

PROYECTO INDUSTRIAL TERMINAL

DESARROLLO DE ROBOT MOVIL PARA INSPECCION  
DE ESTRUCTURAS FERROMAGNETICAS

005649

PARA OBTENER LA ESPECIALIDAD EN:


**“TECNOLOGO EN MECATRÓNICA”**

  
09/DIC/2008

PRESENTA

ALUMNO: ING. SERGIO ALBERTO RODRÍGUEZ GUTIÉRREZ

TUTOR: M. C. JULIO CÉSAR SOLANO VARGAS

  
11/DIC/2008

QUERETARO, QRO. DICIEMBRE 2008

## CONTENIDO

RESUMEN .....	2
ANTECEDENTES .....	3
DEFINICION DEL TEMA .....	4
JUSTIFICACIÓN .....	5
OBJETIVOS .....	6
DESARROLLO .....	7
RESULTADOS.....	18
CONCLUSIONES .....	19
BIBLIOGRAFIA .....	20
ANEXOS .....	21

## RESUMEN

El siguiente proyecto trata de la puesta en marcha de un robot móvil para inspección de espesores de tanques ferromagnéticos y realización de pruebas de nuevos componentes que serán agregados a dicho robot.

El propósito de retomar el robot para inspecciones, es debido a que se pretende actualizar, esto implica, sustituir ciertos componente y agregarle otros para un mejor funcionamiento, y ponerlo en marcha debido a que por el uso que ha tenido dicho robot, el eje de la llanta delantera derecha sufrió una ruptura.

El material con el que fue fabricada la flecha ya anteriormente mencionada es acero inoxidable, siendo escogido este material debido al esfuerzo el cual es sometido, ya que se hicieron pruebas durante el diseño del robot, probándose así algunos materiales como aluminio y cobre. Llegando a la conclusión de que el acero inoxidable es aun más resistente que los materiales antes mencionados y siendo el más idóneo para la fabricación de la flecha.

Al igual se cambio el inclinómetro del robot, por un integrado de escasos centímetros. Este cambio fue hecho ya que actualmente en el mercado existen integrados como este, que son sumamente más pequeños que los que se comercializaban hace unos años, para ser más preciso en el tiempo en el que fue diseñado el robot. El inclinómetro que se esta introduciendo al robot es un inclinómetro de la marca VTI Technologies de la serie "SCA-100T eje dual" el cual tiene cierta características interesantes como conexión SPI. Entre otras características que mas adelante se mencionaran con más detalle.

Por último se agrego otro componente para hacer pruebas de funcionamiento, el cual es una electro válvula a 12 volts, esto con la finalidad de remplazar un pequeña válvula check la cual a ciertas presiones no resulta funcional.

## ANTECEDENTES

Ya que los sistemas robóticos han adquirido un lugar importante en los procesos de manufactura, tareas de inspección y diversas pruebas no destructivas para evaluar el grado de corrosión en materiales ferromagnéticos. El robot que se pretende poner en marcha nuevamente fue diseñado para inspeccionar de forma automática tanques ferromagnéticos de grandes dimensiones, debido a que algunos de los problemas para determinar de forma manual el espesor mediante ultrasonidos, son la cantidad de cientos de mediciones necesarias que hay que hacer sobre el tanque, el alto consumo de tiempo que requiere la inspección, y el riesgo que representa esta tarea para las personas. El robot desarrollado brinda una alternativa para hacer de forma sencilla este tipo de trabajo de una manera segura y eficiente. El propósito de estas mediciones es determinar las condiciones de corrosión en los tanques, a fin de tomar decisiones referentes al mantenimiento cuando sea necesario.

Como lo describe el *M.C. Julio solano Vargas* [1] en su tesis de maestría "Desarrollo de un Robot para Inspección de Espesores de Pared de Tanques de Almacenamiento", resulta significativo conocer que existen más de 700,000 tanques de almacenamiento al exterior y más de 4.5 millones de tanques subterráneos, esto tan solo en los Estados Unidos. Muchos de estos tanques por efectos naturales de corrosión presentan fugas. Algo más importante, muchos de estos tanques presentan fugas sin que nadie sepa o tenga conocimiento de ello.

El proyecto de tesis anteriormente mencionado fue de automatizar las mediciones de espesores en los tanques por medio de un robot que busca reducir el tiempo de inspección, asegurar las mediciones en las lecturas y eliminar el riesgo del inspector en las maniobras aéreas durante la medición convencional.

## **DEFINICION DEL TEMA**

El tema en el cual se centra este proyecto es el agregarle ciertos elementos al robot móvil para la inspección de espesores desarrollado con anterioridad. Esto debido a que actualmente se encuentra fuera de servicio, debido al uso y desgaste por el mismo.

El elemento principal que será agregado es un inclinómetro el cual se describirá más adelante, así como una electro válvula y cambiarle un eje.

Por tal motivo la puesta en marcha nuevamente del robot resulta importante ya que actualmente se encuentra en desarrollo una nueva generación del robot.

## JUSTIFICACIÓN

Resulta significativo el número de tanques de almacenamiento que existen actualmente en nuestro país. Por efectos naturales los tanques presentan corrosión con lo que conllevan a una posible fuga.

Por lo general la inspección se hace de manera manual, el inspector, se encarga de tomar mediciones en todos los conectores, efectuando mediciones a distancias aproximadas a 9", esto de acuerdo a la norma SA-435/SA435-M de la norma ASME. El cumplimiento de esta norma hace que dicho trabajo resulte peligroso, con un alto costo y en un tiempo considerable.

Por lo que la puesta en marcha del robot existente asegura la reducción del tiempo de ejecución del trabajo y una reducción significativa de riesgo para el inspector al realizar su trabajo.

## **OBJETIVOS**

- Desarrollo robot móvil para inspección de estructuras ferromagneticas.

### **Objetivos específicos**

- Hacer una investigación en el mercado de los inclinómetros que actualmente existen.
- Elección del inclinómetro apropiado de acuerdo a las mejores características para el robot.
- Programar el inclinómetro para un mejor funcionamiento del robot.
- Hacer una investigación de las electro-válvulas más pequeñas y con las condiciones de presión y voltaje adecuados para el diseño del robot.
- Hacer pruebas de funcionamiento con la válvula seleccionada
- Reemplazar el eje de la llanta superior derecha del robot.
- Desarrollar las pruebas en el robot explorador versión 1.

## DESARROLLO

### Elementos

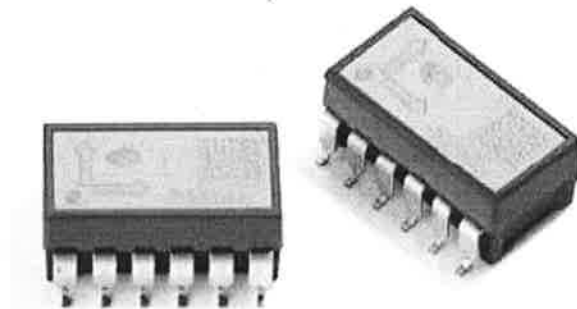
Elementos usados para el desarrollo del proyecto:

- a) Inclinómetro dual Marca VTI TECHNOLOGIES serie SCA-100T.
- b) Microcontrolador MSP430F2617 de la marca Texas Instruments
- c) IDE de programación IAR Systems
- d) Válvula a solenoide marca Jefferson
- e) Eje de acero inoxidable

### Descripción de los elementos

- a) Inclinómetro dual Marca VTI TECHNOLOGIES serie SCA-100T

El inclinómetro de la serie SCA-100T-D02 es un dispositivo basado en la tecnología MEMS de doble eje de inclinación que ofrece alto grado de exactitud. Este inclinómetro obtiene mediciones en los ejes "X" y "Y"



El inclinómetro SCA-100T son insensibles a las vibraciones, y puede soportar choques mecánicos de hasta 20000 g.

Algunas de las otras características por las cuales fue elegido dicho inclinómetro se mencionan a continuación:

- Rango de medición de  $\pm 90^\circ$
- Resolución de  $0.0025^\circ$



- Diseño robusto y resistencia a impactos
- Alimentación de +5 v
- Comunicación SPI
- Entre otras

#### *b) Microcontrolador MSP430F2617*

El microcontrolador MSP430F2617 fue elegido debido a ciertas características como son los módulos de comunicación con los que cuenta este, como es el modulo SPI indispensable para hacer la comunicación con el inclinómetro ya antes mencionado, a su vez los convertidores analógico-digital y digital-analógico indispensable para el control y comunicación de los motores del robot. La hoja de datos será anexada al final de este reporte.



#### *c) IDE de programación IAR Systems*

Este es un entorno de programación para los microcontroladores, este entorno ofrece el poder programar al microcontrolador en lenguaje ensamblador o lenguaje C; el cual fue elegido para la programación de este, debido, a que con el lenguaje C es mucho más rápido el tiempo de desarrollo de la programación, al igual ciertas rutinas mucho mas sencillas de programar así como su depuración y mantenimiento del mismo.

#### *d) Válvula a solenoide marca Jefferson*



Esta es una electro válvula que es alimentada a 12 volt, una de las razones por la cual fue seleccionada dicha válvula, así como por su reducidas dimensiones.

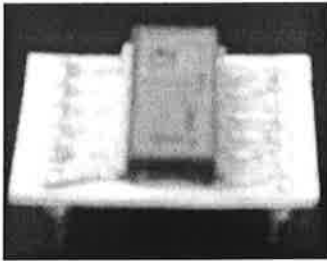
Esta es colocada en el robot para regular el flujo de agua que será administrada a la superficie en la cual se hará la medición, esto es por que actualmente el robot cuenta con una pequeña válvula check que presiones altas deja de funcionar,

permitiendo el paso a grandes cantidades de agua. La válvula solenoide puede manejar presiones de hasta 45 psi. Los cuales son suficientes.

e) Eje de acero inoxidable

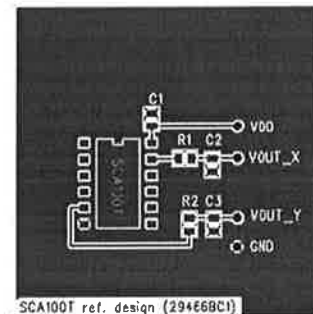
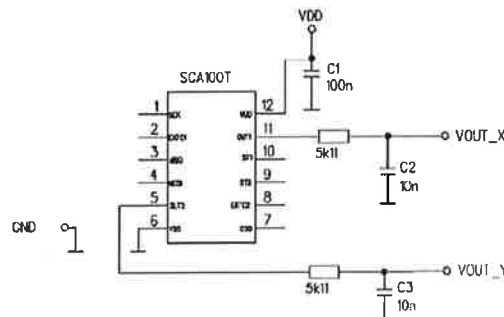
Este último componente fue usado para sustituir el anterior eje que por el desgaste y uso del robot se fue deteriorando.

### Desarrollo del proyecto

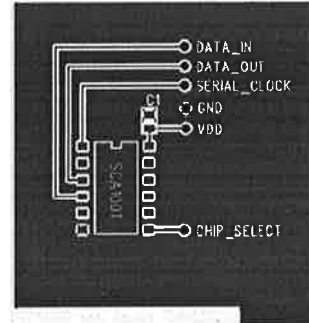
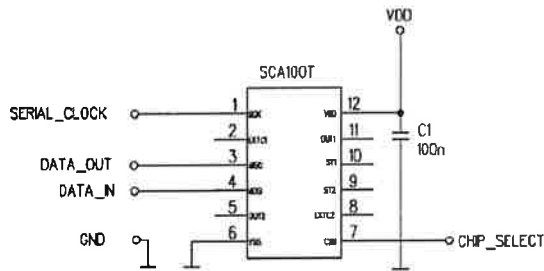


El proyecto comienza verificando el inclinómetro en modo analógico funcionaba correctamente. Este paso se realizo con la ayuda de un multímetro. Se realizo una pequeña placa con la ayuda del software Proteus 7 professional. Una vez realizado este paso lo siguiente fue conectarlo con la ayuda de cables y una protoboard la cual fue conectada al muntimetro para verificar el correcto funcionamiento del inclinómetro.

Al ser comprobado el funcionamiento del inclinómetro se procedió a conectarlo de acuerdo a las especificaciones del mismo, la cual se presenta a continuación, esto con la finalidad de comenzar a programar en el IDE antes mencionado.



Analog connection and layout example



SPI connection example

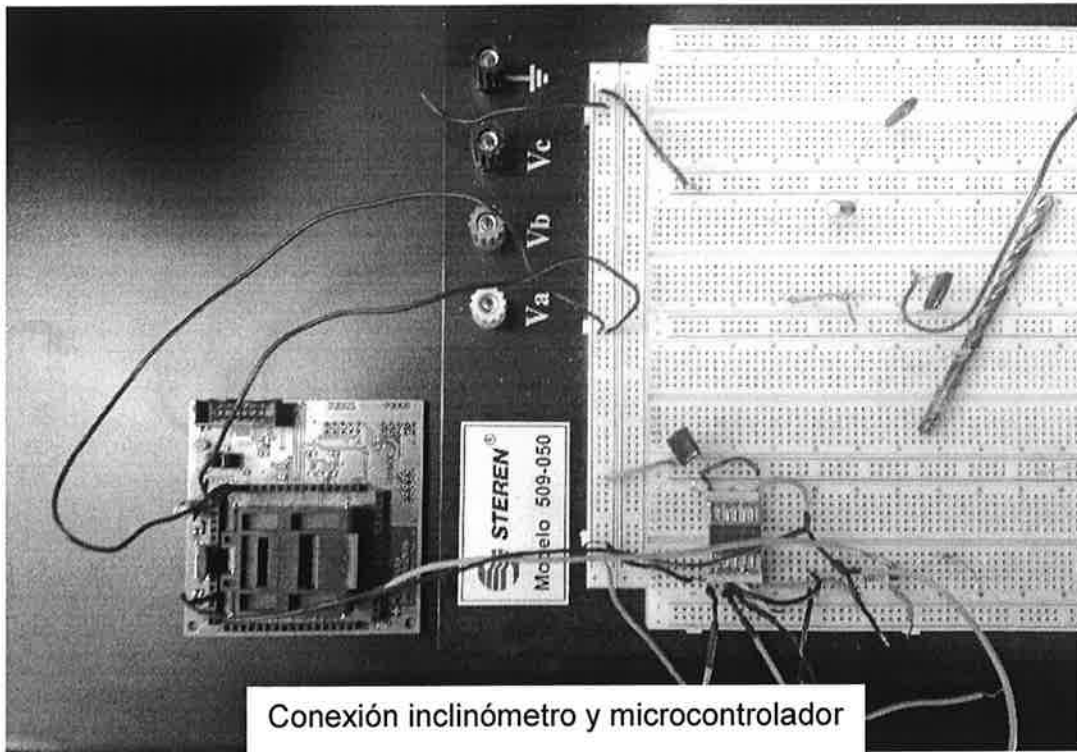
Una vez conectado como se muestra a continuación se procedió a programar; para programar el microcontrolador se uso kit de evaluación, el cual se usa para refinar la programación antes de instalar el dispositivo en el



Kit de evaluación (JTAG)

sitio final. La programación llevo un par de semanas ya que se tuvieron ciertos problemas al hacer la comunicación SPI debido a que el funcionamiento del inclinómetro, ya que la medición del mismo la manda en un paquete de 11 bit y la comunicación SPI maneja 8 bits, se tomo la decisión de hacer la comunicación semi-manual, con esto se refiere a que se usaron ciertos paramentarios del microcontrolador para hacer la comunicación; estos parámetros son: el configurar el modulo SPI para que el

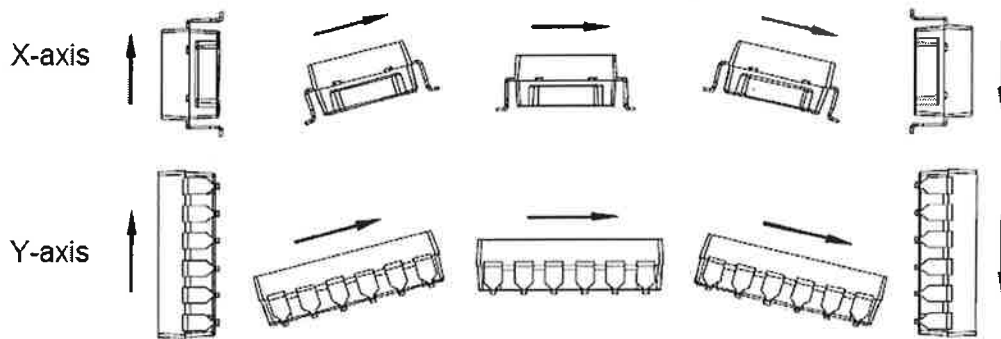
microcontrolador habilitara esta función, y enviar el comando al inclinómetro para que este comenzara la medición.



La tabla de comando que admite el inclinómetro se presenta a continuación.

Command name	Command format	Description:
MEAS	00000000	Measure mode (normal operation mode after power on)
RWTR	00001000	Read and write temperature data register
RDSR	00001010	Read status register
RLOAD	00001011	Reload NV data to memory output register
STX	00001110	Activate Self test for X-channel
STY	00001111	Activate Self test for Y-channel
RDAX	00010000	Read X-channel acceleration through SPI
RDAY	00010001	Read Y-channel acceleration through SPI

El comando utilizado para la medición es RDAY debido a que este eje es el que se está censando para obtener una mejor nivelación al momento de subir. La forma en la que censa el inclinómetro es la siguiente:



El archivo fuente consta de más de 50 líneas de programación debido a que la medición obtenida por el inclinómetro tuvo que ser leída bit a bit por consiguiente se mostrara solo parte del código fuente.

```
void main(void)
{
    WDTCIL = WDIPW + WDIHOLD;           // Stop watchdog timer

    if (CALBC1_8MHZ == 0xFF || CALDCO_8MHZ == 0xFF)
    {
        while(1);                       // If calibration constants erased
                                         // do not load, trap CPU!!
    }
    BCSCIL3 |= XCAP_3;                   // pagina 302, seleccion del capacitor
    BCSCIL1 = CALBC1_8MHZ;               // Set DCO
    DCOCTL = CALDCO_8MHZ;

    P3DIR |= 0x11;
    P1DIR |= 0x02;                       // P1.0 output
    P1OUT |= 0x01;                       // P1 setup for LED and slave reset
    P4DIR |= 0x00;
        P1OUT |= 0x01;
        retardo();

    while (1){
        P1OUT ^= ~0x02;                  // CS
        retardo();
    }
}
```

La parte de código anterior se usa para la configuración de ciertos parámetros del microcontrolador como es el watchdog que claramente se ve que se detiene para tener un mejor funcionamiento del microcontrolador, debido a que no se requiere que después de cierto proceso se pueda quedar colgado o no responder y se tenga que reiniciar.

```

/*****/
for(int i=3;i>0;i--)
{
P3OUT |= 0x01;
retardo();
P3OUT ^= ~0x01;
retardo();
}

P3OUT |= 0x10;
P3OUT |= 0x01;
retardo();
P3OUT ^= ~0x01;
retardo();
P3OUT ^= ~0x10;

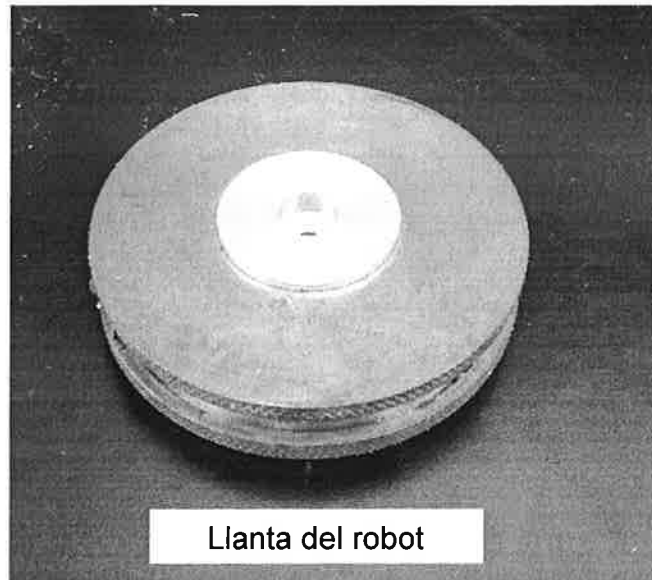
for(int i=3;i>0;i--)
{
P3OUT |= 0x01;
retardo();
P3OUT ^= ~0x01;
retardo();
}

P3OUT |= 0x10;
P3OUT |= 0x01;
retardo();
P3OUT ^= ~0x01;
    bit = P4IN;
bit = bit & 0x01;
bitvec[i]=bit;
retardo();
P3OUT ^= ~0x10;

```

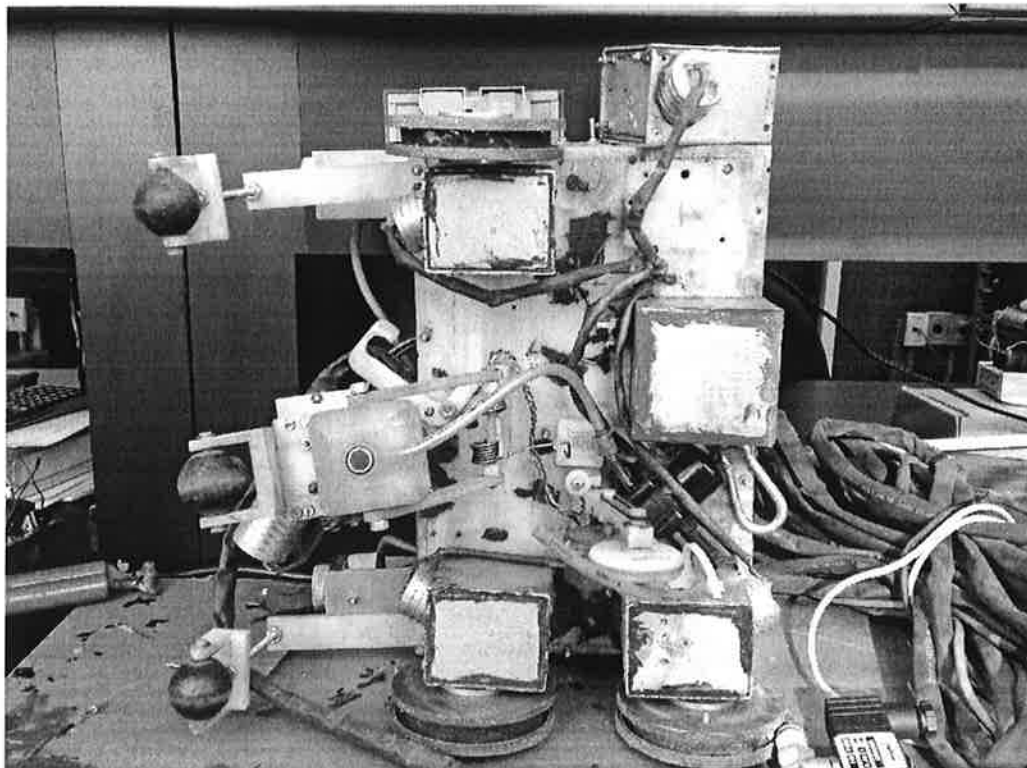
La parte de código anterior trata de adquirir los datos, después de la medición del inclinómetro, esta parte se tuvo que hacer manual debido a que la comunicación SPI es de 8 bits, y la medición realizada por el inclinómetro es de 11, se tiene que apagar el SPI para que se pueda adquirir y convertir los datos.

Una vez terminada la programación se prosiguió a trabajar en la reconstrucción del robot, esta parte del proyecto consistió en sustituir el eje de la llanta que estaba averiado. La llanta del robot está constituida de un imán permanente de los denominados súper imanes

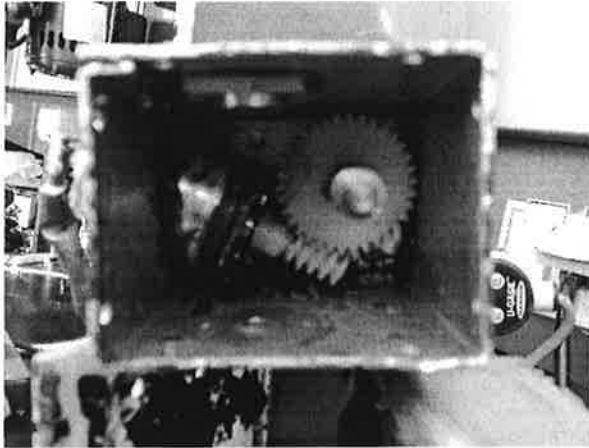


Llanta del robot

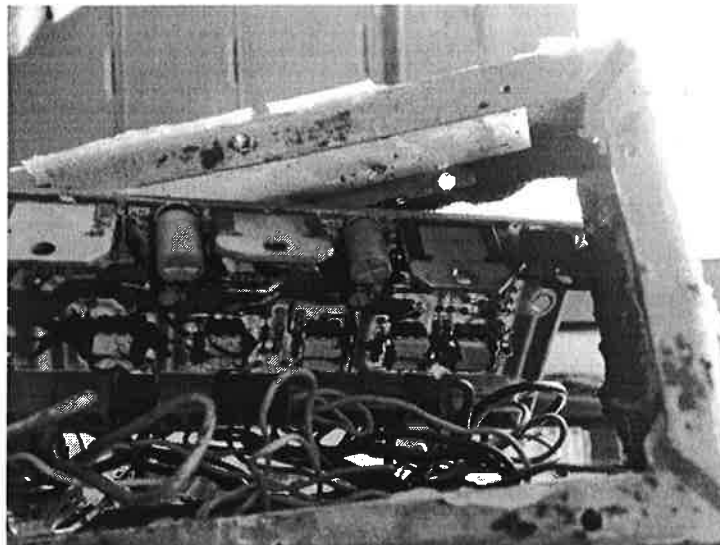
los cuales son los imanes más potentes que actualmente se encuentran en el mercado. La reconstrucción del robot se realizó debido a que actualmente se encuentra en desarrollo una nueva versión del mismo, por lo tanto este robot será usado para realizar las pruebas pertinentes para el refinamiento del nuevo diseño



En la imagen anterior se muestra dicho robot desarmado a continuación se mostrara imágenes del eje y la ubicación y parte del sistema de transmisión.

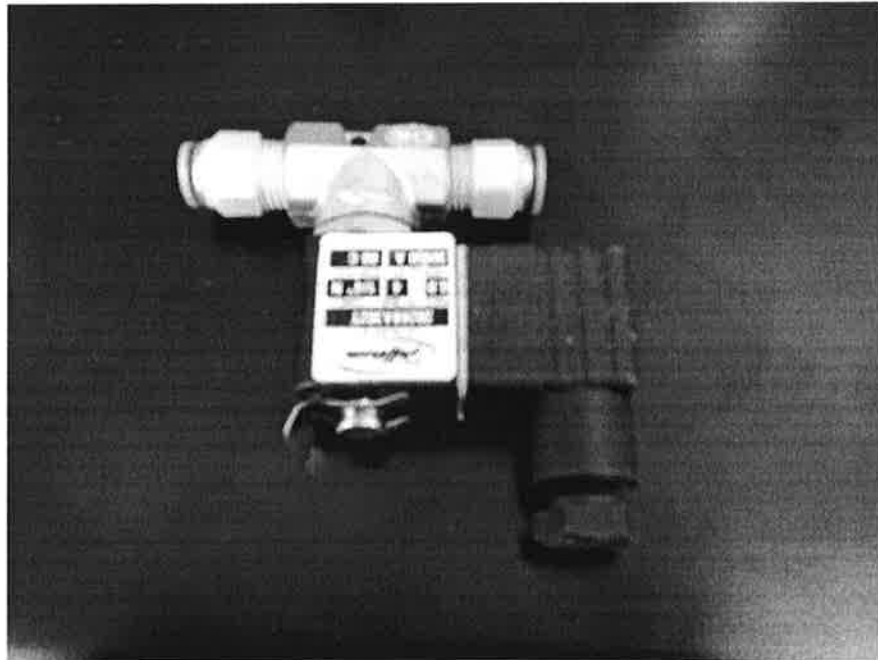


Aun que no se logra apreciar en la imagen anterior del sistema de transmisión la flecha va montada en un pequeño rodamiento el cual le da firmeza para impedir que la llanta quede desajustada. En esta parte de la reconstrucción del robot igual se tuvo que abrir una parte en donde se encuentran la tarjeta de control de los motores la apariencia de la misma se muestra en la siguiente imagen.

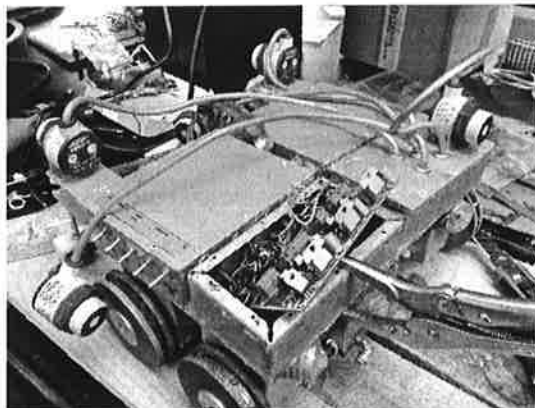




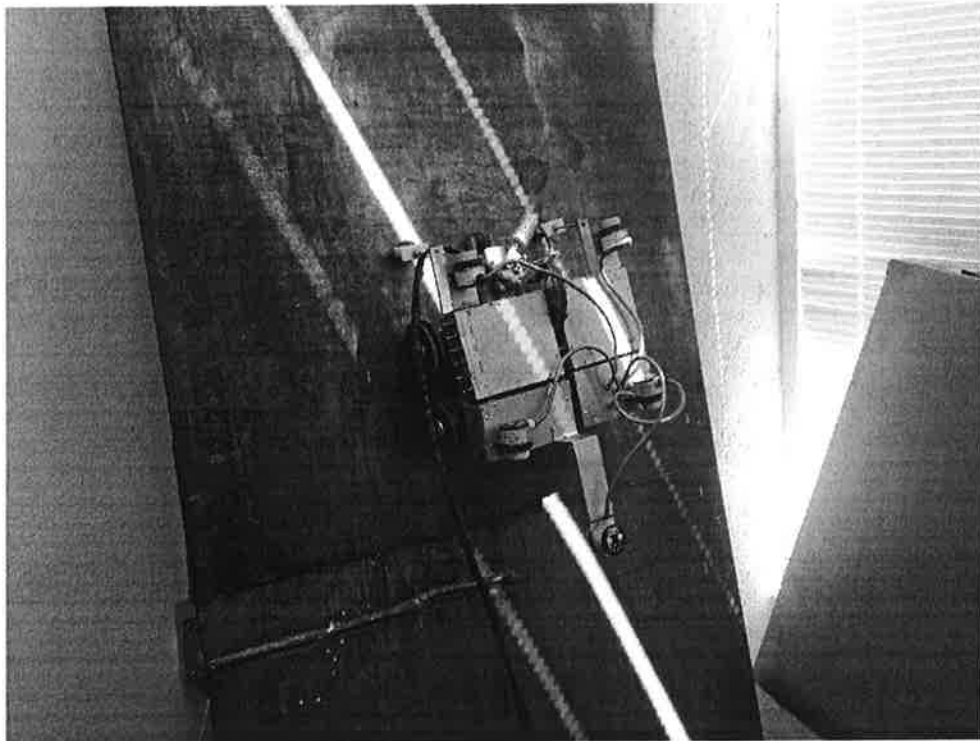
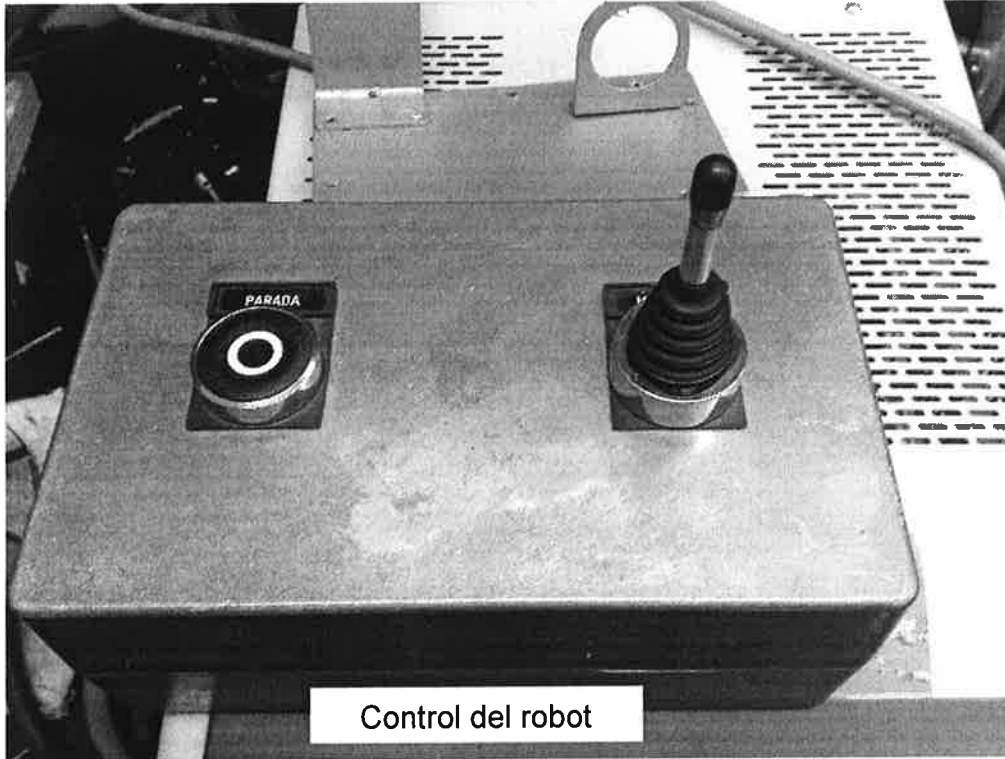
Seguido de haber instalado la flecha se prosiguió a colocar la electro válvula la cual como se comento con anterioridad es a 12 volts de la mar Jefferson, esto debido a que es una de las más pequeñas que actualmente se encuentra en el mercado. La válvula se coloco debajo del chasis del robot con la ayuda de unos tornillos. Colocado la válvula entre la salida del transductor y la bomba.



Una vez colocada la válvula se procedió hacer la primeras pruebas de funcionamiento del robot, para comprobar el optimo funcionamiento, midiendo el rendimiento del robot como es la demanda de voltaje la cual es aproximadamente 24 volts y corriente la cual sin carga es de aproximadamente .45 A (amperes) por motor y en conjunto con carga es de aproximadamente 3 A.



Al final la prueba fue exitosa, logrando que el robot suba y baje y trabajen en óptimas condiciones todas las partes del robot.



## RESULTADOS

Durante el tiempo en el que se desarrollo el proyecto, el inclinómetro de la marca VTI TECHNOLOGIES modelo "SCA-100T" fue programado en el IDE de programación usando un microcontrolador de TEXAS INSTRUMENT MSP430F2617, con el cual se determino que con él, se puede hacer unas mediciones lo suficientemente exactas como para que el robot pueda subir y bajarlos tanques de almacenamiento prácticamente en línea recta.

Se realizaron las pruebas con la válvula ya instalada en el robot, con el cual se hicieron algunas mediciones obteniendo resultados favorables, y llegando a la conclusión de que es factible reemplazar la válvula check que con anterioridad regulaba el flujo del agua que llegaría al transductor.

Los resultados de los elementos remplazado fueron satisfactorios mejorando así el funcionamiento del robot.

## CONCLUSIONES

Una vez terminado esta parte del proyecto se llega a la conclusión de que los elementos que se le añadieron al robot muestran un comportamiento satisfactorio, por lo tanto se propone usar dichos elementos para el desarrollo de la nueva versión del robot explorador de espesores de pared.

Al igual el modificar ciertos parámetros de diseño de este debido a que hay ciertas características que aun pueden ser mejoradas en su totalidad, como es el diseño de las ruedas entre otras.

Para la siguiente versión del robot se hace la propuesta de que pueda ser inalámbrico y que se aumente la velocidad del mismo, al igual cambiar los motores de escobillas por servo motores, ya que estos no generan chispa y genera más torque que los motores que actualmente tiene el robot.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Solano J., "Desarrollo de un Robot para Inspección de Espesores de Pared de Tanques de Almacenamiento", Tesis de Maestría. Postgrado Interinstitucional en Ciencia y Tecnología, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, CIDESI, Querétaro, 2002
- Artículo.- Robot Móvil Orientado a Inspección No Destructiva en Tanques Ferromagnéticos, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, CIDESI Pie de la Cuesta 702, Colonia San Pablo, C.P. 76130 , Querétaro, Qro.

## **ANEXOS**

# Data Sheet



## THE SCA100T DUAL AXIS INCLINOMETER SERIES

The SCA100T Series is a 3D-MEMS-based dual axis inclinometer family that provides instrumentation grade performance for leveling applications. The measuring axes of the sensing elements are parallel to the mounting plane and orthogonal to each other. Low temperature dependency, high resolution and low noise, together with a robust sensing element design, make the SCA100T the ideal choice for leveling instruments. The VTI inclinometers are insensitive to vibration, due to their over damped sensing elements, and can withstand mechanical shocks of up to 20000 g.

### Features

- Dual axis inclination measurement (X and Y)
- Measuring ranges  $\pm 30^\circ$  SCA100T-D01 and  $\pm 90^\circ$  SCA100T-D02
- 0.0025° resolution (10 Hz BW, analog output)
- Sensing element controlled over damped frequency response (-3dB 18Hz)
- Robust design, high shock durability (20000g)
- High stability over temperature and time
- Single +5 V supply
- Ratiometric analog voltage outputs
- Digital SPI inclination and temperature output
- Comprehensive failure detection features
  - True self test by deflecting the sensing elements' proof mass by electrostatic force.
  - Continuous sensing element interconnection failure check.
  - Continuous memory parity check.
- RoHS compliant
- Compatible with Pb-free reflow solder process

### Applications

- Platform leveling and stabilization
- 360° vertical orientation measurement
- Leveling instruments
- Construction levels

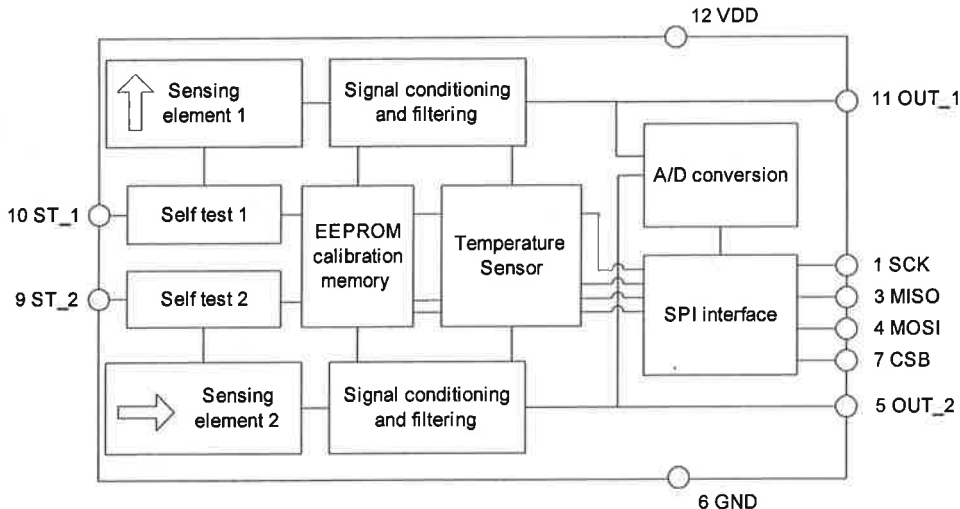


Figure 1. Functional block diagram

## 1 Electrical Specifications

The SCA100T product family comprises two versions, the SCA100T-D01 and the SCA100T-D02 that differ in measurement range. The product version specific performance specifications are listed in the table SCA100T performance characteristics below. All other specifications are common with both versions. Vdd=5.00V and ambient temperature unless otherwise specified.

### 1.1 Absolute Maximum Ratings

Supply voltage (VDD)	-0.3 V to +5.5V
Voltage at input / output pins	-0.3V to (VDD + 0.3V)
Storage temperature	-55°C to +125°C
Operating temperature	-40°C to +125°C
Mechanical shock	Drop from 1 meter onto a concrete surface (20000g). Powered or non-powered

### 1.2 Performance Characteristics

Parameter	Condition	SCA100T -D01	SCA100T -D02	Units
Measuring range	Nominal	±30	±90	°
		±0.5	±1.0	g
Frequency response	-3dB LP <sup>(1)</sup>	8-28	8-28	Hz
Offset (Output at 0g)	Ratiometric output	Vdd/2	Vdd/2	V
Offset calibration error		±0.11	±0.23	°
Offset Digital Output		1024	1024	LSB
Sensitivity		4	2	V/g
	between 0...1° <sup>(2)</sup>	70	35	mV/°
Sensitivity calibration error		±0.5	±0.5	%
Sensitivity Digital Output		1638	819	LSB / g
Offset temperature dependency	-25...85°C (typical)	±0.008	±0.008	°/°C
	-40...125°C (max)	±0.86	±0.86	°
Sensitivity temperature dependency	-25...85°C (typical)	±0.014	±0.014	%/°C
	-40...125°C (max)	-2.5...+1	-2.5...+1	%
Typical non-linearity	Measuring range	±0.11	±0.57	°
Digital output resolution		11	11	Bits
	between 0...1° <sup>(2)</sup>	0.035	0.07	° / LSB
Output noise density	From DC...100Hz	0.0008	0.0008	° / √Hz
Analog output resolution	Bandwidth 10 Hz <sup>(3)</sup>	0.0025	0.0025	°
Ratiometric error	Vdd = 4.75...5.25V	±1	±1	%
Cross-axis sensitivity	Max.	4	4	%
Long term Stability <sup>(4)</sup>		<0.014	<0.014	°

Note 1. The frequency response is determined by the sensing element's internal gas damping.

Note 2. The angle output has SIN curve relationship to voltage output refer to paragraph **Error! Reference source not found.**

Note 3. Resolution = Noise density \* √(bandwidth)

Note 4. Power continuously connected (@ 23°C).



### 1.3 Electrical Characteristics

Parameter	Condition	Min.	Typ	Max.	Units
Supply voltage Vdd		4.75	5.0	5.25	V
Current consumption	Vdd = 5 V; No load		4	5	mA
Operating temperature		-40		+125	°C
Analog resistive output load	Vout to Vdd or GND	10			kOhm
Analog capacitive output load	Vout to Vdd or GND			20	nF
Start-up delay	Reset and parity check			10	ms

### 1.4 SPI Interface DC Characteristics

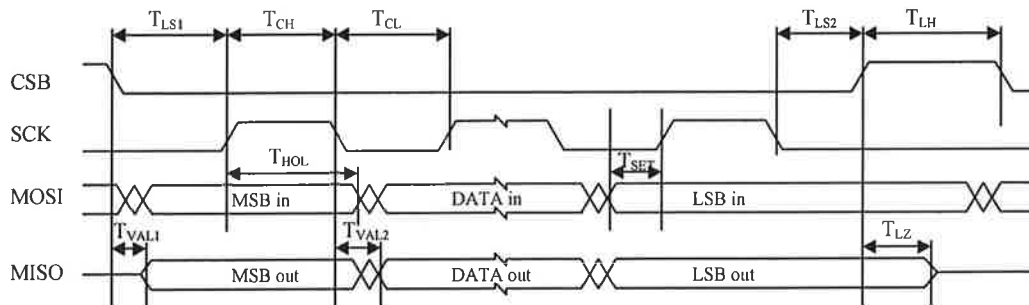
Parameter	Conditions	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
<b>Input terminal CSB</b>						
Pull up current	$V_{IN} = 0 V$	$I_{PU}$	13	22	35	$\mu A$
Input high voltage		$V_{IH}$	4		Vdd+0.3	V
Input low voltage		$V_{IL}$	-0.3		1	V
Hysteresis		$V_{HYST}$		0.23*Vdd		V
Input capacitance		$C_{IN}$		2		pF
<b>Input terminal MOSI, SCK</b>						
Pull down current	$V_{IN} = 5 V$	$I_{PD}$	9	17	29	$\mu A$
Input high voltage		$V_{IH}$	4		Vdd+0.3	V
Input low voltage		$V_{IL}$	-0.3		1	V
Hysteresis		$V_{HYST}$		0.23*Vdd		V
Input capacitance		$C_{IN}$		2		pF
<b>Output terminal MISO</b>						
Output high voltage	$I > -1mA$	$V_{OH}$	Vdd-0.5			V
Output low voltage	$I < 1 mA$	$V_{OL}$			0.5	V
Tristate leakage	$0 < V_{MISO} < V_{dd}$	$I_{LEAK}$		5	100	pA

### 1.5 SPI Interface AC Characteristics

Parameter	Condition	Min.	Typ.	Max.	Units
Output load	@500kHz			1	nF
SPI clock frequency				500	kHz
Internal A/D conversion time			150		$\mu s$
Data transfer time	@500kHz		38		$\mu s$

## 1.6 SPI Interface Timing Specifications

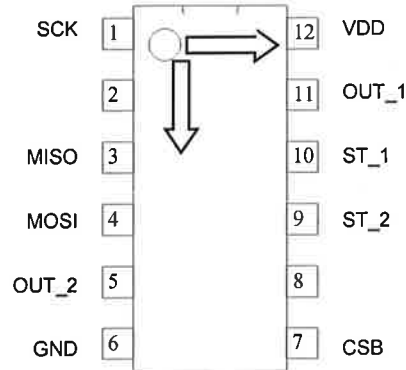
Parameter	Conditions	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
<b>Terminal CSB, SCK</b>						
Time from CSB (10%) to SCK (90%)		$T_{LS1}$	120			ns
Time from SCK (10%) to CSB (90%)		$T_{LS2}$	120			ns
<b>Terminal SCK</b>						
SCK low time	Load capacitance at MISO < 2 nF	$T_{CL}$	1			$\mu$ s
SCK high time	Load capacitance at MISO < 2 nF	$T_{CH}$	1			$\mu$ s
<b>Terminal MOSI, SCK</b>						
Time from changing MOSI (10%, 90%) to SCK (90%).		$T_{SET}$	30			ns
Data setup time						
Time from SCK (90%) to changing MOSI (10%,90%).		$T_{HOL}$	30			ns
Data hold time						
<b>Terminal MISO, CSB</b>						
Time from CSB (10%) to stable MISO (10%, 90%).	Load capacitance at MISO < 15 pF	$T_{VAL1}$	10		100	ns
Time from CSB (90%) to high impedance state of MISO.	Load capacitance at MISO < 15 pF	$T_{LZ}$	10		100	ns
<b>Terminal MISO, SCK</b>						
Time from SCK (10%) to stable MISO (10%, 90%).	Load capacitance at MISO < 15 pF	$T_{VAL2}$			100	ns
<b>Terminal CSB</b>						
Time between SPI cycles, CSB at high level (90%)		$T_{LH}$	15			$\mu$ s
When using SPI commands RDAX, RDAY, RWTR: Time between SPI cycles, CSB at high level (90%)		TLH	150			$\mu$ s



**Figure 2.** Timing diagram for SPI communication

## 1.7 Electrical Connection

If the SPI interface is not used SCK (pin1), MISO (pin3), MOSI (pin4) and CSB (pin7) must be left floating. Self-test can be activated applying logic "1" (positive supply voltage level) to ST\_1 or ST\_2 pins (pins 10 or 9). Self-test must not be activated for both channels at the same time. If ST feature is not used pins 9 and 10 must be left floating or connected to GND. Inclination signals are provided from pins OUT\_1 and OUT\_2.

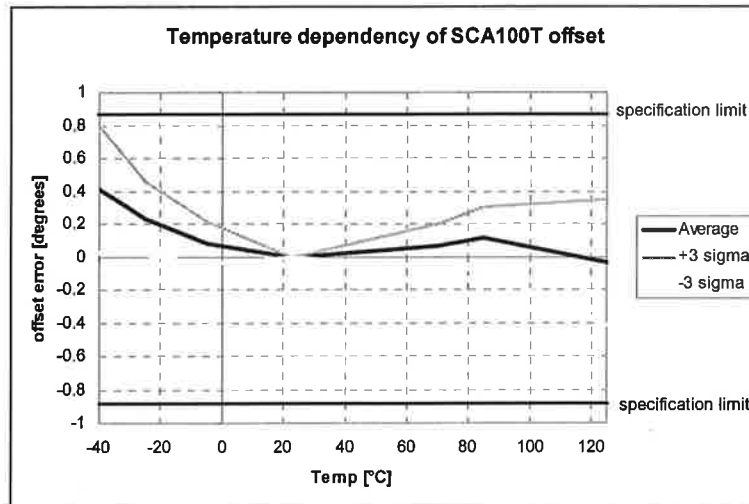


**Figure 3.** SCA100T electrical connection

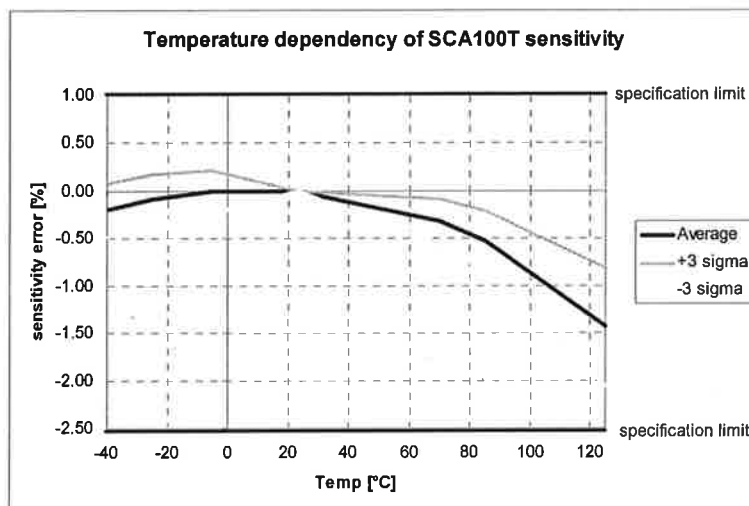
No.	Node	I/O	Description
1	SCK	Input	Serial clock
2	NC	Input	No connect, left floating
3	MISO	Output	Master in slave out; data output
4	MOSI	Input	Master out slave in; data input
5	Out_2	Output	Y axis Output (Ch 2)
6	GND	Supply	Ground
7	CSB	Input	Chip select (active low)
8	NC	Input	No connect, left floating
9	ST_2	Input	Self test input for Ch 2
10	ST_1	Input	Self test input for Ch 1
11	Out_1	Output	X axis Output (Ch 1)
12	VDD	Supply	Positive supply voltage (+5V DC)

## 1.8 Typical Performance Characteristics

Typical offset and sensitivity temperature dependencies of the SCA100T are presented in following diagrams. These results represent the typical performance of SCA100T components. The mean value and 3 sigma limits (mean  $\pm$  3 $\times$  standard deviation) and specification limits are presented in following diagrams. The 3 sigma limits represents 99.73% of the SCA100T population.



**Figure 4.** Typical temperature dependency of SCA100T offset



**Figure 5.** Typical temperature dependency of SCA100T sensitivity

### 1.8.1 Additional External Compensation

To achieve the best possible accuracy, the temperature measurement information and typical temperature dependency curves can be used for SCA100T offset and sensitivity temperature dependency compensation. The equation of fitted 3<sup>rd</sup> order polynome curve for offset compensation is:

$$Offcorr = -0.0000006 * T^3 + 0.0001 * T^2 - 0.0039 * T - 0.0522$$

Where:

Offcorr: 3<sup>rd</sup> order polynome fitted to average offset temperature dependency curve  
 T: temperature in °C (Refer to paragraph 2.7 Temperature Measurement)

The calculated compensation curve can be used to compensate the temperature dependency of the SCA100T offset by using following equation:

$$OFFSETcomp = Offset - Offcorr$$

Where:

OFFSETcomp: temperature compensated offset in degrees  
 Offset: Nominal offset in degrees

The equation of fitted 2<sup>nd</sup> order polynome curve for sensitivity compensation is is:

$$Scorr = -0.00011 * T^2 + 0.0022 * T + 0.0408$$

Where:

Scorr: 2<sup>nd</sup> order polynome fitted to average sensitivity temperature dependency curve  
T temperature in °C

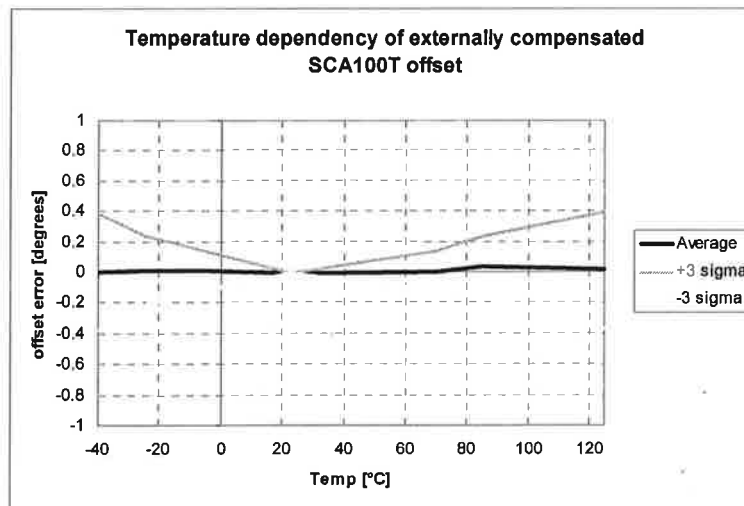
The calculated compensation curve can be used to compensate the temperature dependency of the SCA100T sensitivity by using following equation:

$$SENScomp = SENS * (1 + Scorr / 100)$$

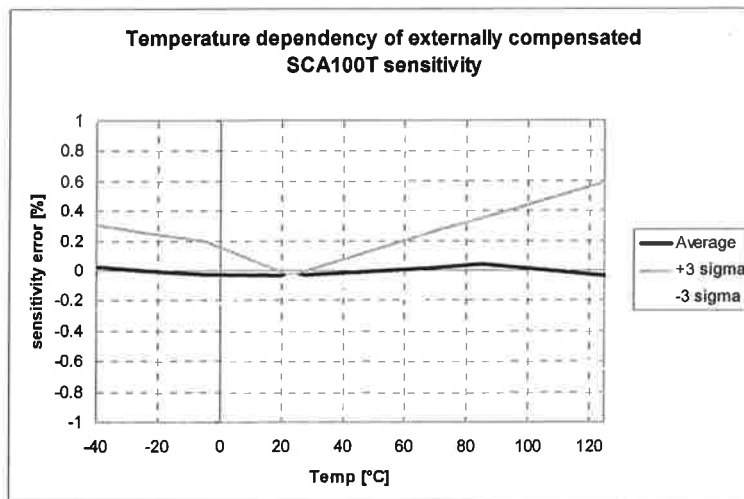
Where:

SENScomp temperature compensated sensitivity  
SENS Nominal sensitivity (4V/g SCA100T-D01, 2V/g SCA100T-D02)

The typical offset and sensitivity temperature dependency after external compensation is shown in the pictures below.



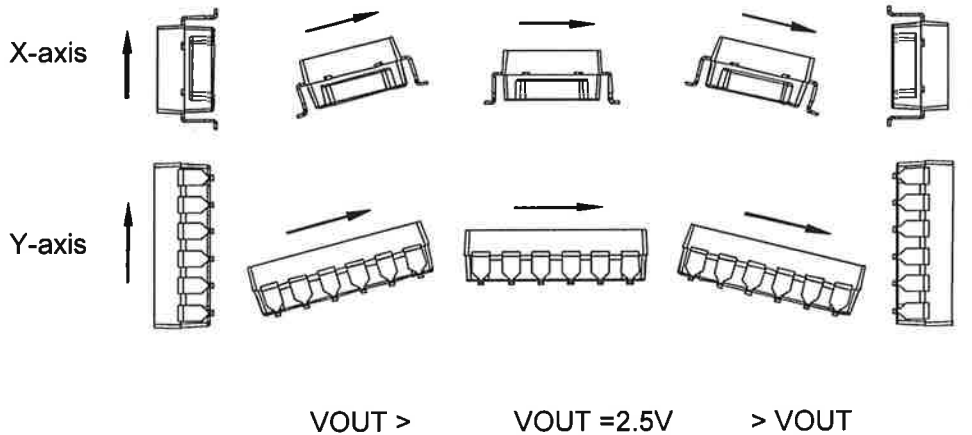
**Figure 6.** The temperature dependency of an externally compensated SCA100T offset



**Figure 7.** The temperature dependency of an externally compensated SCA100T sensitivity

## 2 Functional Description

### 2.1 Measuring Directions



**Figure 8.** The measuring directions of the SCA100T

### 2.2 Voltage to Angle Conversion

Analog output can be transferred to angle using the following equation for conversion:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{V_{out} - Offset}{Sensitivity}\right)$$

where: Offset = output of the device at 0° inclination position, Sensitivity is the sensitivity of the device and  $V_{Dout}$  is the output of the SCA100T. The nominal offset is 2.5 V and the sensitivity is 4 V/g for the SCA100T-D01 and 2 V/g for the SCA100T-D02.

Angles close to 0° inclination can be estimated quite accurately with straight line conversion but for the best possible accuracy, arcsine conversion is recommended to be used. The following table shows the angle measurement error if straight line conversion is used.

Straight line conversion equation:

$$\alpha = \frac{V_{out} - Offset}{Sensitivity}$$

Where: Sensitivity = 70mV/° with SCA100T-D01 or Sensitivity= 35mV/° with SCA100T-D02

Tilt angle [°]	Straight line conversion error [°]
0	0
1	0.0027
2	0.0058
3	0.0094
4	0.0140
5	0.0198
10	0.0787
15	0.2185
30	1.668

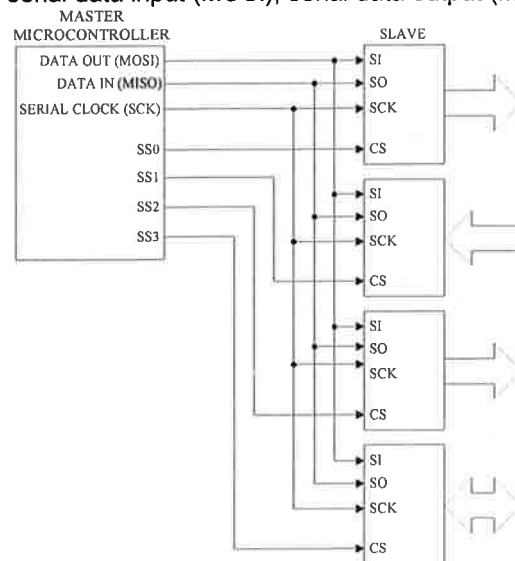
## 2.3 Ratiometric Output

Ratiometric output means that the zero offset point and sensitivity of the sensor are proportional to the supply voltage. If the SCA100T supply voltage is fluctuating the SCA100T output will also vary. When the same reference voltage for both the SCA100T sensor and the measuring part (A/D-converter) is used, the error caused by reference voltage variation is automatically compensated for.

## 2.4 SPI Serial Interface

A Serial Peripheral Interface (SPI) system consists of one master device and one or more slave devices. The master is defined as a micro controller providing the SPI clock and the slave as any integrated circuit receiving the SPI clock from the master. The ASIC in VTI Technologies' products always operates as a slave device in master-slave operation mode.

The SPI has a 4-wire synchronous serial interface. Data communication is enabled by a low active Slave Select or Chip Select wire (CSB). Data is transmitted by a 3-wire interface consisting of wires for serial data input (MOSI), serial data output (MISO) and serial clock (SCK).



**Figure 9.** Typical SPI connection

The SPI interface in VTI products is designed to support any micro controller that uses SPI bus. Communication can be carried out by either a software or hardware based SPI. Please note that in the case of hardware based SPI, the received acceleration data is 11 bits. The data transfer uses the following 4-wire interface:

MOSI	master out slave in	$\mu\text{P} \rightarrow \text{SCA100T}$
MISO	master in slave out	$\text{SCA100T} \rightarrow \mu\text{P}$
SCK	serial clock	$\mu\text{P} \rightarrow \text{SCA100T}$
CSB	chip select (low active)	$\mu\text{P} \rightarrow \text{SCA100T}$

Each transmission starts with a falling edge of CSB and ends with the rising edge. During transmission, commands and data are controlled by SCK and CSB according to the following rules:

- commands and data are shifted; MSB first, LSB last
- each output data/status bits are shifted out on the falling edge of SCK (MISO line)

- each bit is sampled on the rising edge of SCK (MOSI line)
- after the device is selected with the falling edge of CSB, an 8-bit command is received. The command defines the operations to be performed
- the rising edge of CSB ends all data transfer and resets internal counter and command register
- if an invalid command is received, no data is shifted into the chip and the MISO remains in high impedance state until the falling edge of CSB. This reinitializes the serial communication.
- data transfer to MOSI continues immediately after receiving the command in all cases where data is to be written to SCA100T's internal registers
- data transfer out from MISO starts with the falling edge of SCK immediately after the last bit of the SPI command is sampled in on the rising edge of SCK
- maximum SPI clock frequency is 500kHz
- maximum data transfer speed for RDAX and RDAY is 5300 samples per sec / channel

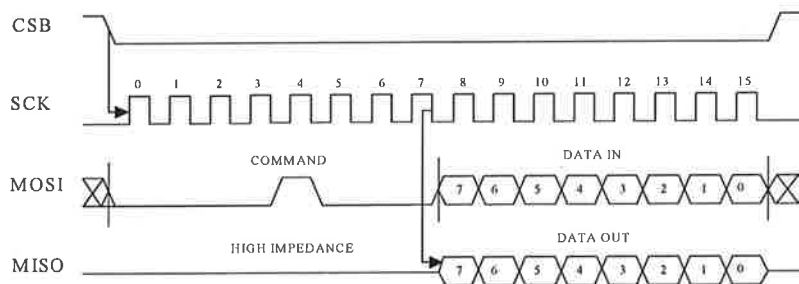
SPI command can be either an individual command or a combination of command and data. In the case of combined command and data, the input data follows uninterruptedly the SPI command and the output data is shifted out parallel with the input data.

The SPI interface uses an 8-bit instruction (or command) register. The list of commands is given in Table below.

Command name	Command format	Description:
MEAS	00000000	Measure mode (normal operation mode after power on)
RWTR	00001000	Read and write temperature data register
RDSR	00001010	Read status register
RLOAD	00001011	Reload NV data to memory output register
STX	00001110	Activate Self test for X-channel
STY	00001111	Activate Self test for Y-channel
RDAX	00010000	Read X-channel acceleration through SPI
RDAY	00010001	Read Y-channel acceleration through SPI

**Measure mode (MEAS)** is standard operation mode after power-up. During normal operation, the MEAS command is the exit command from Self test.

**Read temperature data register (RWTR)** reads temperature data register during normal operation without affecting the operation. The temperature data register is updated every 150  $\mu$ s. The load operation is disabled whenever the CSB signal is low, hence CSB must stay high at least 150  $\mu$ s prior to the RWTR command in order to guarantee correct data. The data transfer is presented in Figure 10 below. The data is transferred MSB first. In normal operation, it does not matter what data is written into temperature data register during the RWTR command and hence writing all zeros is recommended.



**Figure 10.** Command and 8 bit temperature data transmission over the SPI

**Self test for X-channel (STX)** activates the self test function for the X-channel (Channel 1). The internal charge pump is activated and a high voltage is applied to the X-channel acceleration



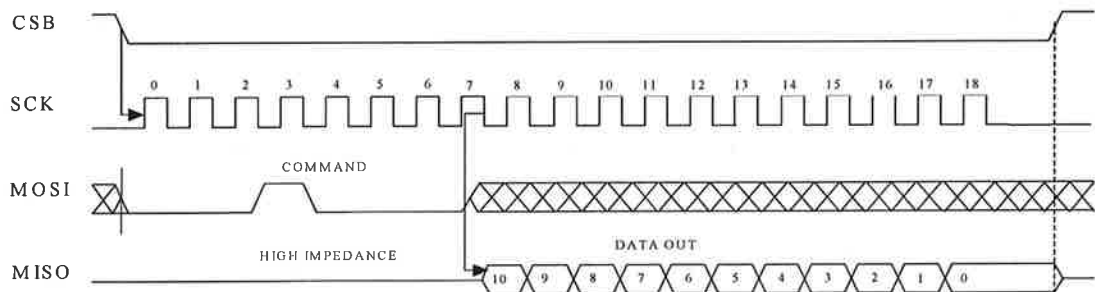
sensor element electrode. This causes the electrostatic force that deflects the beam of the sensing element and simulates the acceleration to the positive direction. The self-test is de-activated by giving the MEAS command. **The self test function must not be activated for both channels at the same time.**

**Self test for Y-channel (STY)** activates the self test function for the Y-channel (Channel 2). The internal charge pump is activated and a high voltage is applied to the Y-channel acceleration sensor element electrode.

**Read X-channel acceleration (RDAX)** accesses the AD converted X-channel (Channel 1) acceleration signal stored in acceleration data register X.

**Read Y-channel acceleration (RDAY)** accesses the AD converted Y-channel (Channel 2) acceleration signal stored in acceleration data register Y.

During normal operation, acceleration data registers are reloaded every 150  $\mu$ s. The load operation is disabled whenever the CSB signal is low, hence CSB must stay high at least 150  $\mu$ s prior the RDAX command in order to guarantee correct data. Data output is an 11-bit digital word that is fed out MSB first and LSB last.



**Figure 11.** Command and 11 bit acceleration data transmission over the SPI

## 2.5 Digital Output to Angle Conversion

The acceleration measurement results in RDAX and RDAY data registers are in 11 bit digital word format. The data range is from 0 to 2048. The nominal content of RDAX and RDAY data registers in zero angle position are:

Binary: 100 0000 0000

Decimal: 1024

The transfer function from differential digital output to angle can be presented as

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{D_{out} [\text{LSB}] - D_{out@0^\circ} [\text{LSB}]}{Sens [\text{LSB/g}]}\right)$$

where;

$D_{out}$  digital output (RDAX or RDAY)

$D_{out@0^\circ}$  digital offset value, nominal value = 1024

$\alpha$  angle

$Sens$  sensitivity of the device. (SCA100T-D01: 1638, SCA100T-D02: 819)

As an example following table contains data register values and calculated differential digital output values with -5, -1 0, 1 and 5 degree tilt angles.

Angle [°]	Acceleration [mg]	RDAX (SCA100T-D01)	RDAX (SCA100T-D02)
-5	-87.16	dec: 881 bin: 011 0111 0001	dec: 953 bin: 011 1011 1001
-1	-17.45	dec: 995 bin: 011 1110 0011	dec: 1010 bin: 011 1111 0010
0	0	dec: 1024 bin: 100 0000 0000	dec: 1024 bin: 100 0000 0000
1	17.45	dec: 1053 bin: 100 0001 1101	dec: 1038 bin: 100 0000 1110
5	87.16	dec: 1167 bin: 100 1000 1111	dec: 1095 bin: 100 0100 0111

## 2.6 Self Test and Failure Detection Modes

To ensure reliable measurement results the SCA100T has continuous interconnection failure and calibration memory validity detection. A detected failure forces the output signal close to power supply ground or VDD level, outside the normal output range. The normal output ranges are: analog 0.25-4.75 V (@Vdd=5V) and SPI 102...1945 counts.

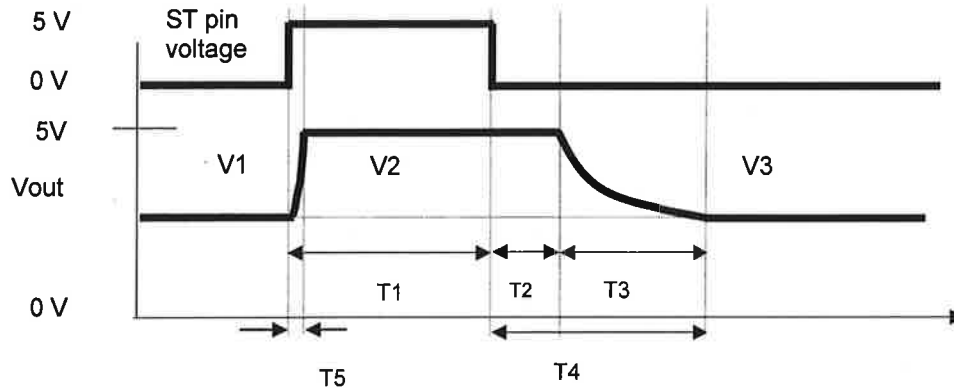
The calibration memory validity is verified by continuously running parity check for the control register memory content. In the case where a parity error is detected, the control register is automatically re-loaded from the EEPROM. If a new parity error is detected after re-loading data both analog output voltages are forced to go close to ground level (<0.25 V) and SPI outputs go below 102 counts.

The SCA100T also includes a separate self test mode. The true self test simulates acceleration, or deceleration, using an electrostatic force. The electrostatic force simulates acceleration that is high enough to deflect the proof mass to the extreme positive position, and this causes the output signal to go to the maximum value. The self test function is activated either by a separate on-off command on the self test input, or through the SPI.

The self-test generates an electrostatic force, deflecting the sensing element's proof mass, thus checking the complete signal path. The true self test performs following checks:

- Sensing element movement check
- ASIC signal path check
- PCB signal path check
- Micro controller A/D and signal path check

The created deflection can be seen in both the SPI and analogue outputs. The self test function is activated digitally by a STX or STY command, and de-activated by a MEAS command. Self test can be also activated applying logic "1" (positive supply voltage level) to ST pins (pins 9 & 10) of SCA100T. The self test input high voltage level is 4 – Vdd+0.3 V and input low voltage level is 0.3 – 1 V. **The self test function must not be activated for both channels at the same time.**



**Figure 12.** Self test wave forms

V1 = initial output voltage before the self test function is activated.

V2 = output voltage during the self test function.

V3 = output voltage after the self test function has been de-activated and after stabilization time. Please note that the error band specified for V3 is to guarantee that the output is within 5% of the initial value after the specified stabilization time. After a longer time (max. 1 second) V1=V3.

T1 = Pulse length for Self test activation

T2 = Saturation delay

T3 = Recovery time

T4 = Stabilization time =T2+T3

T5 = Rise time during self test.

Self test characteristics:

T1 [ms]	T2 [ms]	T3 [ms]	T4 [ms]	T5 [ms]	V2:	V3:
20-100	Typ. 25	Typ. 30	Typ. 55	Typ. 15	Min 0.95*VDD (4.75V @Vdd=5V)	0.95*V1-1.05*V1

## 2.7 Temperature Measurement

The SCA100T has an internal temperature sensor, which is used for internal offset compensation. The temperature information is also available for additional external compensation. The temperature sensor can be accessed via the SPI interface and the temperature reading is an 8-bit word (0...255). The transfer function is expressed with the following formula:

$$T = \frac{Counts - 197}{-1.083}$$

Where:

Counts    Temperature reading  
T            Temperature in °C

The temperature measurement output is not calibrated. The internal temperature compensation routine uses relative results where absolute accuracy is not needed. If the temperature measurement results are used for additional external compensation then one point calibration in the system level is needed to remove the offset. With external one point calibration the accuracy of the temperature measurement is about ±1 °C.

### 3 Application Information

#### 3.1 Recommended Circuit Diagrams and Printed Circuit Board Layouts

The SCA100T should be powered from a well regulated 5 V DC power supply. Coupling of digital noise to the power supply line should be minimized. 100nF filtering capacitor between VDD pin 12 and GND plane must be used.

The SCA100T has a ratiometric output. To get the best performance use the same reference voltage for both the SCA100T and Analog/Digital converter.

Use low pass RC filters with 5.11 kΩ and 10nF on the SCA100T outputs to minimize clock noise.

Locate the 100nF power supply filtering capacitor close to VDD pin 12. Use as short a trace length as possible. Connect the other end of capacitor directly to the ground plane. Connect the GND pin 6 to underlying ground plane. Use as wide ground and power supply planes as possible. Avoid narrow power supply or GND connection strips on PCB.

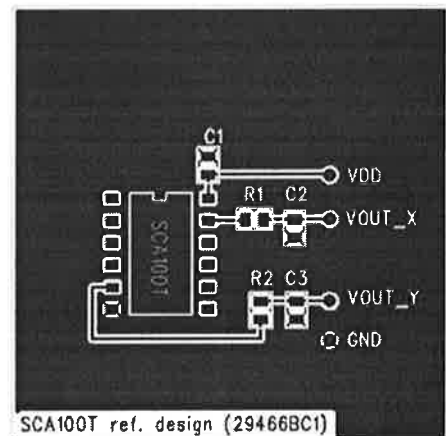
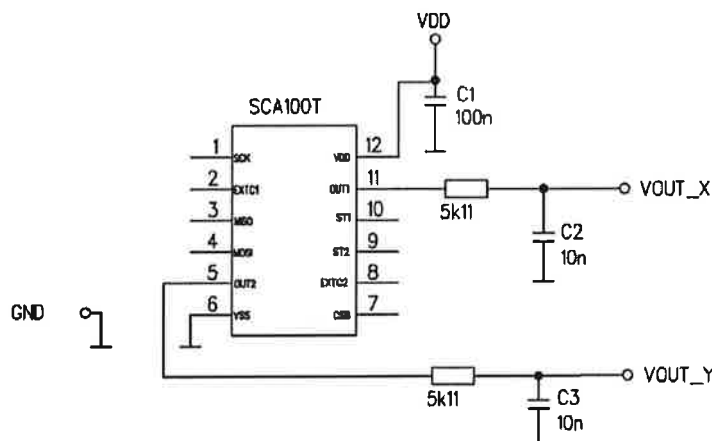


Figure 13. Analog connection and layout example

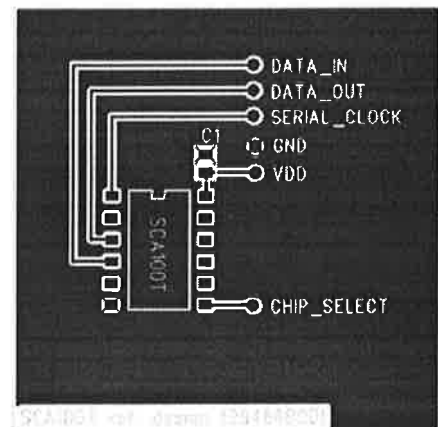
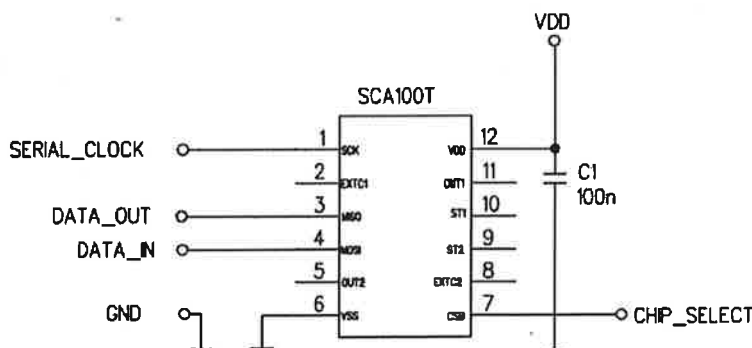
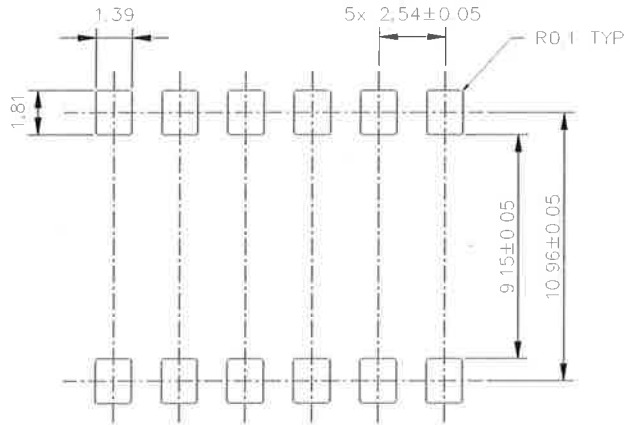


Figure 14. SPI connection example

### 3.2 Recommended Printed Circuit Board Footprint



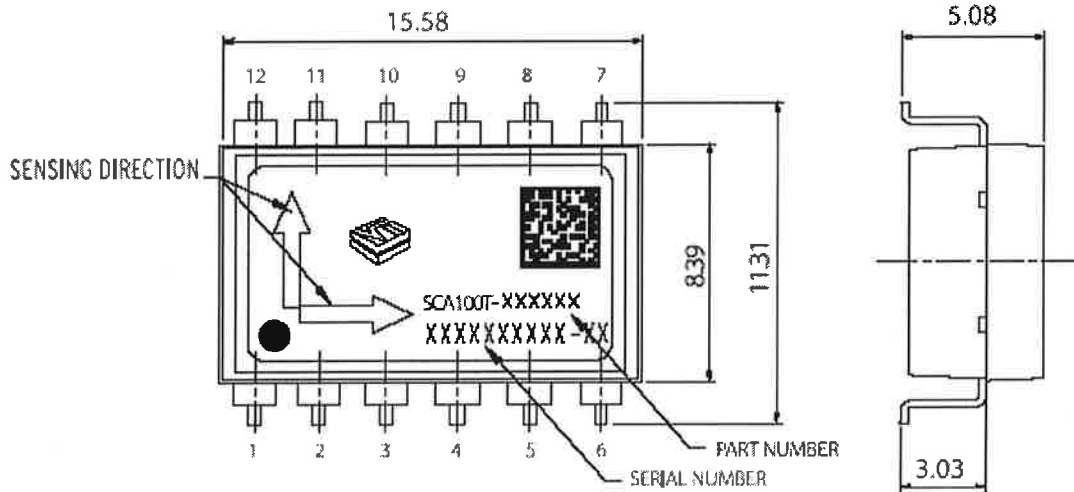
**Figure 15.** Recommended PCB footprint

## 4 Mechanical Specifications and Reflow Soldering

### 4.1 Mechanical Specifications (Reference only)

Lead frame material:  
Plating:  
Solderability:  
RoHS compliance:  
Co-planarity error  
The part weights

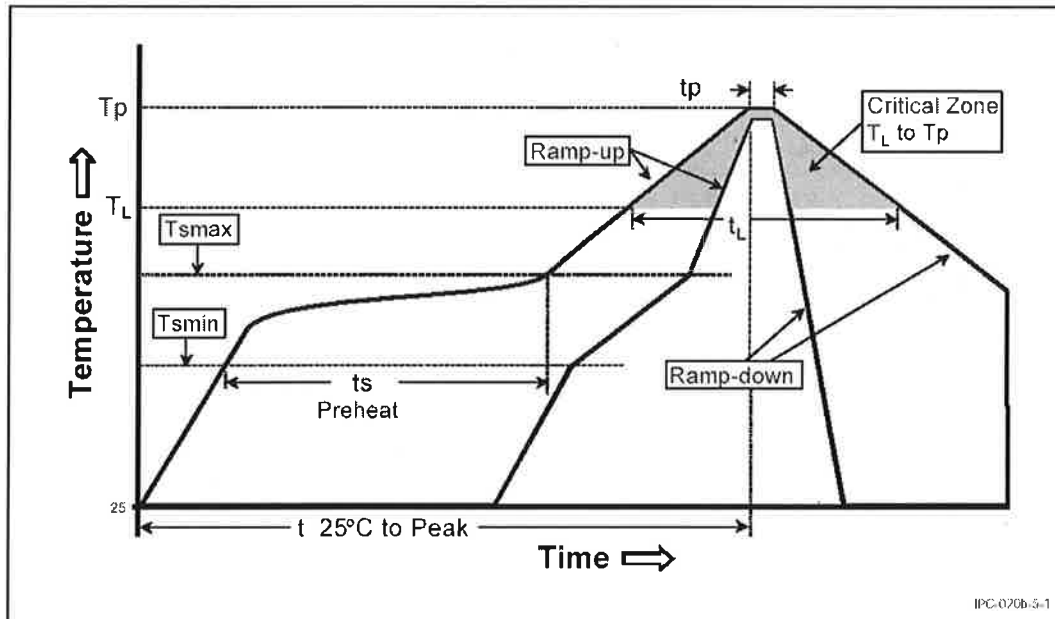
Copper  
Nickel followed by Gold  
JEDEC standard: JESD22-B102-C  
RoHS compliant lead free component.  
0.1mm max.  
<1.2 g



**Figure 16.** Mechanical dimensions of the SCA100T (Dimensions in mm)

## 4.2 Reflow Soldering

The SCA100T is suitable for Sn-Pb eutectic and Pb-free soldering process and mounting with normal SMD pick-and-place equipment.



**Figure 17.** Recommended SCA100T body temperature profile during reflow soldering. Ref. IPC/JEDEC J-STD-020B.

Profile feature	Sn-Pb Eutectic Assembly	Pb-free Assembly
Average ramp-up rate ( $T_L$ to $T_P$ )	3°C/second max.	3°C/second max.
Preheat		
- Temperature min ( $T_{smin}$ )	100°C	150°C
- Temperature max ( $T_{smax}$ )	150°C	200°C
- Time (min to max) ( $t_s$ )	60-120 seconds	60-180 seconds
$T_{smax}$ to $T_L$ Ramp up rate		3°C/second max
Time maintained above:		
- Temperature ( $T_L$ )	183°C	217°C
- Time ( $t_L$ )	60-150 seconds	60-150 seconds
Peak temperature ( $T_P$ )	240 +0/-5°C	250 +0/-5°C
Time within 5°C of actual Peak Temperature ( $T_P$ )	10-30 seconds	20-40 seconds
Ramp-down rate	6°C/second max	6°C/second max
Time 25° to Peak temperature	6 minutes max	8 minutes max

The Moisture Sensitivity Level of the part is 3 according to the IPC/JEDEC J-STD-020B. The part should be delivered in a dry pack. The manufacturing floor time (out of bag) in the customer's end is 168 hours.

### Notes:

- Preheating time and temperatures according to guidance from solder paste manufacturer.
- It is important that the part is parallel to the PCB plane and that there is no angular alignment error from intended measuring direction during assembly process.
- Wave soldering is not recommended.
- **Ultrasonic cleaning is not allowed.** The sensing element may be damaged by an ultrasonic cleaning process.