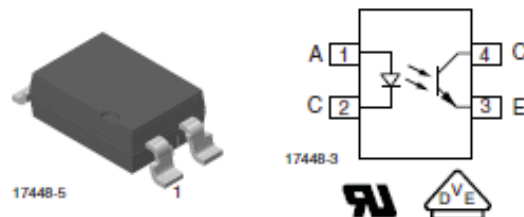
    UART0_serial_send (TxBuffer, (data_ptr - TxBuffer));

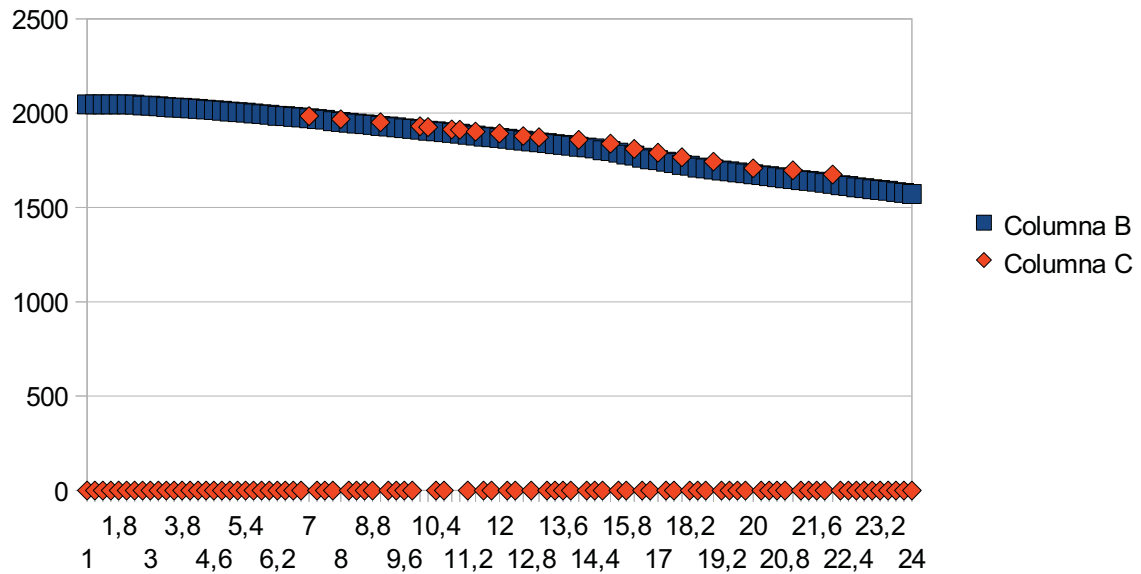
    return TRUE;
}
```

Luego se paso a las funciones para el uso del AC/DC y se comprobó el buen funcionamiento de este con una fuente de alimentación.

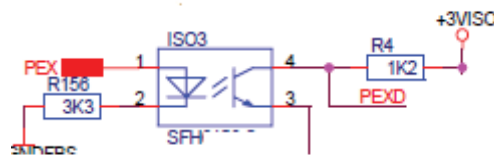
```
bool_t ADC_single_conversion_start (ADC_CHANNEL_t channel, uint16_t * result) {  
  
    uint16_t      value;  
  
    ADCH;  
    ADCCON3 = (ADCCON3 & 0xF0) | channel;          /* Start of single conversion  
  
    while ((ADCCON1 & ADC_EOC) != ADC_EOC) {  
  
        ;                                          /* Wait until conversion complete  
    }  
  
    value = ADCL;                                /* Get the value from the registers  
    value |= (((uint16_t)ADCH) << 8);  
  
    value >>= 4;  
    value &= SingleMeasureMask;  
  
    *result = value;  
    return TRUE;  
}
```

Una vez desarrollado este software se paso al diseño tanto de la placa para la medición de la tensión como de la placa de medición de la corriente. Para la medición de la tensión se pidió que se octoacoplasen las tensiones, para que la tensión de la batería no entrase dentro del NK01, en un principio las medidas que iban a ser medidas por la dispositivo iban a ser entre 14 y 16 voltios, se hizo el siguiente diseño, y se probó el optoacoplador SFH615 ya que era un optoacoplador con el cual ya se había trabajado, y se hicieron diversas medidas con diversos optoacopladores para comprobar su linealidad. Una vez diseñado se cambiaron los valores de las resistencias para que se pudiese medir hasta tensiones de 24V sin problemas.





En la gráfica se puede observar la comparación de 2 optoacopladores, en el eje X es la tensión y en el eje Y la lectura del AC/DC.



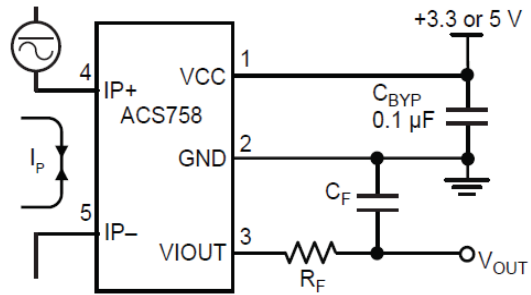
El funcionamiento del circuitos es muy básico, por PEX llega la tensión de la batería que cuanto mas grande mas corriente hace pasar por el diodo del opto, cosa que hace que mas corriente pase por el transistor y hace caer mas la tensión en PEXD, que es lo que se conectaría al AC/DC del micro.



Para el diseño de la medición de corriente se calculo que si el generador iba a ser de 400 a 500W para una tensión de 15V saldrían unos 33,3 amperios del generador, así que se busco un

convertidor de corriente-tensión de efecto hall que pudiese convertir esa corriente. Se eligió el ACS758LCB-50U de allegro. Que es capaz de medir hasta 50A.

Typical Application

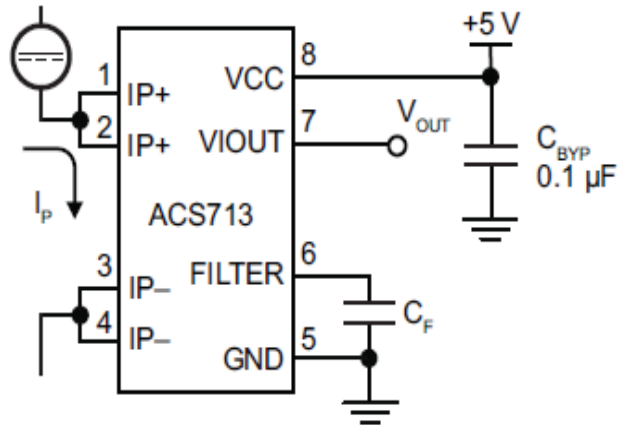


Se diseñó el medidor de corriente con una placa de pruebas y se hicieron pruebas de medidas para lo cual se hicieron pruebas con una batería que había en el departamento y una fuente de alimentación de un pc para intentar sacar la máxima corriente posible, ya que las fuentes de alimentación de las que se disponía se les podía sacar como máximo 4A.

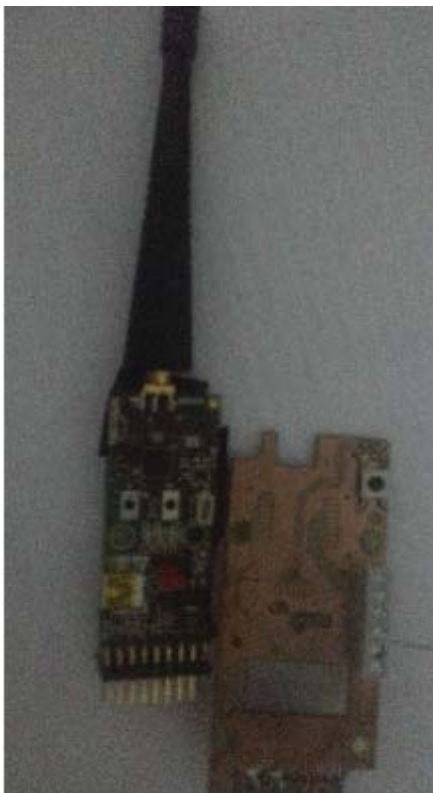


Una vez hechas las pruebas para medir la corriente se observó que se tenía muy poca precisión para medidas pequeñas de corriente, menos de 60mV por amperio con lo cual si el generador no sacaba una cantidad de corriente suficiente no se tendría mucha precisión de la medida, así que se decidió buscar otro convertidor y se eligió el ACS713 de allegro también, este llega a los 20A y a pesar de tener otro encapsulado con apariencia menos robusto tiene mayor precisión.

Typical Application

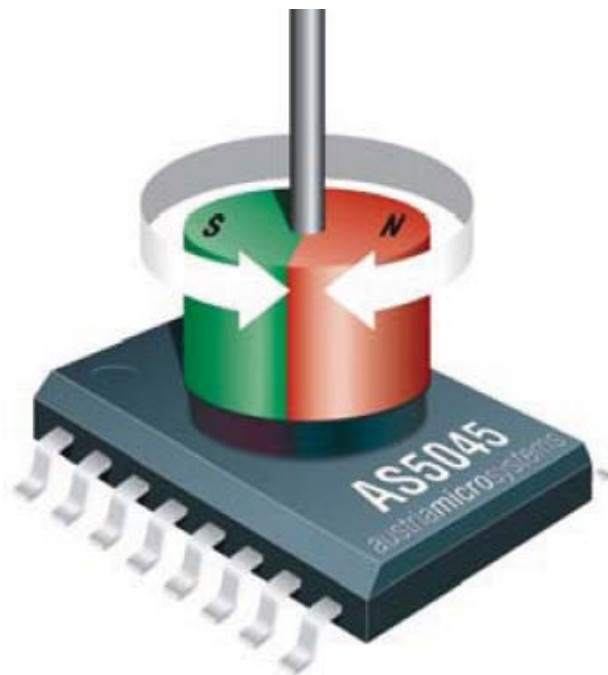


Una vez hecho el diseño como se vio que era un diseño que no ocupaba mucho espacio se decidió a incluirlo dentro de la misma placa que el sensor de tensión, y se diseñó con pads una placa que fuera compatible con el NK01 para que pudiese ir dentro de la caja de encapsulado y poder fijar esta al generador.

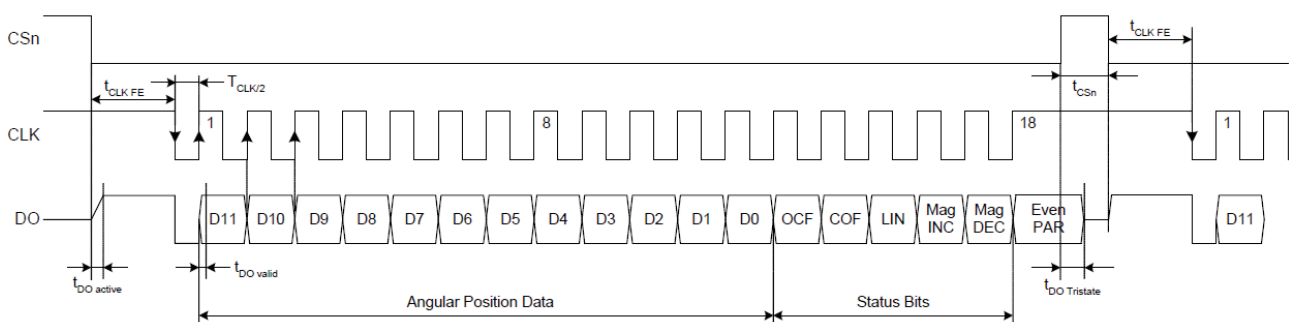


Una vez diseñado y programado el dispositivo para medir la tensión y la corriente se pasó al diseño de un dispositivo para medir las revoluciones por minuto del generador, para este

dispositivo después de barajar diferentes posibilidades se decidió hacer usando el AS5045 de austriamicrosystems.

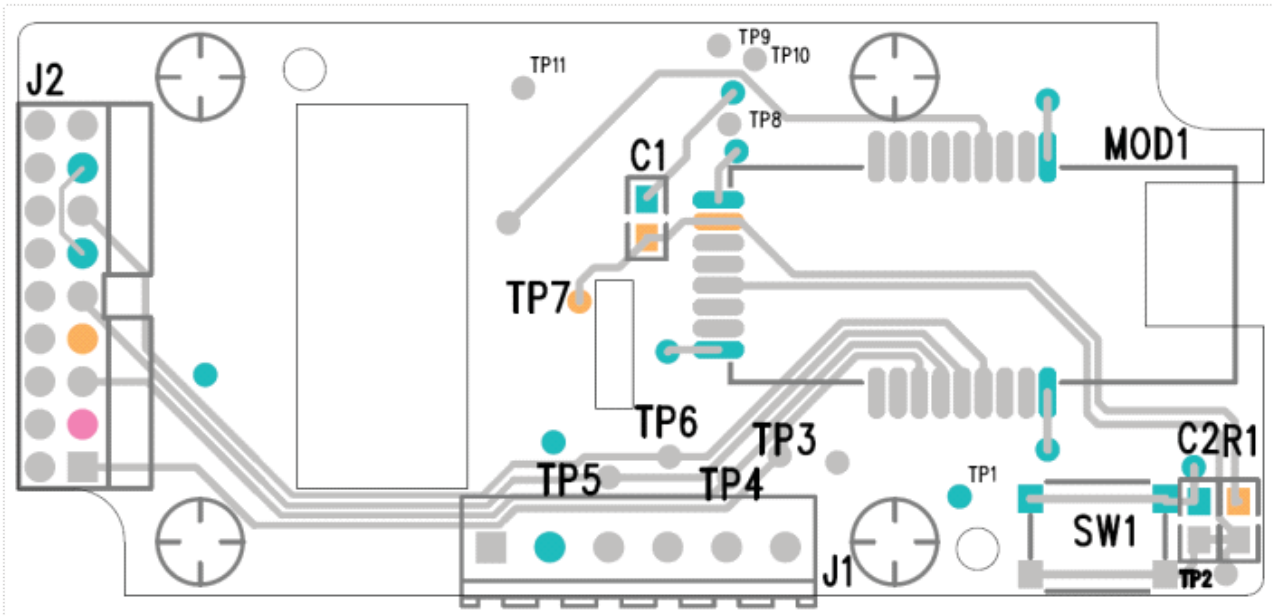


Este dispositivo un dispositivo que usa el efecto hall para medir un campo magnético y es capaz de medir el ángulo de rotación de un imán de dos polos que este sobre el. Existen diversas formas de uso para medir el ángulo, una es el uso del PWM, el AS5045 tiene pin que es la salida de un PWM el cual la frecuencia depende del ángulo de rotación. En un primer momento para comprobar su funcionamiento se midió el PWM con un osciloscopio, y se vio que efectivamente conforme giraba el imán la frecuencia del PWM cambiaba. Este ángulo también puede ser leído mediante I2C, el diseño fue realizado para poder leer el ángulo por SPI ya que el CC1110 de texas instrument que lleva el NK1 tiene comunicación SPI y esta esta disponible mediante los pines de entrada/salida.

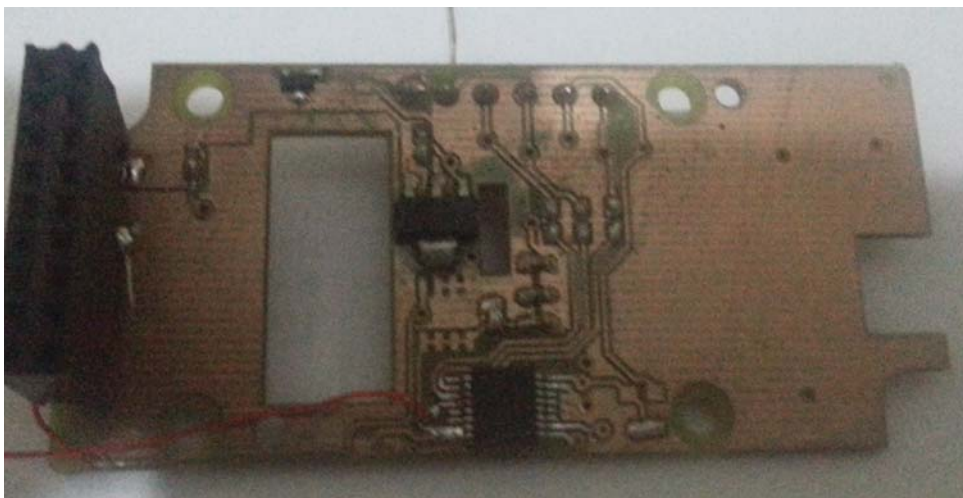


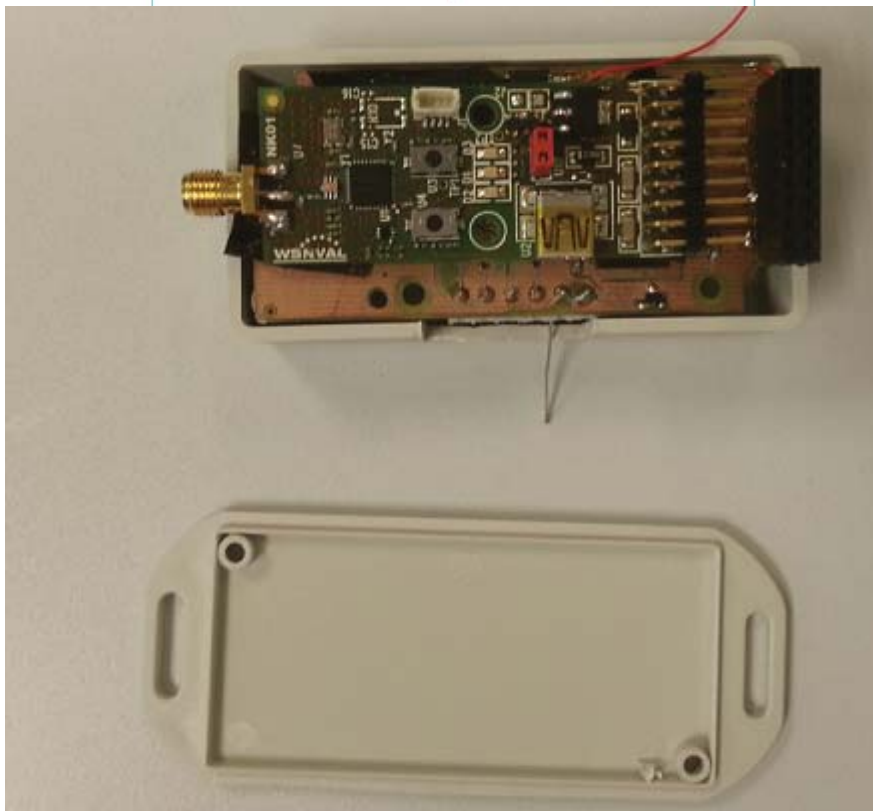
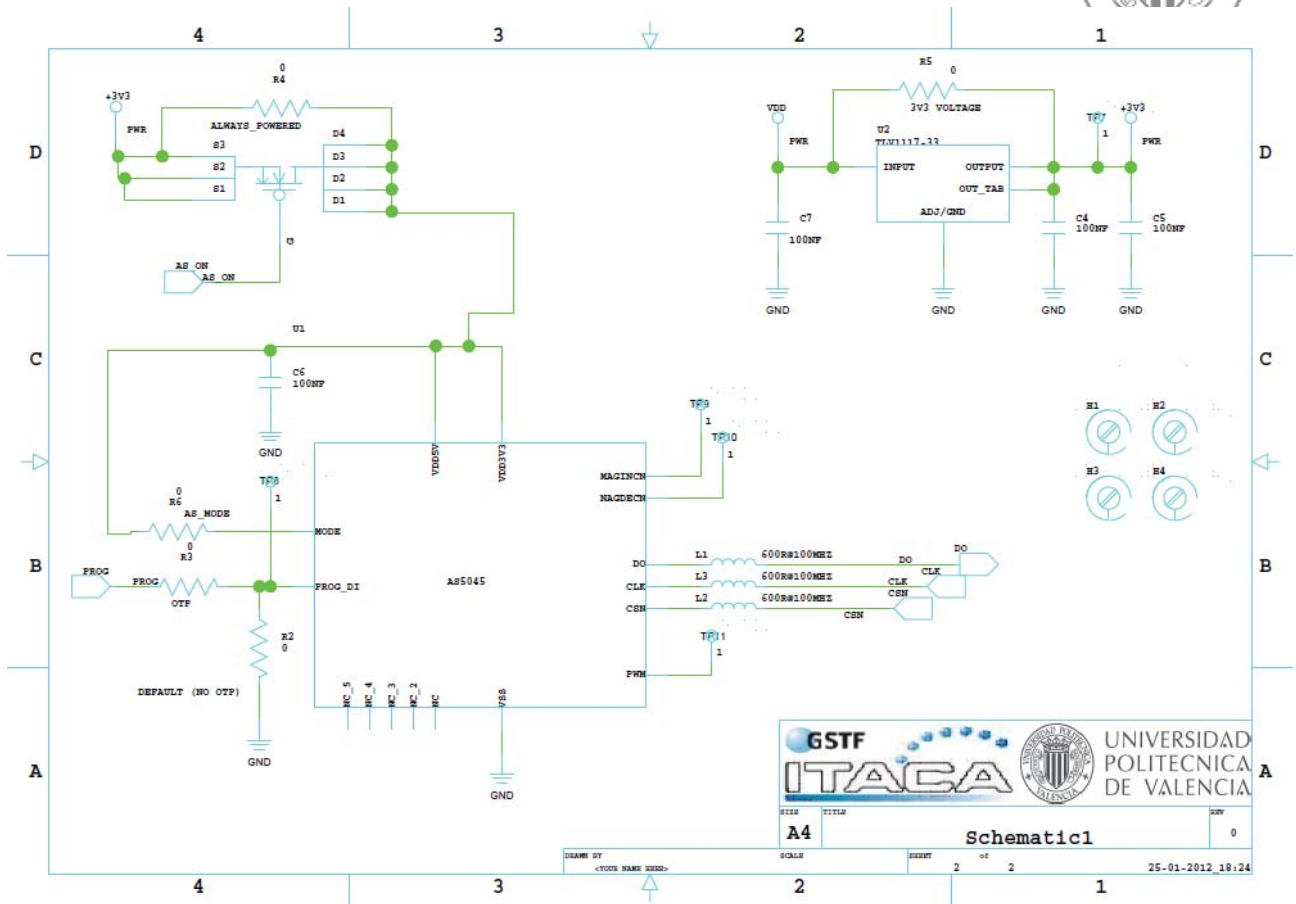
Se eligió el AS5045 porque además de poder medir las revoluciones por minuto (hasta 9766 rpm en modo rápido), también es capaz de medir el ángulo para poder medir la dirección del viento con

una veleta. Así con el mismo diseño puede ser usado para dos nodos diferentes con dos medidas de cosas diferentes. El diseño de la PCB también se hizo con la máxima compatibilidad posible, incluso se hizo compatible con otro nodo mas pequeño que existe en WSNVAL, el WSN-B, y mirando el tamaño del NK1 para poder introducirlo en la caja de encapsulado juntos y poder ser fijado correctamente dentro del aerogenerador.

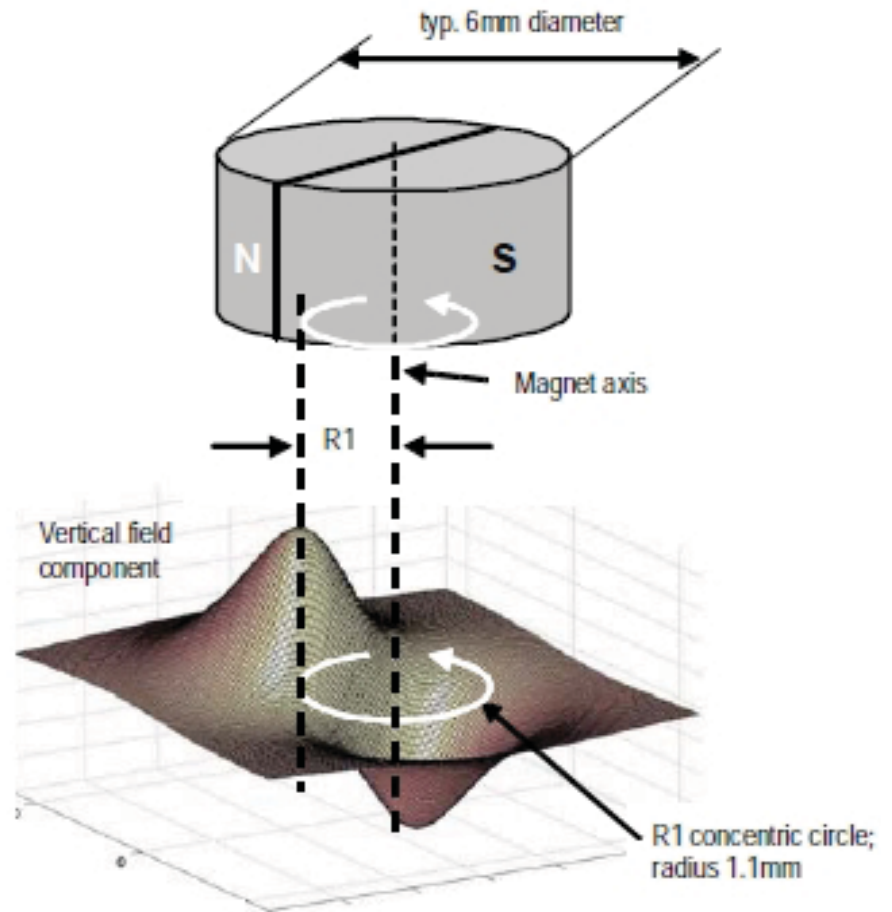


El primer prototipo tubo varios errores de diseño, el mas importante fue la equivocación en el diseño del conector con el NK1, tal y como se puede ver en la imagen superior, con lo que hubo que volver a rediseñarlo.





Para el correcto funcionamiento del AS5045 hubo que usar un imán de neodimio (NdFeB) de unos 6mm de diámetro, aunque también se hubiese podido usar de AlNiCo/SmCo5 cualquier imán de tierra rara. Este imán será lo que mida el AS5045.





Una vez diseñado, se hizo la programación del nodo para leer mediante I2C el ángulo, calcular las rpm y enviarlas al sumidero.

Estas son algunas de las funciones que se programaron para en el C1110:

rutina para la recepción del SPI:

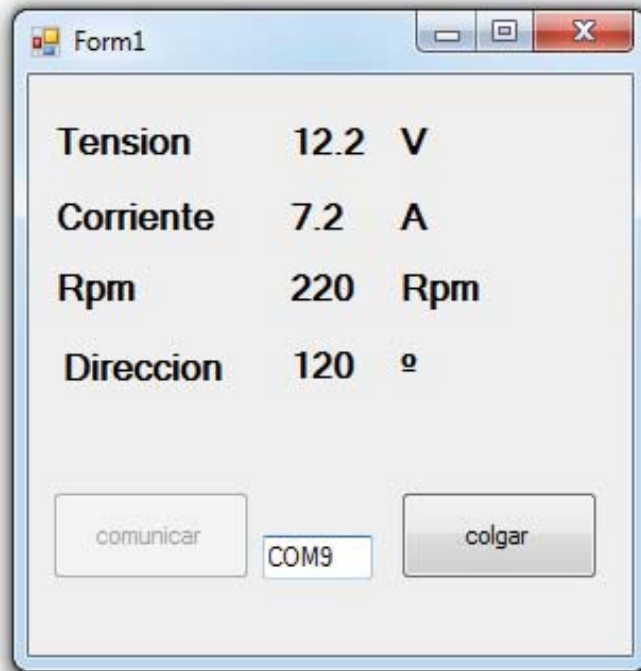
```
uint8_t SPI_USARTO_receive (uint8_t * buffer, uint8_t n) {  
  
    uint8_t      i;  
    uint16_t     j = 0;  
  
    // for (i = 0; i < n; i++, j = 0) {  
    for (i = 0; i < 3; i++, j = 0) {  
  
        UODBUF = 0x00;                                /* Write something */  
  
        while (((UOCSR & USART_CSR_TX_BYTE) == 0x00) && (j < 0xFFFF)) {  
  
            j++;                                       /* Wait until Rx */  
        }  
  
        if (j == 0xFFFF) {  
  
            return i;  
        }  
  
        buffer[i] = UODBUF;  
        UOCSR &= ~USART_CSR_TX_BYTE;  
    }  
  
    return i;  
}
```

función para el envío por SPI:

```
bool_t SPI_USARTO_send (uint8_t * buffer, uint8_t n) {  
  
    uint8_t      i;  
  
    for (i = 0; i < n; i++) {  
  
        UODBUF = buffer[i];  
  
        while (((UOCSR & USART_CSR_TX_BYTE) == 0x00) {  
  
            ;  
        }  
        UOCSR &= ~USART_CSR_TX_BYTE;  
    }  
  
    return TRUE;  
}
```



Una vez diseñados los diferentes nodos y programados se hizo una aplicación para poder visualizar los datos del sumidero de una forma amigable.



Una parte del código es la que se muestra a continuación, la primera parte se abre el puerto serie y se activa el timer para la lectura del puerto serie cuando se pulsa el botón comunicar: .

```
private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
{
    button1.Enabled = false;
    button2.Enabled = true;
    if (textBox1.Text!="")
        serialPort1.PortName = textBox1.Text;
    serialPort1.Open();
    MessageBox.Show("empieza la lectura");
    timer1.Enabled = true;
}
```




En esta parte del código se desactiva la lectura del puerto serie cuando se pulsa el botón Colgar: .

```
private void button2_Click(object sender, EventArgs e)
{
    timer1.Enabled = false;
    button2.Enabled = false;
    button1.Enabled = true;
    MessageBox.Show("acaba la lectura");
    serialPort1.Close();
    serialPort1.Dispose();
}
```

Timer que lee del puerto serie cuando se activa.

```
private void timer1_Tick(object sender, EventArgs e)
{
    string Lectura = "";
    try
    {
        Lectura = serialPort1.ReadLine();
    }
    catch(InvalidOperationException ex)
    {
        MessageBox.Show(ex.Message.ToString());
    }
    if (Lectura == "Tension") {
        label7.Text = serialPort1.ReadLine();
    } if (Lectura == "Corriente") {
        label8.Text = serialPort1.ReadLine();
    } if (Lectura == "rpm") {
        label6.Text = serialPort1.ReadLine();
    } if (Lectura == "angulo"){
        label5.Text = serialPort1.ReadLine();
    }
}
```

6. CONCLUSIÓN

En esta tesis final de master, ha requerido de campos de conocimiento muy diferentes para poder llevarla a cabo, empezando por el estudio de un aerogenerador, para saber como y donde se podían poner los nodos, o con cuanta corriente o tensión se trabajaba, hasta la programación de microcontroladores, aplicaciones para windows, diseño de placas electrónicas, etc. Todo ello ha requerido mucha dedicación, estudio y planificación para el correcto desarrollo.

Esta tesis ha sido desarrollada en el ITACA dentro de un proyecto en el que ellos participan y me ha dado la posibilidad de trabajar en el laboratorio de RIS con la gente de ese departamento, en un marco profesional y no solo académico, además de conocer el funcionamiento del ITACA y los proyectos que esta realizando.

Finalmente, podemos decir que todo el dispositivo que se ha venido desarrollando a lo largo de esta tesis es capaz de llevar a cabo la comunicación inalámbrica, y medir correctamente los valores que se requerían. Para ello se han aplicado conocimientos adquiridos en el master de ingeniería de computadores, tales como la red de sensores inalámbrica, la programación de un protocolo de comunicaciones como el spi, se ha intentando hacer un sistema robusto tolerante a fallos, etc.

Por último, como futuro trabajo que continúe con la labor realizada en esta tesis podría ser el estudio del aerogenerador, una vez obtenidos los datos capturados por los sensores, y aprovechando el trabajo realizado, hacer una base de datos comparativa con otros generadores, en diferentes lugares, calculando el coste y la productividad de cada generador, evaluar la efectividad de los generadores eólicos y de si realmente podrían considerarse como una fuente real de energía suficiente para el auto abastecimiento humano y sustitución de otra formas de conseguir la energía eléctrica mas contaminantes y caras.





7. BIBLIOGRAFÍA.

1. Machinery's Handbook (Erik Oberg y Franklin D. Jones)
2. Energía Eólica,(Pedro Fernandez Diez, Universidad de Cantabria)
3. Atlas de Meteorología (R. Candal Vila)
4. Prontuario de Meteorología y Oceanografía (Serie KOEL)
5. El hobby de la construcción (Campero di Napoli)
6. Manual Práctico del Automóvil (Colección CULTURAL)
7. Texas Renewable Energy Resource Assessment. Julio 1995.
8. <http://www.Monografias.com>
9. <http://www.renovables.com/>
10. Redes Inalámbricas de sensores: teoria y aplicación practica, (Roberto Fernández Martínez, Universidad de la rioja)

8. REFERENCIAS.

- [FORD2008] <http://cse498t03s.cse.msu.edu/index.htm>, CSE 498 Team 3, Ford Capstone Project.
- [WEN2006] Towards Embedded Wireless-Networked Intelligent Daylighting Systems for Commercial Buildings; Yao-Jung Wen, Jessica Granderson, Alice M. Agogino.
- [POL2002] Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring; Alan Mainwaring, Joseph Polastre, Robert Szewczyk, David Culler and John Anderson.
- [MAR2004] Glacial Environment Monitoring using Sensor Networks; K. Martinez, P. Padhy, A. Riddoch, H.L.R. Ong, J.K. Hart.
- [EVER2005] Wireless Sensor Networks and Beyond: A Case Study on Transport and Logistics; L. Evers, M. J. J. Bijl, M. Marin-Perianu, R. Marin-Perianu, P. J. M. Havinga.
- [ECO2003] The Economist, In Dust We Trust, Technology Quarterly, Vol.371, No.8379, pp.10-12.
- [CAM2008] Camalie Net Wireless Sensing; <http://camalie.com/>.
- [THO2004] Auto-sensing and distribution of traffic information in vehicular ad hoc networks; Michael Thomas, Evtim Peytchev, David Al-Dabass; I.J. of Simulation Vol. 5 No 3-4.
- [SHA2007] Multi-Purpose Wireless Accelerometers for Civil Infrastructure Monitoring; Shamim N. Pakzad, Sukun Kim, Gregory L Fenves, Steven D. Glaser, David E. Culler, James W. Demmel.
- [SUK2007] Health Monitoring of Civil Infrastructures Using Wireless Sensor Networks; Sukun Kim, Shamim Pakzad, David Culler, James Demmel, Gregory Fenves, Steven Glaser y Martin Turon.

ANEXO I

WSN-NK01 Manual de Usuario

Introducción

Este manual describe todos los aspectos relacionados con el módulo de evaluación WSN-NK01, cubriendo tanto el componente hardware como su conexión con un PC.

Además del sistema de radio, este nodo de evaluación dispone de un sistema capaz de realizar medidas precisas de la temperatura así como una pequeña interfaz de interacción humana a través de pulsadores y LEDs conectados al núcleo microcontrolador.

Asimismo se pueden realizar aplicaciones personalizadas utilizando el conector de expansión de Entrada/Salida en el que se dispone de una gran cantidad de pines y puertos directamente conectados con el núcleo microcontrolador.

Este manual cubre los aspectos básicos para el correcto funcionamiento del nodo WSN-NK01 con las herramientas desarrolladas por Wireless Sensor Networks Valencia (en adelante WSNVAL).

Las herramientas propietarias de Texas Instruments [™] como son SmartRF [®] Studio, Chipcon Flash Programmer disponen de su propio manual de usuario editado por Texas Instruments.

Referencias

- [1] CC1110Fx/CC1111Fx Datasheet. Texas Instruments [®] www.ti.com
- [2] WSN-B Manual del usuario. WSNVAL www.wsnval.com
- [3] WSN-DBG Manual del usuario. WSNVAL www.wsnval.com
- [4] CC1110EM_PCB_Antenna_reference_design_1_4. Texas Instruments [®] www.ti.com
- [5] TMP112 Datasheet. Texas Instruments [®] www.ti.com
- [6] WSN-SUM-USB Manual de usuario. WSNVAL www.wsnval.com
- [7] MC-306 MC-405 MC-406 datasheet. Epson Toyocom www.epsontoyocom.co.jp
- [8] Guía de usuario LED EXAMPLE. WSNVAL www.wsnval.com
- [9] Guía de usuario NET EXAMPLE. WSNVAL www.wsnval.com

Historial de Revisiones

Versión	Fecha	Descripción/Cambios
0.1	13/4/2010	Primera versión

Definiciones

Módulo de evaluación WSN-NK01



El módulo de evaluación WSN-NK01 se encarga de una solución integrada que facilita el desarrollo de aplicaciones basadas en comunicaciones en la banda Sub-1GHz, así como facilitar el rápido desarrollo de nuevas aplicaciones.

Depurador WSN-DBG

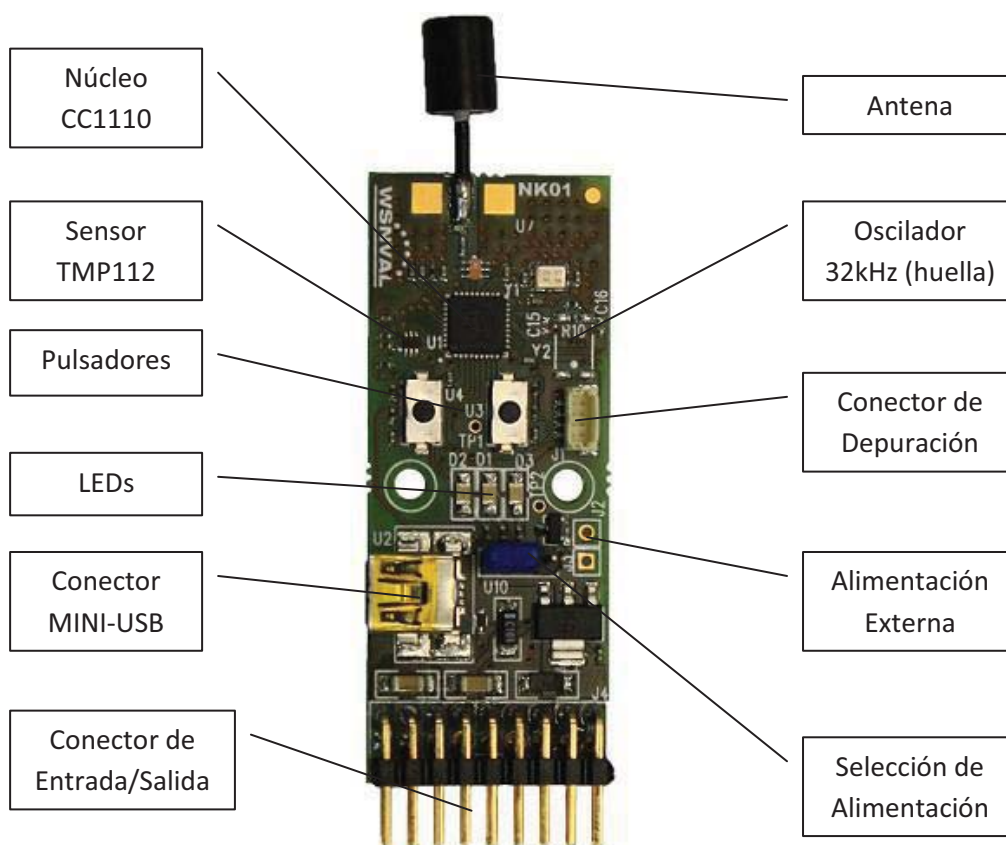


Dispositivo que posibilita la interconexión entre un ordenador personal y los módulos de radio-comunicación de WSNVAL mediante conexión USB.

Este componente es imprescindible tanto para la programación de los módulos, así como para la depuración del software.

Descripción del Hardware

En un formato 23 mm x 58 mm se integra una solución completa de RF, junto con elementos como pulsadores, LEDs, un sensor de temperatura, un conector de entrada/salida y un sistema de alimentación flexible que permite el funcionamiento a partir de baterías o a partir de un USB.



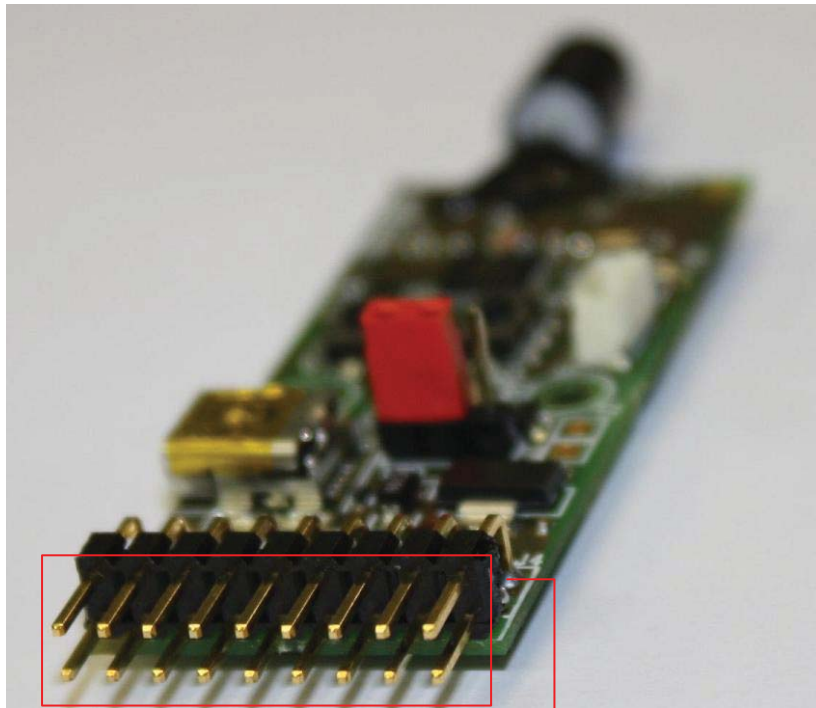
Conector de Entrada/Salida

Se dispone de un conector de paso 2.54 mm en la parte inferior donde se proporciona interconexión con la mayoría de los pines del microcontrolador. Asimismo, se pueden alimentar dispositivos con niveles de alimentación de 5 y 3.3V utilizando los pines seleccionados.



Por favor, consulte el **manual del chip CC1110** para conocer los **niveles de tensión y corriente recomendados** en los puertos del chip para evitar **daños irreparables**.

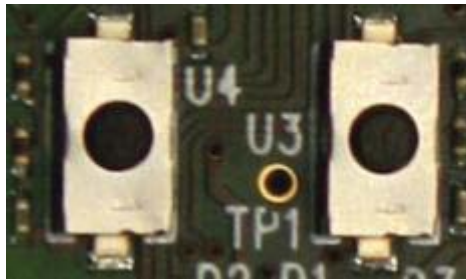
Preste especial atención en la conexión de la **alimentación (+3.3V y +5V)** y de la **masa (GND)**, una conexión inadecuada o la alimentación por medios de estos pines puede derivar en un **daño permanente** en el dispositivo.



2	4	6	8	10	12	14	16	18
1	3	5	7	9	11	13	15	17

Pin	Función
1	P0_2
2	P1_0
3	+ 5V
4	P1_1
5	P0_3
6	P1_2
7	+ 3.3V
8	P1_3
9	P0_4
10	P1_4
11	GND
12	P1_5
13	P0_5
14	P1_6
15	GND
16	P1_7
17	P0_7
18	P2_0

Pulsadores



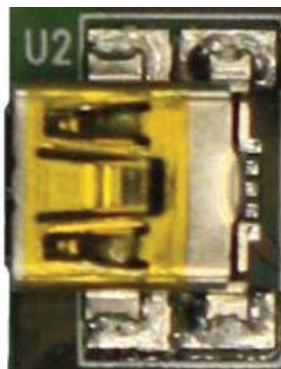
El módulo de evaluación de WSNVAL dispone de dos pulsadores (U3 y U4), ambos activos a nivel bajo, con dos funciones muy diferenciadas:

- **Pulsador de Propósito general U3:** La acción sobre este elemento fuerza un nivel lógico '0' en el pin P1_4 del microcontrolador; en reposo el nivel lógico en este pin es igual a '1'. La variación de este pin puede ser configurada como una fuente de interrupción reconocible por el microcontrolador.
- **Pulsador de RESET U4:** La acción sobre este componente fuerza el reinicio del microcontrolador.

Alimentación del módulo

Conector de Mini-USB

La alimentación del módulo de evaluación se puede realizar a través de una conexión Mini-USB estándar. De este modo conectando el dispositivo a un puerto USB de un PC, todos los dispositivos incluidos en el módulo funcionarán de una manera adecuada y todos los pines de alimentación presentes en el conector de Entrada/Salida estarán disponibles a las tensiones especificadas.



Esta interfaz NO proporciona conectividad entre el microcontrolador y el PC conectado. WSNVAL dispone de un dispositivo específico para realizar dicha función denominado WSN-SUM-USB. Por favor, diríjase a la documentación de este dispositivo en caso de necesitar más información.

Alimentación Externa (Conector)

Los pines denominados como J2 y J3 facilitan la conexión de una fuente de energía externa como baterías o fuentes de tensión reguladas de una manera sencilla, cómoda y segura.

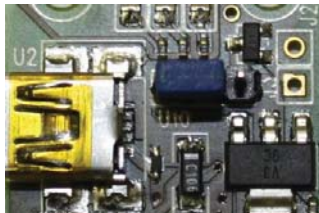


El valor de tensión conectado a dichos pines (tensión positiva a J2 y tensión de referencia a J3) servirá para alimentar todos los dispositivos conectados a tensiones de 3.3 V. La tensión de 5V disponible en el conector de Entrada/Salida no será válida en caso de alimentar únicamente el dispositivo con este conector.

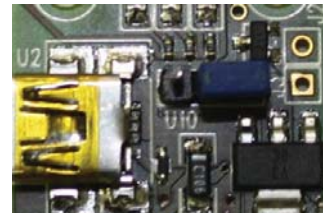
Todos los dispositivos incluidos en el módulo de evaluación funcionarán correctamente con valores de alimentación de entre 2 y 3.6 V. Sin embargo, en caso de conectar alguna circuitería externa deberá tenerse en cuenta el rango adecuado para dicha aplicación.

Selector de alimentación

Para seleccionar la fuente de alimentación a utilizar por el dispositivo se dispone del conector U10 de paso 2.54 mm entre sus pines.



Alimentación a partir del conector Mini-USB



Alimentación a partir de la alimentación externa

Colocando pequeño JUMPER entre el conector central y uno de los extremos se selecciona como fuente de alimentación de 3.3V la procedente del conector Mini-USB (conexión entre los pines central e izquierdo) o del conector de alimentación externa (conexión entre los pines central y derecho).

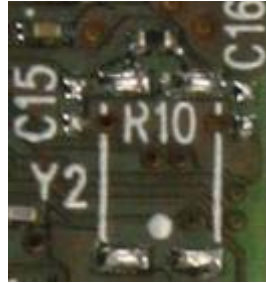
Oscilador 32 kHz (huella)

El microcontrolador CC1110 dispone de un modo de ultra-bajo consumo en el cual la corriente necesaria para su funcionamiento es inferior a 0.6 μ A.

En dichas aplicaciones se puede configurar un temporizador conocido como Sleep Timer para temporizar las tareas periódicas a realizar aprovechando el potencial del modo de bajo consumo.

Aunque esta temporización se puede realizar utilizando un oscilador integrado en el propio microcontrolador de baja precisión y de bajo consumo, se puede conectar un oscilador externo

de 32.678 kHz de frecuencia y de una altísima precisión para realizar temporizaciones mucho más exactas.

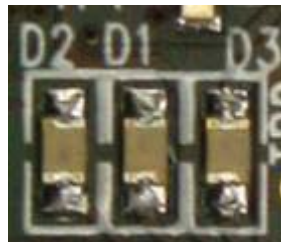


Para obtener más información se ruega consultar la sección marcada como Sleep Timer de la hoja de características del microcontrolador CC1110.

LA INCORPORACIÓN DE ESTE COMPONENTE SE OFRECE BAJO DEMANDA.

LEDs

El dispositivo incorpora 3 diodos luminosos (LEDs) de colores rojo, amarillo y verde. Estos diodos están conectados en configuración de ánodo común con tres puertos del microcontrolador.



Nombre	Color	Pin CC1110
D1	Amarillo	PO_1
D2	Rojo	PO_0
D3	Verde	PO_6

Para un correcto funcionamiento de cada uno de los diodos, el pin correspondiente debe estar configurado como SALIDA DIGITAL en configuración PUSH-PULL. Estableciendo la salida a nivel ALTO el LED permanecerá APAGADO, mientras que si la salida está a nivel BAJO en LED lucirá.

Sensor de Temperatura

Se ha incorporado al dispositivo un sensor de temperatura TMP112 de Texas Instruments[®]. Este sensor de temperatura además de una precisión de 0.5°C, dispone de una resolución de 12 bits y una interfaz de comunicación serie SMBus[™].



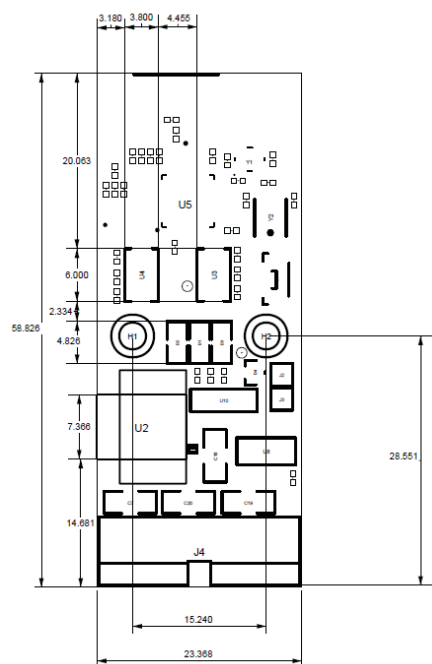
El diagrama de conexiones se resume en la tabla siguiente. La alimentación del chip a través de la línea V+ se realiza mediante un pin (P1_2) del microcontrolador. Para un correcto funcionamiento de este chip el pin P1_2 del microcontrolador debe estar configurado como SALIDA DIGITAL en configuración PUSH-PULL y su valor ha de estar fijado a nivel alto. En otro caso el chip TMP112 no estará correctamente alimentado.

TMP112 Pin	Pin CC1110
V+	P1_2
ADD0	GND
SCL	P1_0
SDA	P1_3
ALERT	P1_1

Asimismo, las líneas SCL, SDA y ALERT del sensor de temperatura están conectadas a la línea V+ mediante un PULL UP adecuado siguiendo las recomendaciones de este dispositivo.

Para la comunicación entre el microcontrolador y el sensor de temperatura se sigue el protocolo SMBus™. Se proporciona una librería software para realizar la comunicación de manera adecuada y siguiendo el esquema de conexión expuesto anteriormente.

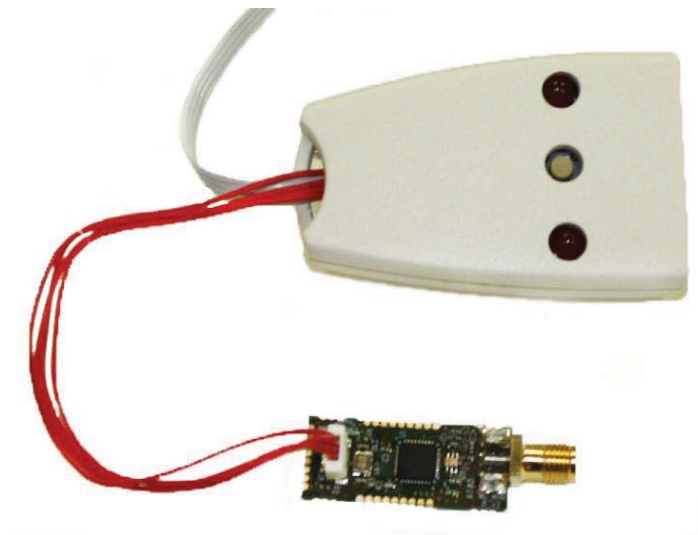
Dimensiones



Conector de depuración

WSNVAL dispone de un hardware específico para la programación de los nodos con un programa ya compilado o para la depuración de los mismos en el propio sistema.

Este dispositivo, conocido como depurador ó debugger, conecta un ordenador que dispone mediante un puerto USB con la gama de dispositivos de comunicaciones de WSNVAL.



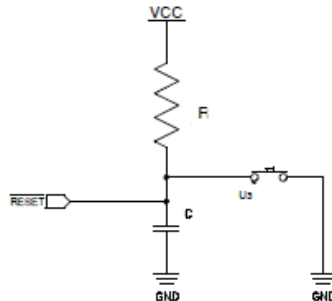
El **nodo** conectado debe estar **correctamente alimentado** durante los procesos de **programación y depuración**.

La alimentación deberá ser estable y aportada de manera externa en el pin designado. El dispositivo depurador no dispone de una fuente de alimentación específica.

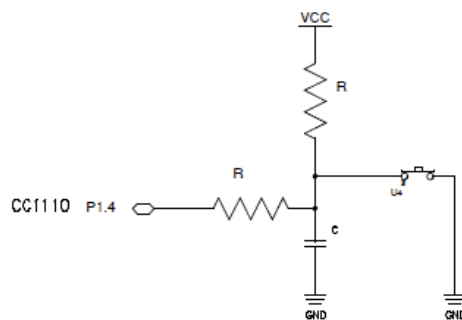
Un **fallo de alimentación** durante el proceso de programación puede causar **daños irreparables** en el dispositivo.

Esquemáticos

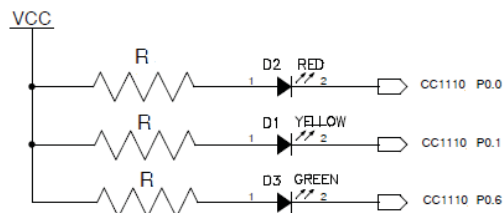
Pulsador de Reset



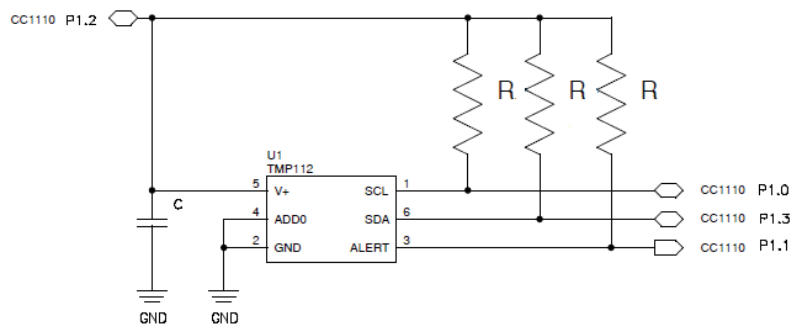
Pulsador Genérico



LEDs



Sensor de Temperatura TMP112



ANEXO II

WSN-SUM-USB Manual de Usuario

Introducción

Este manual describe todos los aspectos relacionados con el sumidero WSN-SUM-USB desarrollado por Wireless Sensor Networks Valencia (de ahora en adelante WSNVAL).

Este manual cubre los aspectos básicos tanto del dispositivo físico como de la instalación del mismo un correcto funcionamiento.

Las herramientas propietarias de Texas Instruments [™], como de Silicon Labs disponen de su propios manuales de usuario y guías de referencia que rogamos encarecidamente consulten ante cualquier duda.

Referencias

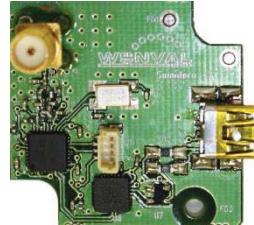
- [1] CC1110Fx/CC1111Fx Datasheet. Texas Instruments [®] www.ti.com
- [2] WSN-DBG Manual del usuario. WSNVAL www.wsnval.com
- [3] CP2102 Single-Chip USB to UART Bridge Datasheet. Silicon Labs www.silabs.com
- [4] AN144: CP210x Device Customization Guide. Silicon Labs www.silabs.com
- [5] AN205: CP210x Baud Rate Support www.silabs.com

Historial de Revisiones

Versión	Fecha	Descripción/Cambios
0.1	5/2/2010	Primera versión

Definiciones

Sumidero WSN-SUM-USB



El nodo básico WSN-SUM-USB se trata de un dispositivo con un convertidor serie-USB para facilitar las comunicaciones serie entre la USART de un microcontrolador CC1110 con un PC.

Disponemos actualmente de dos versiones diferentes, aunque compatibles entre sí.

1. Versión 1.0: Se puede distinguir por el color rojizo de la placa de circuito impreso.
2. Versión 2.0: El color del PCB en este caso es de color verde.

La principal diferencia entre ambas versiones es la incorporación de un conector de depuración que se va a convertir en el estándar para todos los dispositivos de radiocomunicaciones de la gama de WSNVAL.

Depurador WSN-DBG



Dispositivo que posibilita la interconexión entre un ordenador personal y los módulos de radiocomunicación de WSNVAL mediante conexión USB.

Este componente es imprescindible tanto para la programación de los módulos, así como para la depuración del software.

Descripción del Hardware

El sumidero WNS-DBG-USB es una solución completa que proporciona una interfaz entre un puerto USB y las redes inalámbricas de WSNVAL.

En su interior podemos encontrar un chip CC1110 de Texas Instruments conectado a un chip CP210x de Silicon Labs (Silabs). Este último chip proporciona una comunicación serie virtual a través del bus USB.

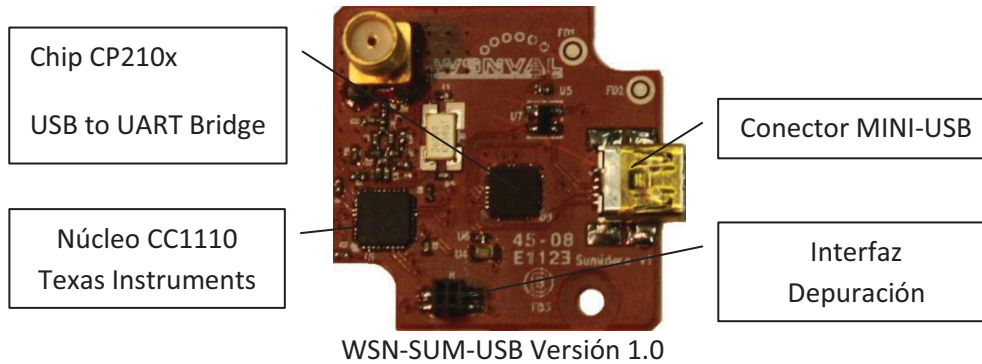
El chip CC1110 es capaz de comunicarse utilizando uno de sus periféricos integrados UART. El driver del chip de Silabs permite la recolección de los datos en el ordenador personal abriendo un puerto COM convencional con la velocidad de transmisión configurada en el CC1110. Por tanto, la comunicación extremo a extremo es equivalente a efectos prácticos de una comunicación serie convencional.

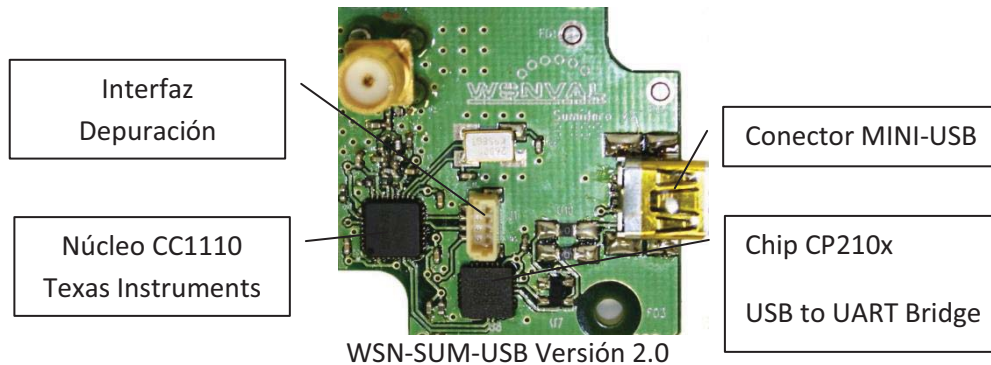
Se deberá configurar la USART0 del chip CC1110 en modo UART con la alternativa 1 para una correcta comunicación. Como se puede observar en la tabla 50 extraída de la hojas de datos del chip CC1110 de Texas Instruments, esta configuración coloca los pines TX y RX en los puertos P0.3 y P0.4 respectivamente.

Periphery / Function	P0								P1								P2							
	7 th	6 th	5	4	3	2	1	0	7	6	5	4	3	2	1	0	4	3	2	1	0			
ADC	A7	A6	A5	A4	A3	A2	A1	A0																
USART0 Alt. 1			C	SS	MO	MI																		
SPI Alt. 2											MO	MI	C	SS										
USART0 Alt. 1			RT	CT	TX	RX																		
UART Alt. 2											TX	RX	RT	CT										
USART1 Alt. 1			MI	MO	C	SS																		
SPI Alt. 2									MI	MO	C	SS												
USART1 Alt. 1			RX	TX	RT	CT																		
UART Alt. 2									RX	TX	RT	CT												
TIMER1 Alt. 1				2	1	0																		
Alt. 2																0	1	2						
TIMER3 Alt. 1												1	0											
Alt. 2									1	0														
TIMER4 Alt. 1														1	0									
Alt. 2																		1				0		
FS Alt. 1									CK	WS	RX	TX												
Alt. 2																		CK	WS	RX	TX			
32.768 kHz XOSC																Q2	Q1							
DEBUG																				DC	DD			

Table 50: Peripheral I/O Pin Mapping

Los elementos más significativos del dispositivo son:





Interfaz USB

La interfaz USB nos permite transmitir la información entre en el microcontrolador y el PC mediante un puerto serie virtual.

El nodo sumidero también obtiene la alimentación del bus USB y no necesita de otra fuente externa para su correcto funcionamiento.

Conectores de depuración

Dependiendo de la versión de sumidero que haya adquirido se encontrará con un conector de depuración u otro. A continuación detallamos el tipo de conector y la modo correcto de interconexión con el depurador desarrollado por WSNVAL: WNS-DBG



Las primeras versiones del sumidero WSN-SUM-USB disponen de un conector de depuración de paso estándar de 50 mils (1.27 mm).



La correcta conexión del depurador se efectúa de la manera que muestra la fotografía.



Las últimas versiones del WSN-SUM-USB disponen de un conector más avanzado que sólo permite la conexión en el sentido correcto.



La utilización de las interfaces de depuración distintas a la última citada se realizará bajo la responsabilidad del usuario y tras la lectura del manual correspondiente del dispositivo a conectar correspondiente.

La conexión incorrecta puede derivar el fallos permanentes tanto de este hardware como del dispositivo conectado

Programación y depuración

WSNVAL dispone de un hardware específico para la programación de los nodos con un programa ya compilado o para la depuración de los mismos en el propio sistema.

Este dispositivo, conocido como depurador ó debugger, conecta un ordenador que dispone mediante un puerto USB con la gama de dispositivos de comunicaciones de WSNVAL.



El **sumidero** debe estar **correctamente alimentado** durante los procesos de **programación y depuración**.

Esto implica que debe estar conectado a un puerto USB, por tanto necesitaremos de dos puertos USB diferentes: uno para el depurador y otro para el sumidero.

Un fallo de alimentación durante el proceso de programación puede causar daños irreparables en el dispositivo.

Instalación

El sumidero WSN-SUM-USB incluye un chip CP210x USB to UART Bridge de la marca Silicon Labs. En la página web de este fabricante (www.silabs.com) se pueden encontrar tanto los drivers, como guías de usuario y notas de aplicación.

Recomendamos que consulten la documentación descrita, así como la hoja de datos del dispositivo CP210x para una mejor comprensión del funcionamiento del dispositivo.

El primer paso consiste en descargar e instalar los drivers designados como VCP Driver Kit para el sistema operativo deseado.

Tras la instalación del driver, ya podremos conectar el sumidero WSN-SUM-USB a un puerto USB de nuestro PC. El dispositivo será detectado y sus drivers serán instalados automáticamente.

Al final de todo el proceso de instalación, si ésta ha sido correcta, encontraremos un nuevo puerto COM designado como Silicon Labs CP210x USB to UART Bridge. Además, encontraremos el número de puerto COM en el que se podrá comunicar con el núcleo CC1110 que se incluye en el sistema.

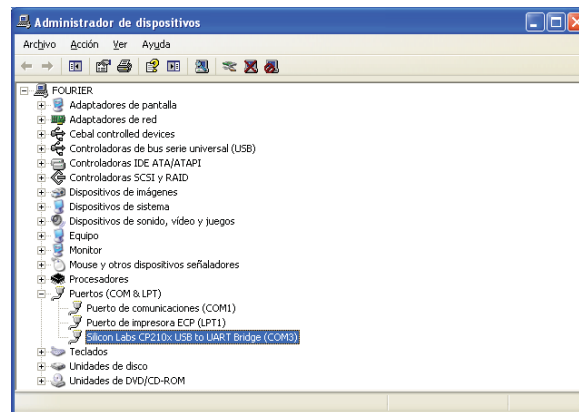


Ilustración 1. Administrador de dispositivos con el driver del sumidero instalado

En este caso el puerto del ordenador personal por el cual podremos recibir la información procedente del sumidero y enviar la información en el sentido contrario será el COM3.

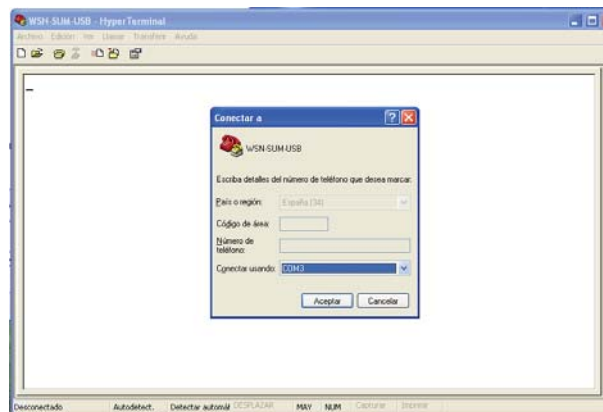


Ilustración 2. Selección del puerto de comunicaciones en el Hyper Terminal de Windows

Este puerto se puede abrir en cualquier cliente hyper-terminal como se muestra en la figura siguiente. Posteriormente, configuraremos tanto la velocidad de transmisión así como la configuración de la comunicación serie elegida también para el nodo CC1110.

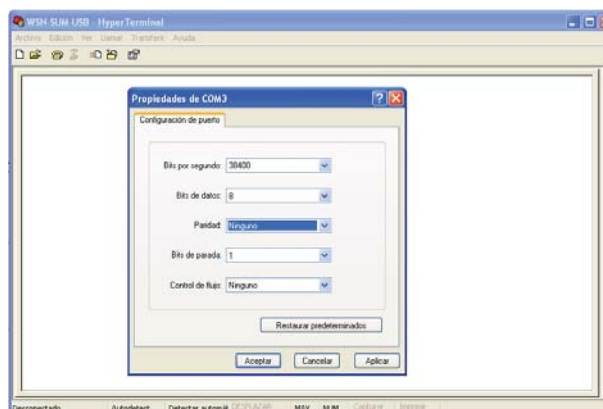


Ilustración 3. Configuración de diferentes parámetros de la comunicación en el Hyper Terminal

WSN-SUM-USB

Una vez configurada la aplicación hyper-terminal adecuadamente se está en disposición de mostrar los caracteres enviados por la UART del sumidero y de enviar datos en el sentido contrario de la comunicación.



El ejemplo de configuración se ha realizado con la aplicación de Windows de Hyper-Terminal.

Se puede abrir este puerto con cualquier otro tipo de software especificando tanto el puerto, como la configuración elegida para la comunicación.

ANEXO III

AS5045

Data Sheet

12 Bit Programmable Magnetic Rotary Encoder

1 General Description

The AS5045 is a contactless magnetic rotary encoder for accurate angular measurement over a full turn of 360°. It is a system-on-chip, combining integrated Hall elements, analog front end and digital signal processing in a single device.

To measure the angle, only a simple two-pole magnet, rotating over the center of the chip, is required. The magnet can be placed above or below the IC.

The absolute angle measurement provides instant indication of the magnet's angular position with a resolution of $0.0879^\circ = 4096$ positions per revolution. This digital data is available as a serial bit stream and as a PWM signal.

An internal voltage regulator allows the AS5045 to operate at either 3.3 V or 5 V supplies.

2 Benefits

- Complete system-on-chip
- Flexible system solution provides absolute and PWM outputs simultaneously
- Ideal for applications in harsh environments due to contactless position sensing
- No calibration required

3 Key Features

- Contactless high resolution rotational position encoding over a full turn of 360 degrees
- Two digital 12bit absolute outputs:
 - Serial interface and
 - Pulse width modulated (PWM) output
- User programmable zero position
- Failure detection mode for magnet placement monitoring and loss of power supply
- "red-yellow-green" indicators display placement of magnet in Z-axis
- Serial read-out of multiple interconnected AS5045 devices using Daisy Chain mode
- Tolerant to magnet misalignment and airgap variations
- Wide temperature range: - 40°C to + 125°C
- Small Pb-free package: SSOP 16 (5.3mm x 6.2mm)

4 Applications

- Industrial applications:
 - Contactless rotary position sensing
 - Robotics
- Automotive applications:
 - Steering wheel position sensing
 - Transmission gearbox encoder
 - Headlight position control
 - Torque sensing
 - Valve position sensing
- Replacement of high end potentiometers

Figure 1. Typical Arrangement of AS5045 and Magnet

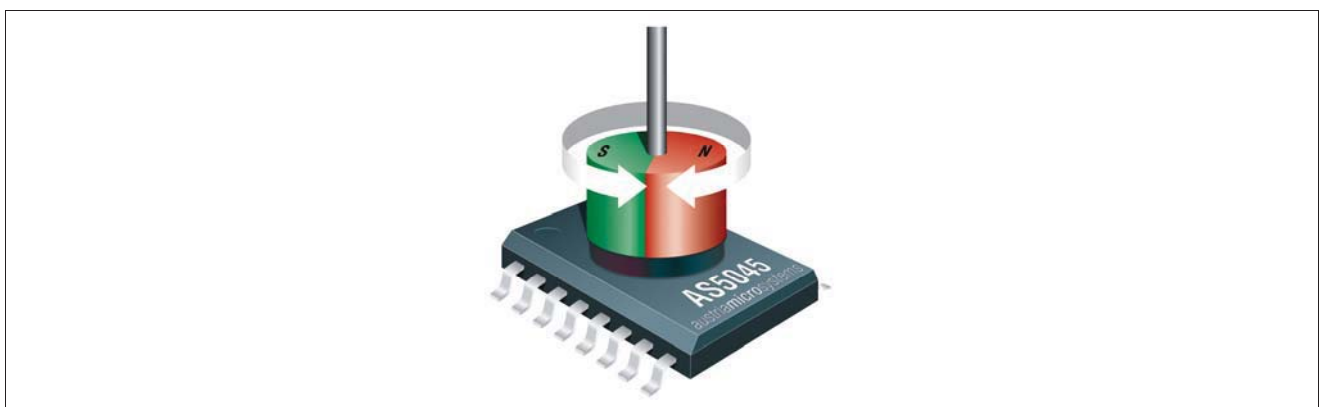


Table of Contents

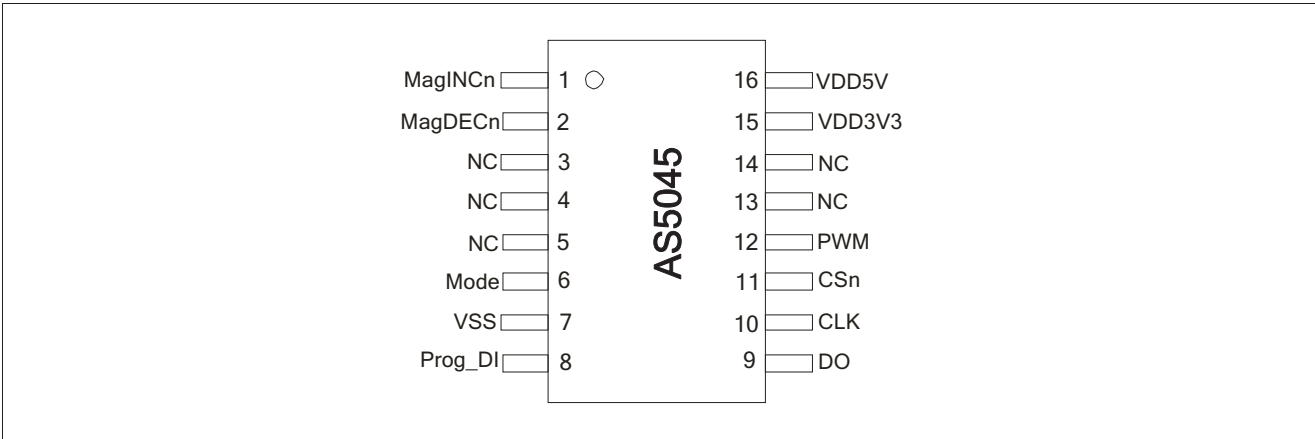
1	General Description	1
2	Benefits.....	1
3	Key Features	1
4	Applications	1
5	Pinout	4
5.1	Pin Configuration	4
5.2	Pin Description.....	4
6	Electrical Characteristics.....	5
6.1	AS5045 Differences to AS5040	5
6.2	Absolute Maximum Ratings (non operating)	6
6.3	Operating Conditions	6
6.4	DC Characteristics for Digital Inputs and Outputs.....	7
6.4.1	CMOS Schmitt-Trigger Inputs: CLK, CSn. (CSn = internal Pull-up).....	7
6.4.2	CMOS / Program Input: Prog.....	7
6.4.3	CMOS Output Open Drain: MagINCn, MagDECn	7
6.4.4	CMOS Output: PWM	7
6.4.5	Tristate CMOS Output: DO.....	8
6.5	Magnetic Input Specification	8
6.6	Electrical System Specifications.....	9
6.7	Timing Characteristics.....	10
6.7.1	Synchronous Serial Interface (SSI).....	10
6.7.2	Pulse Width Modulation Output	11
6.8	Programming Conditions.....	11
7	Functional Description.....	12
8	Mode Input Pin.....	13
8.1	Synchronous Serial Interface (SSI)	13
8.1.1	Data Content.....	14
8.1.2	Z-axis Range Indication (Push Button Feature, Red/Yellow/Green Indicator).....	14
8.2	Daisy Chain Mode.....	15
9	Pulse Width Modulation (PWM) Output	16
9.1	Changing the PWM Frequency.....	17
10	Analog Output.....	17
11	Programming the AS5045	18
11.1	Zero Position Programming.....	18
11.2	Repeated OTP Programming	18
11.3	Non-permanent Programming	19
11.4	Analog Readback Mode	20
12	Alignment Mode	21
13	3.3V / 5V Operation	22
14	Choosing the Proper Magnet.....	23
14.1	Physical Placement of the Magnet	24

15	Simulation Modeling	25
16	Failure Diagnostics	26
16.1	Magnetic Field Strength Diagnosis	26
16.2	Power Supply Failure Detection	26
17	Angular Output Tolerances.....	26
17.1	Accuracy	26
17.2	Transition Noise	28
17.3	High Speed Operation.....	28
17.3.1	Sampling Rate.....	28
17.4	Propagation Delays.....	29
17.4.1	Angular Error Caused by Propagation Delay	29
17.5	Internal Timing Tolerance.....	29
17.6	Temperature	30
17.6.1	Magnetic Temperature Coefficient.....	30
17.7	Accuracy over Temperature	30
17.7.1	Timing Tolerance over Temperature.....	30
18	Package Drawings and Markings	31
19	Ordering Information	31
20	Recommended PCB Footprint.....	32

5 Pinout

5.1 Pin Configuration

Figure 2. Pin Configuration SSOP16



5.2 Pin Description

Table 1 shows the description of each pin of the standard SSOP16 package (Shrink Small Outline Package, 16 leads, body size: 5.3mm x 6.2mm; see Figure 2).

Pins 7, 15 and 16 supply pins, pins 3, 4, 5, 6, 13 and 14 are for internal use and must not be connected.

Pins 1 and 2 MagINCn and MagDECn are the magnetic field change indicators (magnetic field strength increase or decrease through variation of the distance between the magnet and the device). These outputs can be used to detect the valid magnetic field range. Furthermore those indicators can also be used for contact-less push-button functionality.

Pin 6 Mode allows switching between filtered (slow) and unfiltered (fast mode). This pin must be tied to VSS or VDD5V, and must not be switched after power up. See chapter 8 Mode Input Pin.

Pin 8 Prog is used to program the zero-position into the OTP (see chapter 11.1 Zero Position Programming).

This pin is also used as digital input to shift serial data through the device in Daisy Chain configuration, (see chapter 8.2 Daisy Chain Mode).

Pin 11 Chip Select (CSn; active low) selects a device within a network of AS5045 encoders and initiates serial data transfer. A logic high at CSn puts the data output pin (DO) to tri-state and terminates serial data transfer. This pin is also used for alignment mode (Figure 14) and programming mode (Figure 10).

Pin 12 PWM allows a single wire output of the 10-bit absolute position value. The value is encoded into a pulse width modulated signal with 1µs pulse width per step (1µs to 4096µs over a full turn). By using an external low pass filter, the digital PWM signal is converted into an analog voltage, making a direct replacement of potentiometers possible.

Table 1. Pin Description

Pin	Symbol	Type	Description
1	MagINCn	DO_OD	Magnet Field M agnitude INC rease; active low, indicates a distance reduction between the magnet and the device surface. See Table 5
2	MagDECn	DO_OD	Magnet Field M agnitude DEC rease; active low, indicates a distance increase between the device and the magnet. See Table 5
3	NC	-	Must be left unconnected
4	NC	-	Must be left unconnected

Pin	Symbol	Type	Description
5	NC	-	Must be left unconnected
6	Mode	-	Select between slow (low, VSS) and fast (high, VDD5V) mode. Internal pull-down resistor.
7	VSS	S	Negative Supply Voltage (GND)
8	Prog_DI	DI_PD	OTP Program ming Input and Data Input for Daisy Chain mode. Internal pull-down resistor (~74kΩ). Connect to VSS if not used
9	DO	DO_T	Data Output of Synchronous Serial Interface
10	CLK	DI, ST	Clock Input of Synchronous Serial Interface; Schmitt-Trigger input
11	CSn	DI_PU, ST	Chip Select , active low; Schmitt-Trigger input, internal pull-up resistor (~50kΩ)
12	PWM	DO	Pulse Width Modulation of approx. 244Hz; 1μs/step (opt. 122Hz; 2μs/step)
13	NC	-	Must be left unconnected
14	NC	-	Must be left unconnected
15	VDD3V3	S	3V-Regulator Output, internally regulated from VDD5V. Connect to VDD5V for 3V supply voltage. Do not load externally.
16	VDD5V	S	Positive Supply Voltage, 3.0 to 5.5 V

DO_OD	digital output open drain	S	supply pin
DO	digital output	DI	digital input
DI_PD	digital input pull-down	DO_T	digital output /tri-state
DI_PU	digital input pull-up	ST	Schmitt-Trigger input

6 Electrical Characteristics

6.1 AS5045 Differences to AS5040

All parameters are according to AS5040 datasheet except for the parameters shown below:

Building Block	AS5045	AS5040
Resolution	12bits, 0.088°/step.	10bit, 0.35°/step
Data length	Read: 18bits (12bits data + 6 bits status) OTP write: 18 bits (12bits zero position + 6 bits mode selection)	Read: 16bits (10bits data + 6 bits status) OTP write: 16 bits (10bits zero position + 6 bits mode selection)
Incremental encoder	Not used Pin 3: not used Pin 4: not used	Quadrature, step/direction and BLDC motor commutation modes Pin 3: incremental output A_LSB_U Pin 4: incremental output B_DIR_V
Pins 1 and 2	MagINCn, MagDECn: same feature as AS5040, additional OTP option for red-yellow-green magnetic range	MagINCn, MagDECn indicate in-range or out-of-range magnetic field plus movement of magnet in z-axis
Pin 6	MODE pin, switch between fast and slow mode	Pin 6: Index output
Pin 12	PWM output: frequency selectable by OTP: 1μs / step, 4096 steps per revolution, f=244Hz 2μs/ step, 4096 steps per revolution, f=122Hz	PWM output: 1μs / step, 1024 steps per revolution, 976Hz PWM frequency
Sampling frequency	Selectable by MODE input pin: 2.5kHz, 10kHz	Fixed at 10kHz @10bit resolution

Building Block	AS5045	AS5040
Propagation delay	384 μ s (slow mode) 96 μ s (fast mode)	48 μ s
Transition noise (rms; 1sigma)	0.03 degrees max. (slow mode) 0.06 degrees max. (fast mode)	0.12 degrees
OTP programming options	Zero position, rotational direction, PWM disable, 2 Magnetic Field indicator modes, 2 PWM frequencies	Zero position, rotational direction, incremental modes, index bit width

6.2 Absolute Maximum Ratings (non operating)

Stresses beyond those listed under “Absolute Maximum Ratings“ may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only. Functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under “Operating Conditions“ is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

Parameter	Symbol	Min	Max	Unit	Note
DC supply voltage at pin VDD5V	VDD5V	-0.3	7	V	
DC supply voltage at pin VDD3V3	VDD3V3		5	V	
Input pin voltage	V _{in}	-0.3	VDD5V +0.3	V	Except VDD3V3
Input current (latchup immunity)	I _{scr}	-100	100	mA	Norm: JEDEC 78
Electrostatic discharge	ESD		\pm 2	kV	Norm: MIL 883 E method 3015
Storage temperature	T _{strg}	-55	125	°C	Min – 67°F ; Max +257°F
Body temperature (Lead-free package)	T _{Body}		260	°C	t=20 to 40s, Norm: IPC/JEDEC J-Std-020 Lead finish 100% Sn “matte tin”
Humidity non-condensing	H	5	85	%	

6.3 Operating Conditions

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Unit	Note
Ambient temperature	T _{amb}	-40		125	°C	-40°F...+257°F
Supply current	I _{supp}		16	21	mA	
Supply voltage at pin VDD5V Voltage regulator output voltage at pin VDD3V3	VDD5V VDD3V3	4.5 3.0	5.0 3.3	5.5 3.6	V	5V operation
Supply voltage at pin VDD5V Supply voltage at pin VDD3V3	VDD5V VDD3V3	3.0 3.0	3.3 3.3	3.6 3.6	V	3.3V operation (pin VDD5V and VDD3V3 connected)

6.4 DC Characteristics for Digital Inputs and Outputs

6.4.1 CMOS Schmitt-Trigger Inputs: CLK, CSn. (CSn = internal Pull-up)

(operating conditions: $T_{amb} = -40$ to $+125^{\circ}\text{C}$, $V_{DD5V} = 3.0\text{-}3.6\text{V}$ (3V operation) $V_{DD5V} = 4.5\text{-}5.5\text{V}$ (5V operation) unless otherwise noted)

Parameter	Symbol	Min	Max	Unit	Note
High level input voltage	V_{IH}	$0.7 * V_{DD5V}$		V	Normal operation
Low level input voltage	V_{IL}		$0.3 * V_{DD5V}$	V	
Schmitt Trigger hysteresis	$V_{IOn} - V_{IOff}$	1		V	
Input leakage current	I_{LEAK}	-1	1	μA	CLK only
Pull-up low level input current	I_{iL}	-30	-100	μA	CSn only, $V_{DD5V}: 5.0\text{V}$

6.4.2 CMOS / Program Input: Prog

(operating conditions: $T_{amb} = -40$ to $+125^{\circ}\text{C}$, $V_{DD5V} = 3.0\text{-}3.6\text{V}$ (3V operation) $V_{DD5V} = 4.5\text{-}5.5\text{V}$ (5V operation) unless otherwise noted)

Parameter	Symbol	Min	Max	Unit	Note
High level input voltage	V_{IH}	$0.7 * V_{DD5V}$	V_{DD5V}	V	
High level input voltage	V_{PROG}	See <i>Programming Conditions</i>		V	During programming
Low level input voltage	V_{IL}		$0.3 * V_{DD5V}$	V	
High level input current	I_{iL}	30	100	μA	$V_{DD5V}: 5.5\text{V}$

6.4.3 CMOS Output Open Drain: MagINCn, MagDECn

(operating conditions: $T_{amb} = -40$ to $+125^{\circ}\text{C}$, $V_{DD5V} = 3.0\text{-}3.6\text{V}$ (3V operation) $V_{DD5V} = 4.5\text{-}5.5\text{V}$ (5V operation) unless otherwise noted)

Parameter	Symbol	Min	Max	Unit	Note
Low level output voltage	V_{OL}		$V_{SS}+0.4$	V	
Output current	I_O		4 2	mA	$V_{DD5V}: 4.5\text{V}$ $V_{DD5V}: 3\text{V}$
Open drain leakage current	I_{OZ}		1	μA	

6.4.4 CMOS Output: PWM

(operating conditions: $T_{amb} = -40$ to $+125^{\circ}\text{C}$, $V_{DD5V} = 3.0\text{-}3.6\text{V}$ (3V operation) $V_{DD5V} = 4.5\text{-}5.5\text{V}$ (5V operation) unless otherwise noted)

Parameter	Symbol	Min	Max	Unit	Note
High level output voltage	V_{OH}	$V_{DD5V}-0.5$		V	
Low level output voltage	V_{OL}		$V_{SS}+0.4$	V	
Output current	I_O		4 2	mA mA	$V_{DD5V}: 4.5\text{V}$ $V_{DD5V}: 3\text{V}$

6.4.5 Tristate CMOS Output: DO

(operating conditions: $T_{amb} = -40$ to $+125^{\circ}\text{C}$, $V_{DD5V} = 3.0\text{-}3.6\text{V}$ (3V operation) $V_{DD5V} = 4.5\text{-}5.5\text{V}$ (5V operation) unless otherwise noted)

Parameter	Symbol	Min	Max	Unit	Note
High level output voltage	V_{OH}	$V_{DD5V} - 0.5$		V	
Low level output voltage	V_{OL}		$V_{SS} + 0.4$	V	
Output current	I_o		4 2	mA mA	$V_{DD5V}: 4.5\text{V}$ $V_{DD5V}: 3\text{V}$
Tri-state leakage current	I_{OZ}		1	μA	

6.5 Magnetic Input Specification

(operating conditions: $T_{amb} = -40$ to $+125^{\circ}\text{C}$, $V_{DD5V} = 3.0\text{-}3.6\text{V}$ (3V operation) $V_{DD5V} = 4.5\text{-}5.5\text{V}$ (5V operation) unless otherwise noted)

Two-pole cylindrical diametrically magnetised source:

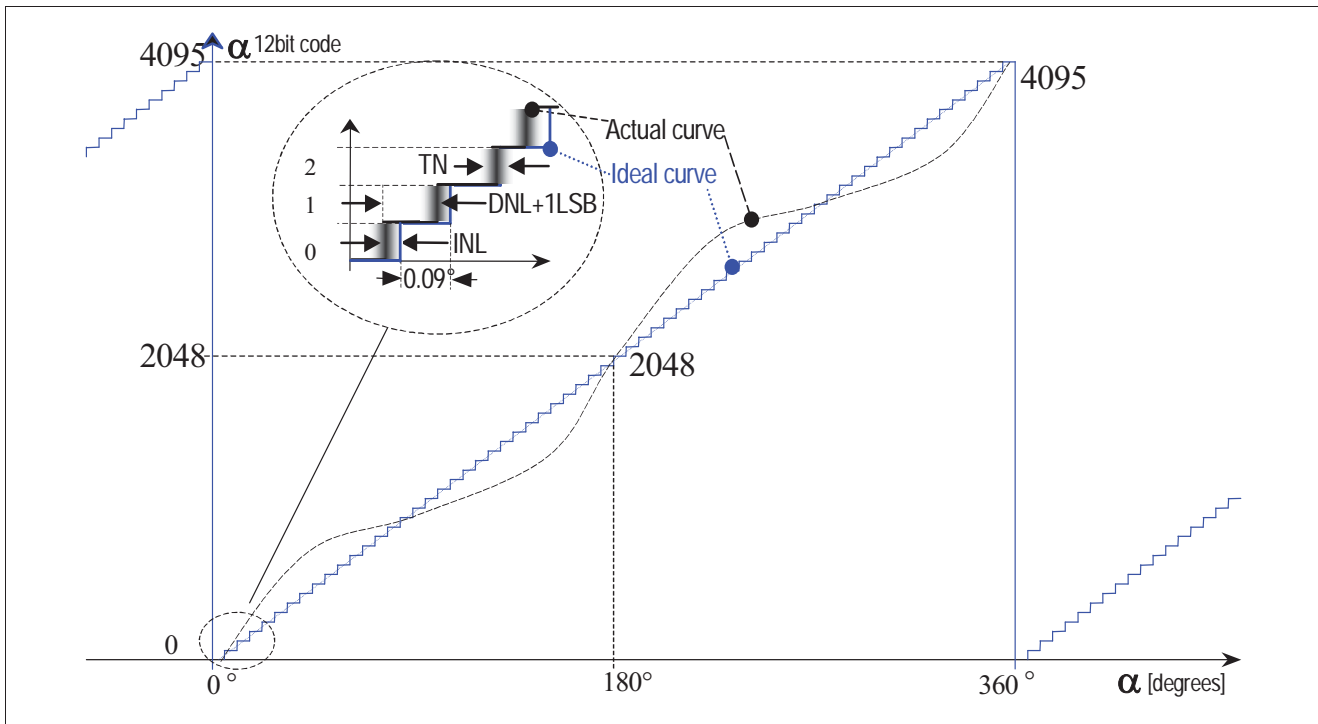
Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Unit	Note
Diameter	d_{mag}	4	6		mm	Recommended magnet: $\varnothing 6\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ for cylindrical magnets
Thickness	t_{mag}	2.5			mm	
Magnetic input field amplitude	B_{pk}	45		75	mT	Required vertical component of the magnetic field strength on the die's surface, measured along a concentric circle with a radius of 1.1mm
Magnetic offset	B_{off}			± 10	mT	Constant magnetic stray field
Field non-linearity				5	%	Including offset gradient
Input frequency (rotational speed of magnet)	f_{mag_abs}			2.44 0.61	Hz	146 rpm @ 4096 positions/rev.; fast mode 36.6rpm @ 4096 positions/rev.; slow mode
Displacement radius	Disp			0.25	mm	Max. offset between defined device center and magnet axis (see <i>Figure 18</i>)
Eccentricity	Ecc			100	μm	Eccentricity of magnet center to rotational axis
Recommended magnet material and temperature drift			-0.12		%K	NdFeB (Neodymium Iron Boron)
			-0.035			SmCo (Samarium Cobalt)

6.6 Electrical System Specifications

(operating conditions: $T_{amb} = -40$ to $+125^{\circ}\text{C}$, $V_{DD5V} = 3.0\text{--}3.6\text{V}$ (3V operation) $V_{DD5V} = 4.5\text{--}5.5\text{V}$ (5V operation) unless otherwise noted)

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Unit	Note
Resolution	RES			12	bit	0.088 deg
Integral non-linearity (optimum)	INL_{opt}			± 0.5	deg	Maximum error with respect to the best line fit. Centered magnet without calibration, $T_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$.
Integral non-linearity (optimum)	INL_{temp}			± 0.9	deg	Maximum error with respect to the best line fit. Centered magnet without calibration, $T_{amb} = -40$ to $+125^{\circ}\text{C}$
Integral non-linearity	INL			± 1.4	deg	Best line fit = $(Err_{max} - Err_{min}) / 2$ Over displacement tolerance with 6mm diameter magnet, without calibration, $T_{amb} = -40$ to $+125^{\circ}\text{C}$
Differential non-linearity	DNL			± 0.044	deg	12bit, no missing codes
Transition noise	TN			0.06	deg RMS	1 sigma, fast mode (MODE = 1)
				0.03		1 sigma, slow mode (MODE=0 or open)
Power-on reset thresholds On voltage; 300mV typ. hysteresis Off voltage; 300mV typ. hysteresis	V_{on} V_{off}	1.37 1.08	2.2 1.9	2.9 2.6	V	DC supply voltage 3.3V (VDD3V3) DC supply voltage 3.3V (VDD3V3)
Power-up time	t_{PwrUp}			20	ms	Fast mode (Mode = 1); until status bit OCF = 1
				80		Slow mode (Mode = 0 or open); until OCF = 1
System propagation delay absolute output : delay of ADC, DSP and absolute interface	t_{delay}			96	μs	Fast mode (MODE=1)
				384		Slow mode (MODE=0 or open)
Internal sampling rate for absolute output:	f_s	2.48	2.61	2.74	kHz	$T_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$, slow mode (MODE=0 or open)
		2.35	2.61	2.87		$T_{amb} = -40$ to $+125^{\circ}\text{C}$, slow mode (MODE=0 or open)
Internal sampling rate for absolute output	f_s	9.90	10.42	10.94	kHz	$T_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$, fast mode (MODE = 1)
		9.38	10.42	11.46		$T_{amb} = -40$ to $+125^{\circ}\text{C}$, : fast mode (MODE = 1)
Read-out frequency	CLK			1	MHz	Max. clock frequency to read out serial data

Figure 3. Integral and Differential Non-linearity (example)



Integral Non-Linearity (INL) is the maximum deviation between actual position and indicated position.

Differential Non-Linearity (DNL) is the maximum deviation of the step length from one position to the next.

Transition Noise (TN) is the repeatability of an indicated position

6.7 Timing Characteristics

6.7.1 Synchronous Serial Interface (SSI)

(operating conditions: $T_{amb} = -40$ to $+125^{\circ}\text{C}$, $V_{DD5V} = 3.0\text{--}3.6\text{V}$ (3V operation) $V_{DD5V} = 4.5\text{--}5.5\text{V}$ (5V operation) unless otherwise noted)

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Unit	Note
Data output activated (logic high)	$t_{DO\ active}$			100	ns	Time between falling edge of CSn and data output activated
First data shifted to output register	$t_{CLK\ FE}$	500			ns	Time between falling edge of CSn and first falling edge of CLK
Start of data output	$T_{CLK/2}$	500			ns	Rising edge of CLK shifts out one bit at a time
Data output valid	$t_{DO\ valid}$	357	375	394	ns	Time between rising edge of CLK and data output valid
Data output tristate	$t_{DO\ tristate}$			100	ns	After the last bit DO changes back to "tristate"
Pulse width of CSn	t_{CSn}	500			ns	CSn = high; To initiate read-out of next angular position
Read-out frequency	f_{CLK}	>0		1	MHz	Clock frequency to read out serial data

6.7.2 Pulse Width Modulation Output

(operating conditions: $T_{amb} = -40$ to $+125^{\circ}\text{C}$, $V_{DD5V} = 3.0\text{--}3.6\text{V}$ (3V operation) $V_{DD5V} = 4.5\text{--}5.5\text{V}$ (5V operation) unless otherwise noted)

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Unit	Note
PWM frequency	f_{PWM}	232	244	256	Hz	Signal period = $4097\mu\text{s} \pm 5\%$ at $T_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$
		220	244	268		= $4097\mu\text{s} \pm 10\%$ at $T_{amb} = -40$ to $+125^{\circ}\text{C}$
Minimum pulse width	PW_{MIN}	0.95	1	1.05	μs	Position 0d; Angle 0°
Maximum pulse width	PW_{MAX}	3891	4096	4301	μs	Position 4095d; Angle 359.91°

Note: when OTP bit "PWMhalfEn" is set, the PWM pulse width PW is doubled (PWM frequency f_{PWM} is divided by 2)

6.8 Programming Conditions

(operating conditions: $T_{amb} = -40$ to $+125^{\circ}\text{C}$, $V_{DD5V} = 3.0\text{--}3.6\text{V}$ (3V operation) $V_{DD5V} = 4.5\text{--}5.5\text{V}$ (5V operation) unless otherwise noted)

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Unit	Note
Programming enable time	$t_{\text{Prog enable}}$	2			μs	Time between rising edge at Prog pin and rising edge of CSn
Write data start	$t_{\text{Data in}}$	2			μs	
Write data valid	$t_{\text{Data in valid}}$	250			ns	Write data at the rising edge of CLK_{PROG}
Load programming data	$t_{\text{Load PROG}}$	3			μs	
Rise time of V_{PROG} before CLK_{PROG}	t_{PrgR}	0			μs	
Hold time of V_{PROG} after CLK_{PROG}	t_{PrgH}	0		5	μs	
Write data – programming CLK_{PROG}	CLK_{PROG}			250	kHz	Ensure that V_{PROG} is stable with rising edge of CLK
CLK pulse width	t_{PROG}	1.8	2	2.2	μs	During programming; 16 clock cycles
Hold time of V_{prog} after programming	$t_{\text{PROG finished}}$	2			μs	Programmed data is available after next power-on
Programming voltage, pin PROG	V_{PROG}	7.3	7.4	7.5	V	Must be switched off after zapping
Programming voltage off level	V_{ProgOff}	0		1	V	Line must be discharged to this level
Programming current	I_{PROG}			130	mA	During programming
Analog read CLK	$\text{CLK}_{\text{Aread}}$			100	kHz	Analog Readback mode
Programmed Zener voltage (log.1)	$V_{\text{programmed}}$			100	mV	$V_{\text{Ref}} - V_{\text{PROG}}$ during Analog Readback mode (see 11.4)
Unprogrammed Zener voltage (log. 0)	$V_{\text{unprogrammed}}$	1			V	

7 Functional Description

The AS5045 is manufactured in a CMOS standard process and uses a spinning current Hall technology for sensing the magnetic field distribution across the surface of the chip.

The integrated Hall elements are placed around the center of the device and deliver a voltage representation of the magnetic field at the surface of the IC.

Through Sigma-Delta Analog / Digital Conversion and Digital Signal-Processing (DSP) algorithms, the AS5045 provides accurate high-resolution absolute angular position information. For this purpose a Coordinate Rotation Digital Computer (CORDIC) calculates the angle and the magnitude of the Hall array signals.

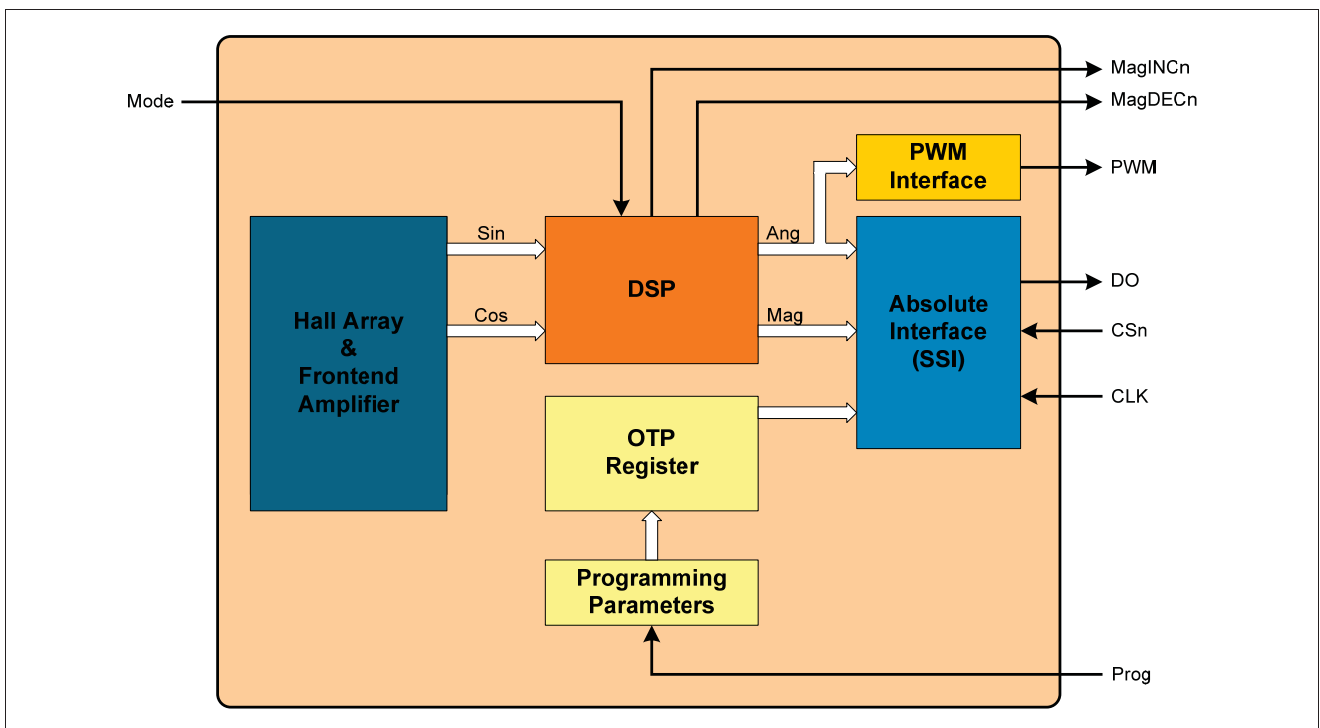
The DSP is also used to provide digital information at the outputs MagINCn and MagDECn that indicate movements of the used magnet towards or away from the device's surface.

A small low cost diametrically magnetized (two-pole) standard magnet provides the angular position information (see Figure 17).

The AS5045 senses the orientation of the magnetic field and calculates a 12-bit binary code. This code can be accessed via a Synchronous Serial Interface (SSI). In addition, an absolute angular representation is given by a Pulse Width Modulated signal at pin 12 (PWM). This PWM signal output also allows the generation of a direct proportional analogue voltage, by using an external Low-Pass-Filter.

The AS5045 is tolerant to magnet misalignment and magnetic stray fields due to differential measurement technique and Hall sensor conditioning circuitry.

Figure 4. AS5045 Block Diagram



8 Mode Input Pin

The mode input pin activates or deactivates an internal filter that is used to reduce the analog output noise.

Activating the filter (Mode pin = LOW) provides a reduced output noise of 0.03° rms. At the same time, the output delay is increased to $384\mu\text{s}$. This mode is recommended for high precision, low speed applications.

Deactivating the filter (Mode pin = HIGH) reduces the output delay to $96\mu\text{s}$ and provides an output noise of 0.06° rms. This mode is recommended for higher speed applications.

The MODE pin should be set at power-up. A change of the mode during operation is not allowed.

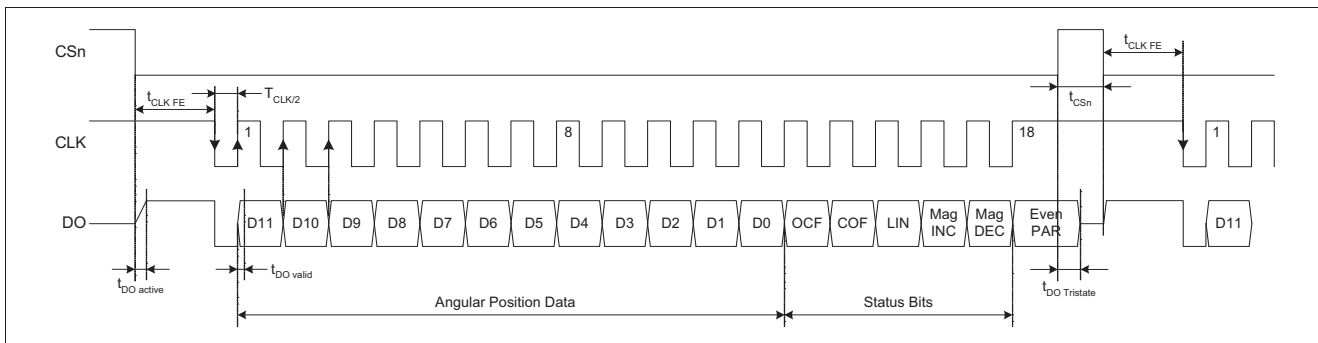
Switching the Mode pin affects the following parameters:

Table 2. Slow and Fast Mode Parameters 12-bit Absolute Angular Position Output

Parameter	Slow Mode (Mode = low)	Fast Mode (Mode = high, VDD5V)
Sampling rate	2.61 kHz (384 μs)	10.42 kHz (96 μs)
Transition noise (1 sigma)	$\leq 0.03^\circ$ rms	$\leq 0.06^\circ$ rms
Output delay	384 μs	96 μs
Max. speed @ 4096 samples/rev.	38 rpm	153 rpm
Max. speed @ 1024 samples/rev.	153 rpm	610 rpm
Max. speed @ 256 samples/rev.	610 rpm	2441 rpm
Max. speed @ 64 samples/rev.	2441 rpm	9766 rpm

8.1 Synchronous Serial Interface (SSI)

Figure 5. Synchronous Serial Interface with Absolute Angular Position Data



If CSn changes to logic low, Data Out (DO) will change from high impedance (tri-state) to logic high and the read-out will be initiated.

- After a minimum time $t_{\text{CLK FE}}$, data is latched into the output shift register with the first falling edge of CLK.
- Each subsequent rising CLK edge shifts out one bit of data.
- The serial word contains 18 bits, the first 12 bits are the angular information D[11:0], the subsequent 6 bits contain system information, about the validity of data such as OCF, COF, LIN, Parity and Magnetic Field status (increase/decrease).
- A subsequent measurement is initiated by a “high” pulse at CSn with a minimum duration of t_{CSn} .

8.1.1 Data Content

D11:D0 absolute angular position data (MSB is clocked out first)

OCF (Offset Compensation Finished), logic high indicates the finished Offset Compensation Algorithm

COF (Cordic Overflow), logic high indicates an out of range error in the CORDIC part. When this bit is set, the data at D9:D0 is invalid. The absolute output maintains the last valid angular value.

This alarm may be resolved by bringing the magnet within the X-Y-Z tolerance limits.

LIN (Linearity Alarm), logic high indicates that the input field generates a critical output linearity. When this bit is set, the data at D9:D0 may still be used, but can contain invalid data. This warning may be resolved by bringing the magnet within the X-Y-Z tolerance limits.

Even Parity bit for transmission error detection of bits 1...17 (D11...D0, OCF, COF, LIN, MagINC, MagDEC)

Placing the magnet above the chip, angular values increase in clockwise direction by default.

Data D11:D0 is valid, when the status bits have the following configurations:

Table 3. Status Bit Outputs

OCF	COF	LIN	Mag INC	Mag DEC	Parity
1	0	0	0	0	Even checksum of bits 1:15
			0	1	
			1	0	
			1*)	1*)	

*) MagInc=MagDec=1 is only recommended in YELLOW mode (see Table 5)

8.1.2 Z-axis Range Indication (Push Button Feature, Red/Yellow/Green Indicator)

The AS5045 provides several options of detecting movement and distance of the magnet in the Z-direction. Signal indicators MagINCn and MagDECn are available both as hardware pins (pins 1 and 2) and as status bits in the serial data stream (see Figure 5). Additionally, an OTP programming option is available with bit MagCompEn (see Figure 10) that enables additional features:

In the default state, the status bits MagINC, MagDec and pins MagINCn, MagDECn have the following function:

Table 4. Magnetic Field Strength Variation Indicator

Status Bits		Hardware Pins		OTP: Mag CompEn = 0 (default)
Mag INC	Mag DEC	Mag INCn	Mag DECn	Description
0	0	Off	Off	No distance change Magnetic input field OK (in range, ~45...75mT)
0	1	Off	On	Distance increase; pull-function. This state is dynamic and only active while the magnet is moving away from the chip.
1	0	On	Off	Distance decrease; push- function. This state is dynamic and only active while the magnet is moving towards the chip.
1	1	On	On	Magnetic field is <~45mT or >~75mT. It is still possible to operate the AS5045 in this range, but not recommended

When bit MagCompEn is programmed in the OTP, the function of status bits MagINC, MagDec and pins MagINCn, MagDECn is changed to the following function:

Table 5. Magnetic Field Strength Red-yellow-green Indicator (OTP option)

Status Bits			Hardware Pins		OTP: Mag CompEn = 1 (red-yellow-green programming option)
Mag INC	Mag DEC	LIN	Mag INCn	Mag DECn	Description
0	0	0	Off	Off	No distance change Magnetic input field OK (GREEN range, ~45...75mT)
1	1	0	On	Off	YELLOW range: magnetic field is ~ 25...45mT or ~75...135mT. The AS5045 may still be operated in this range, but with slightly reduced accuracy.
1	1	1	On	On	RED range: magnetic field is ~<25mT or ~>135mT. It is still possible to operate the AS5045 in the red range, but not recommended.
All other combinations			n/a	n/a	Not available

Note: Pin 1 (MagINCn) and pin 2 (MagDECn) are active low via open drain output and require an external pull-up resistor. If the magnetic field is in range, both outputs are turned off.

The two pins may also be combined with a single pull-up resistor. In this case, the signal is high when the magnetic field is in range. It is low in all other cases (see Table 4 and Table 5).

8.2 Daisy Chain Mode

The Daisy Chain mode allows connection of several AS5045's in series, while still keeping just one digital input for data transfer (see "Data IN" in Figure 6 below). This mode is accomplished by connecting the data output (DO; pin 9) to the data input (PROG; pin 8) of the subsequent device. An RC filter must be implemented between each PROG pin of device n and DO pin of device n+1, to prevent then encoders to enter the alignment mode, in case of ESD discharge, long cables, not conform signal levels or shape. Using the values R=100R and C=1nF allow a max. CLK frequency of 1MHz on the whole chain. The serial data of all connected devices is read from the DO pin of the first device in the chain. The length of the serial bit stream increases with every connected device, it is

$n * (18+1)$ bits:

e.g. 38 bit for two devices, 57 bit for three devices, etc...

The last data bit of the first device (Parity) is followed by a dummy bit and the first data bit of the second device (D11), etc... (see Figure 7)

Figure 6. Daisy Chain Hardware Configuration

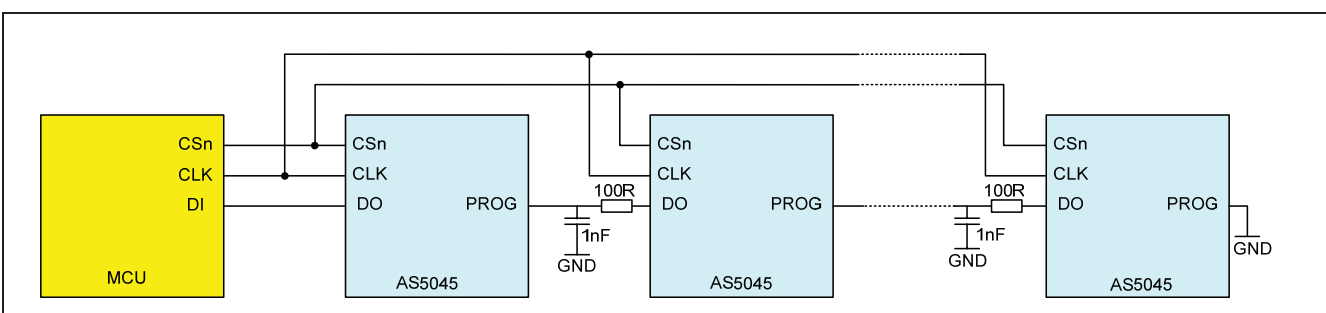
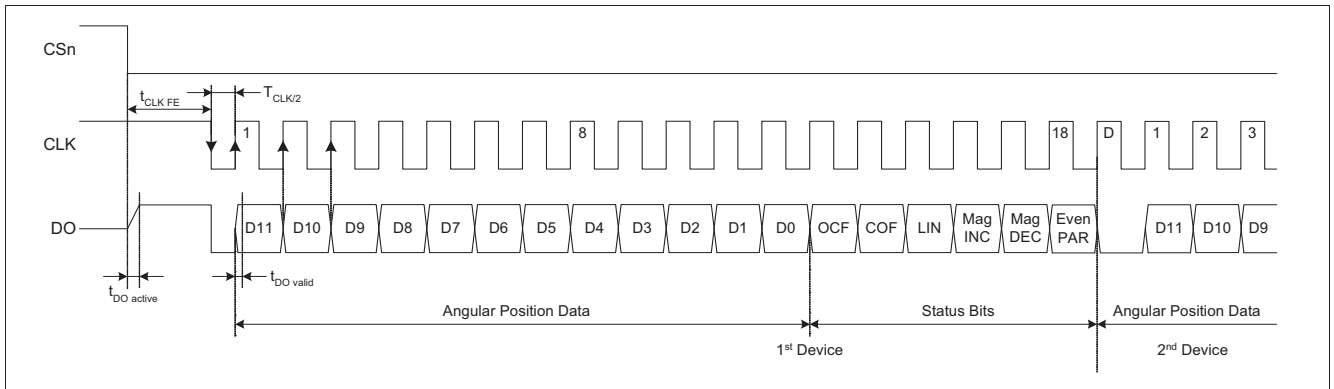


Figure 7. Daisy Chain Mode Data Transfer



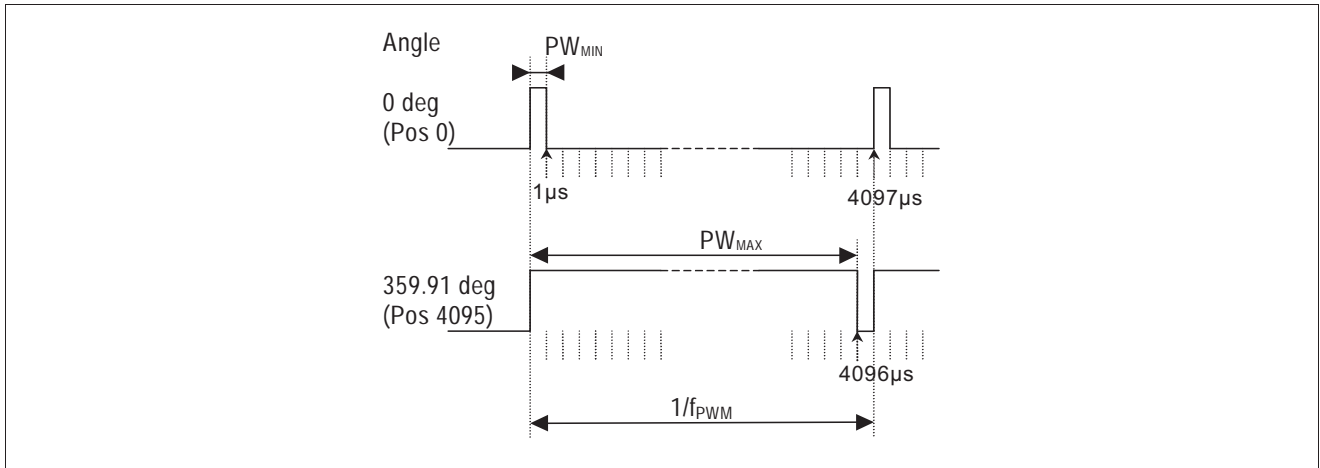
9 Pulse Width Modulation (PWM) Output

The AS5045 provides a pulse width modulated output (PWM), whose duty cycle is proportional to the measured angle:

$$Position = \frac{t_{on} \cdot 4097}{(t_{on} + t_{off})} - 1$$

The PWM frequency is internally trimmed to an accuracy of $\pm 5\%$ ($\pm 10\%$ over full temperature range). This tolerance can be cancelled by measuring the complete duty cycle as shown above.

Figure 8. PWM Output Signal



9.1 Changing the PWM Frequency

The PWM frequency of the AS5045 can be divided by two by setting a bit (PWMhalfEN) in the OTP register (see chapter 11). With PWMhalfEN = 0 the PWM timing is as shown in Table 6:

Table 6. PWM Signal Parameters (default mode)

Parameter	Symbol	Typ	Unit	Note
PWM frequency	f_{PWM}	244	Hz	Signal period: 4097 μ s
MIN pulse width	PW_{MIN}	1	μ s	- Position 0d - Angle 0 deg
MAX pulse width	PW_{MAX}	4096	μ s	- Position 4095d - Angle 359.91 deg

When PWMhalfEN = 1, the PWM timing is as shown in Table 7:

Table 7. PWM Signal Parameters with Half Frequency (OTP option)

Parameter	Symbol	Typ	Unit	Note
PWM frequency	f_{PWM}	122	Hz	Signal period: 8194 μ s
MIN pulse width	PW_{MIN}	2	μ s	- Position 0d - Angle 0 deg
MAX pulse width	PW_{MAX}	8192	μ s	- Position 4095d - Angle 359.91 deg

10 Analog Output

An analog output can be generated by averaging the PWM signal, using an external active or passive low pass filter. The analog output voltage is proportional to the angle: 0° = 0V; 360° = VDD5V.

Using this method, the AS5045 can be used as direct replacement of potentiometers.

Figure 9. Simple 2nd Order Passive RC Low Pass Filter

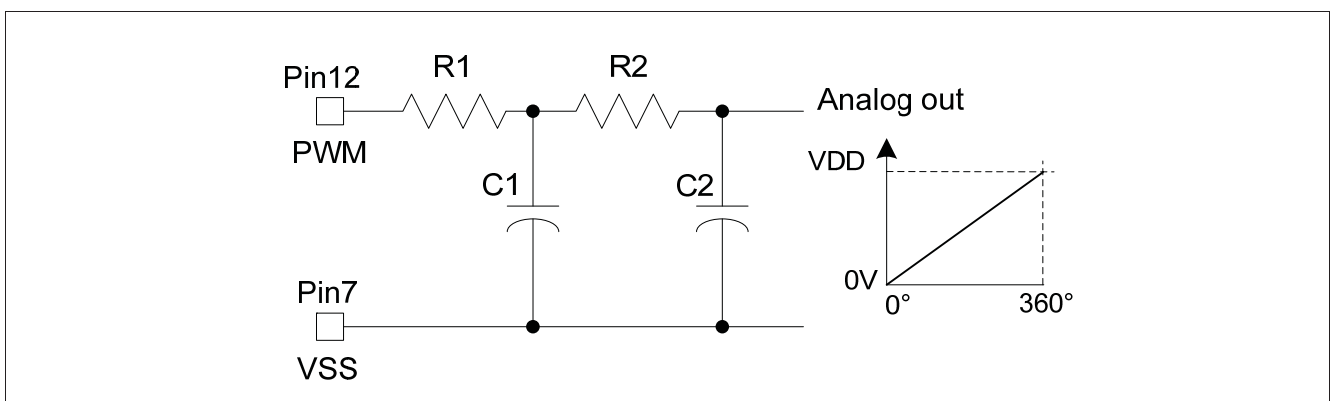


Figure 9 shows an example of a simple passive low pass filter to generate the analog output.

$$R1, R2 \geq 4k7 \quad C1, C2 \geq 1\mu\text{F} / 6V$$

R1 should be $\geq 4k7$ to avoid loading of the PWM output. Larger values of R_x and C_x will provide better filtering and less ripple, but will also slow down the response time.

11 Programming the AS5045

After power-on, programming the AS5045 is enabled with the rising edge of CSn and Prog = logic high. 16 bit configuration data must be serially shifted into the OTP register via the Prog pin. The first “CCW” bit is followed by the zero position data (MSB first) and the Mode setting bits. Data must be valid at the rising edge of CLK (see *Figure 10*).

After writing the data into the OTP register it can be permanently programmed by rising the Prog pin to the programming voltage V_{PROG} . 16 CLK pulses (t_{PROG}) must be applied to program the fuses (*Figure 11*). To exit the programming mode, the chip must be reset by a power-on-reset. The programmed data is available after the next power-up.

Note: During the programming process, the transitions in the programming current may cause high voltage spikes generated by the inductance of the connection cable. To avoid these spikes and possible damage to the IC, the connection wires, especially the signals Prog and VSS must be kept as short as possible. The maximum wire length between the V_{PROG} switching transistor and pin Prog should not exceed 50mm (2 inches). To suppress eventual voltage spikes, a 10nF ceramic capacitor should be connected close to pins VPROG and VSS. This capacitor is only required for programming, it is not required for normal operation. The clock timing t_{clk} must be selected at a proper rate to ensure that the signal Prog is stable at the rising edge of CLK (see *Figure 10*). Additionally, the programming supply voltage should be buffered with a 10 μ F capacitor mounted close to the switching transistor. This capacitor aids in providing peak currents during programming. The specified programming voltage at pin Prog is 7.3 ~ 7.5V (see section 6.8).

To compensate for the voltage drop across the V_{PROG} switching transistor, the applied programming voltage may be set slightly higher (7.5 ~ 8.0V, see *Figure 12*).

OTP Register Contents:

CCW	Counter Clockwise Bit ccw=0 – angular value increases in clockwise direction ccw=1 – angular value increases in counter clockwise direction
Z [11:0]:	Programmable Zero Position
PWM dis:	Disable PWM output
MagCompEn:	When set, activates LIN alarm both when magnetic field is too high and too low (see <i>Table 5</i>)
PWMhalfEn:	When set, PWM frequency is 122Hz or 2 μ s / step (when PWMhalfEN = 0, PWM frequency is 244Hz, 1 μ s / step)

11.1 Zero Position Programming

Zero position programming is an OTP option that simplifies assembly of a system, as the magnet does not need to be manually adjusted to the mechanical zero position. Once the assembly is completed, the mechanical and electrical zero positions can be matched by software. Any position within a full turn can be defined as the permanent new zero position.

For zero position programming, the magnet is turned to the mechanical zero position (e.g. the “off”-position of a rotary switch) and the actual angular value is read.

This value is written into the OTP register bits Z11:Z0 (see *Figure 10*) and programmed (see *Figure 11*).

Note: The zero position value may also be modified before programming, e.g. to program an electrical zero position that is 180° (half turn) from the mechanical zero position, just add 2048 to the value read at the mechanical zero position and program the new value into the OTP register.

11.2 Repeated OTP Programming

Although a single AS5045 OTP register bit can be programmed only once (from 0 to 1), it is possible to program other, unprogrammed bits in subsequent programming cycles. However, a bit that has already been programmed should not be programmed twice. Therefore it is recommended that bits that are already programmed are set to “0” during a programming cycle.

11.3 Non-permanent Programming

It is also possible to re-configure the AS5045 in a non-permanent way by overwriting the OTP register.

This procedure is essentially a “Write Data” sequence (see *Figure 10*) without a subsequent OTP programming cycle.

The “Write Data” sequence may be applied at any time during normal operation. This configuration remains set while the power supply voltage is above the power-on reset level (see 6.6).

See Application Note AN5000-20 for further information.

Figure 10. Programming Access – Write Data (section of Figure 11)

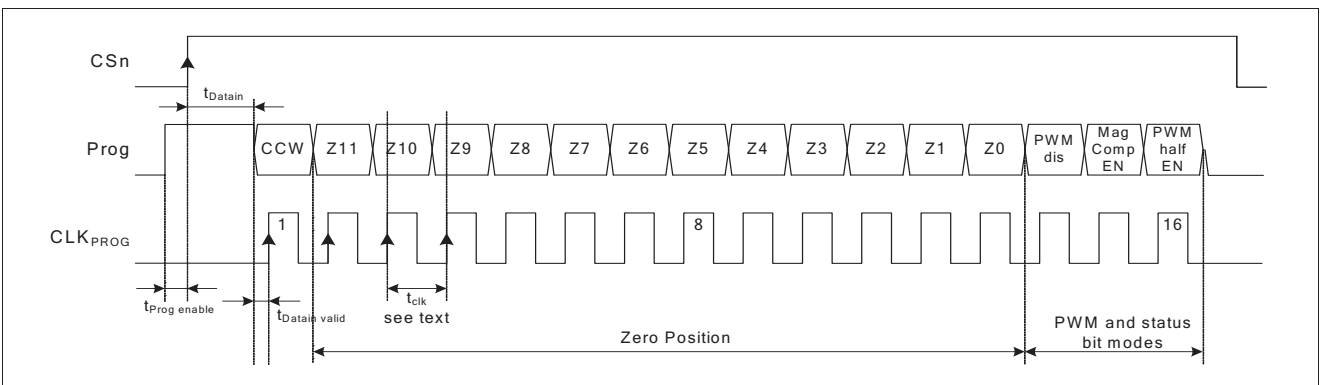


Figure 11. Complete Programming Sequence

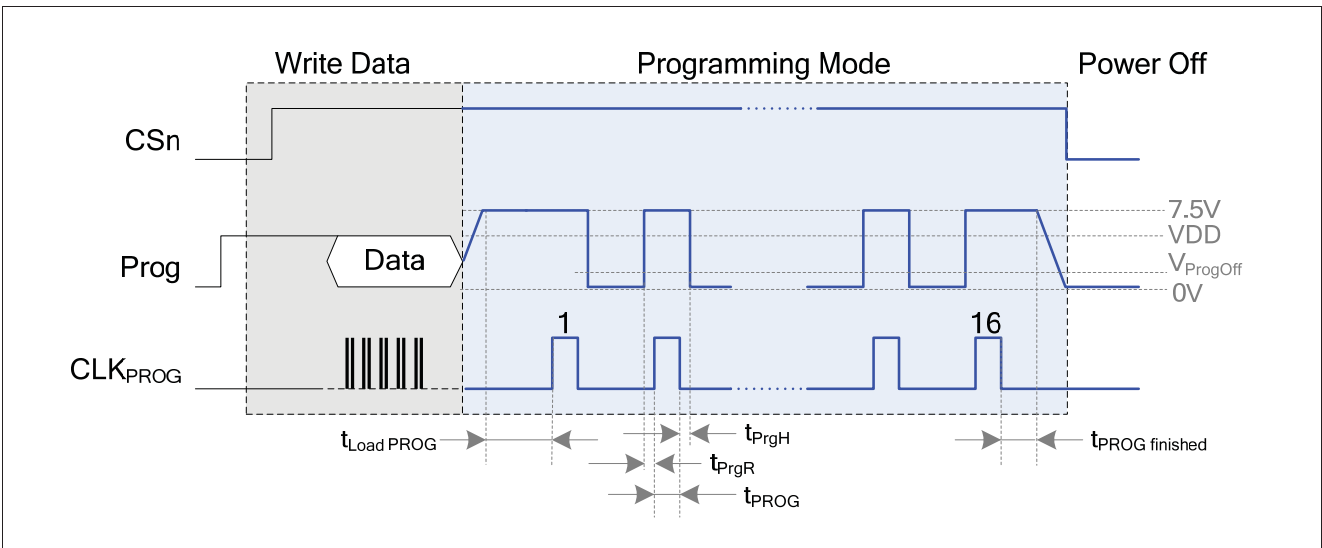
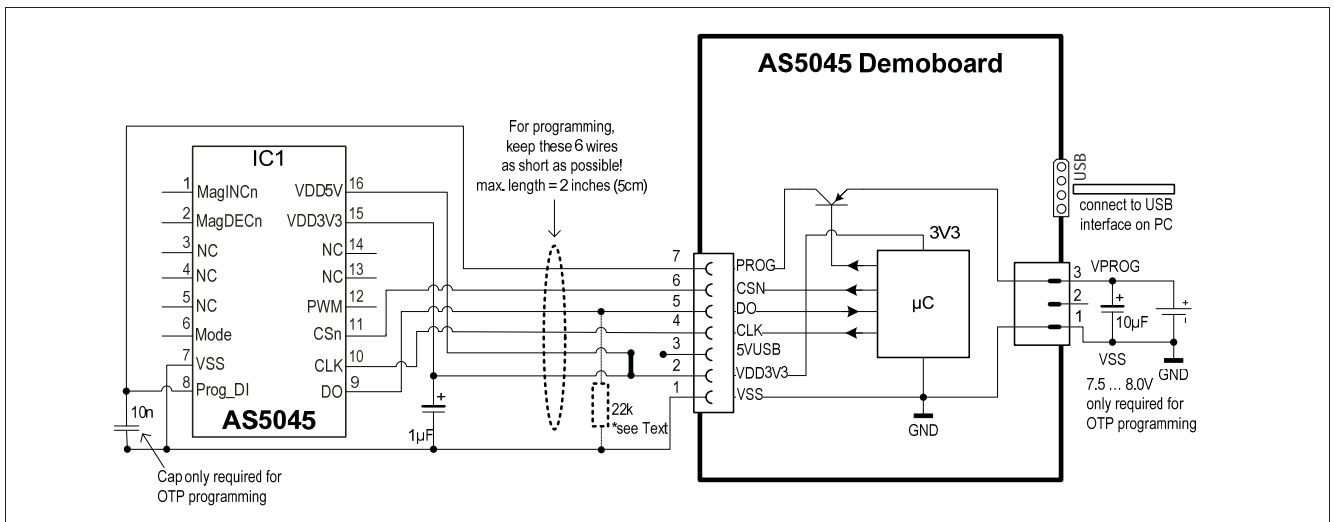


Figure 12. OTP Programming Connection of AS5045 (shown with AS5045 demoboard)



11.4 Analog Readback Mode

Non-volatile programming (OTP) uses on-chip zener diodes, which become permanently low resistive when subjected to a specified reverse current.

The quality of the programming process depends on the amount of current that is applied during the programming process (up to 130mA). This current must be provided by an external voltage source. If this voltage source cannot provide adequate power, the zener diodes may not be programmed properly.

In order to verify the quality of the programmed bit, an analog level can be read for each zener diode, giving an indication whether this particular bit was properly programmed or not.

To put the AS5045 in Analog Readback Mode, a digital sequence must be applied to pins CSn, PROG and CLK as shown in Figure 13. The digital level for this pin depends on the supply configuration (3.3V or 5V; see section 13 3V / 5V Operation).

The second rising edge on CSn (OutpEN) changes pin PROG to a digital output and the log. high signal at pin PROG must be removed to avoid collision of outputs (grey area in Figure 13).

The following falling slope of CSn changes pin PROG to an analog output, providing a reference voltage V_{ref} , that must be saved as a reference for the calculation of the subsequent programmed and unprogrammed OTP bits. Following this step, each rising slope of CLK outputs one bit of data in the reverse order as during programming (see Figure 10: Md0-MD1-Div0, Div1-Indx-Z0...Z11, ccw).

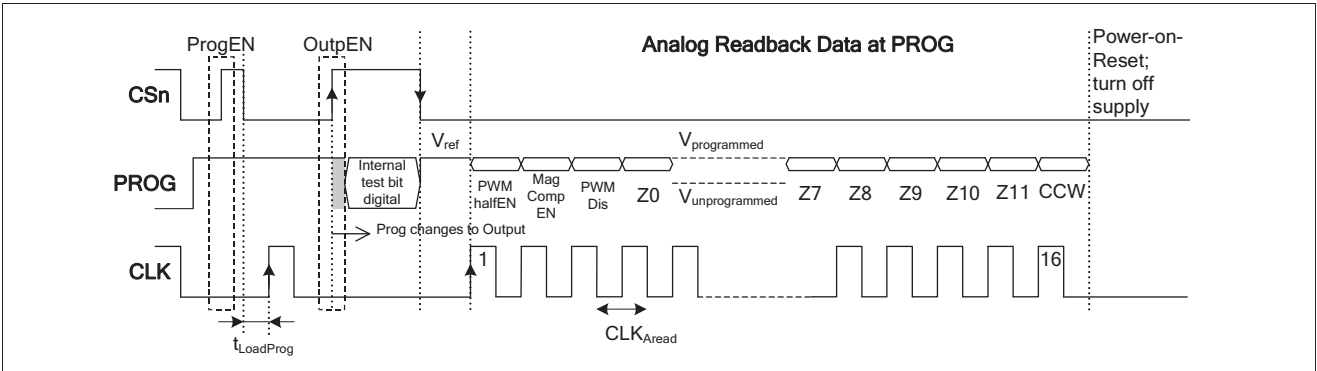
If a capacitor is connected to pin PROG, it should be removed during analog readback mode to allow a fast readout rate. If the capacitor is not removed the analog voltage will take longer to stabilize due to the additional capacitance.

The measured analog voltage for each bit must be subtracted from the previously measured V_{ref} , and the resulting value gives an indication on the quality of the programmed bit: a reading of <100mV indicates a properly programmed bit and a reading of >1V indicates a properly unprogrammed bit.

A reading between 100mV and 1V indicates a faulty bit, which may result in an undefined digital value, when the OTP is read at power-up.

Following the 18th clock (after reading bit "ccw"), the chip must be reset by disconnecting the power supply.

Figure 13. OTP Register Analog Read



12 Alignment Mode

The alignment mode simplifies centering the magnet over the center of the chip to gain maximum accuracy.

Alignment mode can be enabled with the falling edge of CSn while Prog = logic high (Figure 14). The Data bits D11-D0 of the SSI change to a 12-bit displacement amplitude output. A high value indicates large X or Y displacement, but also higher absolute magnetic field strength. The magnet is properly aligned, when the difference between highest and lowest value over one full turn is at a minimum.

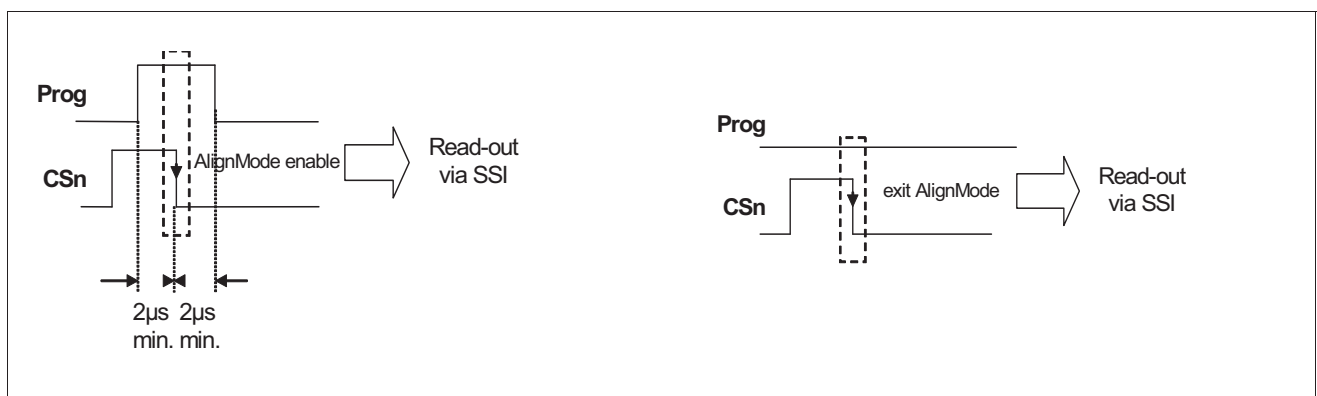
Under normal conditions, a properly aligned magnet will result in a reading of less than 128 over a full turn. The MagINCn and MagDECn indicators will be = 1 when the alignment mode reading is < 128. At the same time, both hardware pins MagINCn (#1) and MagDECn (#2) will be pulled to VSS. A properly aligned magnet will therefore produce a MagINCn = MagDECn = 1 signal throughout a full 360° turn of the magnet.

Stronger magnets or short gaps between magnet and IC may show values larger than 128. These magnets are still properly aligned as long as the difference between highest and lowest value over one full turn is at a minimum.

The alignment mode can be reset to normal operation by a power-on-reset (disconnect / re-connect power supply) or by a falling edge on CSn with Prog = low.

Figure 14. Enabling the Alignment Mode

Figure 15. Exiting Alignment Mode



13 3.3V / 5V Operation

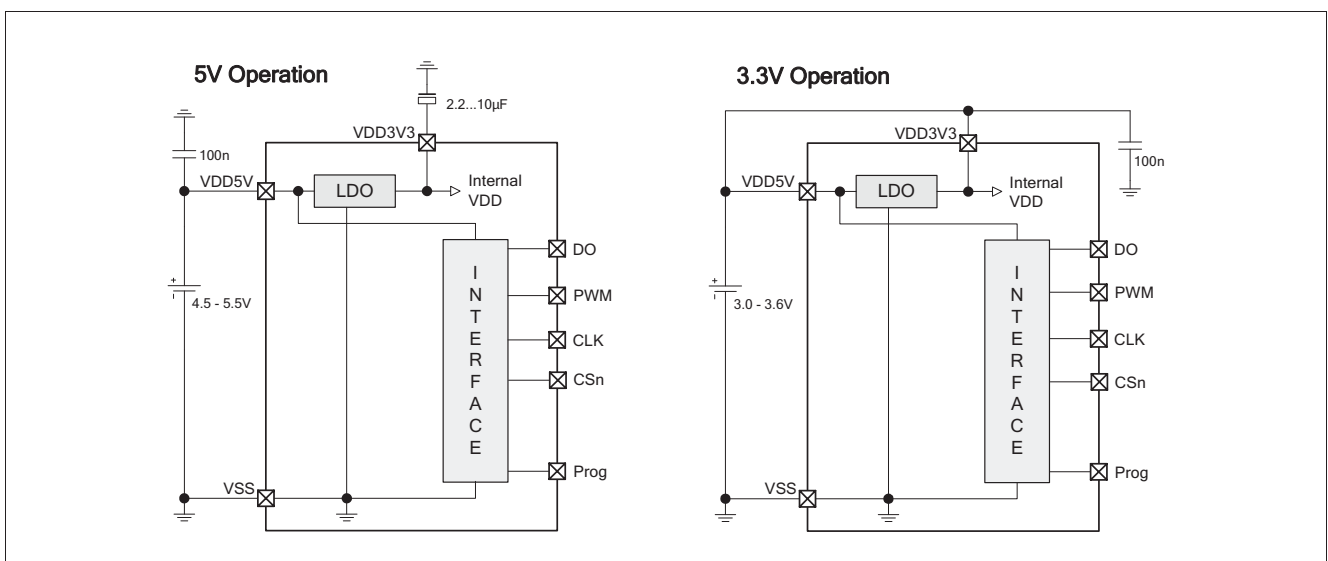
The AS5045 operates either at 3.3V \pm 10% or at 5V \pm 10%. This is made possible by an internal 3.3V Low-Dropout (LDO) Voltage regulator. The internal supply voltage is always taken from the output of the LDO, meaning that the internal blocks are always operating at 3.3V.

For 3.3V operation, the LDO must be bypassed by connecting VDD3V3 with VDD5V (see *Figure 16*).

For 5V operation, the 5V supply is connected to pin VDD5V, while VDD3V3 (LDO output) must be buffered by a 2.2...10 μ F capacitor, which is supposed to be placed close to the supply pin (see *Figure 16*).

The VDD3V3 output is intended for internal use only. It must not be loaded with an external load (see *Figure 16*).

Figure 16. Connections for 5V / 3.3V Supply Voltages



A buffer capacitor of 100nF is recommended in both cases close to pin VDD5V. Note that pin VDD3V3 must always be buffered by a capacitor. It must not be left floating, as this may cause an instable internal 3.3V supply voltage which may lead to larger than normal jitter of the measured angle.

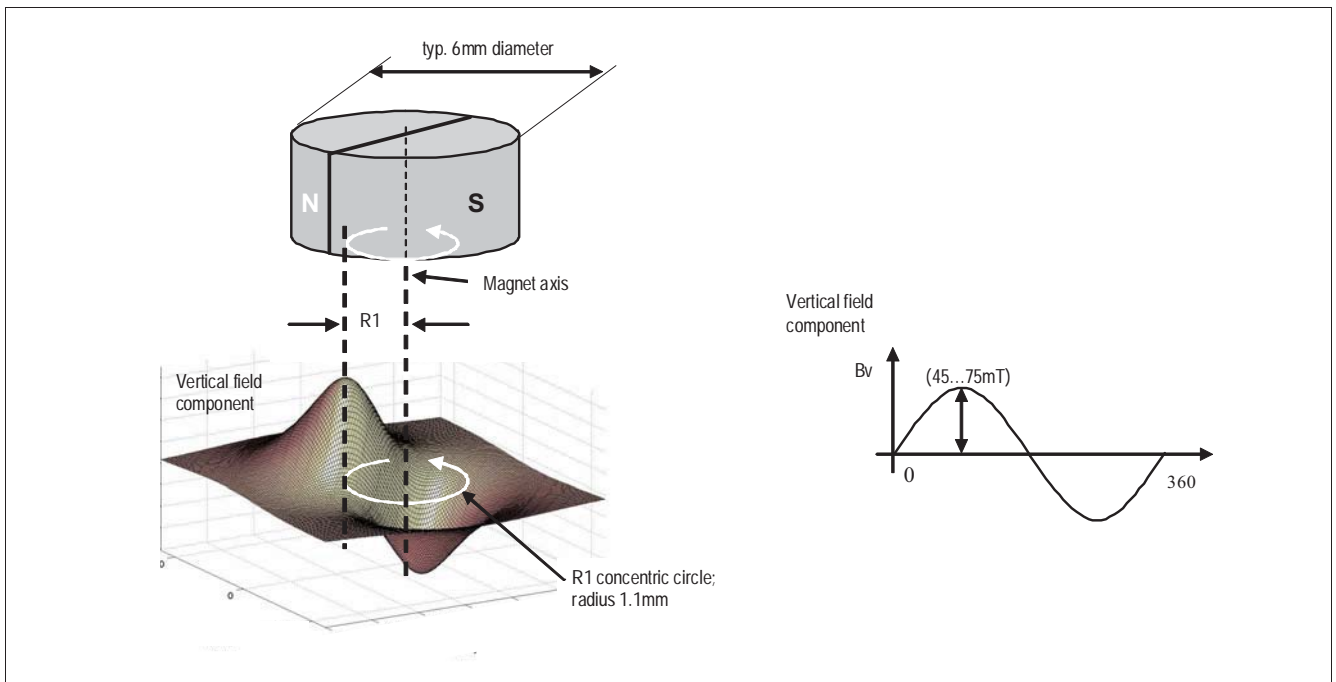
14 Choosing the Proper Magnet

Typically the magnet should be 6mm in diameter and $\geq 2.5\text{mm}$ in height. Magnetic materials such as rare earth AlNiCo/SmCo5 or NdFeB are recommended.

The magnetic field strength perpendicular to the die surface has to be in the range of $\pm 45\text{mT} \dots \pm 75\text{mT}$ (peak).

The magnet's field strength should be verified using a gauss-meter. The magnetic field B_v at a given distance, along a concentric circle with a radius of 1.1mm (R1), should be in the range of $\pm 45\text{mT} \dots \pm 75\text{mT}$ (see Figure 17).

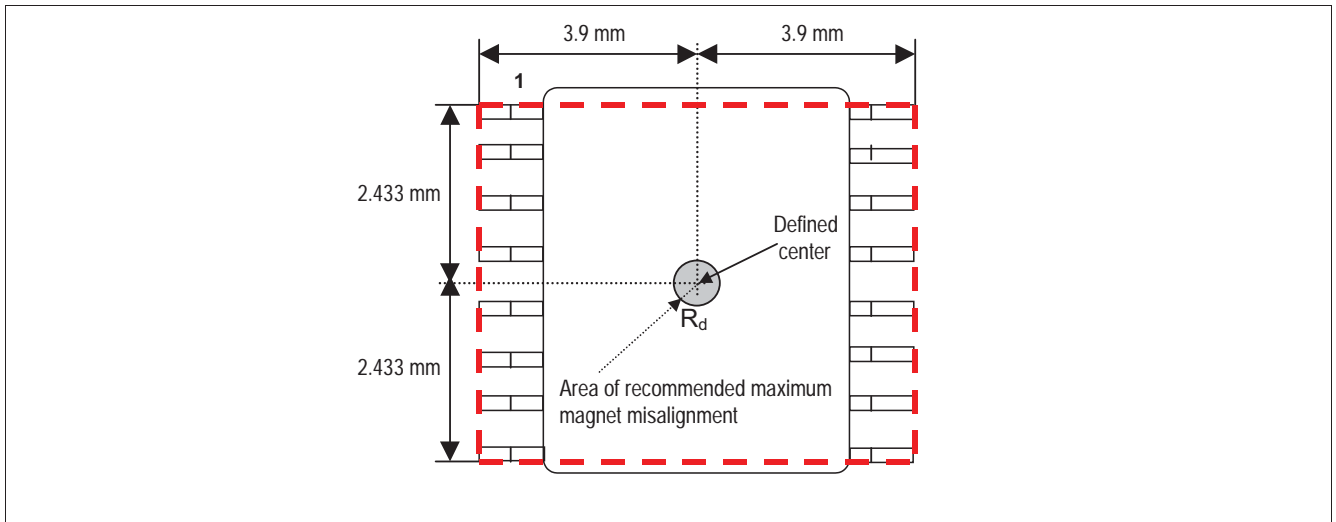
Figure 17. Typical Magnet (6x3mm) and Magnetic Field Distribution



14.1 Physical Placement of the Magnet

The best linearity can be achieved by placing the center of the magnet exactly over the defined center of the chip as shown in the drawing below:

Figure 18. Defined Chip Center and Magnet Displacement Radius



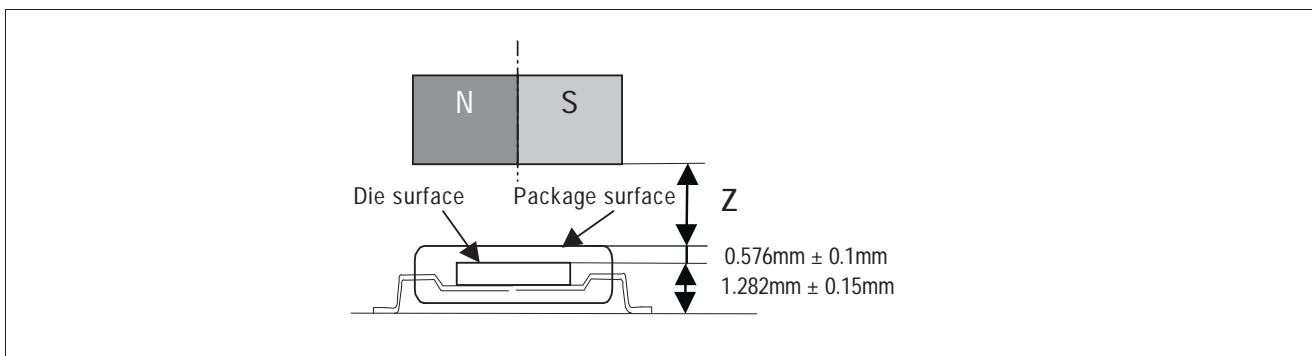
Magnet Placement

The magnet's center axis should be aligned within a displacement radius R_d of 0.25mm from the defined center of the IC.

The magnet may be placed below or above the device. The distance should be chosen such that the magnetic field on the die surface is within the specified limits (see Figure 17). The typical distance "z" between the magnet and the package surface is 0.5mm to 1.5mm, provided the use of the recommended magnet material and dimensions (6mm x 3mm). Larger distances are possible, as long as the required magnetic field strength stays within the defined limits.

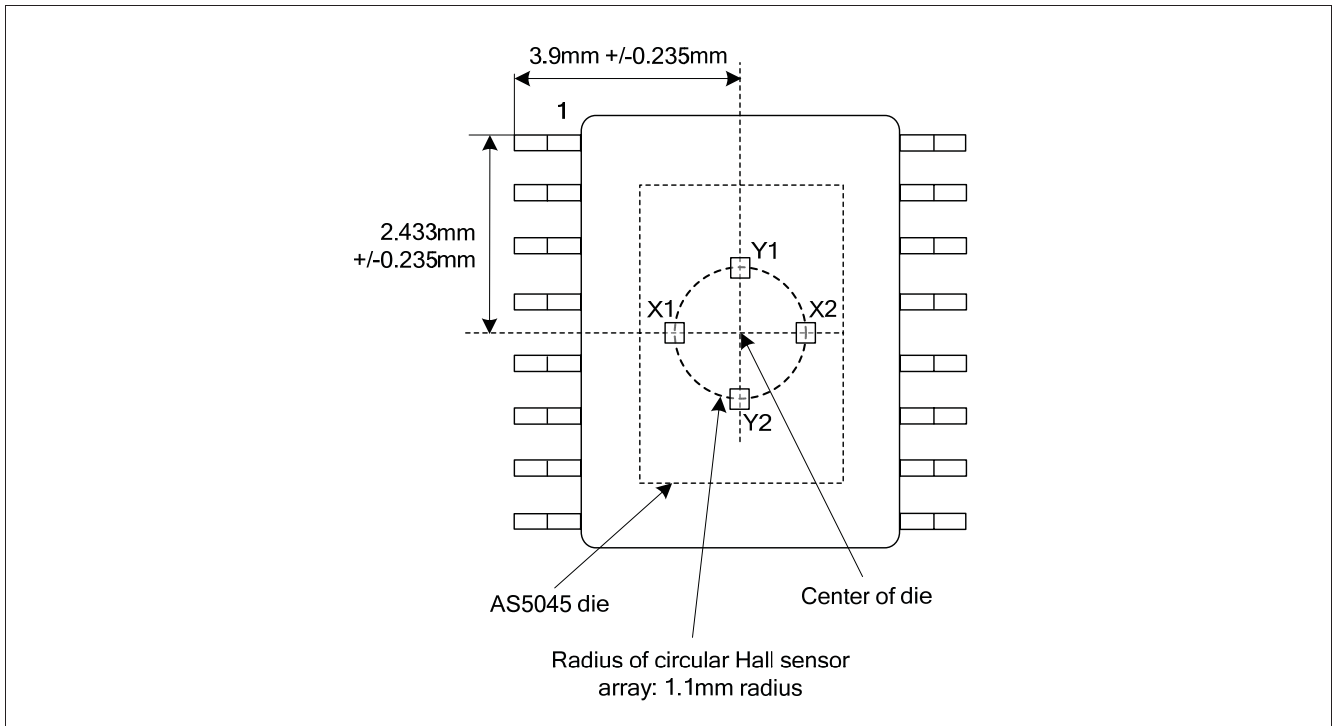
However, a magnetic field outside the specified range may still produce usable results, but the out-of-range condition will be indicated by MagINCn (pin 1) and MagDECn (pin 2), see Table 1.

Figure 19. Vertical Placement of the Magnet



15 Simulation Modeling

Figure 20. Arrangement of Hall Sensor Array on Chip (principle)



With reference to *Figure 20*, a diametrically magnetized permanent magnet is placed above or below the surface of the AS5045. The chip uses an array of Hall sensors to sample the vertical vector of a magnetic field distributed across the device package surface. The area of magnetic sensitivity is a circular locus of 1.1mm radius with respect to the center of the die. The Hall sensors in the area of magnetic sensitivity are grouped and configured such that orthogonally related components of the magnetic fields are sampled differentially.

The differential signal $Y1-Y2$ will give a sine vector of the magnetic field. The differential signal $X1-X2$ will give an orthogonally related cosine vector of the magnetic field.

The angular displacement (Θ) of the magnetic source with reference to the Hall sensor array may then be modelled by:

$$\Theta = \arctan \frac{(Y1 - Y2)}{(X1 - X2)} \pm 0.5^\circ$$

The $\pm 0.5^\circ$ angular error assumes a magnet optimally aligned over the center of the die and is a result of gain mismatch errors of the AS5045. Placement tolerances of the die within the package are $\pm 0.235\text{mm}$ in X and Y direction, using a reference point of the edge of pin #1 (see *Figure 20*).

In order to neglect the influence of external disturbing magnetic fields, a robust differential sampling and ratiometric calculation algorithm has been implemented. The differential sampling of the sine and cosine vectors removes any common mode error due to DC components introduced by the magnetic source itself or external disturbing magnetic fields. A ratiometric division of the sine and cosine vectors removes the need for an accurate absolute magnitude of the magnetic field and thus accurate Z-axis alignment of the magnetic source.

The recommended differential input range of the magnetic field strength ($B_{(X1-X2)}$, $B_{(Y1-Y2)}$) is $\pm 75\text{mT}$ at the surface of the die. In addition to this range, an additional offset of $\pm 5\text{mT}$, caused by unwanted external stray fields is allowed.

The chip will continue to operate, but with degraded output linearity, if the signal field strength is outside the recommended range. Too strong magnetic fields will introduce errors due to saturation effects in the internal preamplifiers. Too weak magnetic fields will introduce errors due to noise becoming more dominant.

16 Failure Diagnostics

The AS5045 also offers several diagnostic and failure detection features:

16.1 Magnetic Field Strength Diagnosis

By software: the MagINC and MagDEC status bits will both be high when the magnetic field is out of range.

By hardware: Pins #1 (MagINCn) and #2 (MagDECn) are open-drain outputs and will both be turned on (= low with external pull-up resistor) when the magnetic field is out of range. If only one of the outputs are low, the magnet is either moving towards the chip (MagINCn) or away from the chip (MagDECn).

16.2 Power Supply Failure Detection

By software: If the power supply to the AS5045 is interrupted, the digital data read by the SSI will be all "0"s. Data is only valid, when bit OCF is high, hence a data stream with all "0"s is invalid. To ensure adequate low levels in the failure case, a pull-down resistor (~10kΩ) should be added between pin DO and VSS at the receiving side

By hardware: The MagINCn and MagDECn pins are open drain outputs and require external pull-up resistors. In normal operation, these pins are high ohmic and the outputs are high (see *Table 5*). In a failure case, either when the magnetic field is out of range of the power supply is missing, these outputs will become low. To ensure adequate low levels in case of a broken power supply to the AS5045, the pull-up resistors (~10kΩ) from each pin must be connected to the positive supply at pin 16 (VDD5V).

By hardware: PWM output: The PWM output is a constant stream of pulses with 1kHz repetition frequency. In case of power loss, these pulses are missing

17 Angular Output Tolerances

17.1 Accuracy

Accuracy is defined as the error between measured angle and actual angle. It is influenced by several factors:

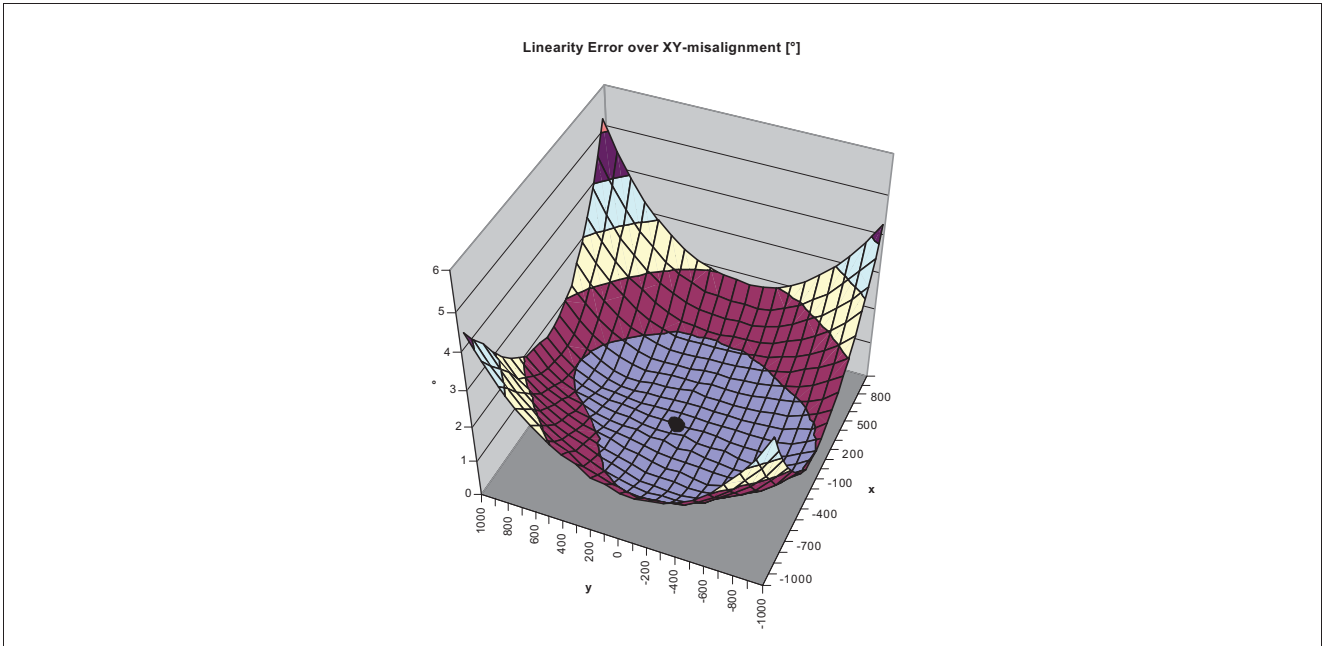
- the non-linearity of the analog-digital converters,
- internal gain and mismatch errors,
- non-linearity due to misalignment of the magnet

As a sum of all these errors, the accuracy with centered magnet = $(Err_{max} - Err_{min})/2$ is specified as better than ± 0.5 degrees @ 25°C (see *Figure 22*).

Misalignment of the magnet further reduces the accuracy. *Figure 21* shows an example of a 3D-graph displaying non-linearity over XY-misalignment. The center of the square XY-area corresponds to a centered magnet (see dot in the center of the graph). The X- and Y- axis extends to a misalignment of ± 1 mm in both directions. The total misalignment area of the graph covers a square of 2x2 mm (79x79mil) with a step size of 100μm.

For each misalignment step, the measurement as shown in *Figure 21* is repeated and the accuracy $(Err_{max} - Err_{min})/2$ (e.g. 0.25° in) is entered as the Z-axis in the 3D-graph.

Figure 21. Example of Linearity Error over XY Misalignment

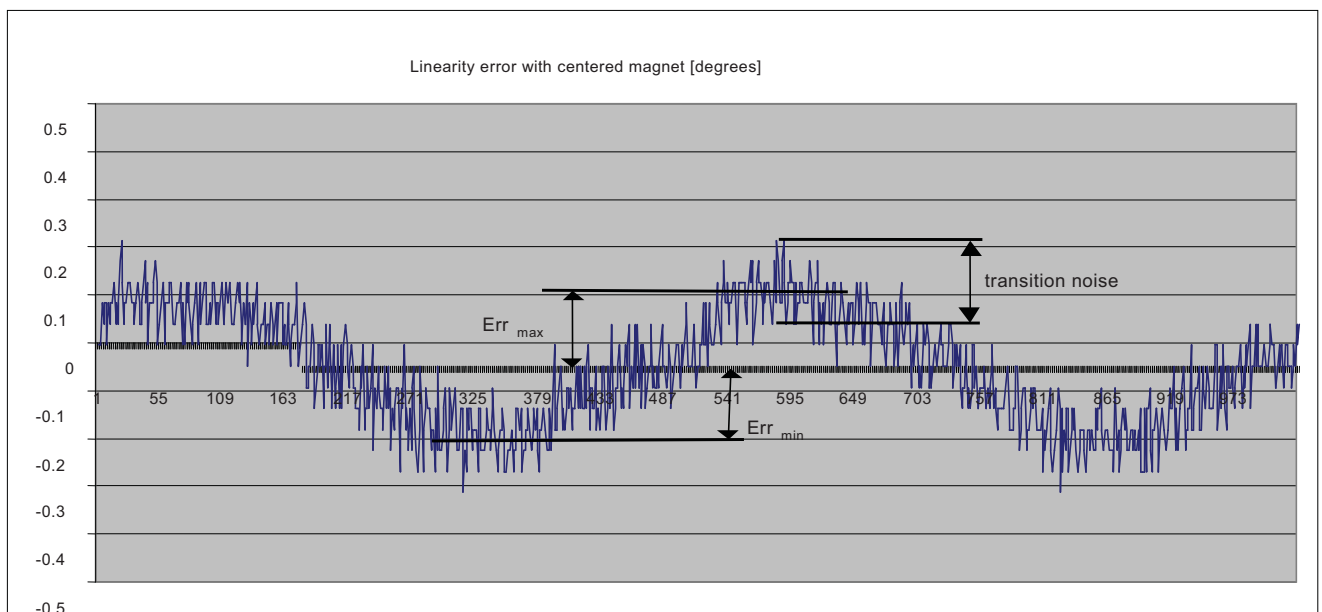


The maximum non-linearity error on this example is better than ± 1 degree (inner circle) over a misalignment radius of ~ 0.7 mm. For volume production, the placement tolerance of the IC within the package (± 0.235 mm) must also be taken into account.

The total nonlinearity error over process tolerances, temperature and a misalignment circle radius of 0.25mm is specified better than ± 1.4 degrees.

The magnet used for this measurement was a cylindrical NdFeB (Bomatec® BMN-35H) magnet with 6mm diameter and 2.5mm in height.

Figure 22. Example of Linearity Error over 360°



17.2 Transition Noise

Transition noise is defined as the jitter in the transition between two steps.

Due to the nature of the measurement principle (Hall sensors + Preamplifier + ADC), there is always a certain degree of noise involved.

This transition noise voltage results in an angular transition noise at the outputs. It is specified as 0.06 degrees rms (1 sigma)^{*1} in fast mode (pin MODE = high) and 0.03 degrees rms (1 sigma)^{*1} in slow mode (pin MODE = low or open).

This is the repeatability of an indicated angle at a given mechanical position.

The transition noise has different implications on the type of output that is used:

- Absolute output; SSI interface:
The transition noise of the absolute output can be reduced by the user by implementing averaging of readings. An averaging of 4 readings will reduce the transition noise by 6dB or 50%, e.g. from 0.03°rms to 0.015°rms (1 sigma) in slow mode.
- PWM interface:
If the PWM interface is used as an analog output by adding a low pass filter, the transition noise can be reduced by lowering the cutoff frequency of the filter.
If the PWM interface is used as a digital interface with a counter at the receiving side, the transition noise may again be reduced by averaging of readings.

^{*1}: statistically, 1 sigma represents 68.27% of readings, 3 sigma represents 99.73% of readings.

17.3 High Speed Operation

17.3.1 Sampling Rate

The AS5045 samples the angular value at a rate of 2.61k (slow mode) or 10.42k (fast mode, selectable by pin MODE) samples per second. Consequently, the absolute outputs are updated each 384µs (96µs in fast mode). At a stationary position of the magnet, the sampling rate creates no additional error.

Absolute Mode

At a sampling rate of 2.6kHz/10.4kHz, the number of samples (n) per turn for a magnet rotating at high speed can be calculated by

$$n_{\text{slow mode}} = \frac{60}{\text{rpm} \cdot 384 \mu\text{s}}$$

$$n_{\text{fast mode}} = \frac{60}{\text{rpm} \cdot 96 \mu\text{s}}$$

The upper speed limit in slow mode is ~6.000rpm and ~30.000rpm in fast mode. The only restriction at high speed is that there will be fewer samples per revolution as the speed increases (see *Table 2*).

Regardless of the rotational speed, the absolute angular value is always sampled at the highest resolution of 12 bit.

17.4 Propagation Delays

The propagation delay is the delay between the time that the sample is taken until it is converted and available as angular data. This delay is 96µs in fast mode and 384µs in slow mode.

Using the SSI interface for absolute data transmission, an additional delay must be considered, caused by the asynchronous sampling ($0 \dots 1/f_{\text{sample}}$) and the time it takes the external control unit to read and process the angular data from the chip (maximum clock rate = 1MHz, number of bits per reading = 18).

17.4.1 Angular Error Caused by Propagation Delay

A rotating magnet will cause an angular error caused by the output propagation delay. This error increases linearly with speed:

$$e_{\text{sampling}} = \text{rpm} * 6 * \text{prop.delay}$$

where

e_{sampling} = angular error [°]

rpm = rotating speed [rpm]

prop.delay = propagation delay [seconds]

Note: since the propagation delay is known, it can be automatically compensated by the control unit processing the data from the AS5045.

17.5 Internal Timing Tolerance

The AS5045 does not require an external ceramic resonator or quartz. All internal clock timings for the AS5045 are generated by an on-chip RC oscillator. This oscillator is factory trimmed to ±5% accuracy at room temperature (±10% over full temperature range). This tolerance influences the ADC sampling rate and the pulse width of the PWM output:

- Absolute output; SSI interface:
A new angular value is updated every 96µs (typ.) in fast mode and every 384µs (typ.) in slow mode.
- PWM output:
A new angular value is updated every 400µs (typ.).
The PWM pulse timings T_{on} and T_{off} also have the same tolerance as the internal oscillator (see above).
If only the PWM pulse width T_{on} is used to measure the angle, the resulting value also has this timing tolerance.
However, this tolerance can be cancelled by measuring both T_{on} and T_{off} and calculating the angle from the duty cycle (see section 9):

$$\text{Position} = \frac{t_{\text{on}} \cdot 4097}{(t_{\text{on}} + t_{\text{off}})} - 1$$

17.6 Temperature

17.6.1 Magnetic Temperature Coefficient

One of the major benefits of the AS5045 compared to linear Hall sensors is that it is much less sensitive to temperature. While linear Hall sensors require a compensation of the magnet's temperature coefficients, the AS5045 automatically compensates for the varying magnetic field strength over temperature. The magnet's temperature drift does not need to be considered, as the AS5045 operates with magnetic field strengths from $\pm 45 \dots \pm 75 \text{mT}$.

Example:

An NdFeB magnet has a field strength of 75mT @ -40°C and a temperature coefficient of -0.12% per Kelvin. The temperature change is from -40° to $+125^\circ = 165\text{K}$. The magnetic field change is: $165 \times -0.12\% = -19.8\%$, which corresponds to 75mT at -40°C and 60mT at 125°C .

The AS5045 can compensate for this temperature related field strength change automatically, no user adjustment is required.

17.7 Accuracy over Temperature

The influence of temperature in the absolute accuracy is very low. While the accuracy is $\leq \pm 0.5^\circ$ at room temperature, it may increase to $\leq \pm 0.9^\circ$ due to increasing noise at high temperatures.

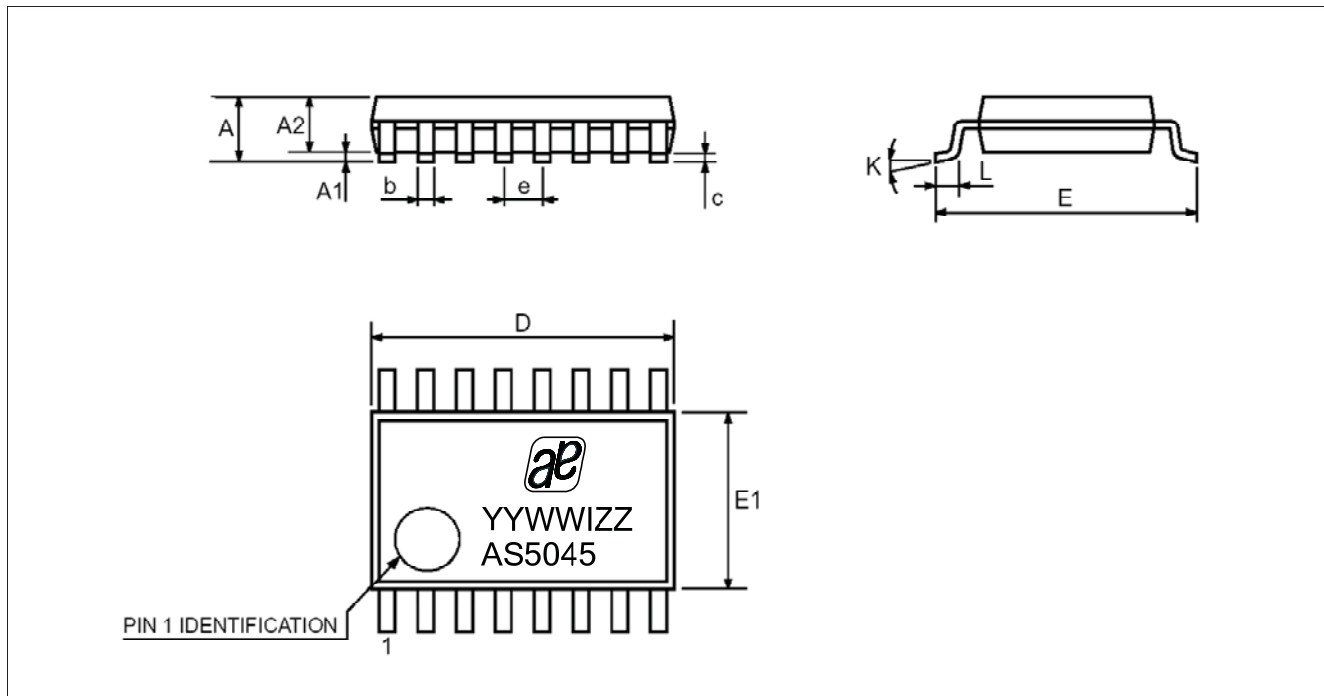
17.7.1 Timing Tolerance over Temperature

The internal RC oscillator is factory trimmed to $\pm 5\%$. Over temperature, this tolerance may increase to $\pm 10\%$. Generally, the timing tolerance has no influence in the accuracy or resolution of the system, as it is used mainly for internal clock generation.

The only concern to the user is the width of the PWM output pulse, which relates directly to the timing tolerance of the internal oscillator. This influence however can be cancelled by measuring the complete PWM duty cycle instead of just the PWM pulse (see 17.5).

18 Package Drawings and Markings

Figure 23. 16-Lead Shrink Small Outline Package SSOP-16



Dimensions						
Symbol	mm			inch		
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max
A	-	-	2.00			.079
A1	0.05	-	-	.002		
A2	1.65	1.75	1.85	.065	.069	.073
b	0.22	-	0.38	.009		.015
c	0.09	-	0.25	.004	-	.010
D	5.90	6.20	6.50	.232	.244	.256
E	7.40	7.80	8.20	.291	.307	.323
E1	5.00	5.30	5.60	.197	.209	.220
e	0.65			.0256		
K	0°	4°	8°	0°	4°	8°
L	0.55	0.75	0.95	.022	.030	.037

Marking: YYWWIZZ

Y: Last Digit of Manufacturing Year

WW: Manufacturing Week

I: Plant Identifier

ZZ: Traceability Code

JEDEC Package Outline Standard:
MO - 150 AC

Thermal Resistance $R_{th(j-a)}$:
typ. 151 K/W in still air, soldered on PCB

IC's marked with a white dot or the letters
"ES" denote Engineering Samples

19 Ordering Information

Delivery: Tape and Reel (1 reel = 2000 devices) Tubes (1 box = 100 tubes à 77 devices)

Order # AS5045ASSU for delivery in tubes

Order # AS5045ASST for delivery in tape and reel

20 Recommended PCB Footprint

Figure 24. Recommended PCB Footprint

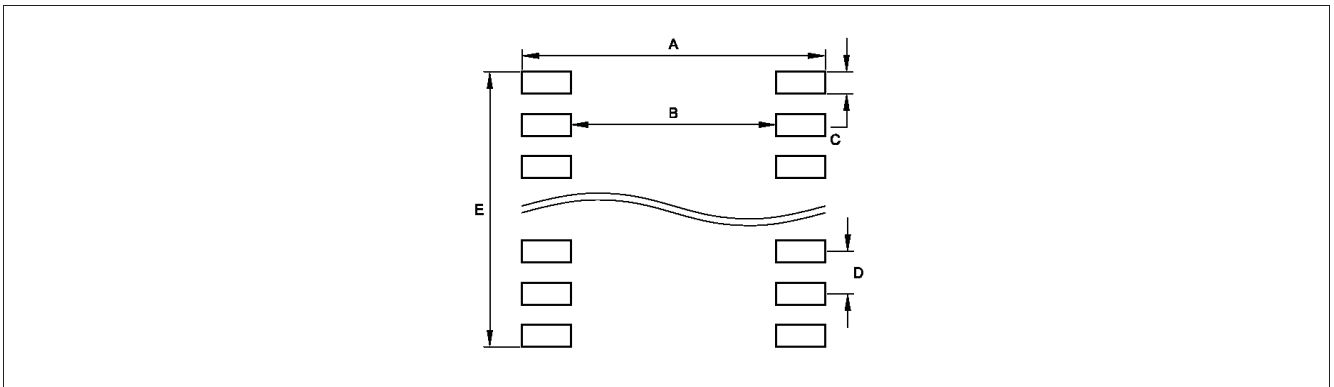


Table 8. Recommended Footprint Data

Recommended Footprint Data		
	mm	inch
A	9.02	0.355
B	6.16	0.242
C	0.46	0.018
D	0.65	0.025
E	5.01	0.197

Copyrights

Copyright © 1997-2010, austriamicrosystems AG, Schloss Premstaetten, 8141 Unterpremstaetten, Austria-Europe.

Trademarks Registered ®. All rights reserved. The material herein may not be reproduced, adapted, merged, translated, stored, or used without the prior written consent of the copyright owner.

All products and companies mentioned are trademarks or registered trademarks of their respective companies.

Disclaimer

Devices sold by austriamicrosystems AG are covered by the warranty and patent indemnification provisions appearing in its Term of Sale. austriamicrosystems AG makes no warranty, express, statutory, implied, or by description regarding the information set forth herein or regarding the freedom of the described devices from patent infringement. austriamicrosystems AG reserves the right to change specifications and prices at any time and without notice. Therefore, prior to designing this product into a system, it is necessary to check with austriamicrosystems AG for current information. This product is intended for use in normal commercial applications. Applications requiring extended temperature range, unusual environmental requirements, or high reliability applications, such as military, medical life-support or lifesustaining equipment are specifically not recommended without additional processing by austriamicrosystems AG for each application.

The information furnished here by austriamicrosystems AG is believed to be correct and accurate. However, austriamicrosystems AG shall not be liable to recipient or any third party for any damages, including but not limited to personal injury, property damage, loss of profits, loss of use, interruption of business or indirect, special, incidental or consequential damages, of any kind, in connection with or arising out of the furnishing, performance or use of the technical data herein. No obligation or liability to recipient or any third party shall arise or flow out of austriamicrosystems AG rendering of technical or other services.



Contact Information

Headquarters

austriamicrosystems AG

A-8141 Schloss Premstaetten, Austria

Tel: +43 (0) 3136 500 0

Fax: +43 (0) 3136 525 01

For Sales Offices, Distributors and Representatives, please visit:

<http://www.austriamicrosystems.com/contact>