

Diseño, construcción y evaluación de un prototipo de
tablero de Ajedrez con sistema de identificación de
tipo y posición de las piezas en tiempo real

Nicolás Guarín Zapata
nguarinz@eafit.edu.co

Grupo de Instrumentos Didácticos, Científicos y
de Control Industrial - GIDCCI
Departamento de Ciencias Básicas
Escuela de Ciencias y Humanidades
Universidad EAFIT
Medellín, Colombia
2009

Diseño, construcción y evaluación de un prototipo de tablero de
Ajedrez con sistema de identificación de tipo y posición de las
piezas en tiempo real

Nicolás Guarín Zapata
nguarinz@eafit.edu.co

*Proyecto de Grado presentado como requisito
parcial para optar por el título de Ingeniero Físico*

Asesor: Álvaro Andrés Velásquez Torres
Profesor de tiempo completo
Departamento de Ciencias Básicas
Ingeniería Física

Grupo de Instrumentos Didácticos, Científicos y
de Control Industrial - GIDCCI
Departamento de Ciencias Básicas
Escuela de Ciencias y Humanidades
Universidad EAFIT
Medellín, Colombia
2009

Nota de aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Ciudad y Fecha

Dedico este trabajo a todas las personas que
siguen adelante con sus proyectos a pesar de
las dificultades para avanzar,
pues son quienes nos motivan para seguir
el camino. Particularmente a mis padres
¡Gracias por todo!.

Agradecimientos

A Sissa por inventar el Ajedrez, pues sin esto no existiría proyecto. Y a Apolo por la música, la cual hizo posible llevar a cabo el trabajo.

Al Dr. Álvaro Andrés Velásquez, asesor del proyecto.

A Esteban García y Augusto Carmona, compañeros de estudio -y prontamente colegas- por acompañarme en el proceso.

A Sebastián Guzmán, Luz María Martínez, Rodrigo Gómez, compañeros de estudio y primera promoción de Ingeniería Física por acompañarme en el proceso.

A Esteban Barrera, estudiante de Ingeniería Industrial de la Universidad de Antioquia, carpintero y amigo quien me ayudó en la construcción de las piezas.

A Hugo Murillo, Jair de Jesús Mira, Óscar Molina y Luis Cuellar, personal del taller de Física y Electrónica que me apoyaron en la implementación de los circuitos del prototipo.

A Gilberto Valencia, Wilson de Jesús Hernández , Alexánder Gil y Juan Camilo Gómez, personal del taller de prototipos que me ayudaron con la construcción de las piezas y la carcasa del prototipo.

Tabla de contenido

Glosario	IV
Resumen	VII
Introducción	VIII
1. Problema	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Objetivos	1
1.2.1. Objetivo General	1
1.2.2. Objetivos específicos	1
1.3. Justificación de la propuesta	2
2. Marco de referencia	3
2.1. Marco Teórico	3
2.1.1. Sistemas de Medida	4
2.1.2. Materiales Magnéticos	6
2.1.3. Efecto Hall	8
2.1.4. Sensado por Efecto Hall	10
2.2. Antecedentes	12
3. Metodología	14
3.1. Especificaciones de Diseño	15

4. Desarrollo	18
4.1. Hardware	18
4.1.1. Acondicionamiento de señal	18
4.1.2. Selección del tipo de imán	19
4.1.3. Sistema de sensado	21
4.1.4. Electrónica	23
4.2. Software	26
4.2.1. Algoritmo del Microcontrolador (PIC)	27
4.3. Escalamiento	29
4.4. Resultados y discusión	31
5. Conclusiones	36
Referencias	37
Anexos	39
A. Código del programa del microcontrolador	39
B. Artículo sometido a evaluación	42
C. Planos Electrónicos	48

Lista de figuras

1.	Diagrama de bloques del sistema.	4
2.	Elementos de un sistema de medida (1).	4
3.	Elementos de un sistema de medida (2).	5
4.	Sistema de medida multicanal con un solo ADC.	6
5.	Sistema de medida multicanal con un ADC por canal.	7
6.	Curva de magnetización de un material.	8
7.	Esquema de representación de un conductor en el que se presenta el Efecto Hall.	9
8.	Sensor genérico basado en el Efecto Hall.	11
9.	Sensor simple de salida analógica.	12
10.	Algunos tableros comerciales.	13
11.	Esquema de distribución de los sensores en el tablero.	14
12.	Circuito de acondicionamiento de los sensores Hall.	18
13.	Configuración de las mediciones.	19
14.	Datos medidos para los 7 tipos de imanes.	20
15.	Medidas de los imanes <i>D18A4</i>	20
16.	Valores medidos para 7 imanes con la misma geometría (<i>D18A4</i>).	21
17.	Ubicación de los imanes al interior de las piezas.	21
18.	Ubicación de los sensores en el tablero.	22
19.	Ubicación de los imanes al interior de las piezas fabricadas.	22
20.	Vista de corte de un tablero con los sensores ya ubicados y una pieza con el imán en su interior.	23

21.	Circuito implementado para el microcontrolador	25
22.	Circuito de comunicación serial	25
23.	Circuito de acondicionamiento de los sensores Hall de una misma Fila .	26
24.	Manejo del sensado	27
25.	Fotos de los circuitos y del tablero desarrollados	27
26.	Fuente de voltaje dual implementada	28
27.	Fotos de los circuitos y del tablero desarrollados	29
28.	Diagrama de flujo del algoritmo realizado al interior del microcontrolador PIC.	30
29.	Diagrama de flujo del algoritmo realizado al interior del microcontrolador PIC. Subrutina LECTURA.	31
30.	Diagrama de flujo del software implementado para el PC.	32
31.	Desalineamiento admisible por pieza	32
32.	Interfaz implementada en LabVIEW para la visualización	34
33.	Componentes desarrolladas para el prototipo	35

Lista de tablas

1.	Ventajas y desventajas de diferentes sistemas de sensado.	16
2.	Especificaciones de diseño	17
3.	Código asignado a los diferentes imanes caracterizados.	19
4.	Dimensiones de las piezas	23
5.	Profundidades de perforación en las diferentes piezas	24
6.	Intervalos de voltaje asignados a los diferentes estados de casilla	33

Glosario

- **ADC**, sigla en inglés de Analogic to Digital Converter (Convertor Analógico-Digital). Es un dispositivo que convierte las señales analógicas en señales digitales.
- **Baudio**, Unidad de la velocidad de transmisión de señales, equivalente a un bit por segundo.
- **Caja Negra**, en teoría de sistemas, se denomina caja negra a aquel elemento que es estudiado desde el punto de vista de las entradas que recibe y las salidas o respuestas que produce, sin tener en cuenta su funcionamiento interno.
- **Domótica**, El término Domótica proviene de la unión de las palabras *domus* (que significa casa en latín) y *tica* (de automática, palabra en griego, que funciona por sí sola). Se entiende por domótica al conjunto de sistemas capaces de automatizar una vivienda, aportando servicios de gestión energética, seguridad, bienestar y comunicación. Se podría definir como la integración de la tecnología en el diseño inteligente de un recinto.
- **DSP**, sigla en inglés de Digital Signal Processor (Procesador Digital de Señales). Es un sistema basado en un procesador o microprocesador que posee un juego de instrucciones, un hardware y un software optimizados para aplicaciones que requieran operaciones numéricas a muy alta velocidad.
- **FIDE**, sigla en francés de Fédération Internationale de Échecs (Federación Internacional de Ajedrez). Es la organización internacional que conecta las diversas federaciones nacionales de ajedrez y que actúa como el organismo regulador para las competiciones de ajedrez a nivel mundial.
- **Firmware o programación en firme**, es un bloque de instrucciones de programa para propósitos específicos, grabado en una memoria de tipo no volátil (ROM, EEPROM, flash,...), que establece la lógica de más bajo nivel que controla los circuitos electrónicos de un dispositivo de cualquier tipo. Funcionalmente, el firmware es el intermediario (interfaz) entre las órdenes externas que recibe el dispositivo y su electrónica, ya que es el encargado de controlar a ésta última para ejecutar correctamente dichas órdenes externas.
- **PDS**, sigla en inglés de Product Design Specification. Es una descripción de las demandas y deseos que tiene como requerimiento un producto y que permite desarrollar alternativas de diseño.
- **Reed Switch**, es un interruptor eléctrico activado por un campo magnético. Cuando los contactos están normalmente abiertos se cierran en la presencia de un campo magnético; cuando están normalmente cerrados se abren en presencia de un campo magnético. Fue inventado por W. B. Elwood en 1936 cuando trabajaba para Laboratorios Bell

- **SI o Sistema Internacional de Unidades**, es el nombre que recibe el sistema de unidades que se usa en la mayoría de los países y es la forma actual del sistema métrico decimal. El SI también es conocido como *sistema métrico*, especialmente en las naciones en las que aún no se ha implantado para su uso cotidiano.
- **SNR**, sigla en inglés de Signal to Noise Ratio , también denotado S/N. Se define como el margen que hay entre la potencia de la señal que se transmite y la potencia del ruido que hay de fondo. Este margen es medido en decibelios.

Resumen

El trabajo consiste en el desarrollo de un prototipo de tablero de Ajedrez con un sistema de identificación de tipo y posición de las piezas. Este prototipo tiene 9 casillas (3×3) en el cual se busca validar e implementar el sensado por efecto Hall en el reconocimiento de las piezas. Adicionalmente se analizó el escalamiento del prototipo a un tablero convencional (8×8).

Palabras clave: Ajedrez, tablero de Ajedrez Electrónico, Instrumentación Electrónica, efecto Hall, imanes de Neodimio.

Introducción

En el presente documento se expone el desarrollo de un prototipo de tablero de Ajedrez con un sistema de identificación de tipo y posición de las piezas en tiempo real sin que altere la forma en la que se lleva a cabo el juego. Este proyecto constituye mi trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Físico. La idea de tener un dispositivo con estas características se hace importante por varias razones, entre ellas: almacenamiento de las partidas (lo cual es obligatorio en torneos [1]), proyección de partidas en escenarios de juego, seguimiento remoto de las partidas (e.g. por Internet) e interacción entre un PC/Computador y el jugador.

El trabajo se llevó a cabo de la siguiente manera, se hizo una revisión del estado del arte de los tableros comerciales y los desarrollados en ambientes académicos, como puede verse a lo largo del documento. Esto con el fin de evaluar diferentes alternativas de solución al problema, que brindaran valor agregado al proyecto, con la idea de contribuir significativamente en la instrumentación relacionada con el Ajedrez.

Posteriormente se evaluaron diferentes técnicas de sensado que pudieran usarse en el reconocimiento de las piezas y que fueran asequibles localmente. Se desarrolló una etapa de acondicionamiento para las señales provenientes de los sensores y un sistema de adquisición y transmisión de los datos que representan el estado del tablero.

Con la información del estado del tablero se realizó un programa para la visualización de este en una pantalla de PC. Una vez finalizado el prototipo se procedió con la verificación de su funcionamiento. Además se plantea un escalamiento del diseño para un tablero convencional (8×8).

Como puede evidenciarse en el documento, la base de este trabajo se halla en la instrumentación electrónica. Esta, presente no sólo en entornos científicos o industriales sino en otras actividades humanas como las disciplinas deportivas.

1. Problema

1.1. Planteamiento del problema

Se busca desarrollar y evaluar un kit de ajedrez compuesto de un minitablero (3×3 casillas), piezas y un sistema electrónico que permita el sensado de la ubicación y el tipo de pieza dentro del tablero de manera autónoma sin alterar la experiencia del juego tradicional para una posterior visualización.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Desarrollar y evaluar un kit de ajedrez para un tablero 3×3 de bajo costo que permita identificar la ubicación y el tipo de piezas en tiempo real.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Identificar y adecuar los sistemas de sensado de las piezas dentro del tablero.
2. Verificar las señales de respuesta de los sensores.
3. Escoger el sistema de cómputo que procese las señales sensadas.
4. Implementar la forma de codificar el estado del tablero.
5. Implementar un prototipo.
6. Evaluar el prototipo.

1.3. Justificación de la propuesta

La tecnología ha impulsado el desarrollo en muchas actividades humanas, entre ellas los deportes [2, 3]. Resaltando algunos desarrollos técnicos, se han mejorado los implementos de los atletas incluyendo los trajes de natación y las zapatillas deportivas. Con relación a los implementos de ajedrez (tablero, piezas, reloj) se han presentado avances, como el paso de reloj mecánico a reloj digital [4].

La masificación de la computación permitió el uso de los PC para diferentes fines [5]; con respecto al ajedrez se impulsó su estudio desde la ciencia de la computación hasta convertirse, el ajedrez por computadora [6], en una herramienta indispensable en el estudio del juego. Con la aceptación del ajedrez por computadora como una herramienta diaria del ajedrecista se generó la necesidad de mejorar la interfaz humano-computadora para emular la interacción en el juego con otra persona. Y de la intención de comunicarse con las aplicaciones de ajedrez sin cambiar la experiencia de juego surge la necesidad de hacer un sensado automático de la ubicación de las piezas al interior del tablero de ajedrez.

En un torneo de ajedrez bajo las reglas de la FIDE [1] suelen jugarse simultáneamente un gran número de partidas (igual a la mitad de jugadores) lo que implica una gran dificultad en registrarlas todas de una manera simple, de nuevo se hace necesario un sistema que permita realizar esta labor autónomamente.

En el marco de la Ingeniería Física se evidencia la pertinencia del proyecto. La instrumentación electrónica es un tópico, hoy en día, *omnipresente* en aplicaciones de ingeniería e incluso en aplicaciones cotidianas como la domótica. El diseño de un sistema de sensado requiere conocimientos de los fenómenos (físico-químicos), es entonces menester una formación en Física para lograr definir qué propiedad va a sensarse y qué tipo de sensores son los adecuados. Ya que el problema a solucionar tiene una aplicación casi inmediata se torna en un problema de interés para la ingeniería. Se puede ver que se trata de un proyecto afín con Ingeniería Física.

2. Marco de referencia

2.1. Marco Teórico

Para jugar ajedrez se tienen unos requerimientos – en cuanto a implementos básicos [7]– que están reglamentados por la FIDE [1]:

- Un tablero, formado por una cuadrícula de 64 casillas o escaques. Estos deben tener un largo y ancho entre 5cm y 6,5cm y tener dos colores que contrasten entre sí.
- Son 32 piezas, divididas en dos bandos que deben cumplir varias características:
 - Los colores de las piezas “blancas” y “negras” deben contrastar entre sí y ser unas más oscuras que otras.
 - La forma de las piezas debe permitir diferenciarlas.
 - El alto del rey debe ser de 9,5cm y el diámetro entre el 40 % y el 50 % del alto.
 - El material de las piezas debe tener apariencia de madera o plástico y el peso debe ser cómodo para manipularlas.
- Un Reloj, cuenta el tiempo de análisis de cada jugador [4, 8].

La solución que se dio al problema de sensado de la ubicación de las piezas se basa en la colocación de sensores dentro del minitablero (uno por casilla) y la medición de una misma propiedad física en cada pieza, diferenciando el tipo por la magnitud y el signo de la señal de medición. Se tienen 12 tipos de piezas diferentes (caballos, alfiles, peones, reyes, damas, torres y se diferencia el color de cada una). El trabajo consistió en desarrollar un sistema modular (ver Figura 1) con un microcontrolador como núcleo y con unos periféricos que se encargan de realizar unas tareas específicas.

Un microcontrolador es un circuito integrado que constituye un sistema de cómputo completo (computadora), e incluye en su interior las tres unidades funcionales necesarias: CPU (Unidad Central de Procesos), Memoria y Unidades de Entrada- Salida (E/S ó I/O). Los microcontroladores han tenido una creciente demanda gracias a su bajo costo y a su versatilidad. Este es el dispositivo que se usó como núcleo para procesar las señales obtenidas desde los sensores, y enviar los datos al sistema de visualización a utilizar. [9, 10]

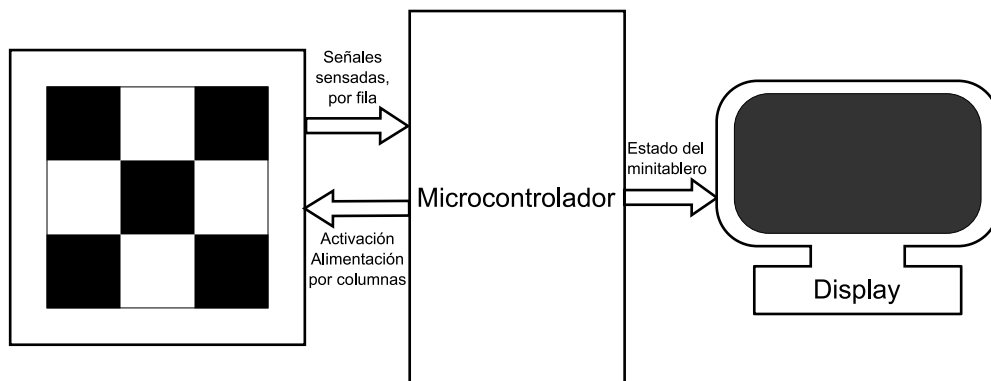


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema.

2.1.1. Sistemas de Medida

“La instrumentación comprende todas las técnicas, equipos y metodologías relacionadas con el diseño, la construcción y la aplicación de dispositivos físicos para mejorar, completar y aumentar la eficiencia de los mecanismos de percepción del ser humano”. [11] Para el caso de este proyecto, es de interés la *Instrumentación Electrónica* en la cual se utilizan técnicas electrónicas para realizar la medida. Las magnitudes físicas medidas son convertidas a señales eléctricas y luego son tratadas por dispositivos electrónicos para llevar dicha información a un sistema de control, a un operador humano o a ambos.

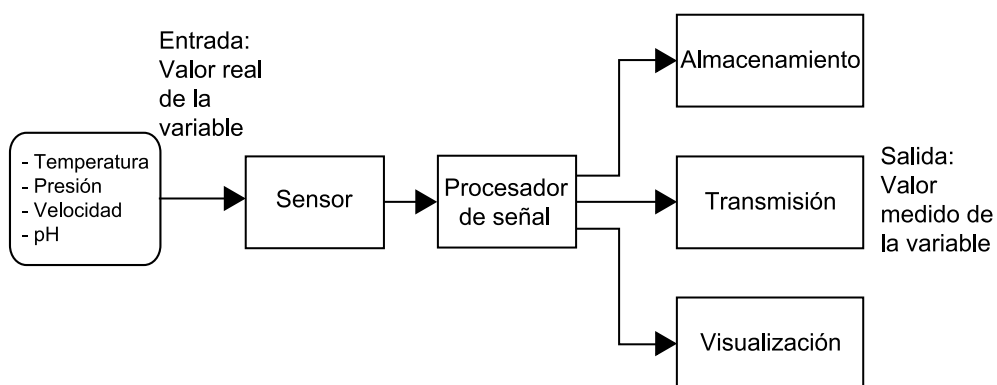


Figura 2. Elementos de un sistema de medida. Tomado de *Instrumentation and Control Systems* [12]

Un sistema de medida electrónico es aquel cuya finalidad es obtener información acerca de un proceso físico y presentar dicha información en forma adecuada a un observador o a otro sistema. En la Figura 2 se puede ver un esquema que representa un sistema de medida y además muestra sus componentes.

Considerando un sistema de medida como una “caja negra”, la entrada sería el valor verdadero de la variable a medir y la salida, el valor medido. Sólo en el caso ideal la diferencia entre ambos valores sería nula, por lo que siempre se comete un error de medida. Las causas de este error son de origen diverso.?? En un sistema de medida se pueden distinguir tres funciones principales: adquisición de datos, procesamiento de datos y distribución de datos.

- *Adquisición de datos.* La información de las variables a medir es adquirida y convertida en una señal eléctrica.
- *Procesamiento de datos.* Consiste en el procesamiento, selección y manipulación dependiendo de los intereses que se tengan. Esta función suele ser realizada por un procesador digital, como un microcontrolador o un procesador digital de señales (DSP, de sus siglas en inglés Digital Signal Processor).
- *Distribución de datos.* El valor medido se presenta a un observador o se transmite a otro sistema.

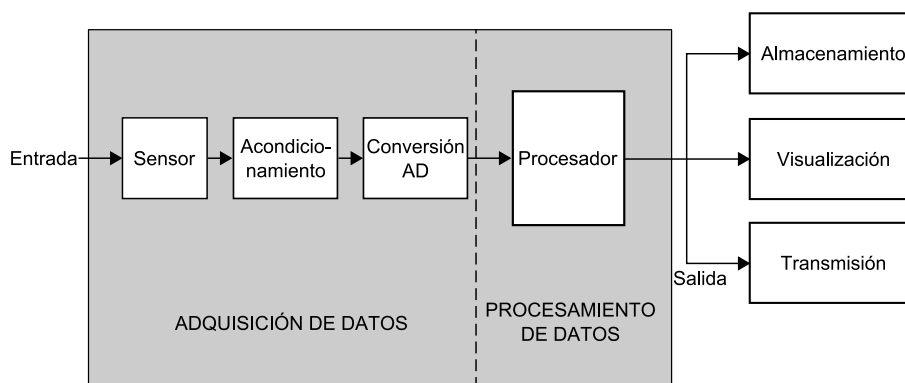


Figura 3. Elementos de un sistema de medida. Tomado de *Instrumentación electrónica* [11]

Adicionalmente, la función de adquisición de datos puede ser dividida en unidades funcionales más pequeñas como se ve en la Figura 3. En primer lugar, la variable del mundo físico es convertida en una señal eléctrica mediante un sensor. Con frecuencia, la señal procedente del sensor tiene unas características que no son convenientes para el procesamiento: señal de bajo o alto nivel, falta de linealidad, ruido de la red eléctrica, entre otras. Se hace, pues, necesaria una etapa de acondicionamiento de señal. Este acondicionamiento consiste en realizar alguna de las siguientes operaciones básicas:

- *Amplificación:* aumentar o disminuir el nivel de potencia de la señal.
- *Filtrado:* eliminar las componentes de la señal de ruido.

- *Linealización*: obtener una señal de salida que varíe linealmente con la variable que se mide.
- *Modulación/Demodulación*: modificar la forma de la señal a fin de poder transmitirla a largas distancias o para reducir su sensibilidad a interferencias durante el transporte.

En algunas ocasiones se necesita procesar más de una variable de entrada, esto se puede obtener con sistemas en dos configuraciones (ver Figuras 4 y 5), en una de ellas se tiene un único Conversor Analógico-Digital (ADC de sus siglas en inglés *Analogic to Digital Converter*) y un multiplexor que se encarga de seleccionar el canal a convertir, en la otra se tiene un conversor por canal, es decir, se hace la adquisición de las señales simultáneamente, y luego se llevan al procesador.

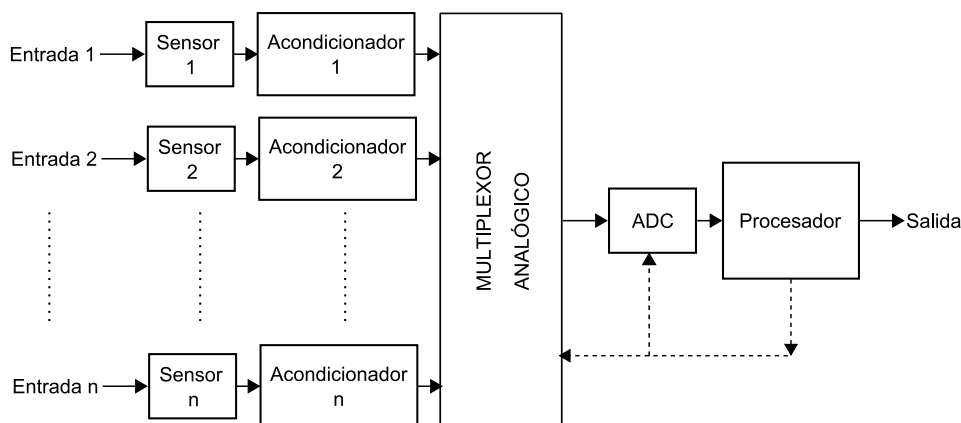


Figura 4. Sistema de medida multicanal con un sólo ADC. Tomado de *Instrumentación electrónica* [11]

En este trabajo se utiliza la arquitectura que se presenta en la Figura 4, es decir, cuenta con varios canales (5 en el caso del PIC16F873A) y todos estos son conmutados internamente hacia la entrada del conversor ADC. El conversor es de 10 bits, es decir que puede representar 1024 estados diferentes para la señal a ser *digitalizada*. [13]

2.1.2. Materiales Magnéticos

El movimiento de una carga eléctrica produce un campo magnético. Por ejemplo, una espira de corriente eléctrica I que encierra un área A produce un dipolo magnético de intensidad

$$\mathbf{m} = IA\hat{n}$$

en donde \mathbf{m} es un vector perpendicular a la espira de corriente y \hat{n} es el vector normal a la superficie.

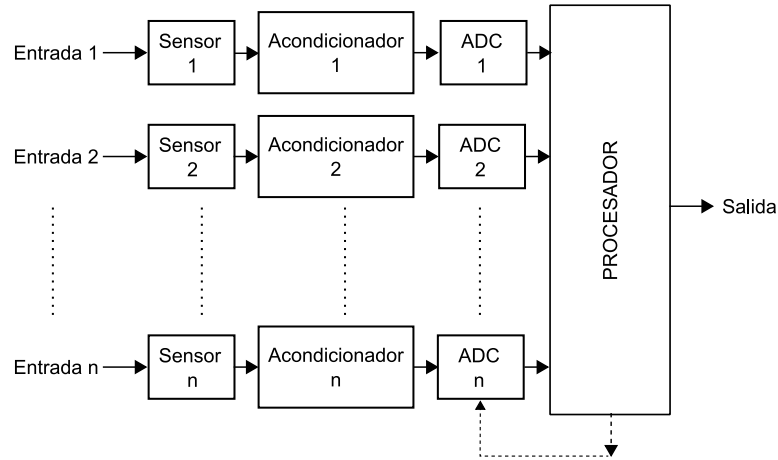


Figura 5. Sistema de medida multicanal con un ADC por canal. Tomado de *Instrumentación electrónica* [11]

La razón de las propiedades magnéticas en los materiales es la presencia de “espiras” de corriente producidas por el movimiento de los electrones. Los dos tipos de movimiento electrónico que se consideran son: el movimiento de los electrones en órbita en torno al núcleo del átomo, y el giro o *espín* de un electrón en torno a su propio eje de rotación. La interacción de los momentos magnéticos inducidos por electrones, con un campo magnético aplicado del exterior, da como resultado las propiedades magnéticas de un material. Un campo magnético externo se puede describir con uno de dos vectores paralelos: la inducción magnética \mathbf{B} , o la intensidad de campo magnético \mathbf{H} . En el vacío las cantidades \mathbf{B} y \mathbf{H} se relacionan con la ecuación:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$$

en donde μ_0 es la permeabilidad del vacío. La unidad SI de inducción magnética es el tesla ($T = kgC^{-1}$). Las unidades de \mathbf{H} son A/m y las de la permeabilidad son Tm/A . La magnitud de μ_0 es $4\pi \times 10^{-7} Tm/A$.

Un material se magnetiza en presencia de un campo magnético externo de intensidad \mathbf{H} . El grado de esta magnetización se puede cuantificar por el *vector magnético* \mathbf{M} , que representa el momento dipolar magnético inducido por unidad de volumen dentro del material. La inducción magnética total es la suma de las contribuciones del campo magnético externo ($\mu_0 \mathbf{H}$) y la respuesta interna del material ($\mu_0 \mathbf{M}$). Esto es:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M} \quad (1)$$

Ya que el vector magnético \mathbf{M} , que también es llamado magnetización, es inducido por el campo magnético externo \mathbf{H} , es razonable suponer que \mathbf{M} es proporcional a \mathbf{H} . Esto es:

$$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H}$$

en donde χ se llama *susceptibilidad magnética*. Combinando las dos ecuaciones anteriores se obtiene una ecuación alterna de \mathbf{B} ,

$$\mathbf{B} = \mu_0(1 + \chi)\mathbf{H} = \mu\mathbf{H} \quad \text{con } \mu = \mu_0(1 + \chi) \quad (2)$$

siendo μ la *permeabilidad magnética* del material. La relación

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = 1 + \chi$$

se llama *permeabilidad relativa* del material.[14]

Un material está dividido en dominios magnéticos, estos son volúmenes microscópicos de material en los que los dipolos están alineados. Cuando se aplica un campo externo, hace aumentar el momento magnético neto en su dirección. Este proceso se puede efectuar sea por el aumento de los dominios con orientación favorable, o por rotación de los dipolos. Debido al trabajo irreversible que se requiere para mover las paredes de los dominios, con la respuesta de un material ferrimagnético o ferromagnético a campos externos alternantes se asocia un ciclo de histéresis. En general uno de estos materiales presenta una curva de magnetización con histéresis (ver Figura 6).

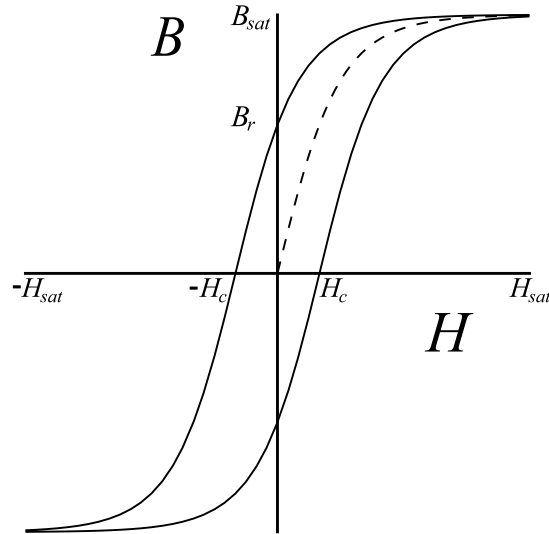


Figura 6. Curva de magnetización de un material. H_c y H_{sat} son los valores de *Campo coercitivo* y de *saturación* respectivamente, mientras B_{sat} y B_r los de *Campo de inducción de saturación* y *Campo de Inducción remanente*.

2.1.3. Efecto Hall

El efecto Hall fue descubierto por Edwin Hall hacia 1897 mientras terminaba sus estudios de doctorado en la Universidad John Hopkins en Baltimore. Hall estaba intentando verificar la teoría de flujo de electrones propuesta por Kelvin cerca de 30 años

atrás. Hall encontró que cuando se aproxima un imán con el campo perpendicular a una de las caras de una lámina delgada de oro a través de la cual fluye corriente, aparece una diferencia de potencial entre las aristas opuestas. Él encontró que ese voltaje era proporcional a la intensidad de corriente que fluye por el conductor, y a la densidad de flujo magnético perpendicular al mismo .[15]

Un dispositivo basado en efecto Hall consta de un conductor plano por el que circula una corriente I en la dirección x . Un campo magnético uniforme B se aplica en la dirección y . Si los portadores de carga son electrones que se mueven en la dirección x negativa con velocidad de arrastre v_d , experimentan una fuerza magnética hacia arriba $\mathbf{F} = q\mathbf{v}_d \times \mathbf{B}$ (ver Figura 7), se desvían hacia arriba y se acumulan en el borde superior del conductor dejando un exceso de carga positiva en el borde inferior. Esta acumulación de carga aumenta hasta que la fuerza eléctrica, establecida por la separación de carga, equilibra la fuerza magnética. Una vez se alcanza esta condición de equilibrio los portadores no se desvían más. A la diferencia de potencial generada se le conoce como *voltaje Hall* (ΔV_H).

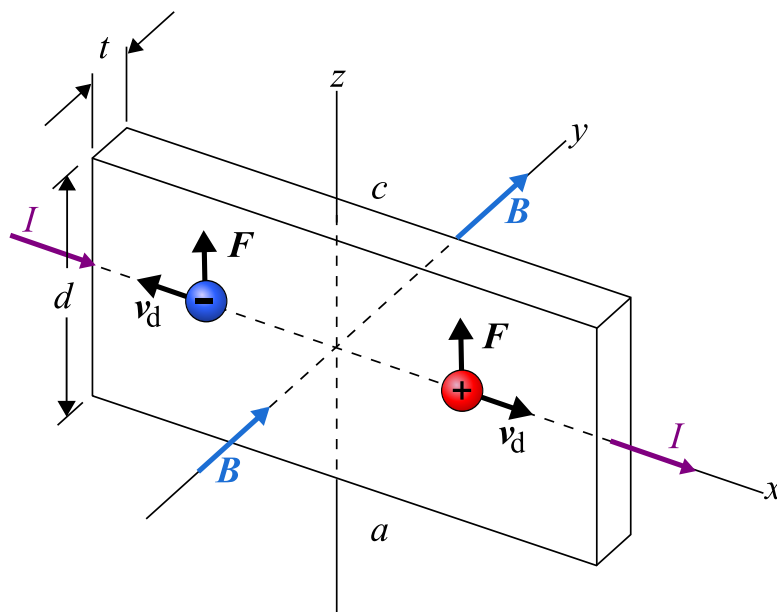


Figura 7. Esquema de representación de un conductor en el que se presenta el Efecto Hall. El *Voltaje Hall* se mide entre los puntos a y c . Tomado de *Física para Ciencias e Ingeniería* [16]

Si los portadores de carga son positivos el signo del voltaje Hall es opuesto. El signo de los portadores de carga puede, por ende, determinarse a partir de la medición de la polaridad del voltaje Hall. En el equilibrio se tiene que:

$$qv_d B = qE_H \quad \Rightarrow \quad E_H = v_d B,$$

siendo d el ancho del conductor, el voltaje Hall es

$$\Delta V_H = E_h d = v_d B d. \quad (3)$$

De este modo, el voltaje Hall medido proporciona un valor para la rapidez de arrastre de los portadores de carga si se conocen d y B . Puede obtenerse la densidad de portadores de carga n midiendo la corriente en la muestra, la rapidez de arrastre puede expresarse como

$$v_d = \frac{I}{nqA}$$

donde A es el área de la sección transversal del conductor, sustituyendo en (3) se obtiene

$$\Delta V_H = \frac{R_H IB}{t}, \quad (4)$$

donde $R_H = \frac{1}{nq}$ es el *coeficiente Hall* (una propiedad del material). Esta relación muestra que un conductor calibrado puede usarse para medir la magnitud de un campo magnético desconocido – uso que se aprovecha en el presente trabajo.

En la mayoría de los metales los portadores de carga son electrones y la densidad de portadores determinada a partir de las mediciones concuerda bien con los valores calculados (esto para metales como Li, Na, Cu, Ag, cuyos átomos proporciona cada uno un electrón para actuar como portador de corriente). En este caso n es aproximadamente igual al número de electrones conductores por unidad de volumen. Sin embargo, este modelo clásico no es válido para metales como hierro, bismuto y cadmio o para semiconductores. Estas discrepancias pueden explicarse sólo con el uso de un modelo basado en la naturaleza cuántica de los sólidos.[16]

2.1.4. Sensado por Efecto Hall

Como se mencionó brevemente en la sección anterior el efecto Hall puede ser usado para medir campo magnético siempre que se conozcan la geometría y las características del conductor sobre el cual se presenta el fenómeno. Pero no se encontraron aplicaciones hasta 1950, estas fueron muy limitadas por su costo.

El Efecto Hall se presenta en cualquier conductor sometido a un campo magnético perpendicular, pero desde el punto de vista práctico no sirve cualquier material para hacer un sensor basado en Efecto Hall. Para una tira de cobre rectangular con las siguientes características: $1,5\text{cm}$ de ancho, $0,10\text{cm}$ de espesor, con una corriente de 5A , un campo aplicado de $1,2\text{T}$ y suponiendo que hay un electrón por átomo disponible para la conducción (puede considerarse la densidad de portadores de carga igual a $n = 8,49 \times 10^{28} \text{electrones}/\text{m}^3$) se tiene entonces:

$$\Delta V_H = \frac{IB}{nqt} = 0,44\mu\text{V}, \quad (5)$$

que es un voltaje muy pequeño; en general para buenos conductores el voltaje Hall es de este orden de magnitud. En semiconductores n es mucho más pequeño que en metales

que contribuyen con un electrón por átomo a la corriente; en consecuencia, el voltaje Hall es mayor. Si se trata de un trozo de silicio con las mismas dimensiones que la tira de cobre, con $n = 1 \times 10^{20} \text{electrones}/m^3$. Si $B = 1,2T$ e $I = 5A$, se encuentra que $\Delta V_H = 375V$.

En 1965, Everett Vorthmann y Joe Maupin, ingenieros de *MICRO SWITCH Sensing and Control*, encontraron un sensor de estado sólido de bajo costo. Evaluaron muchas opciones, pero escogieron el Efecto Hall por una razón: podía ser integrado completamente en un único circuito integrado de silicio. El resultado fue la primera aplicación de bajo costo y alto volumen de producción del Efecto Hall, los teclados (pianos electrónicos) de estado sólido. [15]

Aunque los sensores de Efecto Hall sean de campo magnético, pueden ser usados como el componente principal de muchos otros tipos de dispositivos de detección (corriente, temperatura, presión, posición, entre otros). Se tiene un dispositivo de sensado genérico (ver Figura 8), en este el sensor Hall mide el campo producido por el sistema magnético. El sistema magnético responde a la magnitud física a través de la interfaz de entrada. La interfaz de salida convierte la señal eléctrica del sensor Hall a una señal que cumpla los requerimientos de la aplicación.

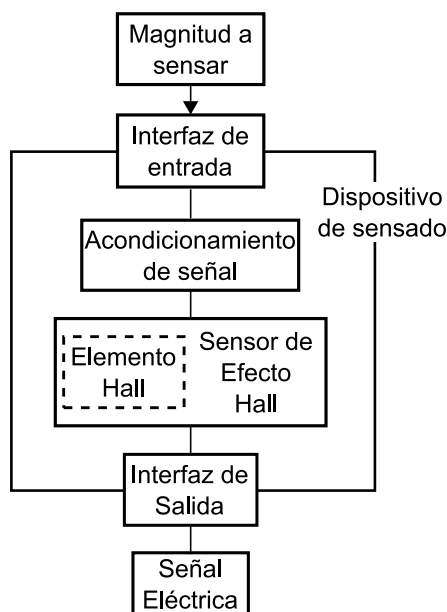


Figura 8. Sensor genérico basado en el Efecto Hall. Tomado de *Hall Sensing and Application* [15]

En muchas aplicaciones los campos no sobrepasan unas décimas de Tesla y entonces el voltaje Hall obtenido es muy bajo, es por eso que los dispositivos de sensado incluyen en su interior una etapa de acondicionamiento de señal, en la que se hace, por ejemplo,

una preamplificación para tener en la salida del dispositivo un voltaje más adecuado para el uso (ver Figura 9).

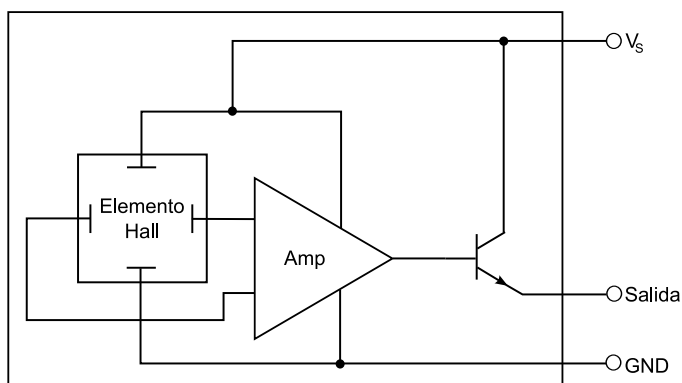


Figura 9. Sensor simple de salida analógica. Tomado de *Hall Sensing and Application* [15]

2.2. Antecedentes

Los tableros de ajedrez electrónicos ya existen, tanto comercialmente [17, 18, 19] como en ámbitos académicos [20, 21]. Los desarrollos se han hecho con finalidades diferentes y para públicos diferentes.

En el año 2000 se presentó un trabajo de grado en Ingeniería de Sistemas en la Universidad EAFIT titulado: *Camelot - Aplicación y Tablero de Ajedrez Acondicionado para la Visualización y Registro de las Partidas*[21], en este trabajo los principales objetivos eran poder visualizar la partida en una pantalla de computador y registrar el listado de jugadas en un archivo de texto. Se partió de un tablero convencional y el sensado de piezas se hizo por medio de imanes bipolares en las piezas e interruptores magnéticos (*reed switches*) en el tablero, esto permitía detectar la presencia de piezas en las casillas. Se ve además un trabajo importante en el desarrollo de las aplicaciones de visualización y monitoreo de las partidas.

Un trabajo de grado en Ingeniería Técnica Industrial en Electrónica Industrial de la Universitat Rovira I Virgili plantea una solución para ayudar a los invidentes con el juego. En éste el sensado se hace con pares emisor-receptor (ópticos) en cada casilla. Si hay una interrupción, por la presencia de una ficha en esa casilla, se entiende que está ocupada. Para determinar de qué pieza se trata se hace una comparación entre los cambios en las posiciones sensadas.

En este último se provee una solución completa a la accesibilidad de personas con limitaciones visuales al juego, en un tablero de este tipo la interacción jugador-tablero



(a) Tablero *Classic* de la compañía DGT [17].



(b) Tablero *Citrine* de la compañía Novag [19].



(c) Tablero de la marca *Brando*. [18].

Figura 10. Algunos tableros comerciales.

es por medio del tacto. Para evitar que las piezas sean derribadas se tiene una protuberancia en cada una de ellas que encaja en un agujero hecho en cada casilla, para distinguir el color de las casillas hay un pequeño relieve en las de color negro y para hacerlo con las piezas se tiene una cabeza de alfiler en la parte superior de las mismas.

Los tableros electrónicos más usados en competición son de marca *DGT* [17], estos pueden conectarse a un PC y por medio de un software recibir la información desde el tablero por puerto serial o USB (ver Figura 10a). Los tableros *Novag* [19] son, en su mayoría, hardware dedicado a jugar ajedrez (ver Figura 10b), no sólo cuentan con el tablero y el sistema de sensado sino que cuentan también con un algoritmo dedicado a jugar ajedrez [22], aunque también tienen tableros que pueden conectarse a un PC. Los tableros de ajedrez *Brando* son enrollables y tienen conexión USB, permiten jugar con el computador a partir del software que incluyen [18].

3. Metodología

La primera etapa que se abordó es la selección del sistema de sensado. Se pensó que un sistema de imán-sensor de efecto Hall era lo adecuado. Los criterios que se consideraron fundamentales en esta selección son:

- Bajo costo: se usaron 9 sensores por lo que tener dispositivos de bajo costo es importante.
- El emisor de señal que debe ir en la pieza debe ser pasivo, es decir, que no necesite alimentación.
- La señal debe sensarse a través de un medio material (la pieza y el tablero), el material de la ficha y el tablero no deben afectar notablemente la intensidad de la señal.
- El juego (tablero/piezas) debe tener el aspecto de un tablero tradicional.
- El emisor y el receptor no introducen cambios en el aspecto deseado para el tablero.

La selección del sistema de cómputo utilizado está determinada, principalmente, por el bajo costo y la cantidad de señales tanto digitales como analógicas (usadas en la determinación de las diferentes piezas). La manera de manejar el sensado en el tablero es organizando una matriz de sensores con alimentación común por cada columna y por fila se verifica la señal de respuesta (ver Figura 11), se activa la i -ésima columna y se lee en la j -ésima fila y así se determina qué ficha hay en la casilla \mathbf{ji} , con $i, j = 1, 2, 3$.

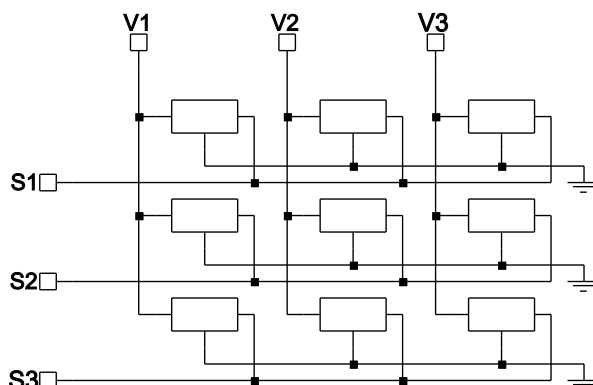


Figura 11. Esquema de distribución de los sensores en el tablero. Los rótulos V1, V2 y V3 representan los voltajes de alimentación para las diferentes columnas. Los rótulos S1, S2 y S3 corresponden a las salidas de los sensores en las diferentes filas.

Se consideraron varios tipos de sensores (algunas de las características principales están en la Tabla 1) como ópticos, magnéticos, acústicos, de presión e inductivos. [11]

Después de tener bien definidos los sistemas de sensado y cómputo se procedió a implementar el firmware y hardware necesario para alcanzar la funcionalidad requerida. Luego se pasó a hacer pruebas sobre un Modelo Funcional, conformado por el minitablero y el conjunto de piezas, para implementar por último un prototipo α .

3.1. Especificaciones de Diseño

Adicionalmente a la evaluación que se hizo de las técnicas de sensado se tuvieron en cuenta las Especificaciones de Diseño [23], en este caso se tienen los “Requerimientos” o necesidades y se les dio dos tipos de valoraciones “Demanda” (D) o “Deseo” (d) (ver Tabla 2). Esta información es útil para determinar qué restricciones se deben establecer al diseño que se piensa desarrollar.

Sistema	Ventajas	Desventajas
Sensores ópticos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bajo costo. ▪ Muy usados, numerosas implementaciones. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Necesidad de usar Materiales traslúcidos. ▪ Dificultad como dispositivo pasivo en las piezas, implica sensado por reflexión.
Sensores magnéticos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Facilidad para usarse a través de medios materiales. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pocos proveedores en el mercado local. ▪ Costosos.
Sensores acústicos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Variedad de sensores, precios y precisiones. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Longitudes de onda del orden de las dimensiones de las casillas lo cual tiene problemas de difracción.
Sensores de presión	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Posibilidad de sensar señales continuas de presión. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fácil deterioro por el uso normal del tablero. ▪ Afecta la conducta del juego al impedir que las personas puedan apoyarse sobre el tablero.
Sensores inductivos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gran sensibilidad. ▪ Fenómeno apreciable a través de medios materiales. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alta alinealidad en las señales.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de diferentes sistemas de sensado.

Demanda/Deseo - (D)/(d)	Requerimiento
(d)	Debe ser un tablero formado por una cuadrícula de 64 casillas o escaques
(D)	Las casillas deben tener un largo y ancho entre 5 y 6 cm.
(d)	Los colores de las piezas blancas y negras debe contrastar entre sí y ser unas más oscuras que otras.
(d)	La forma de las piezas debe permitir diferenciarlas.
(D)	El alto del rey debe ser de 9,5cm y el diámetro entre 40 y 50 % del alto
(D)	El material de las piezas debe tener apariencia de madera o plástico y el peso debe ser cómodo.
(d)	Debe haber un reloj que contabilice el tiempo de las jugadas.
(D)	El componente del sistema de sensado ubicado en las piezas no debe necesitar alimentación.
(D)	La señal debe sensarse a través de un medio material.
(D)	El juego debe tener aspecto de un tablero tradicional.
(D)	El emisor y el receptor no cambian el aspecto de los componentes.
(D)	Debe haber bajo consumo de potencia.
(D)	La velocidad de respuesta del tablero debe ser mayor a la de juego.

Tabla 2. Especificaciones de diseño. (D) representa una demanda, una necesidad que debe satisfacerse. (d) representa un deseo, una necesidad que se desearía se satisficiera.

4. Desarrollo

4.1. Hardware

Partiendo del tipo de sensado que iba a realizarse –por Efecto Hall– se inició el desarrollo del *hardware* del dispositivo. Los sensores usados fueron los *THS119*, los cuales tienen una salida diferencial y una sensibilidad de $800mV/T$ [24]. Paralelo a esto se realizó el proceso de selección de los imanes a utilizar basándose en una caracterización que se hizo de ellos.

4.1.1. Acondicionamiento de señal

Para obtener una señal adecuada para ingresar al microcontrolador se diseñó un circuito de acondicionamiento para los sensores Hall. Esto se hizo con un amplificador operacional en configuración de restador con una ganancia de $\frac{R2}{R1}$ (ver Figura 12). En la salida del operacional se tiene una señal igual a la diferencia de potencial entre las salidas del sensor multiplicada por el factor de ganancia que se tiene.

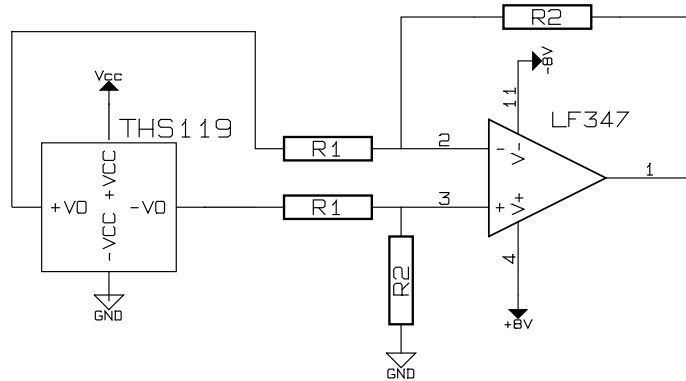


Figura 12. Circuito de acondicionamiento de los sensores Hall.

El valor de ganancia requerido queda determinado por el voltaje en el sensor – dependiente del tipo de imán usado– y del voltaje de entrada en el microcontrolador,

$$V_{OUT} = \frac{R2}{R1} V_{IN},$$

en donde V_{IN} , y V_{OUT} son los voltajes de entrada y de salida, respectivamente.

4.1.2. Selección del tipo de imán

Para definir los imanes a utilizar se realizó una caracterización de los mismos. Se partió de 7 imanes de Neodimio [25] cilíndricos con diferentes dimensiones (ver tabla 3).

Código Imán	Diámetro (mm)	Altura (mm)
D12A2	12	2
D15A4	15	4
D18A2	18	2
D18A4	18	4
D20A2	20	2
D21A1	21	1
D21A3	21	3

Tabla 3. Código asignado a los diferentes imanes caracterizados.

Las medidas realizadas a los imanes fueron de dos tipos: unas variando la distancia entre el imán y el sensor, ubicados en eje; otra fijando una distancia entre imán y sensor y variando la distancia entre ejes de simetría como se muestra en la Figura 13. Para la primera configuración se repitió la medida girando el imán en sentido contrario para invertir el valor del campo. En la Figura 14 pueden verse los valores medidos, del lado positivo y en eje, para los 7 tipos de imanes. Puede verse que el voltaje medido decrece cuando la distancia aumenta para todos los imanes.

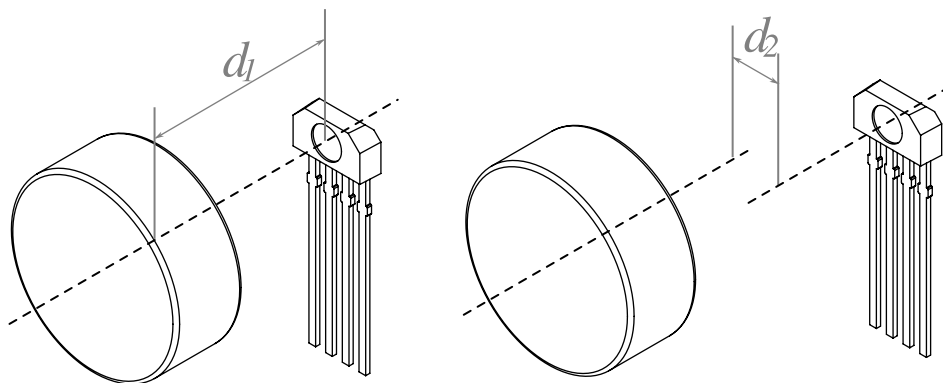


Figura 13. Configuración del par sensor-imán usada en la caracterización, d_1 representa la separación entre el imán y el sensor (en eje) y d_2 la distancia respecto al eje de simetría.

El tipo de imán seleccionado es el *D18A4* que tiene 18mm de diámetro y 4mm de altura. Se escogieron estos porque permiten tener hasta una separación de 16mm con

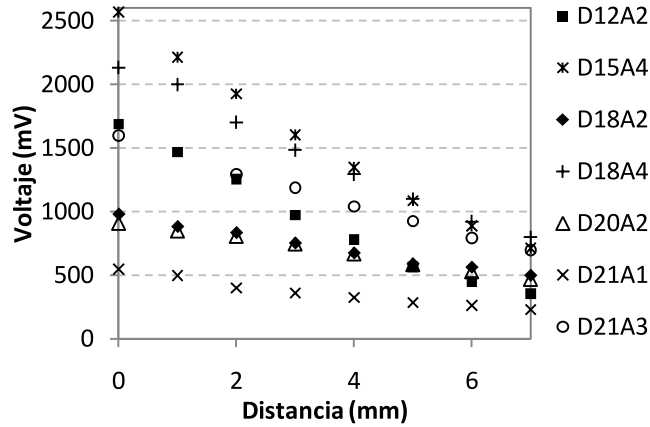
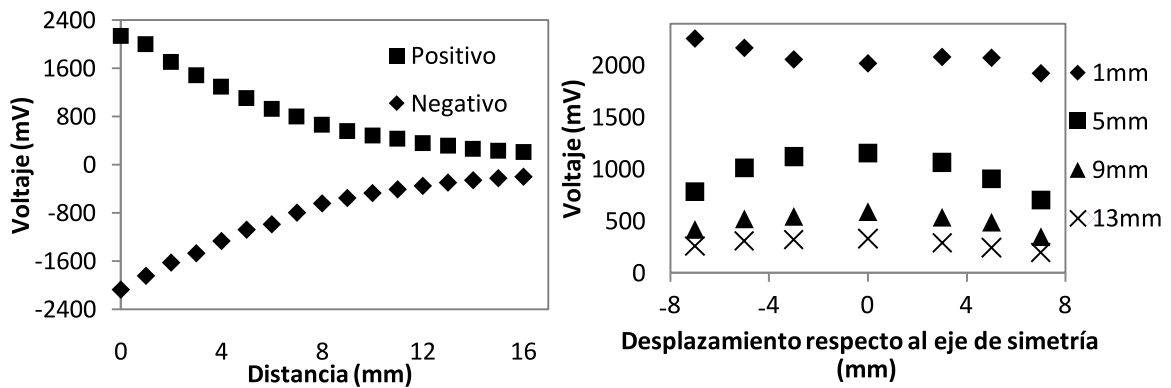


Figura 14. Datos medidos (en eje) para la parte positiva de los 7 tipos de imanes.



(a) Valores de voltaje para las medidas en eje para los imanes D18A4.

(b) Valores de voltaje para las medidas *perpendiculares al eje* para los imanes D18A4.

Figura 15. Medidas realizadas para los imanes del tipo D18A4 en las dos configuraciones planteadas (ver Figura 13).

un valor de voltaje mayor a 200mV (ver Figura 15a). En la Figura 15b se presentan las medidas para el mismo tipo de imán variando la distancia entre los ejes de simetría (como se plantea en la Figura 13), de esta configuración se pudo establecer que este tipo de imanes podría permitir un desalineamiento horizontal de 4mm , esto permite que el juego se desarrolle de manera natural al no tener que garantizarse el alineamiento entre el imán (que estaría ubicado coaxialmente con la pieza) y el sensor (que estaría en el centro de cada casilla).

Para garantizar que las medidas realizadas fueran confiables para representar el comportamiento de un tipo particular de imán, se hicieron medidas de voltaje de sensorado Hall versus separación en eje sobre 7 imanes idénticos y se comparó el grado de dispersión de las medidas. A partir de estas medidas se obtuvieron los valores mínimo,

máximo y promedio del voltaje de sensado Hall para cada separación (ver Figura 16). Los tres valores fueron muy próximos y por ello puede afirmarse que un imán representa a todos los que tengan sus mismas dimensiones.

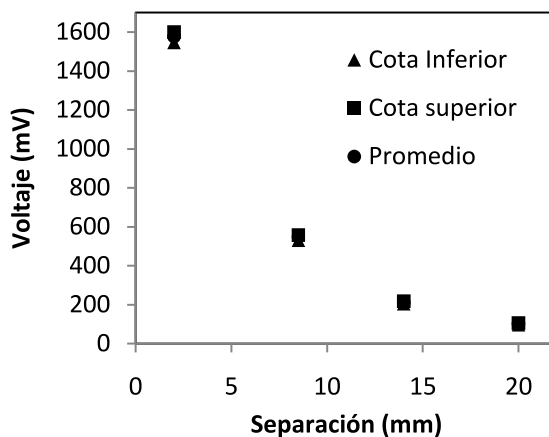


Figura 16. Valores medidos para 7 imanes con la misma geometría (*D18A4*). Los cuadros representan los valores máximos, los triángulos representan los valores mínimos y los círculos representan los valores medios.

4.1.3. Sistema de sensado

Luego de haber implementado el circuito de acondicionamiento de señal para el sensor y de haber seleccionado el imán adecuado se planteó el sistema de sensado compuesto por el par sensor-imán. Los imanes *D18A4* se ubicaron en las piezas fabricadas a diferentes profundidades (ver Figura 17), los sensores se dispusieron en el centro de cada casilla de un tablero 3×3 a una misma profundidad (ver Figura 18). Debido a que los imanes ubicados en unas piezas están más alejados que otros del dispositivo Hall se puede hacer una asignación de los diferentes valores de voltaje a las diferentes piezas.

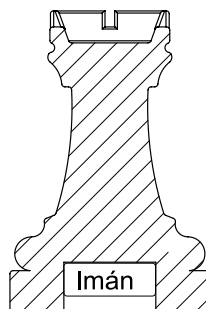


Figura 17. Ubicación de los imanes al interior de las piezas.

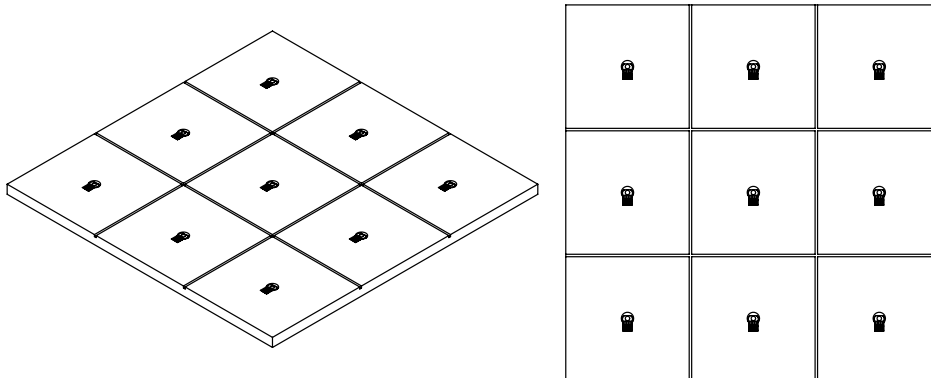


Figura 18. Ubicación de los sensores en el tablero.



Figura 19. Ubicación de los imanes al interior de las piezas fabricadas. Se construyeron en madera (abarco) debido a los requerimientos de apariencia de la FIDE.

En la Figura 20 puede verse un esquema de cómo se configuraron los 9 sistemas de sensado para todas las casillas, como se había mencionado anteriormente la profundidad de la perforación en la pieza permite jugar con la intensidad del campo magnético que llega al sensor Hall y por tanto se tiene un valor mayor o menor de voltaje a la salida del circuito de acondicionamiento de señal, variando el signo dependiendo de la orientación del imán. Se tienen entonces 9 señales de salida, cada una correspondiente al estado de una de las casillas. La Figura 19 muestra una foto de las piezas e imanes incrustados en 2 de ellas, fueron fabricadas en madera para seguir los requerimientos de aspecto planteados por la FIDE [1] (La Tabla 4 contiene las dimensiones más relevantes de estas piezas).

Como ya se mencionó anteriormente la diferenciación de los tipos de piezas se hace con las diferencias en el valor de campo magnético sensado en el dispositivo Hall,

Pieza	Alto (mm)	Diámetro (mm)
Peón	40	58
Alfil	40	71
Caballo	40	62
Torre	41	62
Dama	41	79
Rey	45	87

Tabla 4. Dimensiones de las piezas.

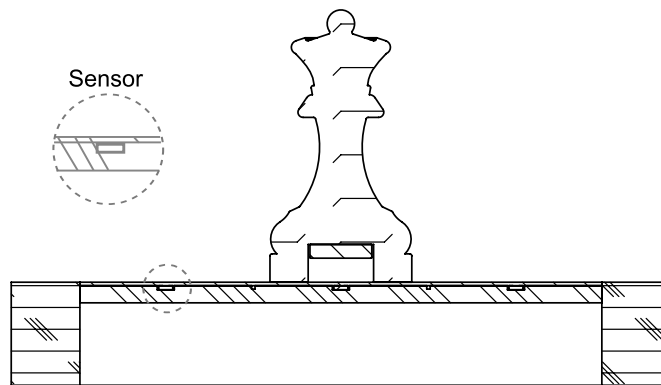


Figura 20. Vista de corte de un tablero con los sensores ya ubicados y una pieza con el imán en su interior. Haciendo variar la profundidad de la perforación se pueden identificar las piezas.

también se mencionó que la variación de campo se obtiene incrustando a diferentes alturas los imanes en las piezas. En la Tabla 5 se muestran las profundidades deseadas para los diferentes tipos de piezas y las profundidades obtenidas en la práctica, estas discrepancias se deben a la precisión que se tiene sobre los procesos de maquinado de madera.

4.1.4. Electrónica

La electrónica que se desarrolló se puede dividir en:

- **Cicuito Base del microcontrolador**

La demanda sobre el microcontrolador es de: 3 entradas analógicas para la señal sensada, 3 salidas digitales para controlar la alimentación de la matriz de sensores y 2 bits para la comunicación serial. En la Figura 21 se puede ver el circuito implementado para el microcontrolador PIC16F873A.

Pieza	P. Esperada (mm)	P. Real (mm)
Peón Blanco	4,0	4,3
Peón Negro	4,0	4,4
Alfil Blanco	5,5	5,8
Alfil Negro	5,5	5,0
Caballo Blanco	7,0	7,5
Caballo Negro	7,0	7,2
Torre Blanca	9,0	8,5
Torre Negra	9,0	8,5
Dama Blanca	11,0	10,6
Dama Negra	13,0	10,3
Rey Blanco	13,0	12,3
Rey Negro	13,0	12,5

Tabla 5. Profundidades de perforación en las diferentes piezas.

- **Circuito de comunicación serial**

El circuito de comunicación serial corresponde a una aplicación típica del circuito integrado *MAX232* [26], el circuito esquemático puede verse en la Figura 22.

- **Tarjeta para el manejo del sensado**

Inicialmente se había planteado tener los sensores conectados en serie por columna y en paralelo por fila para hacer el sensado, haciendo variar la activación de las columnas para así obtener la información de todo el tablero (ver Figura 11 en la página 14). Esta configuración se probó pero no funcionó adecuadamente pues el valor de voltaje en un sensor dependía de la excitación magnética que sufrieran los otros de la misma fila. La interacción entre los dispositivos Hall se evidenció en presencia y ausencia de voltaje de alimentación.

Para evitar que se interfiriera el funcionamiento de los diferentes sensores se añadió un amplificador restador (como el de la Figura 12) a cada uno de ellos para luego llevar la señal de salida de este primer circuito a un sumador inversor con una señal de *offset* de $2,5V$ para obtener a la salida una variación entre 0 y $5V$ (ver Figura 23), adecuada para ser ingresada al microcontrolador por el conversor analógico-digital.

Se cuenta entonces con 4 amplificadores operacionales por cada fila, 1 por cada casilla de la misma y 1 adicional para la suma de las señales provenientes de estos. Se utilizaron integrados de la referencia *LF347* que contiene 4 amplificadores operacionales internamente, éste tiene las mismas características de funcionamiento que el *LF353* –el cual contiene 2 amplificadores por integrado.

Para el prototipo de tablero se tienen 3 circuitos como el de la Figura 23, uno por fila. La forma de obtener el estado del tablero es cambiar la activación por columna y sensar la señal obtenida para cada una de las filas. La multiplexación de

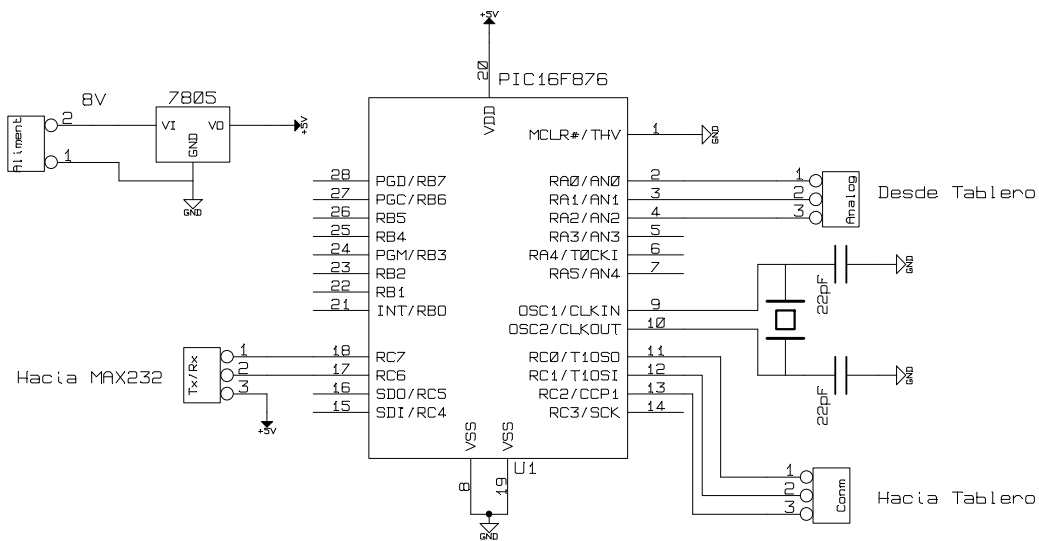


Figura 21. Circuito implementado para el microcontrolador. Tiene como entrada las señales provenientes de los sensores, como salida la activación de las casillas y adicionalmente la comunicación serial.

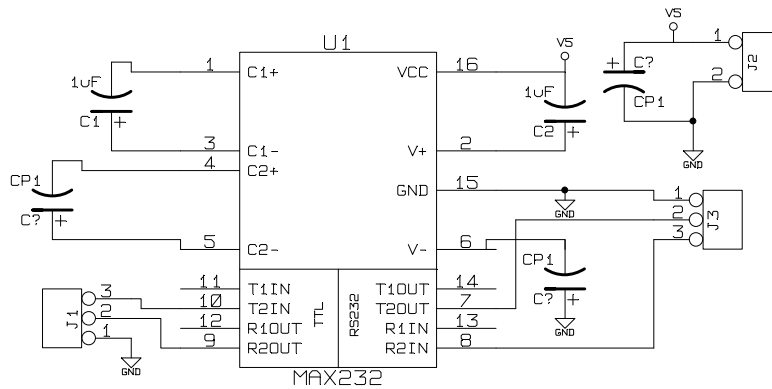


Figura 22. Circuito de comunicación serial.

la señal de activación se hizo con 3 bits del microcontrolador conectados cada uno a un transistor que opera en corte y saturación (activándose sólo uno a la vez). La lectura del estado del tablero se hizo conectando la salida de cada amplificador sumador a un terminal del puerto A del microcontrolador de donde toma la señal el A/D [9, 13], esto se muestra en la Figura 24.

Para ordenar los sensores en columnas y hacer variar su alimentación se usaron transistores en corte y saturación, y se ubicaron los sensores en serie (Figura 25a) y en paralelo (Figura 25b) para contrastar su comportamiento. Para decidir cuál configuración utilizar se midieron los consumos de corriente (i) y la relación

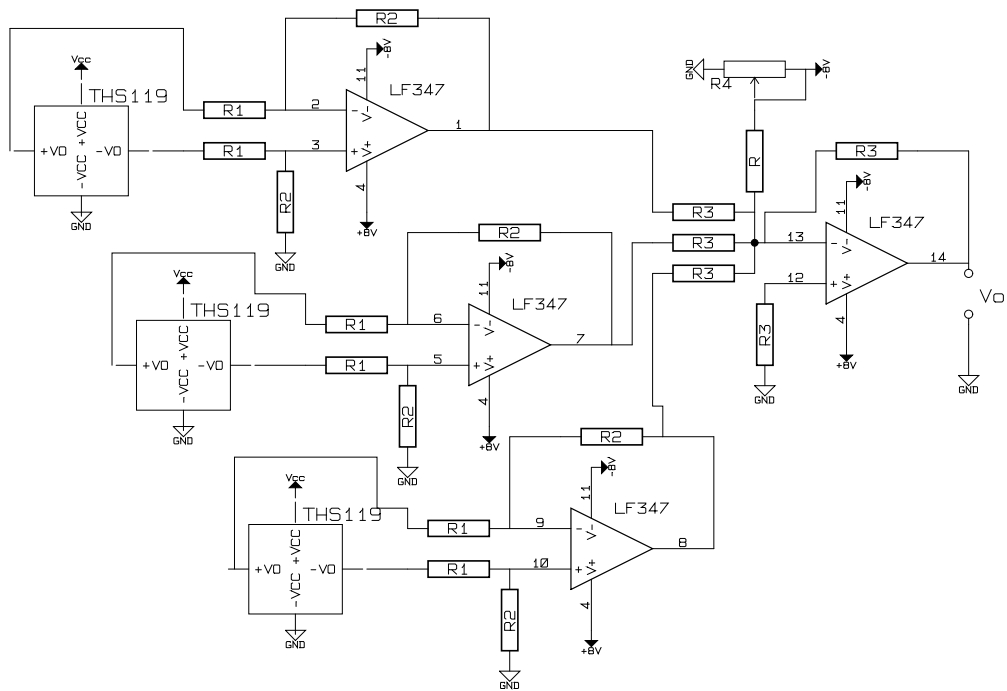


Figura 23. Circuito de acondicionamiento de los sensores Hall de una misma Fila.

señal/ruido (SNR) de cada configuración, los valores obtenidos fueron:

$$i_{serie} = 10mA \quad SNR_{serie} = 37,07dB \quad (6)$$

$$i_{paralelo} = 15mA \quad SNR_{paralelo} = 33,70dB, \quad (7)$$

los sensores en serie consumen menos corriente y tienen una relación señal/ruido mayor y por esto se ubicaron de esta forma.

- **Fuente de alimentación del sistema**

Ya que la señal obtenida de los sensores podía ser positiva o negativa los amplificadores operacionales debían estar alimentados con señales duales y por esto se implementó una fuente de voltaje dual. El consumo de corriente que se calculó es de $102mA$, en la práctica se tuvo un consumo de $106mA$. La fuente implementada puede entregar hasta $450mA$, que es el limitante que establece el transformador que se está usando ($T504$).

En la Figura 27 pueden verse fotos de la electrónica implementada (Figura 27a) y de la carcasa del tablero (Figura 27b)

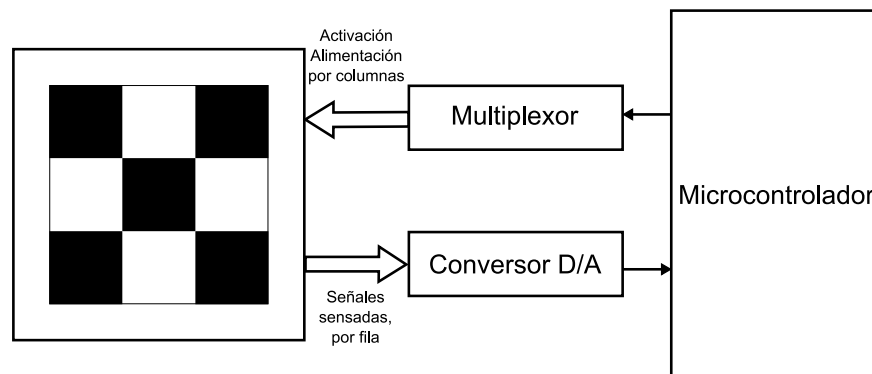


Figura 24. Esquema de manejo del sensor.

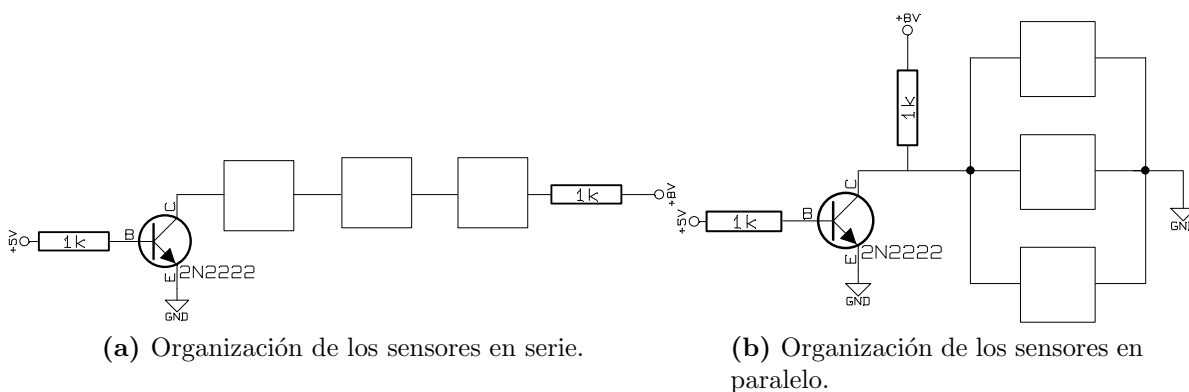


Figura 25. Organización de los sensores en serie y en paralelo con un transistor configurado en corte y saturación, para su activación por filas. En el primer caso la activación se da en alto y el segundo en bajo.

4.2. Software

Las soluciones de software que se implementaron podrían dividirse en dos, una es el *firmware* o software para el microcontrolador y otra es el software que se usaría en el PC para la recepción y visualización de datos.

4.2.1. Algoritmo del Microcontrolador (PIC)

En un tablero de ajedrez se tiene una cuadrícula de 8×8 en la cual se distribuyen las piezas a lo largo de la partida. A la distribución de piezas sobre el tablero se le denomina posición.

Se ubicaron 9 sensores, uno por cada casilla (ver Figura 11, en la página 14). Para

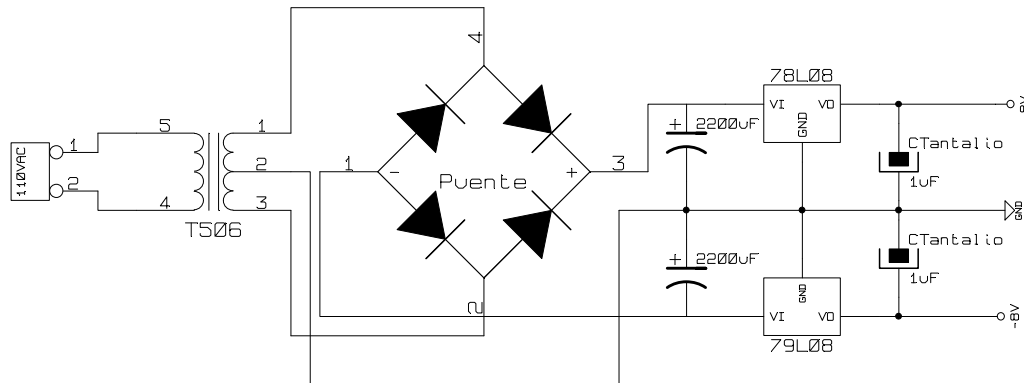


Figura 26. Fuente de voltaje dual implementada.

identificar qué piezas hay ubicadas se realiza la siguiente secuencia (ver Figura 25):

1. Se activa la primera columna.
2. Se lee el valor de voltaje que existe en la primera fila.
3. Se lee la siguiente fila, se repite el paso 2 (hasta llegar a la fila 3).
4. Se activa la siguiente columna (hasta llegar a la columna 3).
5. Se repiten los pasos 2 a 4.
6. Se envía la posición a un PC por puerto serial (RS232).
7. Se repiten los pasos 1 a 7.

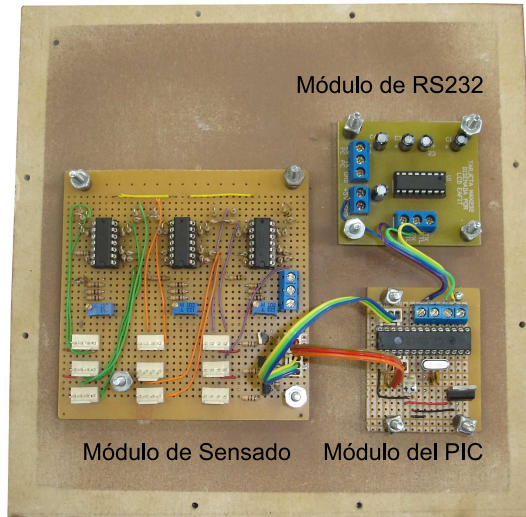
La subrutina “LECTURA” del diagrama de flujo de la Figura 28 recibe como entrada un número entero entre 0 y $n - 1$ que representa la fila a ser leída en el tablero y devuelve un carácter que corresponde a la pieza que se identificó en esa fila. Para este caso n es igual a 3 (en un tablero de ajedrez convencional n es 8).

Como se vió en la Tabla 2 es importante que el sistema responda más rápido de lo que lo haría un jugador normalmente. Se analizó el tiempo que se tarda en hacer la conversión analógica-digital de todo el tablero y en enviar la cadena de caracteres por RS232 [13]. La señal de reloj que se usó para el microcontrolador tiene una frecuencia (F_{OSC}) de $4MHz$, el tiempo de ejecución de instrucción es $T_{CY} = 4/F_{OSC} = 1\mu s$. Para adquirir un valor de voltaje, de $10bits$ se tiene

$$T_{AD10} = 24\mu s,$$

para n^2 casillas, despreciando otras instrucciones,

$$T_n = 24n^2\mu s. \tag{8}$$



(a) Foto de los circuitos implementados.



(b) Foto del tablero. Al interior se encuentran los circuitos del microcontrolador, de sensado y de comunicación serial.

Figura 27. Fotos de los circuitos y del tablero desarrollados.

Como en este caso $n = 3$, $T_n = 216\mu s$, en la etapa siguiente se tiene una cadena de caracteres de longitud n^2 para ser transmitida por RS232. Siendo la velocidad de transmisión V_{TX} (en baudios) se puede expresar el tiempo de transmisión como

$$T_{TX} = \frac{8n^2}{V_{TX}}, \quad (9)$$

tomando $n = 3$ y $V_{TX} = 9600\text{baud}$, $T_{TX} = 7,5\text{ms}$. El tiempo que se toma leer el estado del tablero y transmitirlo es entonces

$$T_{TOTAL} = T_3 + T_{TX} = 7,72\text{ms}. \quad (10)$$

En un juego de ajedrez común se realizan menos de 4 jugadas por segundo [7], lo que implica un tiempo de jugada de $T_J = 250\text{ms}$ que es mucho mayor que T_{TOTAL} .

Para la visualización del estado del tablero se implementó una interfaz en LabVIEW®. La idea era tener un programa sencillo que permitiera ver la distribución de las piezas [27], pues ya existe gran cantidad de software para ello que incluso permite la conexión de tableros electrónicos tanto comerciales [28, 29, 30, 31] como libres [32]. Otro programa libre que se podría usar para esta labor, ampliándolo para que permita la conexión con el tablero, es *WinBoard/XBoard* [33, 34] que es bastante popular y es mantenido por la *Free Software Foundation*, además de correr en varios sistemas operativos como Windows, Linux y Mac OS X.

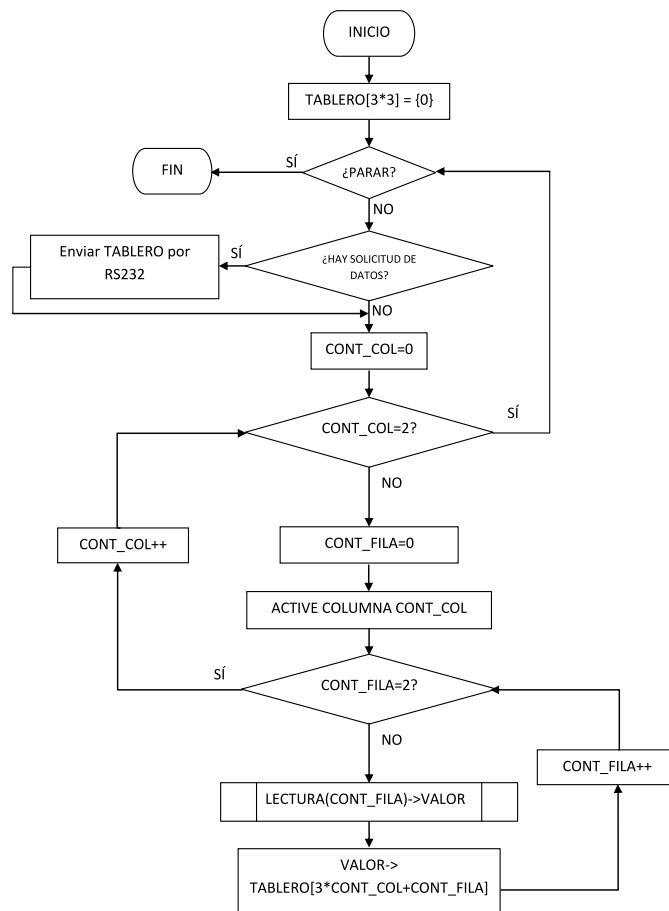


Figura 28. Diagrama de flujo del algoritmo realizado al interior del microcontrolador PIC.

4.3. Escalamiento

El prototipo desarrollado fue para un tablero 3×3 , sin embargo la metodología seguida permite hacer el escalamiento a uno común. El sistema para un tablero tradicional tendría las siguientes diferencias:

- *Tamaño:* ya no sería 3×3 sino 8×8 .
- *Cantidad de sensores:* al haber crecido el tamaño habría que ubicar un sensor en cada casilla de 64 en total.
- *Activación de columnas:* para el tablero 3×3 se planteó usar 3 bits del microcontrolador con transistores en corte y saturación por cada uno. Para el tablero completo se necesitarían 8 bits para esto. Se propone entonces usar un decodificador n a 2^n (como el 74LS138): de esta forma para la activación de las 8 columnas sólo se necesitan 3 bits.

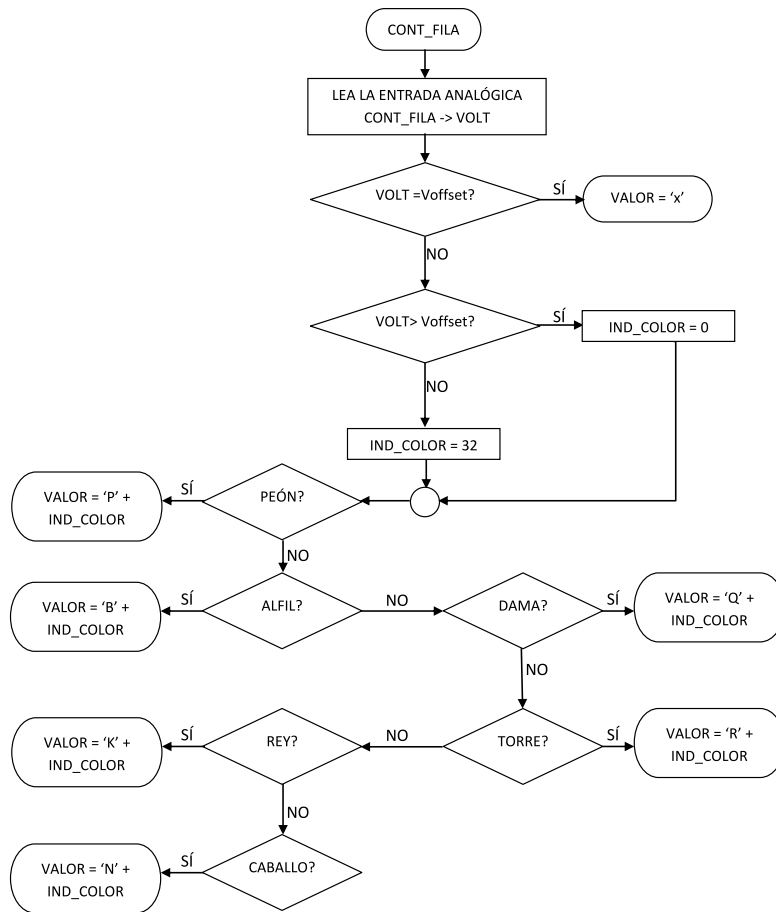


Figura 29. Diagrama de flujo del algoritmo realizado al interior del microcontrolador PIC. Subrutina LECTURA.

- *Lectura de las filas:* el prototipo requiere de 3 terminales que provean conversión A/D, esto se logra con un microcontrolador *PIC16F873A* que tiene 5 entradas analógicas. Para el tablero común se necesitarían 8 entradas analógicas lo que se logra reemplazando el microcontrolador por un *PIC16F877A* [13].

Adicionalmente habría que hacer unos ajustes en la algoritmia planteada para que recorra el tablero y envíe por comunicación serial el estado completos. Se verificó además que el tiempo de adquisición (T_n , ver eq 8) y envío del tablero (T_{TX} , ver eq 9) fuera menor que el tiempo por jugada. En el caso de $n = 8$ y $V_{TX} = 9600baud$ se tiene

$$T_8 = 1,54ms$$

$$T_{TX} = 53ms$$

$$T_{TOTAL} = 54,4ms.$$

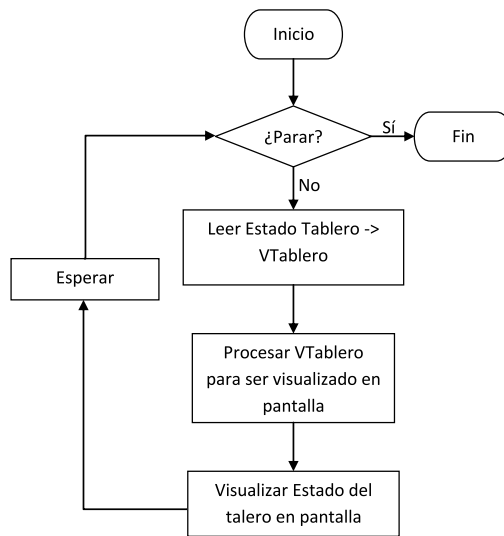


Figura 30. Diagrama de flujo del software implementado para el PC.

4.4. Resultados y discusión

En la sección *Selección del tipo de imán* se mencionó que el imán seleccionado permite un desalineamiento de $4mm$, un esquema de esto se presenta en la Figura 31 en donde puede verse una región en la cual puede considerarse que la pieza es identificada. Para piezas de $4cm$ de diámetro en la base el desalineamiento vertical y horizontal en la casilla permite llevarla hasta los extremos de la misma, en diagonal no pasa lo mismo pues este desalineamiento sería de $5,7mm$ que está por fuera del rango establecido.

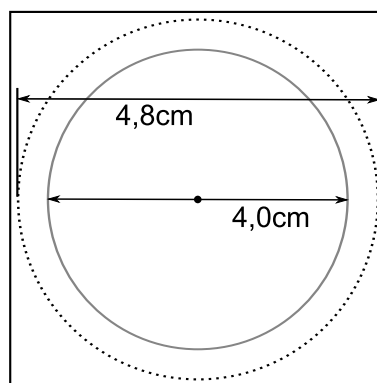


Figura 31. Desalineamiento admisible por pieza en tamaño real. Para una pieza de $4cm$ de diámetro en la base la circunferencia punteada encierra la región dentro de la cual es admisible el desalineamiento.

Para lograr obtener los voltajes de identificación se hicieron medidas sobre el prototipo una vez ensamblado, estableciéndose luego un conjunto de intervalos de voltaje en

los cuales quedaban representados los 13 estados diferentes de cada casilla (ver Tabla 6).

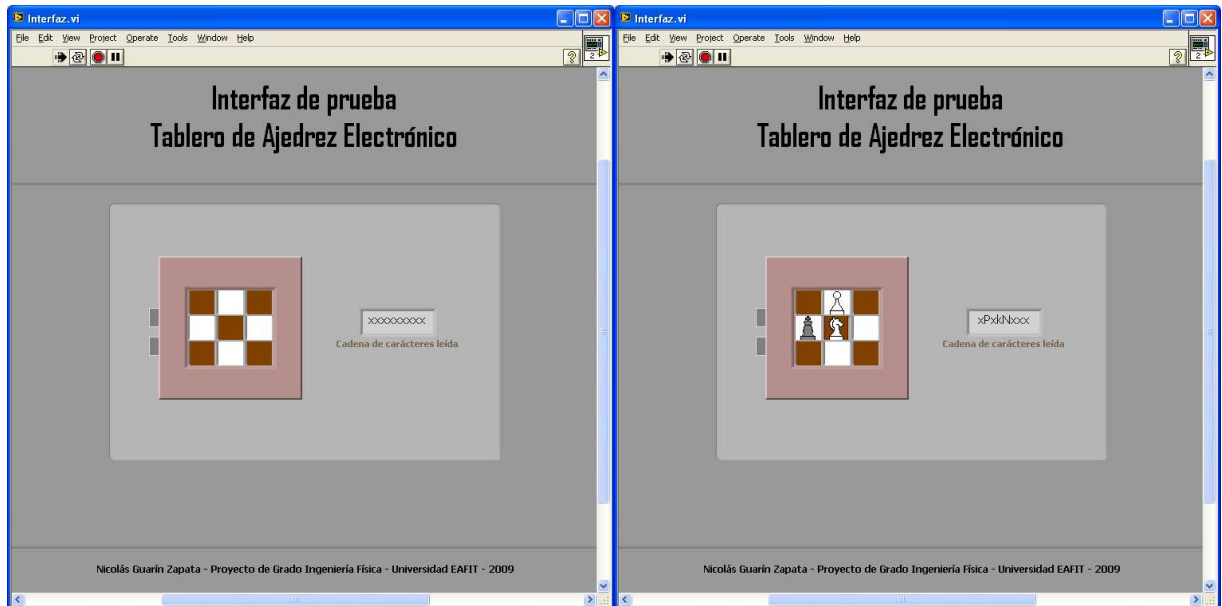
Pieza	Voltaje mínimo (V)	Voltaje máximo (V)
Peón Blanco	0,00	0,79
Alfil Blanco	0,80	1,01
Caballo Blanco	1,02	1,30
Torre Blanca	1,31	1,65
Dama Blanca	1,66	1,88
Rey Blanco	1,89	2,00
Peón Negro	4,50	5,00
Alfil Negro	4,10	4,49
Caballo Negro	3,70	4,09
Torre Negra	3,45	3,69
Dama Negra	3,16	3,44
Rey Negro	2,90	3,15
Casilla Vacía	2,01	2,89

Tabla 6. Intervalos de voltaje asignados a los diferentes estados de casilla.

Los intervalos de voltaje no son simétricos respecto al voltaje de offset de $2,5V$ debido a las discrepancias en la profundidad de las perforaciones obtenidas (ver Tabla 5). La resolución que se tiene en el convertor configurado en $10bits$ y $5V$ de referencia es de $4,9mV$, menor que la cifra menos significativa de los valores presentados en la Tabla 6.

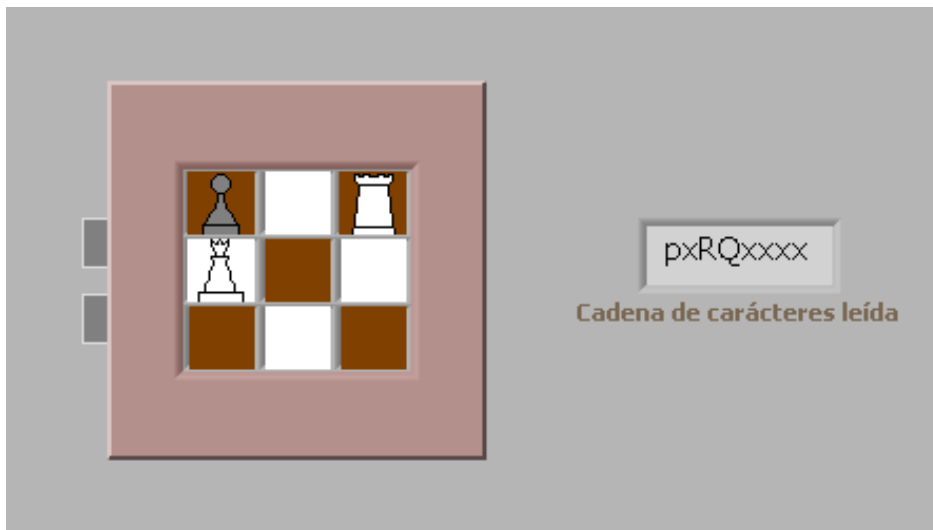
La interfaz que se implementó en LabVIEW[®] se muestra en la Figura 32, en esta puede verse una cuadrícula sobre la cual se dibuja el estado y está cambiando a medida que la distribución de piezas sobre el tablero cambia (Figura 32a), incluye también un campo en el cual se puede ver la cadena de caracteres que recibe el PC por el puerto serial desde el microcontrolador (Figura 32b).

Como se mencionó en la parte inicial del documento el proyecto buscaba construir un kit, este contiene: el tablero con la electrónica en su interior, las piezas con los imanes incrustados en ellas, y una fuente de voltaje que se conecta a la red eléctrica ($120V_{AC}$ - $60Hz$). En la Figura 33 puede verse una foto del kit real, con todas sus componentes.



(a) Interfaz gráfica, con el tablero vacío.

(b) Interfaz gráfica, con algunas piezas en el tablero. Puede verse el cambio en la cadena de caracteres respecto al tablero vacío.



(c) Detalle de la interfaz. A la izquierda se tiene una representación del tablero, a la derecha la cadena de caracteres que se envió desde el microcontrolador y que representa la posición.

Figura 32. Interfaz implementada en LabVIEW ® para la visualización.



Figura 33. Componentes desarrolladas para el prototipo.

5. Conclusiones

Se diseñó e implementó un prototipo funcional de tablero de Ajedrez, el cual permite identificar la posición y el tipo de piezas al interior de éste.

Se identificaron las piezas usando campo magnético ya que permite ser detectado a través de medios materiales. El sistema de sensado escogido fue la pareja imán-sensor Hall, pues brinda una salida de voltaje analógica proporcional a la magnitud del campo magnético que le llegue y además permite manipular con la polaridad de la señal invirtiendo el signo del campo, lo que permite duplicar la cantidad de estados a representar.

El sistema se desarrolló con componentes asequibles localmente. Esto, sumado a la caracterización realizada a los imanes permite que el prototipo sea reproducible.

Para el procesamiento de las señales sensadas se utilizó un microcontrolador PIC16F873A, el cual realiza las tareas de conversión Analógica-Digital, procesamiento de las señales, codificación del estado del tablero y transmisión de los datos a un PC usando la interfaz RS232.

El tablero permite una identificación de las piezas con un desalineamiento de hasta $4mm$ respecto al centro de cada casilla.

Se propuso el escalamiento de este sistema 3×3 a uno convencional (8×8).

Este trabajo constituye un aporte al desarrollo de instrumentación dedicada a fines deportivos, específicamente en el Ajedrez.

Referencias

- [1] World Chess Federation. Handbook. <http://www.fide.com/info/handbook>.
- [2] Leigh Bramall. Simulating swimwear for increased speed. *ANSYS Advantage*, Vol. II, Issue 2, 2008. <http://www.ansys.com/magazine/issues/06-12-2008-ansys-advantage/01-sports.pdf>.
- [3] Chris Hardee. Faster, higher, stronger. *ANSYS Advantage*, Vol. II, Issue 3, 2008. <http://www.ansys.com/magazine/issues/9-22-2008-ansys-advantage/01-sports.pdf>.
- [4] Wikipedia. Game clock — wikipedia, the free encyclopedia, 2008. [Internet; descargado 1-diciembre-2008].
- [5] R. W. Hamming. Intellectual implications of the computer revolution. *The American Mathematical Monthly*, Vol. 70, No. 1, Enero 1963. <http://www.jstor.org/stable/2312776>.
- [6] Claude Shannon. Programming a computer for playing chess. *Philosophical Magazine*, Ser. 7, Vol. 41, No. 314, Marzo 1950. http://archive.computerhistory.org/projects/chess/related_materials/text/2-0and2-1.Programming_a_computer_for_playing_chess.shannon/2-0and2-1.Programming_a_computer_for_playing_chess.shannon.062303002.pdf.
- [7] Wikipedia. Ajedrez — wikipedia, la enciclopedia libre, 2008. [Internet; descargado 8-noviembre-2008].
- [8] Robert J. Fischer. United states patent 4884255- digital chess clock, 1989. [Internet; descargado 3-diciembre-2008].
- [9] Eugenio Martín Cuenca, José Angulo Usategui, and Ignacio Angulo Martínez. *Microcontroladores PIC*, chapter 1. Thomson Learning, 2001.
- [10] Ronald S. Tocci, Neal S. Widmer, and Gregory L. Moss. *Sistemas digitales: Principios y Aplicaciones*, chapter 1. Pearson, México DF. Ed. 10, 2007.
- [11] Miguel A. Pérez García, Juan C. Álvarez Antón, and Juan C. Campo Rodríguez. *Instrumentación electrónica*, chapter 1,5-19. Thomson, 2004.
- [12] William Bolton. *Instrumentation and control systems*, chapter 1. Elsevier, 2004.
- [13] Microchip Technology Inc. *PIC16F87XA Data Sheet*, 2003.
- [14] James P. Schaffer, Ashok Saxena, Stephen D. Antolovich, Jr. Thomas H. Sanders, and Steven B. Warner. *Ciencia y Diseño de Materiales para Ingeniería*, chapter 11, 12. Compañía Editorial Continental, México DF, 2000.
- [15] Honeywell International Inc. Hall effect sensing and application.

- [16] Raymond A. Serway and Robert J. Beichner. *Física para Ciencias e Ingeniería*, chapter 29, 30. McGraw-Hill, México DF, 2000.
- [17] DGT. Electronic boards. [Internet; descargado 3-mayo-2009].
- [18] Brando Workshop. Usb chess game. [Internet; descargado 3-mayo-2009].
- [19] Novag.net. Novag.net. [Internet; descargado 3-mayo-2009].
- [20] Carlos Vidal García. Gestión basada en microcontrolador de un tablero de ajedrez para ciegos. Ingeniería Técnica Industrial en Electrónica Industrial, Universitat Rovira I Virgili, 2005. <http://sauron.etse.urv.es/public/propostes/pub/pdf/437pub.pdf>.
- [21] Mauricio Lotero Suárez and Andrés Felipe Martínez Moreno. Camelot. aplicación y tablero de ajedrez acondicionado para la visualización y registro de las partidas. Ingeniería de Sistemas, Universidad EAFIT, 2000.
- [22] Wikipedia. Motor de ajedrez — wikipedia, la enciclopedia libre, 2008. [Internet; descargado 8-noviembre-2008].
- [23] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, and K. H. Grote. *Engineering design: a systematic approach*. ISBN 1846283183. Springer, 2007.
- [24] Toshiba Corporation. *THS119 Datasheet*, 2003.
- [25] J.F. Herbst y J.J. Croa. Neodymium-iron-boron permanent magnets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, p 57-78, 1991.
- [26] Texas Instruments Incorporated. *MAX232 Datasheet*, 2004.
- [27] National Instruments Corporation. Customizing controls using a picture ring - developer zone - national instruments. [Internet; descargado 17-abril-2009].
- [28] Lokasoft. Chesspartner a strong chessgame for w95/98/nt/xp - lokasoft. [Internet; descargado 8-agosto-2009].
- [29] ChessBase. Chessbase shop - fritz 12. [Internet; descargado 8-agosto-2009].
- [30] Stefan Meyer-Kahlen. Shredder computer chess download. [Internet; descargado 8-agosto-2009].
- [31] Stefan Meyer-Kahlen. *Shredder User Manual*, 2008.
- [32] Free chess graphical user interface (gui) arena for chess engines. [Internet; descargado 8-agosto-2009].
- [33] Free Software Foundation. Xboard - gnu project - free software foundation. [Internet; descargado 8-agosto-2009].
- [34] Free Software Foundation. *Xboard User Manual*, 2009.

Anexos

Anexo A. Código del programa del microcontrolador

Se incluye el código del programa del microcontrolador. Este fue desarrollado en PIC C Compiler ®.

```
/*  
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
```

```
Programa Tablero.c  
Nicolas Guarin - 2009
```

```
Este programa realiza la adquisicion de las señales de voltaje provenientes del  
prototipo de tablero de ajedrez electronico (3x3), las convierte a caracteres,  
organiza la informacion en una cadena de caracteres y luego la envia por RS232  
hacia un PC. Cuando recibe el caracter 'E', realiza la lectura del estado del  
tablero y envia la cadena.
```

```
El tablero se representa en una cadena de longitud 9, los caracteres representan:
```

```
* 'P' —> Peon Blanco  
* 'B' —> Alfil Blanco  
* 'N' —> Caballo Blanco  
* 'R' —> Torre Blanca  
* 'Q' —> Dama Blanca  
* 'K' —> Rey Blanco  
* 'p' —> Peon Negro  
* 'b' —> Alfil Negro  
* 'n' —> Caballo Negro  
* 'r' —> Torre Negra  
* 'q' —> Dama Negra  
* 'k' —> Rey Negro  
* 'x' —> Casilla Vacia
```

```
Los caracteres usados son los que normalmente se usan para representar las piezas  
en ingles.
```

```
Ejemplo de cadena: "xxPrxNBxq"
```

```
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
```

```
Ultima Revision: Octubre 26 2009  
Revisado Por: Nicolas Guarin
```

```
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////  
*/
```

```
// Inicio encabezado  
#include <16F873A.h>  
#device adc=10//Se configura la adquisicion de señales a 10bits.  
#use delay(clock=4000000)// Se configura el reloj a 4MHz.  
#use RS232(BAUD=9600,XMIT=pin_c6 ,RCV=pin_c7)  
// Se configura ala comunicaci3n serial  
/* BAUD es la velocidad de transmision en Baudios (bits por segundo)  
XMIT es el bit de transmisi3n Tx  
RCV es el bit que recibe Rx  
*/
```

```

#fuses XT,NOPROTECT,NOWDT,NOBROWNOUT,NOPUT,NOLVP
#byte porta= 5// Llama porta a la posicion de memoria 5
#byte portb= 6// Llama porta a la posicion de memoria 6
#byte portc= 7// Llama porta a la posicion de memoria 7
// Fin encabezado

int i,j;// Contadores usados en el ciclo de recorres el tablero en la funcion main

char bandera_envio, // Variable que representa la peticion de envio
estado[10]; // Cadena de caracteres que representa el estado del tablero

byte const activacion[3]= // Usada para activar diferentes filas del tablero electronico.
{0B00100000, // Activa la fila 1 (terminal B5)
0B01000000, // Activa la fila 2 (terminal B6)
0B10000000}; // Activa la fila 3 (terminal B7)

float const resolucion=5.0/1023.0; // Resolucion de voltaje del conversor A/D.

// Se definen los intervalos de voltaje para las piezas
float const minVoltaje[13]={0.00, 0.80, 1.02, 1.31, 1.66, 1.89, 4.50, 4.10, 3.70,
3.45, 3.16, 2.90, 2.01};

float const maxVoltaje[13]={0.79, 1.01, 1.30, 1.65, 1.88, 2.00, 5.00, 4.49, 4.09,
3.69, 3.44, 3.15, 2.89};

// Se definen los caracteres que corresponden a las piezas de acuerdo al orden
// de los intervalos
char const piezas[13]={'P', 'B', 'N', 'R', 'Q', 'K', 'p', 'b', 'n', 'r', 'q',
'k', 'x'};

// Funcion de identificacion de las piezas
char identificacion(float volt){
/* Recibe como entrada el valor de voltaje medido y verifica en que intervalo de
voltaje esta y asigna el caracter que corresponde.
ENTRADA: float volt
SALIDA : char pieza
*/
int k;
char pieza;

for(k=0;k<13;k++){

if(volt>=minVoltaje[k] && volt<=maxVoltaje[k]){

pieza=piezas[k];

}

}

return pieza;

}

//
void main(){
set_tris_b(0); //Se configura el puerto B como puerto de salida

set_tris_c(0b10111111); // Se configura el puerto C con la terminal C6 de
// entrada (repcion de RS232) y el resto de salida.

setup_adc_ports( ALLANALOG ); // Se configura la entrada RA0,RA1, RA2 como una

```

```

// entrada analógica.

setup_adc(adc_clock_internal); // Se configura el reloj A/D como el reloj
// interno del micro.

estado[9]='\0'; // Ubico el caracter nulo al final de la cadena, para
// poder hacer la transmision.

//
while(true){
    do{ // Verificacion de solicitud
        bandera_envio=getc();
    }while(bandera_envio!='E');

    // Rutina de lectura
    for(i=0;i<3;i++){ // i representa las filas
        portb=activacion[i];
        for(j=0;j<3;j++){ // j representa las columnas
            set_adc_channel(j); // Configuro la ADC en RA0
            estado[3*i+j]=identificacion((float)read_adc()*resolucion);
        }
    }
    printf(estado);
}
}

```

Anexo B. Artículo sometido a evaluación

Producto del trabajo de grado se generó un artículo que se encuentra en evaluación para publicación en la Revista Colombiana de Física.

El artículo se incluye en este anexo.

Anexo C. Planos Electrónicos

Se incluyen los planos electrónicos de los diferentes circuitos implementados en el proyecto, estos son:

- Circuito del microcontrolador PIC
- Circuito de acondicionamiento de señal de los sensores por fila
- Circuito de comunicación Serial
- Circuito de la fuente de alimentación dual (+8V/ - 8V)

