

SISTEMA DE MEDICION DE TEMPERATURA PARA EL PROCESO CURADO DEL CONCRETO



Ponente: Juan Camilo Chaparro Riveros

Director: Ing. Camilo Otalora Sanchez

Facultad de Ingeniería, Ingeniería Electrónica

Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., Colombia

Trabajo de grado presentado para optar por el título de

Ingeniero Electrónico

2018

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi familia por el apoyo incondicional que me han brindado durante todo este proceso universitario y de toda mi formación, ayudándome a pasar los momentos difíciles durante toda esta aventura, Estoy especialmente agradecido con Andrés por sus apoyo incondicional y hermandad que llevamos durante tanto tiempo, me a hecho cambiar muchos puntos de vista desde que inicie este proceso, que han sido para bien.

Agradezco a mi director del trabajo de grado, Camilo Otalora Sánchez por su gran conocimiento, información y experiencia. Donde el tiempo que dedico en mi proyecto fue vital para culminar el proyecto

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO	i
TABLA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABLAS	iv
1 INTRODUCCION	1
2 MARCO TEORICO	2
2.1 CURADO DEL CONCRETO	2
2.2 METODOS DE MADUREZ	2
2.2.1 FUNCION DE MADUREZ – FACTOR DE TIEMPO TEMPERATURA (NURSE - SAUL).....	3
2.2.2 FUNCION DE MADUREZ – EDAD EQUIVALENTE	4
2.3 NORMA ASTM C 1074	5
2.4 NORMA NTC 3357	5
2.4.1 MUESTREO DEL CONCRETO	5
3 OBJETIVO DEL PROYECTO	7
3.1 OBJETIVOS GENERAL	7
3.2 OBJETIVO ESPECIFICO	7
3.3 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA	7
4 DESARROLLO	8
4.1 FASE 2: SELECCIÓN DE SENSOR	8
4.1.1 TERMOPAR	8
4.1.2 DETECTORES DE TEMPERATURA RESISTIVA (RTD).....	9
4.1.2.1 RTD DE 2 HILOS.....	10
4.1.2.2 RTD DE 3 HILOS.....	10
4.1.2.3 RTD DE 4 HILOS.....	12
4.1.2.4 RESISTENCIA NOMINAL	13
4.1.2.5 CLASES RTD	13
4.1.3 SELECCIÓN DE SENSOR	13
4.1.4 SENSORES EN EL MERCADO.....	14
4.1.5 SENSITIVIDAD DE LOS PT100 RTD.....	14
4.2 FASE 3: DISEÑO DEL DIAGRAMA DE BLOQUES	15

4.2.1	CONVERSION DE TEMPERATURA A DIGITAL (ACONDICIONAMIENTO Y ADC).....	16
4.2.2	DISEÑO DEL BLOQUE DE ALMACENAMIENTO DE DATOS (MEMORIA).....	16
4.2.3	DISEÑO DE LA COMUNICACIÓN SERIAL DEL SISTEMA AL COMPUTADOR.....	17
4.3	FASE 4: IMPLEMENTACION DEL SISTEMA	18
4.3.1	SELECCION DE COMPONENTES	18
4.3.1.1	CONVERSION DE VOLTAJE A TEMPERATURA.....	18
4.3.1.1.1	LTC2983	18
4.3.1.2	MICROCONTROLADOR.....	21
4.3.1.2.1	SOFTWARE	23
4.3.1.3	MEMORIA	27
4.3.1.4	BATERIA	27
4.3.1.5	CAJA.....	29
4.3.2	DISEÑO DEL CIRCUITO IMPRESO DEL PROTOTIPO DE PRUEBAS.....	30
4.3.2.1	DISEÑO DE PRINTED CIRCUIT BOARD (PCB)	32
4.3.3	FABRICACION DEL CIRCUITO IMPRESO Y ENSABLAJE DE COMPONENTES	33
4.4	FASE 5: PROTOCOLO DE PRUEBAS.....	34
4.4.1	PROTOCOLO DE PRUEBAS CALIBRACION DEL SISTEMA.....	34
4.4.2	PROTOCOLO DE PRUEBAS: CONSUMO DEL SISTEMA	34
5	RESULTADOS.....	36
5.1	RESULTADOS: CALIBRACION DEL SISTEMA	36
5.2	RESULTADOS: CONSUMO DEL SISTEMA	38
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	40
6.1	REVISIONES GENERALES	¡Error! Marcador no definido.
6.2	TRABAJO FUTURO.....	41
7	BIBLIOGRAFIA.....	42
8	ANEXOS	43

TABLA DE FIGURAS

Figura 2.1: Curva de Temperatura Vs Edad	4
Figura 4.1: Voltaje Vs Temperatura	9
Figura 4.2: RTD Configuración de 2 hilos	10
Figura 4.3: RTD Configuración de 3 hilos	11
Figura 4.4: RTD Configuración de 3 hilos con compensación	12
Figura 4.5: RTD Configuración de 4 hilos	12
Figura 4.6: Clases de RTD	13
Figura 4.7: Diagrama de bloques	16
Figura 4.8: Esquemático de conexiones LTC2983	20
Figura 4.9: Voltaje de salida alto Vs Corriente de salida en alto	22
Figura 4.10: Esquemático del circuito del microcontrolador	23
Figura 4.11: Diagrama de flujo main	24
Figura 4.12: Diagrama de flujo ISR	25
Figura 4.13: Diagrama de flujo LTC2983	26
Figura 4.14: Esquemático de la memoria	27
Figura 4.15: Especificaciones y Descarga de Batería TL-2150	29
Figura 4.16: Hoja de especificaciones HAMMOND MANUFACTURING	30
Figura 4.17: Esquemático del circuito	30
Figura 4.18: PCB Top Layer	32
Figura 4.19: PCB Bottom Layer	32
Figura 4.20: Ensamblaje top layer	33
Figura 4.21: Ensamblaje bottom layer	33
Figura 4.22: Medición de corriente del sistema	35
Figura 5.1: Medición Termómetro Vs Sistema	36
Figura 5.2: Error absoluto del sistema	37
Figura 5.3: Mediciones de los sensores	37
Figura 5.4: Consumo del Sistema	38

LISTA DE TABLAS

Tabla 4.1: Tipos de termocupla.....	9
Tabla 4.2: Materiales de RTD.....	10
Tabla 4.3: Comparación entre sensores.....	14
Tabla 4.4: Cambios de voltaje con diferentes corrientes de alimentación	15
Tabla 4.5: Tiempo total de transferencia a diferentes tasas de transmisión	17
Tabla 4.6: Comparación de circuitos integrados.....	18
Tabla 4.7: Especificaciones LTC2983	19
Tabla 4.8: Especificaciones de entrada y salidas digitales.....	20
Tabla 4.9: Consumo del microcontrolador con reloj interno	22
Tabla 4.10: Consumos de LTC2983	28
Tabla 4.11: Consumo PIC18F46k20.....	28
Tabla 4.12: Consumo Memoria.....	28
Tabla 4.13: Consumo del sistema	29
Tabla 4.14: Especificación de la batería.	29
Tabla 4.15: Componentes.....	31
Tabla 4.16: Especificaciones del Termistor	34
Tabla 4.17: Equipos utilizados.....	34
Tabla 4.18: Equipo utilizado	35
Tabla 5.1: Comparación de Consumo	39

1 INTRODUCCION

La construcción de edificios es un área que ha ido avanzando tanto en tecnología como la demanda de estructuras a medida que pasa el tiempo, acelerando sus procesos de construcción, cumpliendo con cortos tiempos de entrega, donde la calidad, durabilidad y resistencia del concreto son fundamentales para que la estructura cumpla con los estándares de construcción, el proceso que busca hacer lo dicho anteriormente es el curado del concreto.

Para estimar este proceso, se utiliza métodos de madurez que consisten en funciones de madurez, los cuales estiman la resistencia de compresión del concreto, donde se toma muestras de temperatura durante lapsos de tiempo para poder hallar su resistencia, esta toma de medidas se suele hacer por medio de un termómetro digital, sin embargo, para que el método de madurez funcione de manera precisa, se requiere que, durante el curado se tome cada 30 min una muestra de temperatura durante los primeros dos días y después de esto, puede tomarse cada hora una muestras hasta terminar el curado (máximo 30 días), donde los termómetros que se utilizan no poseen una forma de comunicación con otros dispositivos, haciendo que las mediciones se tenga que hacer manualmente, generando mediciones potencialmente erradas.

El objetivo de este proyecto es diseñar e implementar un sistema de medición de temperatura durante el proceso del curado del concreto, donde utilice múltiples sensores de temperatura capaces de soportar las condiciones del curado, almacenar estos datos en una memoria y posteriormente ser enviados por medio de un sistema de comunicación serial a una computadora donde se almacenarán.

En el presente documento se organiza con el marco teórico, donde se investiga las diferentes problemáticas del tema, con trabajos relacionados y estándares que poseen este tipo de medidores de temperatura, posteriormente se presentara el objetivo del trabajo de grado, siguiendo, con el desarrollo del proyecto, donde se muestra la metodología que se realizó para generar la solución final, donde se dividen en diferentes fases, selección de sensor, diseño de diagrama de bloques, implementación del sistema y protocolo de pruebas, con esto, se llega a los resultados obtenidos por el protocolo de pruebas, finalmente, el documento culmina con conclusiones y recomendaciones de trabajo futuro, sintetizando los resultados del proyecto y mencionando algunas propuestas para mejorar el trabajo en el futuro.

2 MARCO TEORICO

2.1 CURADO DEL CONCRETO

“El curado de concreto es el mantenimiento de un adecuado contenido de humedad y temperatura en el concreto a edades tempranas, de manera que esta pueda desarrollar las propiedades para las cuales fue diseñada la mezcla”.[1]

Por lo que el curado de concreto es un proceso que desarrolla de manera positiva las propiedades del concreto, donde, la temperatura y humedad tienen un efecto directo del mismo.

“La temperatura es un factor importante en un curado apropiado, basándose en la velocidad de hidratación y, por lo tanto, el desarrollo de resistencia es mayor a más altas temperaturas, Generalmente, la temperatura del concreto debe ser mantenida por encima de 50°F (10°C) para un ritmo adecuado de desarrollo de resistencias. Además, debe mantenerse una temperatura uniforme a través de la sección del concreto, mientras está ganando resistencia, para evitar las grietas por choque térmico”.[1]

De este modo, la temperatura debe tenerse un cuidado especial para no generar daños durante el proceso de curado y así obtener la resistencia diseñada.

Las ventajas de hacer curado concreto son:

- Una ganancia de la resistencia predecible: A diferentes temperaturas el curado se comporta de forma distinta, por ejemplo; El curado en alta temperatura ganara una resistencia temprana rápidamente, pero la resistencia después del proceso puede que se reduzcan en cuanto a bajas temperaturas tomara más tiempo en curarse por lo que su resistencia también, lo que demora la remoción del encofrado y la construcción siguiente.
- Durabilidad mejorada: Mejora la dureza superficial, resistencia al desgaste superficial y la abrasión, además, de que el concreto es mas impermeable al agua, lo que evita que tanto la humedad y sustancia químicas disueltas en agua puedan afectarlo.
- Mejores condiciones de servicio y apariencia: Un curado apropiado reduce el resquebrajamiento y la pulverización.

2.2 METODOS DE MADUREZ

Los métodos de madurez son utilizados como un indicador confiable de estimación de la resistencia del concreto durante su curado en sitio. Esta práctica es usada para programar actividades como el retiro de formaletas, o el apuntalamiento, el relleno de muros de contención, programar operaciones pretensado y postensado, corte de juntas y en qué momento deben concluir las protecciones contra el frío.

Los métodos de madurez utilizan el concepto de que las propiedades del concreto se desarrollan con el tiempo en la medida que el cemento hidrata y libera calor, la tasa de desarrollo de la resistencia del concreto está relacionada con la tasa de hidratación del cemento. El calor generado incrementa la temperatura en el concreto. Donde la principal ventaja de registrar el perfil de temperatura-tiempo es poder estimar su resistencia en el sitio.

“Con los métodos de estimación de madurez la información de resistencia es suministrada en tiempo real dado que las mediciones de madurez son realizadas en el sitio en cualquier momento. Como resultado, se optimiza el flujo de trabajo en la construcción, y la programación de las actividades de construcción se pueden basar en una información de resistencia en el sitio más precisa” [2].

El método de madurez involucra los siguientes pasos

- Medir el desarrollo de la temperatura del concreto en la estructura, insertando los sensores en sitios de la estructura que son críticos en términos de exposición y requerimientos estructurales.
- Determinar una relación resistencia-madurez para la mezcla de concreto a ser utilizada en la estructura, monitorear el desarrollo de la temperatura de los especímenes de prueba empleando termopares introducidos en uno o más cilindros.
- Calcular el índice de madurez con base en el registro de temperatura y edad.
- Estimar la resistencia del concreto en el sitio de obra con base en el índice de madurez calculado y la relación resistencia-madurez.

Teniendo en cuenta lo anterior, se requiere un sistema de medición que almacene los datos de temperatura-tiempo durante todo el curado de concreto, con esto se puede estimar el índice de madurez con los métodos de madurez y derivado a esto la resistencia del concreto.

Algunos de las limitaciones de los métodos de los métodos de madurez que pueden llevar a estimaciones erróneas son:

- El concreto usado en la estructura no es representativo de aquel usado para los ensayos de calibración debido a cambios del material, precisión en la preparación, contenido de aire, etc.
- Temperaturas elevadas a edades tempranas resultarían en una predicción incorrecta de la resistencia a largo plazo
- El concreto debería ser adecuadamente colocado, consolidando y las condiciones de curado deberían permitir la hidratación continua del cemento.
- El uso de datos de temperatura o valores de energía de activación que no son representativos de la mezcla de concreto.

Con lo que el curado de concreto debe hacerse de manera adecuada para poder estimar de forma adecuada la resistencia del concreto, midiendo tan solo la temperatura del mismo.

2.2.1 FUNCION DE MADUREZ – FACTOR DE TIEMPO TEMPERATURA (NURSE - SAUL)

“Nurse (1949)[3] mostró que cuando el desarrollo de la fuerza relativa se representa como una función del producto del tiempo y la temperatura, los datos de los diferentes concretos y los ciclos de curado cayeron razonablemente cerca de una sola curva no lineal. Saúl (1951)[3] introdujo el término "Madurez", y sugirió que la madurez se debe calcular con respecto a una temperatura de referencia (T_0), que corresponde a la temperatura a la que no se producirá ningún aumento de la fuerza”.[3]

Por lo que fue un trabajo conjunto para poder llegar a la ecuación final por eso el nombre Nurse-Saul, donde, es una función lineal entre la temperatura y la ganancia de fuerza. Este método toma el área bajo la curva de la temperatura como el índice de madurez como se puede observar en la ecuación 2.1

$$M(t) = \sum_0^t (T - T_0)\Delta t \quad (2.1)$$

Donde

M(t): Índice de madurez en °C h o °C días.

Ta: Temperatura promedio del concreto, en °C.

To: Temperatura de referencia (°C).

t: Tiempo transcurrido.

Δt = intervalo de tiempo (días u horas)

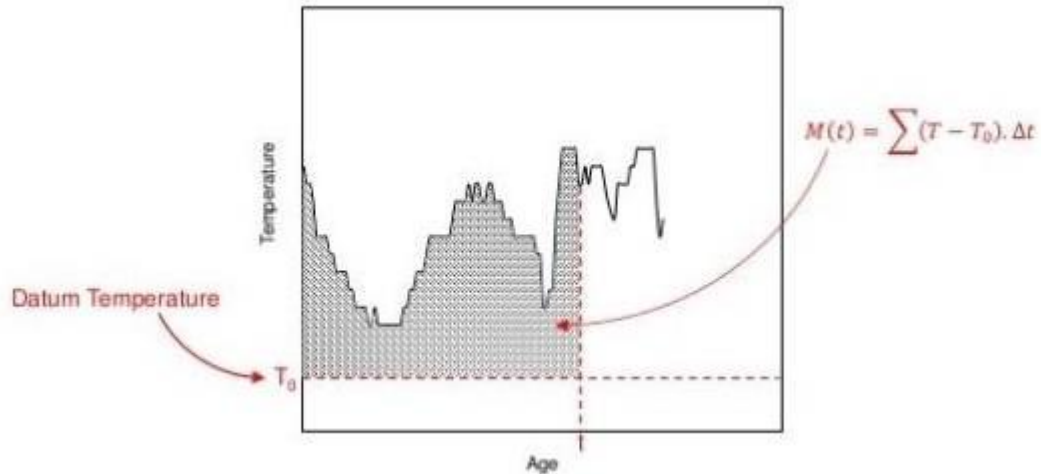


Figura 2.1: Curva de Temperatura Vs Edad

“La temperatura de referencia representa la temperatura a la que el hormigón deja de ganar resistencia. La temperatura de referencia es específica para un diseño de mezcla. La ASTM C1074 – A.1 proporciona un procedimiento estándar para encontrar la temperatura de referencia”.[4]

Estudios previos muestran que la temperatura de referencia puede ser seleccionada entre 0°C y -10°C.

2.2.2 FUNCION DE MADUREZ – EDAD EQUIVALENTE

“La introducción de esta función se sobrepuso a una de las principales limitaciones de la Nurse-Saúl, porque permite una relación no lineal entre la velocidad inicial de la fuerza de desarrollo y la temperatura de curado. Esta dependencia de la temperatura se describe por el valor de la energía de activación aparente”.[5]

$$te = \sum e^{-Q\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r}\right)} \Delta t \quad (2.2)$$

$$Q = \frac{E}{R} \quad (2.3)$$

Donde:

te: edad equivalente a la temperatura de referencia

E: Energía de activación equivalente (J/mol)

R: Constante universal de los gases (8,3144 J/K mol)

T: Temperatura absoluta promedio del concreto durante el intervalo de tiempo Δt (K)

T_r : Temperatura absoluta de referencia (K)

Δt = intervalo de tiempo (h)

El concepto de “edad equivalente” utiliza la energía de activación para predecir su comportamiento de hidratación a diversas temperaturas de curado.

Como se puede apreciar ambos métodos requieren una constante medición de temperatura durante todo el proceso de curado, para poder estimar la madurez o edad equivalente de temperatura, acelerando los procesos posteriores de la obra.

2.3 NORMA ASTM C 1074

“Los métodos de madurez son utilizados como un indicador más confiable de la resistencia del concreto en el sitio durante la construcción, en vez de los ensayos a compresión de cilindros curados en obra. La práctica tradicional de medir la resistencia de los cilindros de obra, curados en las mismas condiciones que la estructura, es usada para programar actividades de construcción tales como: el retiro de las formaletas o el re-apuntalamiento, el relleno de muros de contención, programar operaciones de pretensado y postensado, determinar el tiempo para abrir al tránsito en pavimentos y puentes, el corte de juntas, y para establecer cuando deben concluir las medidas de protección en climas fríos” [3].

A continuación, se muestra algunas consideraciones que presenta la norma con respecto a los registradores de datos de temperatura y medidores de madurez de concreto

- Un dispositivo que monitoree y almacene las diferentes temperaturas de concreto como una función de tiempo y estos datos puedan ser manipulados para estimar el índice de madurez según el método.
- Dispositivos alternativos que incluyen sensores de temperatura conectados a registradores de datos o dispositivos digitales embebidos que midan y almacenen la temperatura para posteriormente calcular el índice de madurez.
- El tiempo entre mediciones de temperatura deberán ser cada ½ hora o menos durante las primeras 48, luego de esto, las medidas pueden ocurrir cada hora.
- La temperatura almacenada en el dispositivo deberá tener una precisión de $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

2.4 NORMA NTC 3357

Esta norma determina el método adecuado para determinar la temperatura del concreto fresco.

“El recipiente debe ser fabricado de material no absorbente y de un tamaño suficiente para recubrir de concreto el sensor de temperatura, por lo menos, con 75 mm alrededor de éste. La capa de concreto debe ser, por lo menos, tres veces el tamaño máximo nominal del agregado grueso.” [6]

Con lo que el sensor tiene que ser depositado dentro del concreto durante su proceso de curado y quede rodeado de concreto por lo menos de 7.5 cm a su alrededor.

2.4.1 MUESTREO DEL CONCRETO

A continuación, se muestra algunas recomendaciones para tomar muestras durante el curado de concreto con el dispositivo de medición de temperatura.

- El sensor del dispositivo de medición debe tener un recubrimiento mínimo de 7.5cm del concreto en todas direcciones
- Se deja el dispositivo de medición en el concreto fresco durante un periodo mínimo de 2 min o hasta que la lectura se estabilice, luego se toma y registra la temperatura.
- Se completa la medición de temperatura del concreto fresco dentro de los 5 min siguientes a la obtención de la muestra.

Teniendo en cuenta lo anterior se espera que el sistema de medición tenga 4 sensores de temperatura, los cuales deberá tener una exactitud de 1°C, además de esto, los sensores deben ser capaces de soportar las condiciones de curado del concreto, garantizando su medición. Además, el sistema almacenara estos datos en una memoria hasta culminar el curado, dando la posibilidad de solicitar los datos almacenados en cualquier momento y ser transferidos a un computador. Por otro lado, se espera que el sistema tenga un bajo de consumo de energía donde funcione por lo menos 60 días consecutivos.

3 OBJETIVO DEL PROYECTO

3.1 OBJETIVOS GENERAL

El objetivo de este proyecto es diseñar e implementar un sistema de medición de temperatura durante el proceso del curado del concreto, donde utilice múltiples sensores de temperatura capaces de soportar las condiciones del curado, almacenar estos datos en una memoria y ser enviados en cualquier momento por medio de un sistema de comunicación serial a una computadora.

3.2 OBJETIVO ESPECIFICO

Las características del proyecto relacionadas con las de diseño son:

- Seleccionar un sensor de temperatura que puedan operar durante el curado del concreto.
- Diseñar e implementar un sistema de almacenamiento y recolección de datos de temperatura
- Diseñar e implementar la comunicación serial entre el sistema de almacenamiento y computador.
- Calibrar el sistema de medición con un medidor de temperatura certificado que corrobore la información suministrada por el sistema.
- Mostrar los datos adquiridos por el sistema de almacenamiento y recolección en el computador (temperatura Vs tiempo).
- Probar el funcionamiento y medición del sistema durante el curado de concreto.

3.3 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

Para este proyecto es necesario que la medición de los sensores tenga una precisión por lo menos de $\pm 1^{\circ}\text{C}$, para garantizar que la medición sea válida para el proceso de estimación de la madurez del concreto, además este debe poseer una autonomía de 60 días, puesto que es el caso más largo que se registra de duración del proceso de curado, adicionalmente de poseer una memoria para adquirir los datos para ser enviado a una computadora por puerto serial donde se mostrara los datos, adicionalmente, poseerá una protección en contra del ambiente, esto por medio de una caja. Se espera que, en la prueba de medición durante el proceso de curado, los sensores quedaran atrapados dentro del concreto y no se podrán recuperar, sin embargo, el sistema estará en un lugar seguro fuera del proceso de curado.

4 DESARROLLO

El desarrollo del proyecto se dividió en cinco fases las cuales abarcan la selección de los sensores, Diseño del diagrama de bloques, implementación del sistema y su respectiva evaluación de funcionamiento (protocolo de pruebas).

Fase 1 – Estudio del proceso de curado del concreto: En esta etapa se estudia el proceso de curado de concreto y métodos de madurez.

Fase 2 – Identificación y selección de sensores según las especificaciones: En esta fase se estudia los diferentes tipos de sensores de temperatura, donde se escoge el más adecuado según las especificaciones requeridas.

Fase 3 – Diseño diagrama de bloques: En esta fase se diseñarán los bloques del sistema. Esto comprende a selección de topologías, hasta definición de los componentes y parámetros mínimos de cada bloque.

Fase 4 – Implementación de sistema: Se fabricará el sistema usando circuitos integrados comerciales, para posteriormente verificar que funcione y realizar mediciones, las cuales mido el desempeño de cada bloque.

Fase 5 – Evaluación: En esta fase se evaluarán los parámetros de funcionamiento del proyecto. Se realizarán y calibrará el sistema diseñado con un medidor certificado, garantizando que el dato adquirido sea el correcto

4.1 FASE 2: SELECCIÓN DE SENSOR

En esta sección se estudiará los diferentes sensores encontrados en el mercado, señalando su forma de funcionamiento, características, ventajas y desventajas. Donde se analizará cada uno estos y se decide cual es el más adecuado para la aplicación.

4.1.1 TERMOPAR

“Un termopar es un transductor formado por la unión de dos metales distintos que produce una diferencia de potencial muy pequeña (del orden de los μV). Este potencial es función de la diferencia de temperatura entre sus extremos, los denominados punto caliente y punto frío”. [7]

Teniendo un cambio de temperatura se tiene un cambio de voltaje en la termopar, que se puede tomar como una interpretación casi directa entre esas dos variables, teniendo en cuenta que se tiene que referenciar la punta “fría” para que se tenga las medidas referenciadas a un 0°C , para estos casos se solía usar cubos de hielo en esta punta, para referir la diferencia de temperatura a 0°C . Sin embargo, en la actualidad se suele utilizar sistemas electrónicos para generar esta referencia

Los termopares vienen en diferentes presentaciones donde cada una tiene un rango de temperatura, tolerancia y precisión representativas, cabe destacar que estos poseen distintas clases donde mejora su rango de temperatura o tolerancia, se ilustra en la tabla 4.1 algunos de estos tipos, en los rangos de temperatura que interesan en la aplicación, además se muestra la gráfica en la figura 4.1 del comportamiento de las termocuplas en sus distintos tipos Voltaje (mV) Vs Temperatura $^\circ\text{C}$.

Como se puede observar el tipo T clase 1, posee un rango de temperatura pequeño sin embargo su tolerancia es la más adecuada de los dos restantes.

Termocupla	Clase 1 (°C)	Clase 2 (°C)	Clase 3 (°C)
Tipo T			
Temperatura	-40 < t < 125	-40 < t < 125	-40 < t < 125
Tolerancia	±0.5	±1	±1
Tipo E			
Temperatura	-40 < t < 375	-40 < t < 333	-167 < t < 40
Tolerancia	±1.5	±2.5	±2.5
Tipo J			
Temperatura	-40 < t < 375	-40 < t < 333	-
Tolerancia	±1.5	±2.5	-

Tabla 4.1: Tipos de termocupla

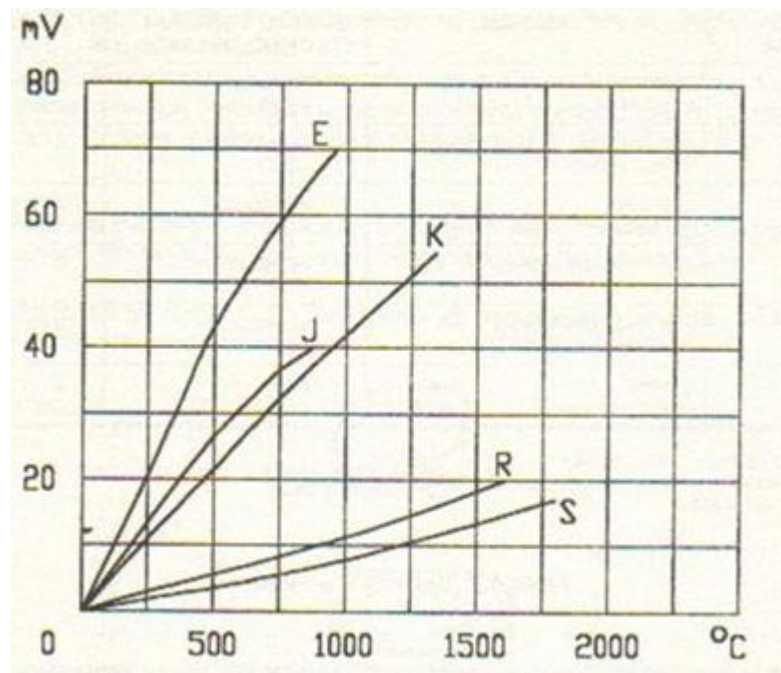


Figura 4.1: Voltaje Vs Temperatura

Algunas ventajas y desventajas de este tipo de sensores son:

- Poseen la limitación con su exactitud ya que es fácil obtener errores cuando se requiere precisiones inferiores a 1°C.
- La temperatura del objeto se debe inferir, y el usuario debe asegurarse de que no hay flujo de calor entre sus terminales.
- Son propensos a errores de lectura de la temperatura después de un uso prolongado
- Son conductores eléctricos por lo que no se debe poner en contacto con fuentes de electricidad
- Estos dispositivos reaccionan rápidamente si se los compara con termómetros de resistencia

Uno de los mayores problemas de este tipo de sensor es cuando se requiere medir relativamente largas distancias el voltaje y medición puede verse afectados, además si el material del conductor del termopar es distinto al conector para acoplarse al circuito electrónico genera un pequeño margen de error en la medición.

4.1.2 DETECTORES DE TEMPERATURA RESISTIVA (RTD)

Son sensores de temperatura que contienen una resistencia que cambia su valor a medida que cambia su temperatura. Poseen un coeficiente de temperatura – resistencia positiva (la resistencia eléctrica aumenta

cuando aumenta la temperatura). El RTD se le reconoce por tener una precisión, repetividad y estabilidad. Este tipo de sensores al ser resistivos requieren una fuente de alimentación, se suele utilizar una fuente de corriente constante para el sensor generando un voltaje, que es proporcional a la temperatura medida.

Los RTD se suelen diseñar con distintos materiales que, dependiendo de esto, determina tanto precisión, como rango de temperatura, alguno de estos materiales se presenta en la tabla 4.2

Material de RTD	Rango de Temperatura
Platino	-260°C a 650°C
Nickel	-100°C a 300°C
Cobre	-75°C a 150°C
Nickel/Hierro	0°C a 200°C

Tabla 4.2: Materiales de RTD

Además de los rangos de cada material se debe tener en cuenta que tan susceptible es el material a una contaminación ambiental o corrosión que se pueda presentar durante la medida.

Los RTD vienen de diferentes presentaciones por número de hilos, resistencia nominal y clase, en la siguiente sección se presenta las diferentes presentaciones que suele encontrar los sensores RTD.

4.1.2.1 RTD DE 2 HILOS

Es la más sencilla, sin embargo, es la más propensa a tener errores de medición, ya que, la resistencia parasita de los conectores es propensa a aumentar por cambios de temperatura y también es afectada por largas longitudes de cables de conexión del RTD, haciendo que haya una caída de voltaje en los cables, generando un medición errónea, en la figura 4.2 su esquemático eléctrico, donde el R_L es la resistencia parasita que posee los alambres de conexión del RTD, I_{ex} es la fuente de corriente, RTD es el la resistencia del RTD y V_o el Voltaje que sobre el sensor (como RTD y conectores)..

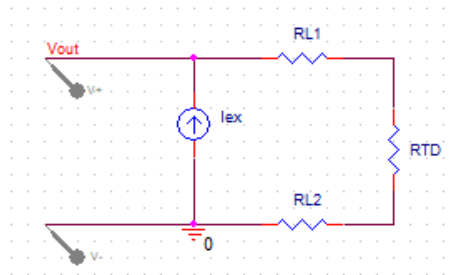


Figura 4.2: RTD Configuración de 2 hilos

Por lo cual los RTD de 2 hilos se utilizan en aplicaciones donde no requiera grandes extensiones de cable de conexión entre el sistema de medición y el sensor.

4.1.2.2 RTD DE 3 HILOS

Este RTD resuelve parcialmente el problema que se presentaba en el de 2 hilos, su esquemático se muestra en la figura 4.3, añadiendo una conexión para tomar la medición de voltaje, donde se conecta a un amplificador de alta impedancia, la corriente que pasa por allí es despreciable, haciendo que se reduzca el error presentado en 2 hilos. En la figura 4.3 se muestra las conexiones de un RTD 3 hilos, Donde $RL1$, RT y $RL3$ es donde se alimentará con la fuente de corriente y $RL2$ es donde se tomará la medición de voltaje normalmente referido a tierra.

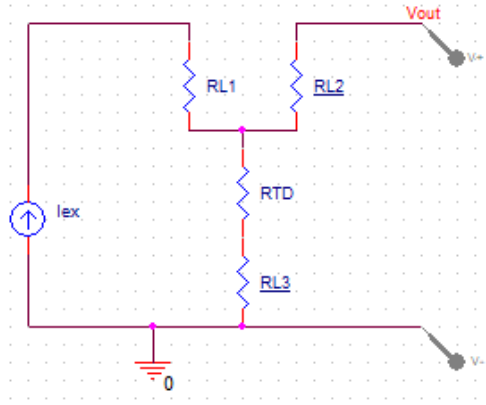


Figura 4.3: RTD Configuración de 3 hilos

Sin embargo, existe una forma de reducir este error hasta cero, suponiendo que las resistencias parasitas de los conectores son exactamente iguales, utilizando un conversor de análogo a digital (ADC), añadiendo una resistencia de referencia en serie al RTD, además una fuente de corriente adicional (mismo valor I_{ex}) como se muestra en la figura 4.4. Dando uso de la fuente de corriente adicional, se alimenta $RL2$ generando una caída de voltaje en el cable, haciendo que la resistencia en serie que se añadió pase $2I_{ex}$. Analizando esa situación se llega a las siguientes ecuaciones 4.1, 4.2 y 4.3.

$$V^+ = I_{ex}(RL1 + RTD) + I_{ex}(RL3 + Rref) \quad (4.1)$$

$$V^- = I_{ex}(RL2) + 2I_{ex}(RL3 + Rref) \quad (4.2)$$

$$V_{dif} = V^+ - V^- = I_{ex}(RL1 - RL2 + RTD) \quad (4.3)$$

Como

$$RL1 = RL2 = RL3$$

Entonces

$$V_{dif} = I_{ex}(RTD) \quad (4.4)$$

Para el voltaje de referencia

$$V_{ref} = 2I_{ex}(Rref) \quad (4.5)$$

V_{ref} es la referencia de voltaje del ADC, donde su salida para un cierto número de bits es

$$Code_{ideal} = (2^n - 1) \left(\frac{V_{dif}}{V_{ref}} \right) \quad (4.6)$$

Donde n es el número de bits que posee el ADC, Reemplazando y simplificando la expresión se llega finalmente a la ecuación 4.7

$$Code_{ideal} = (2^n - 1) \left(\frac{RTD}{2R_{ref}} \right) \quad (4.7)$$

Así el código que procese los datos del ADC hace la medida independiente de los cables de conexión del sensor, sin embargo, se debe garantizar que estos cables sean del mismo material y posean la misma longitud para que funcione este método, además que Rref tiene que ser de precisión y que posea un coeficiente de temperatura bajo.

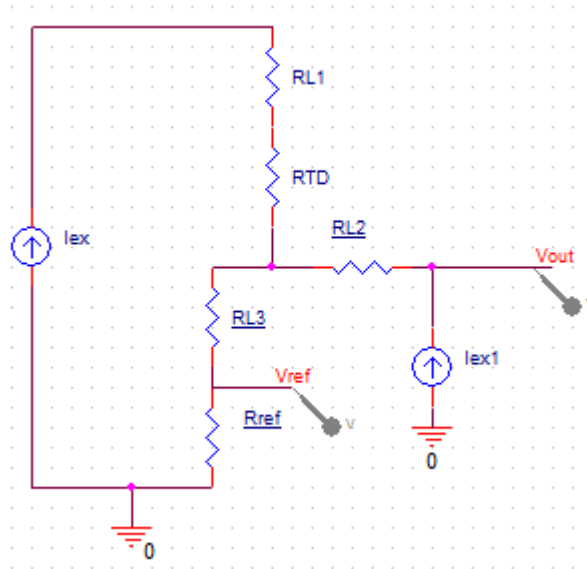


Figura 4.4: RTD Configuración de 3 hilos con compensación

4.1.2.3 RTD DE 4 HILOS

Este tipo de RTD resuelve en su totalidad el problema de 2 hilos, tomando 2 cables exclusivos para medir el voltaje que posee el RTD y los restantes para la alimentación de la fuente de corriente, de esta forma se garantiza que la medición sea realmente del RTD sin tener problemas con las resistencias parasitas, se aclara que este tipo de medición es diferencial.

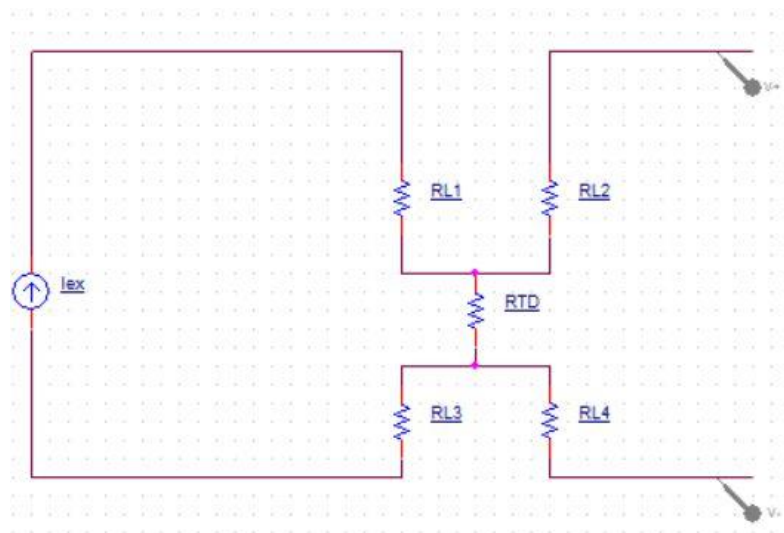


Figura 4.5: RTD Configuración de 4 hilos

4.1.2.4 RESISTENCIA NOMINAL

Los RTD pueden tener diferentes resistencias nominales, que se presentan como PT-10, PT-50, PT-100, PT-200, PT-500, PT-1000 y PT10000. Donde la referencia corresponde al valor nominal de la resistencia 10Ω , 50Ω , 100Ω , 500Ω , 1000Ω , 10000Ω a una temperatura de 0°C ; una de las mayores ventajas de utilizar un RTD de valores nominales elevados, es la sensibilidad que el sensor tiene con un cambio de temperatura, ya que cuanto mayor sea la resistencia nominal presentara mayor coeficiente de temperatura, sin embargo, un problema de esto es que son propensos a tener problemas de autocalentamiento si se alimenta con fuente de corriente relativamente grandes, haciendo que existan errores de medición.

4.1.2.5 CLASES RTD

“Todas las PT100 de platino suministradas y montadas por SRC cumplen con los valores básicos y las desviaciones admitidas de la norma DIN IEC 751. Los valores DIN rigen para un valor nominal de 100 Ohmios. La estabilidad de temperatura de la PT100 con respecto a sus valores medidos asimismo cumple - o excede - las exigencias DIN IEC” [8]

En la figura 4.6 se muestra la tolerancia tanto resistencia y temperatura en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$), se puede apreciar las diferentes clases con sus respectivas tolerancias tanto de resistencia como de temperatura, donde la clase B posee un gran rango de temperatura, sin embargo, la clase A tiene mejor tolerancia que la clase B.

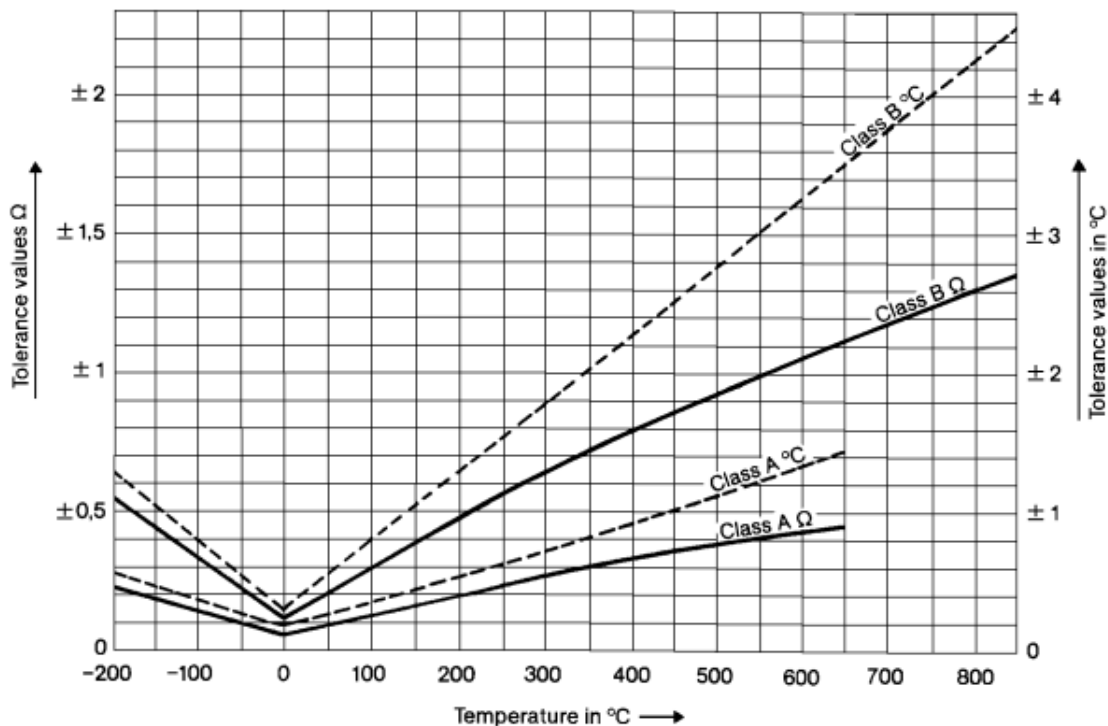


Figura 4.6: Clases de RTD [8, Tomado de SRC]

4.1.3 SELECCIÓN DE SENSOR

Teniendo en cuenta tanto características y graficas de tolerancia de los dos tipos de sensores se concluye que, los termopares tienen la ventaja de un amplio rango de temperatura, rápida reacción a cambios de temperatura se suele utilizar para procesos industriales. En cuanto a los RTD suelen ser reconocidos por su buena precisión, linealidad e intercambiabilidad, además que se requiere una calibración mínima en un instrumento de medición. En la tabla 4.3, se ilustra los parámetros relevantes de los dos sensores. Se puede

concluir que las termocuplas poseen la ventaja de no requerir una fuente de alimentación como los RTD, haciendo que ahorre energía en el sistema, sin embargo, estos pueden presentar problemas de calibración durante el proceso de curado, dando como resultado mediciones erróneas, a lo que los RTD no son tan susceptibles. Otro parámetro para tener en cuenta es que los conectores de los termopares deben ser termo cables para que la medición no se vea afectada. Además, los termopares requieren una referencia de temperatura para tener una medición referida a 0°C, algo que los RTD no requieren.

Criterio	RTD (PT100)	Termopar
Rango de Temperatura	-250°C a 850°C	-200°C a 2000°C
Precisión	Muy buena	Buena
Linealidad	Buena	Buena
Sensibilidad	Total	En punta
Tiempo de respuesta	Rápido	Muy Rápido
Vibración	Buena	Muy buena
Estabilidad a largo plazo	Muy buena	Buena
Auto calentamiento	Pequeña	Ninguno
Fuente de Energía	Requiere	No Requiere
Conexiones	Normales	Termo cables
Salida	$\mu\Omega$	mV

Tabla 4.3: Comparación entre sensores

Con esto se concluye que se utilizará el sensor RTD para la aplicación, donde se hará uso de 4 RTD de 3 hilos con la configuración compensada y su resistencia nominal de 100 Ω (PT100), disminuyendo su consumo de energía mediante cortos periodos de medición.

4.1.4 SENSORES EN EL MERCADO

Comercialmente se encuentran diferentes tipos de RTD, como los tipos que se hablaron anteriormente, sin embargo, se tomará atención en aquellos RTD que sean PT100, que tenga 3 hilos y sean de bajo costo. Donde se encontró el siguiente candidato por parte del fabricante Adufruit. Que además de cumplir con los parámetros de selección, posee un 1 metro de cable, está recubierto con una capa de acero inoxidable de 30mm, generando una protección adicional a las conexiones del RTD. A continuación, se presentan algunas especificaciones del sensor.

Especificaciones de conectores

- Tubo de acero inoxidable: 4mm de diámetro por 30 mm de largo
- Longitud de cable de 100cm
- 3 terminales

Especificaciones de PT100

- Rango de temperatura -200 a 500 °C
- Utiliza interfaz de 3 hilos
- Precisión de $\pm 0.5^\circ\text{C}$ de -10°C a 85°C
- Peso del producto: 19.3gr

4.1.5 SENSITIVIDAD DE LOS PT100 RTD

Para determinar la sensibilidad de este tipo de sensores se parte de las ecuaciones 4.8 y 4.9, donde se analiza el caso cuando se tiene cambios de temperatura de 1°C

$$R_{td}(T) = R_0(1 + aT + bT^2 + cT^3) \text{ para } T < 0^\circ\text{C} \quad (4.8)$$

$$R_{td}(T) = R_0(1 + aT + bT^2) \text{ para } T \geq 0^\circ\text{C} \quad (4.9)$$

Donde

$T = \text{Temperatura}$

$R_o = 100\Omega$ Resistencia nominal del RTD

$$a = 3.9692 \times 10^{-3} \frac{1}{^\circ\text{C}}$$

$$b = -5.8495 \times 10^{-7} \frac{1}{^\circ\text{C}^2}$$

$$c = -4.2325 \times 10^{-12} \frac{1}{^\circ\text{C}^3}$$

Estos coeficientes se basaron en las curvas de linealización americana.

$$R_{td}(1^\circ\text{C}) = 100.3969 \quad (4.10)$$

Teniendo este cambio de resistencia, se calcula a partir de diferentes fuentes de corriente los voltajes obtenidos, a partir de la ecuación 4.11, donde esto visualiza en la tabla 4.4, donde se puede observar que los cambios de voltaje son pequeños, además de querer adquirir voltajes mayores se requiere aumentar la corriente de alimentación, comprometiendo el consumo del sistema, adicionalmente de esto, se tiene que tener en cuenta que se alimenta con dos fuentes de corriente para compensar los errores del RTD de 3 hilos, por esto se decide que la fuente de corriente que se utilizara es de $500\mu\text{A}$

$$V = IR \quad (4.11)$$

Voltaje	Corriente para el sensor	Corriente Total
$99.2\mu\text{V}$	$250\mu\text{A}$	$500\mu\text{A}$
$198.4\mu\text{V}$	$500\mu\text{A}$	1mA
$396.8\mu\text{V}$	1mA	2mA
$789.7\mu\text{V}$	2mA	4mA

Tabla 4.4: Cambios de voltaje con diferentes corrientes de alimentación

4.2 FASE 3: DISEÑO DEL DIAGRAMA DE BLOQUES

Después de haber escogido el sensor se tiene parámetros adicionales para diseñar el diagrama de bloques, que se propone en la figura 4.7, Donde el “arreglo de sensores” se decidió utilizar 4 sensores RTD de 3 Hilos con compensación, Un conversor de temperatura a voltaje que además de acondicionar, filtrar y convertir las señales a digitales, alimentará los sensores RTD, se espera que tenga una conexión SPI entre módulos, Un microcontrolador, que se encargará de coordinar y controlar los bloques de memoria y conversor de voltaje a temperatura, además, hará posible la comunicación entre una computadora y el sistema para enviar datos, una memoria que almacenará los datos adquiridos por parte del conversor, por último una batería, que alimentara el sistema durante todo el proceso de medición, adicionalmente se agrega un pulsador para culminar las mediciones.

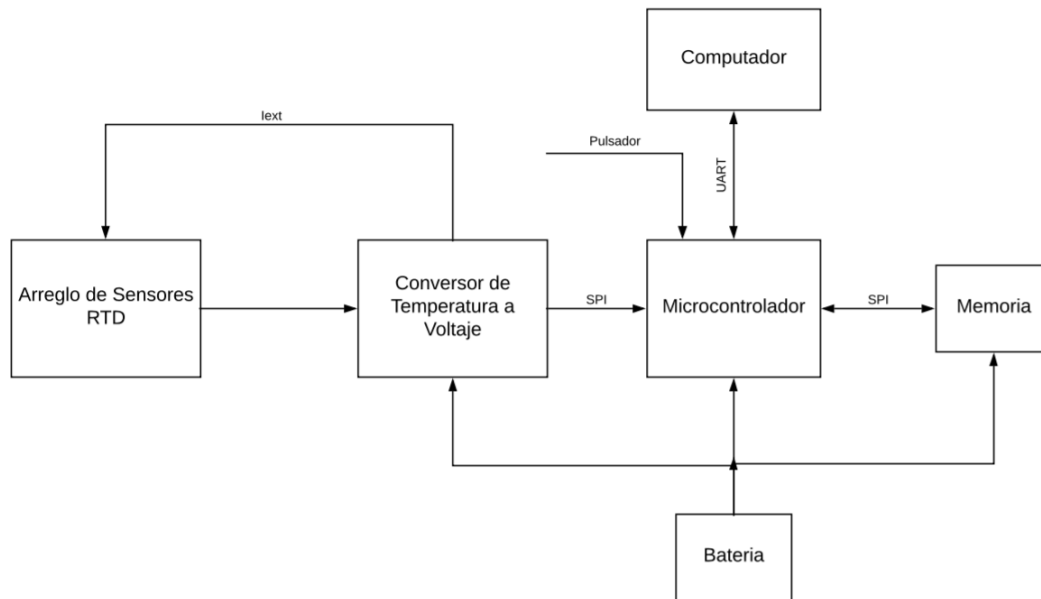


Figura 4.7: Diagrama de bloques

4.2.1 CONVERTOR DE TEMPERATURA A DIGITAL (ACONDICIONAMIENTO Y ADC)

En esta sección se explicará el método que se alimentará el sensor y el acondicionamiento de la señal (amplificar y filtrar), con esto se busca digitalizar esta señal por medio de un ADC, para después ser procesada por un sistema digital (microcontrolador).

Sin embargo, en el mercado se encuentra diferentes circuitos integrados, que son diseñados con diversos propósitos, amplificadores, ADC, DAC, Microcontroladores, que, al ser dispositivos discretos, pueden tener problemas de ruido y perder integridad en la señal al conectarse a otros sistemas. Sin embargo, existen circuitos integrados que son capaces de tener todas las funciones antes descritas en un solo chip, el caso de esto son sistemas conversores de Resistencia a Digital y también Conversores de temperatura a Digital, donde hacen todo el acondicionamiento y digitalización, donde la señal que tiene como salida son de temperatura o resistencia, además de suministran la fuente la polarización al sensor. Sin embargo, se calculará los bits mínimos para percibir un cambio de voltaje[9] de $198.4\mu\text{V}$ (V_{in}) suponiendo una fuente de voltaje de 3.3V (V_{CC}) (valor común en sistemas embebidos), esto por medio de la ecuación 4.12. Teniendo se requiere que el ADC tenga por lo menos 15 bits de resolución para adquirir el cambio de voltaje de 1°C del sensor.

$$\text{Codigo} = \frac{V_{cc}}{V_{in}} \quad (4.12)$$

$$\text{Codigo} = \frac{3.3\text{V}}{198.4\mu\text{V}}$$

$$\text{Codigo} = 16629$$

4.2.2 DISEÑO DEL BLOQUE DE ALMACENAMIENTO DE DATOS (MEMORIA)

La memoria es un circuito integrado dedicado para almacenar rutinas de programa que un microcontrolador no puede almacenar o simplemente para guardar datos, en este caso se utilizara la segunda aplicación, por

lo tanto, se estima la memoria mínima requerida, esperando que cada dato de temperatura posee una longitud de 32 bits y cada dato es enviado cada 15 minutos durante 60 días, entonces:

$$Datos = 32bits$$

$$\# \text{ de Sensores} = 4$$

$$\# \text{ de días} = 60$$

Teniendo en cuenta lo anterior se calcula el número de bits que almacenara el sistema durante 60 días con 4 sensores a una frecuencia de muestreo de 15 minutos, entonces se llega al resultado de la ecuación 4.13, donde es la memoria mínima requerida.

$$Datos_{memoria} = Datos_{LTC2983}(\#sensores) \left(\frac{60min}{T_s} \right) (24)(60) \quad (4.13)$$

$$Datos_{memoria} = (32bits)(4) \left(\frac{60min}{15min} \right) (24)(60)$$

$$Datos_{memoria} = 737.280Kb$$

$$Datos_{memoria} = 92.160KB$$

4.2.3 DISEÑO DE LA COMUNICACIÓN SERIAL DEL SISTEMA AL COMPUTADOR

Para el sistema de comunicación serial, se hará uso de la comunicación UART, ya que es el más utilizado, por su sencilla forma de comunicar. Donde sus velocidades de transmisión suelen ya estar estandarizadas, donde esta velocidad debe ser igual entre dispositivos para que puedan entender entre ellos el mensaje. Esta velocidad se escogerá dependiendo del microcontrolador que se utilice, ya que estos son más limitados en escoger velocidad de transmisión, en la mayoría de los casos se suele utilizar 9600bps y 115200bps en sistemas más modernos, Teniendo en cuenta la tasa de transmisión del puerto serial y carga de datos cuando pasan 30 días, se calcula con la expresión de la ecuación 4.14, donde T es el tiempo (en segundos) total al transmitir todos los datos que están almacenados en la memoria. Rbps la tasa de transmisión y el número de bits a enviar, con esto se obtiene la tabla 4.5. donde se ilustra a diferentes tasas de trasmisión el tiempo de completar una transferencia de datos a 30 días.

$$T = \left(\frac{1}{R_{bps}} \right) \#bits \quad (4.14)$$

Tasa de transmisión (bps)	Tiempo de transmisión (s)
2400	307,2
4800	153,6
9600	76,8
14400	51,2
19200	38,4
38400	19,2
56000	13,16
115200	6,4
460800	1,6

Tabla 4.5: Tiempo total de transferencia a diferentes tasas de transmisión

4.3 FASE 4: IMPLEMENTACION DEL SISTEMA

4.3.1 SELECCION DE COMPONENTES

En esta sección se analizará los distintos componentes necesarios para implementar el sistema, analizando y comparando distintos circuitos integrados y sus características, además, mostrando los esquemáticos de los circuitos propuestos.

4.3.1.1 CONVERTOR DE VOLTAJE A TEMPERATURA

Para este bloque se decidió analizar 2 circuitos integrados, el LTC2983[10] y el MAX31865[11]. A continuación, se ilustra en la tabla 4.6, ventajas de cada uno de los integrados, aclarando que se requiere 4 integrados para utilizar el MAX31865, donde se puede observar que los tiempos de conversión de mediciones del MAX31865 son menores, en modo activo consume menos que el LTC2983, sin embargo, no posee modo “Sleep mode”, además de ser menos costoso, el LTC2983 posee un mayor rechazo a ruido de 60Hz, su salida es en temperatura ($^{\circ}\text{C}$ o $^{\circ}\text{F}$) y la salida del MAX31865 es resistiva (Ω). Teniendo en cuenta esto, se decidió utilizar el LTC2983, por tener la posibilidad de conectar múltiples sensores, además de esto, las conexiones de comunicaciones serán menores, además que se busca que los periodos de mediciones sean cortos lapsos largos entre medida y medida (30 minutos máximo), por lo que el “sleep mode” es un parámetro muy importante para tener en cuenta en aplicaciones de bajo consumo.

	LTC2983	MAX31865
# Sensores	6 RTD de 3 hilos	1 RTD de 3 hilos
Fuente de corriente integrada	Aplica	Aplica
Rechazo a ruido 60Hz	120dB	82dB
Precisión	0.1 $^{\circ}\text{C}$	0.5 $^{\circ}\text{C}$
Resolución	24 Bits (0.001 $^{\circ}\text{C}$)	15 Bits (0.03125 $^{\circ}\text{C}$)
Comunicación	SPI	SPI
Tiempo de Conversión/sensor	167.2ms	60ms
Consumo (Encendido)	20mA	4*3.5mA=14mA
Consumo (Sleep mode)	60 μA	No posee
Precio	33.97\$	4*7\$=28\$
Salida	$^{\circ}\text{C}$ o $^{\circ}\text{F}$	Ω

Tabla 4.6: Comparación de circuitos integrados

4.3.1.1.1 LTC2983

Es un sistema de medición de temperatura de multiple-sensor con una alta precisión, que es capaz de operar con diferentes tipos de sensores, termistores, RTD, termopares y diodos. Con una precisión de 0.1 $^{\circ}\text{C}$ y 0.001 $^{\circ}\text{C}$ de resolución, también es capaz de medir los sensores RTD de 2, 3 y 4 hilos, además de esto es capaz de suministrarles su fuente de corriente para alimentarlos, el cual es configurable. Este integrado posee 20 entradas analógicas configurables, todas estas señales pasan por un multiplexor de 6 salidas, donde son recibidas por 3 amplificadores en configuración buffer y son simultáneamente digitalizadas con tres ADC de alta resolución delta-sigma, ya teniendo las señales digitalizadas, un procesador se encarga de analizar y linealizar los datos para posteriormente ser almacenadas en una memoria RAM (almacena 80 Bytes para todos los canales de adquisición), que posteriormente podrán ser leído por una interfaz SPI.

Se puede observar que este integrado soluciona en gran medida el problema de adquirir señales análogas, acondicionarlas, digitalizarlas y procesadas para ajustes por tabla o linealización haciendo que se obtenga concretamente la temperatura, además de poseer múltiples entradas, haciendo que se pueda utilizar en un sistema con arreglo de sensores y su precisión es más que suficiente para la aplicación.

La siguiente información fue tomada de la hoja de especificaciones del fabricante Linear Technology, donde se puede observar características eléctricas del sistema, características eléctricas del ADC y características eléctricas de la referencia

LTC2983

COMPLETE SYSTEM ELECTRICAL CHARACTERISTICS

The ● denotes the specifications which apply over the full operating temperature range, otherwise specifications are at $T_A = 25^\circ\text{C}$.

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Input Normal Mode Rejection	50Hz (Notes 4, 8)	● 120			dB
Input Normal Mode Rejection	50Hz/60Hz (Notes 4, 6, 9)	● 75			dB
Power-On Reset Threshold			2.25		V
Analog Power-Up	(Note 11)	●		100	ms
Digital Initialization	(Note 12)	●		100	ms

ADC ELECTRICAL CHARACTERISTICS

The ● denotes the specifications which apply over the full operating temperature range, otherwise specifications are at $T_A = 25^\circ\text{C}$.

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	
Resolution (No Missing Codes)	$-F_S \leq V_{IN} \leq +F_S$	● 24			Bits	
Integral Nonlinearity	$V_{IN(CM)} = 1.25\text{V}$ (Note 15)	●	2	30	ppm of V_{REF}	
Offset Error		●	0.5	2	μV	
Offset Error Drift	(Note 4)	●	10	20	$\text{nV}/^\circ\text{C}$	
Positive Full-Scale Error	(Notes 3, 15)	●		100	ppm of V_{REF}	
Positive Full-Scale Drift	(Notes 3, 15)	●	0.1	0.5	ppm of $V_{REF}/^\circ\text{C}$	
Input Leakage	(Note 18) H-Grade	●		1	nA	
Negative Full-Scale Error	(Notes 3, 15)	●		100	ppm of V_{REF}	
Negative Full-Scale Drift	(Notes 3, 15)	●	0.1	0.5	ppm of $V_{REF}/^\circ\text{C}$	
Input Referred Noise	(Note 5) H-Grade	●	0.8	1.5	μV_{RMS}	
		●		2.0	μV_{RMS}	
Common Mode Input Range		●	-0.05	$V_{DD} - 0.3$	V	
RTD Excitation Current	(Note 16)	●	-25	Table 30	25	%
RTD Excitation Current Matching	Continuously Calibrated	●	Error within Noise Level of ADC			
Thermistor Excitation Current	(Note 16)	●	-37.5	Table 53	37.5	%

REFERENCE ELECTRICAL CHARACTERISTICS

The ● denotes the specifications which apply over the full operating temperature range, otherwise specifications are at $T_A = 25^\circ\text{C}$.

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Output Voltage	V_{REFOUT} (Note 10)		2.49	2.51	V
Output Voltage Temperature Coefficient	I-Grade, H-Grade	●	3	15	$\text{ppm}/^\circ\text{C}$
Output Voltage Temperature Coefficient	C-Grade	●	3	20	$\text{ppm}/^\circ\text{C}$
Line Regulation		●		10	ppm/V
Load Regulation	$I_{OUT(SOURCE)} = 100\mu\text{A}$	●		5	mV/mA
	$I_{OUT(SINK)} = 100\mu\text{A}$	●		5	mV/mA
Output Voltage Noise	$0.1\text{Hz} \leq f \leq 10\text{Hz}$		4		μV_{P-P}
	$10\text{Hz} \leq f \leq 1\text{kHz}$		4.5		μV_{P-P}
Output Short-Circuit Current	Short V_{REFOUT} to GND		40		mA
	Short V_{REFOUT} to V_{DD}		30		mA
Turn-On Time	0.1% Setting, $C_{LOAD} = 1\mu\text{F}$		115		μs
Long Term Drift of Output Voltage (Note 13)			60		$\text{ppm}/\sqrt{\text{kHz}}$
Hysteresis (Note 14)	$\Delta T = 0^\circ\text{C}$ to 70°C		30		ppm
	$\Delta T = -40^\circ\text{C}$ to 85°C		70		ppm

Tabla 4.7: Especificaciones LTC2983

La compatibilidad es un parámetro muy importante en la comunicación entre sistemas, la tabla 4.8 que se presenta, a continuación, se puede observar que las entradas y salidas digitales, donde se tiene que tener en cuanto los voltajes mínimos y máximo para el sistema que controlara este sistema, además de las corrientes que consumen en el momento de estar activos.

DIGITAL INPUTS AND DIGITAL OUTPUTS

The ● denotes the specifications which apply over the full operating temperature range, otherwise specifications are at $T_A = 25^\circ\text{C}$.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
	External SCK Frequency Range		●	0	2	MHz
	External SCK LOW Period		●	250		ns
	External SCK HIGH Period		●	250		ns
t_1	$\overline{\text{CS}}\downarrow$ to SDO Valid		●	0	200	ns
t_2	$\overline{\text{CS}}\uparrow$ to SDO Hi-Z		●	0	200	ns
t_3	$\overline{\text{CS}}\downarrow$ to SCK \uparrow		●	100		ns
t_4	SCK \downarrow to SDO Valid		●		225	ns
t_5	SDO Hold After SCK \downarrow		●	10		ns
t_6	SDI Setup Before SCK \uparrow		●	100		ns
t_7	SDI HOLD After SCK \uparrow		●	100		ns
	High Level Input Voltage	$\overline{\text{CS}}$, SDI, SCK, $\overline{\text{RESET}}$	●	$V_{DD} - 0.5$		V
	Low Level Input Voltage	$\overline{\text{CS}}$, SDI, SCK, $\overline{\text{RESET}}$	●		0.5	V
	Digital Input Current	$\overline{\text{CS}}$, SDI, SCK, $\overline{\text{RESET}}$	●	-10	10	μA
	Digital Input Capacitance	$\overline{\text{CS}}$, SDI, SCK, $\overline{\text{RESET}}$		10		pF
	LOW Level Output Voltage (SDO, INTERRUPT)	$I_O = -800\mu\text{A}$	●		0.4	V
	High Level Output Voltage (SDO, INTERRUPT)	$I_O = 1.6\text{mA}$	●	$V_{DD} - 0.5$		V
	Hi-Z Output Leakage (SDO)		●	-10	10	μA

Tabla 4.8: Especificaciones de entrada y salidas digitales

En la figura 4.8 se puede observar el esquemático básico del circuito integrado, teniendo en cuenta recomendaciones de layout (proporcionado por el fabricante) y conexiones de los sensores (Ch10, Ch9, Ch8, Ch7, Ch6, Ch5, Ch4 y Ch3) y la resistencia de referencia (Ch2 y Ch1), aclarando que la conexión extra de los sensores de 3 hilos está conectados a la resistencia de referencia (Ch2)

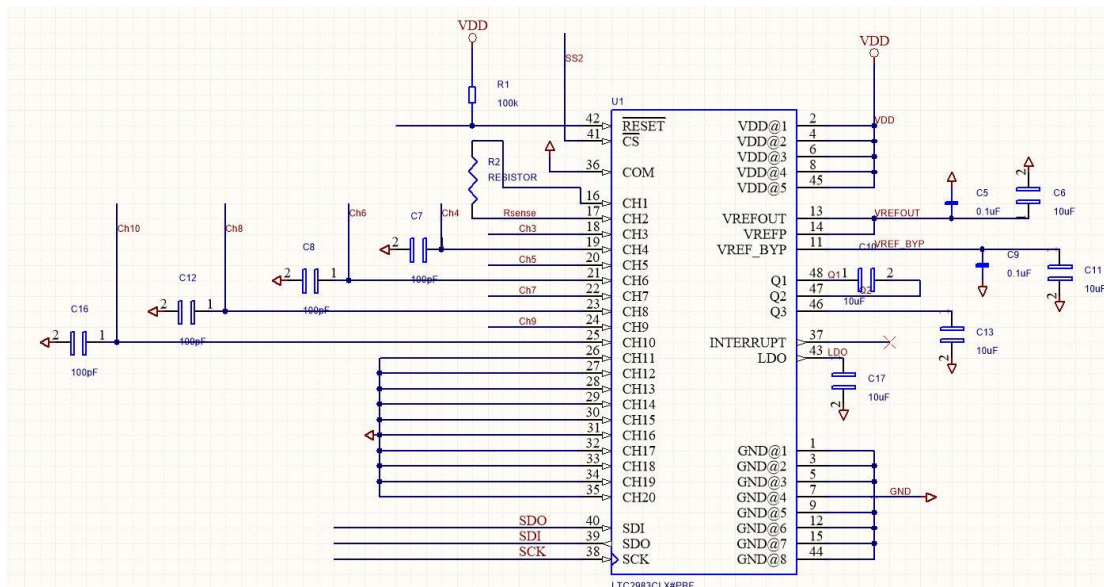


Figura 4.8: Esquemático de conexiones LTC2983

4.3.1.2 MICROCONTROLADOR

Un microcontrolador es un circuito integrado programable, el cual ejecuta una serie de acciones programadas en memoria. Como norma general, un microcontrolador está compuesto por una unidad de procesamiento central (CPU), que es la que ejecuta cada una de las acciones, una memoria de almacenamiento, donde se guarda el código o serie de instrucción que van a ser ejecutadas, adicionalmente, almacena los datos adquiridos mientras el microcontrolador ejecuta acción y tiene módulos de entradas y salidas. De esta forma, el MCU interactúa con los periféricos que lo rodean, recibiendo y enviando datos al usuario.

Un microcontrolador cuenta con diversos periféricos que son los dispositivos auxiliares de la CPU, que permiten la integración de Hardware, complementando el sistema embebido con nuevas entradas y salidas. Un ejemplo de esto son los diferentes protocolos de comunicación encontrados actualmente (UART, I2C, SPI, Ethernet, Wifi, etc). Dependiendo de los periféricos que se requieran, Los microcontroladores puede tener algunos o todos estos, que se ven reflejados en su costo y tamaño.

Para el sistema, el microcontrolador requiere tener las siguientes especificaciones y periféricos.

- Conexión SPI Master con múltiples esclavos (mínimo 2).
- Conexión UART.
- Tener el modo de bajo consumo.
- Consumir menos de 5mA en modo activo.
- Memoria mínima de programa 32KB.

Teniendo estas especificaciones y por tener la mayor cantidad de documentación en programación de microcontroladores y ejemplos, se decide analizar los microcontroladores del fabricante microchip de la serie PIC, donde analizando sus diferentes presentaciones (PIC12, PIC14, PIC16, PIC18, PIC24), de la serie 12 a 18. Son microcontroladores con procesamiento de 8 bits, pero solo la serie 18 posee un modo de bajo consumo y un reloj asíncrono que es necesario para para encender de nuevo el sistema, sin embargo el PIC24 posee las mismas capacidades además de poseer un procesamiento de 16 bits, pero, el PIC24 al tener un sistema de procesamiento más poderoso que el PIC18 suele ser más costoso., otra ventaja de utilizar la serie 18 es la directa compatibilidad que existe en programación con microcontroladores de la misma familia, facilitando la familiarización de estos integrados con su programación, con lo que se puede pasar de una tecnología antigua de pic18 a una más nueva sin tener que hacer cambio mayores al código elaborado, por lo que se decide utilizar la serie PIC18.

En el mercado se puede encontrar muchas versiones del PIC18 que suele diferir en los periféricos que tengan y los modos de operación, modo de consumo o modo de ultra bajo consumo, Tipos de contadores (Timer), etc. En la búsqueda del microcontrolador, se espera que tenga, por lo menos un Timer 1 para despertar el microcontrolador en “sleep mode” el candidato más adecuado, que cumple las especificaciones, es el PIC18F46K20[12], que posee un modo de ultra bajo consumo, donde en este modo puede consumir, con fuente de 1.8V 100nA o menos, además de poseer comunicación SPI y UART integradas, su consumo en operación normal depende de la frecuencia, tomando como ejemplo, en modo de máxima frecuencia interna (16MHZ) consume 4.5mA y consumo de bajo consumo de 1μA, además de poseer una memoria de 64KB.

En la tabla 4.9 se ilustra los parámetros relevantes del PIC18F46K20

PIC18F2XK20/4XK20		Standard Operating Conditions (unless otherwise stated)					
Param. No.	Device Characteristics	Typ.	Max.	Units	Conditions		
D008	Supply Current (I_{DD}) ^(1,2)	5.5	9	μA	-40°C	V _{DD} = 1.8V	Fosc = 31 kHz (RC_RUN mode, LFINTOSC source)
		6.0	10	μA	+25°C		
		6.5	14	μA	+85°C		
		9.0	30	μA	+125°C		
D008A		10.0	15	μA	-40°C	V _{DD} = 3.0V	
		10.5	16	μA	+25°C		
		11.0	20	μA	+85°C		
		14.0	40	μA	+125°C		
D009		0.40	0.50	mA	-40°C TO +125°C	V _{DD} = 1.8V	Fosc = 1 MHz (RC_RUN mode, HF-INTOSC source)
D009A		0.60	0.80	mA	-40°C TO +125°C	V _{DD} = 3.0V	
D010		2.2	3.0	mA	-40°C TO +125°C	V _{DD} = 1.8V	Fosc = 16 MHz (RC_RUN mode, HF-INTOSC source)
D010A		3.8	4.4	mA	-40°C TO +125°C	V _{DD} = 3.0V	

Tabla 4.9: Consumo del microcontrolador con reloj interno

La compatibilidad de voltajes de entrada y salida de los puertos de SPI es un parámetro bastante importante a tener en cuenta, ya que de estos depende si los sistemas en verdad están entendiéndose entre ellos, en la figura 4.9, donde se toma los voltajes de entrada y salida que posee el circuito integrado LTC2983, con esto se traza el punto de operación de operación que tendrá tanto las salidas como entradas del PIC, donde se puede observar que por el consumo de corriente que demanda el LTC al enviarle datos, genera un voltaje en algo de aproximadamente 3.5V, el cual es suficiente para tomar ese nivel como alto, para el caso de bajo entra dentro del rango de voltaje para interpretarlo en voltaje bajo.

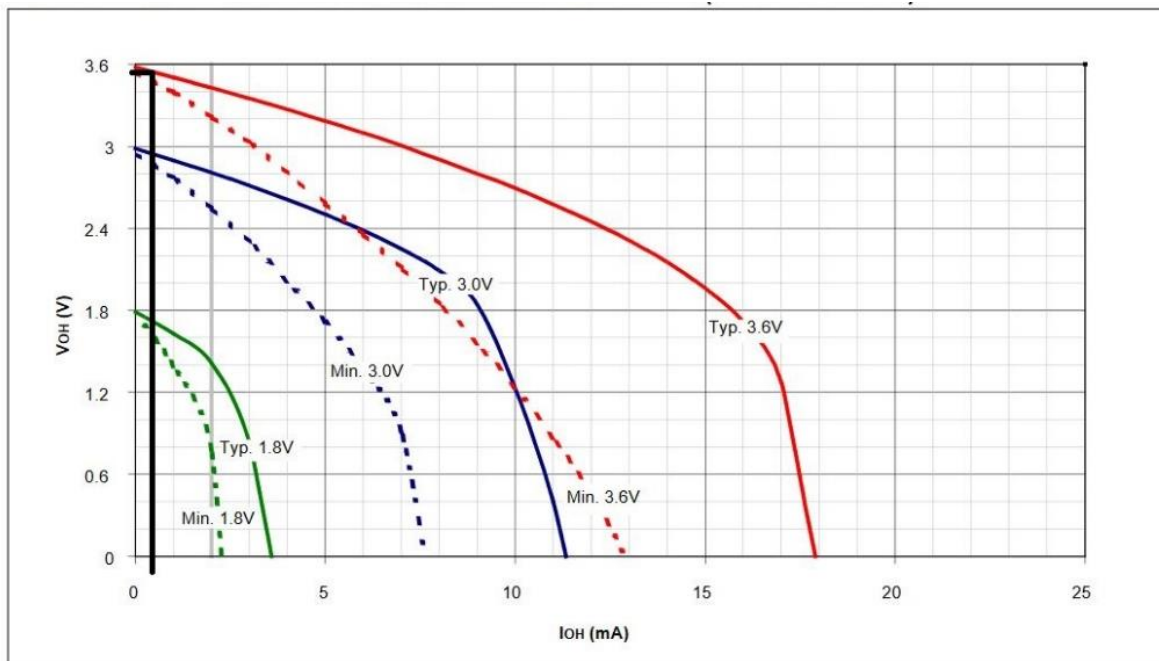


Figura 4.9: Voltaje de salida alto Vs Corriente de salida en alto

En la figura 4.10 se ilustra el esquemático del circuito del microcontrolador.

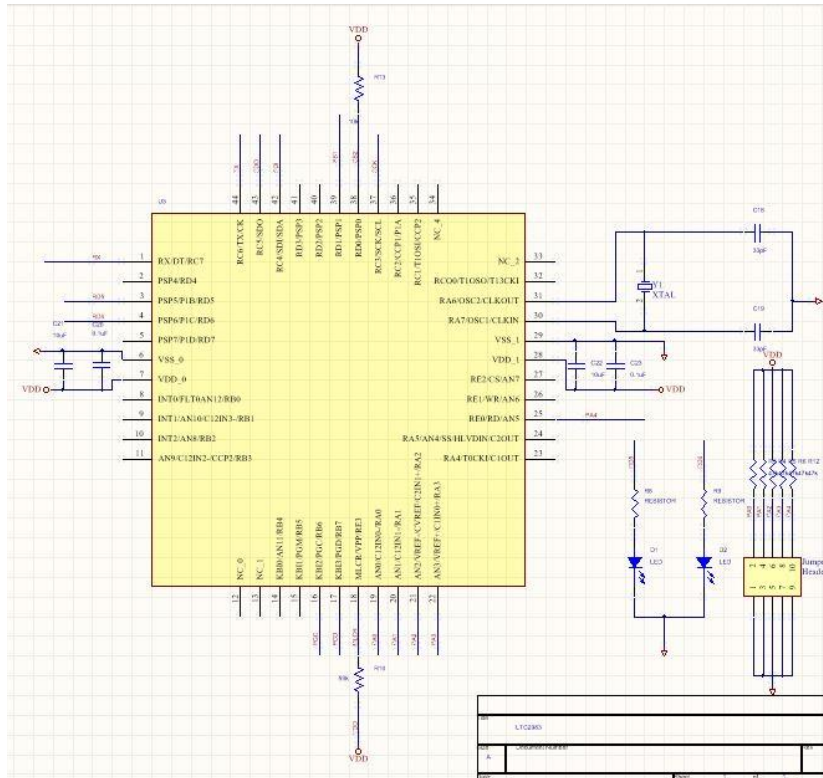


Figura 4.10: Esquemático del circuito del microcontrolador

4.3.1.2.1 SOFTWARE

Para la programación, se dio uso del software gratuito que ofrece microchip MPLABX 5.0, donde utiliza un lenguaje de programación C, además de esto se requiere un programador, que es el encargado de enviar las instrucciones al microcontrolador, donde se seleccionó el ICD3 que proporciona el laboratorio de ingeniería electrónica. A continuación, se describirá los diferentes programas, por medio de diagrama de flujos, que se utilizaron en el sistema.

4.3.1.2.1.1 Main

El funcionamiento principal de sistema es estar durante casi todo el tiempo durmiendo, donde se lleva el tiempo que lleva dormido el sistema, por medio de un “Timer”, que puede funcionar de forma asíncrona del sistema y en el modo dormido del microcontrolador, teniendo esto, cada vez que llega al conteo definido, genera un cambio de estado en una bandera, generando una interrupción, haciendo que se despierte el sistema. Estando despierto, inicia con una rutina de interrupción de servicio (ISR), que es donde se encuentra todo el proceso de medición del sistema, cuando termina este proceso, si está el pulsador en alto se termina las mediciones sino se vuelve a dormir el sistema y repite el proceso anterior. Esto se ilustra en la figura 4.11.

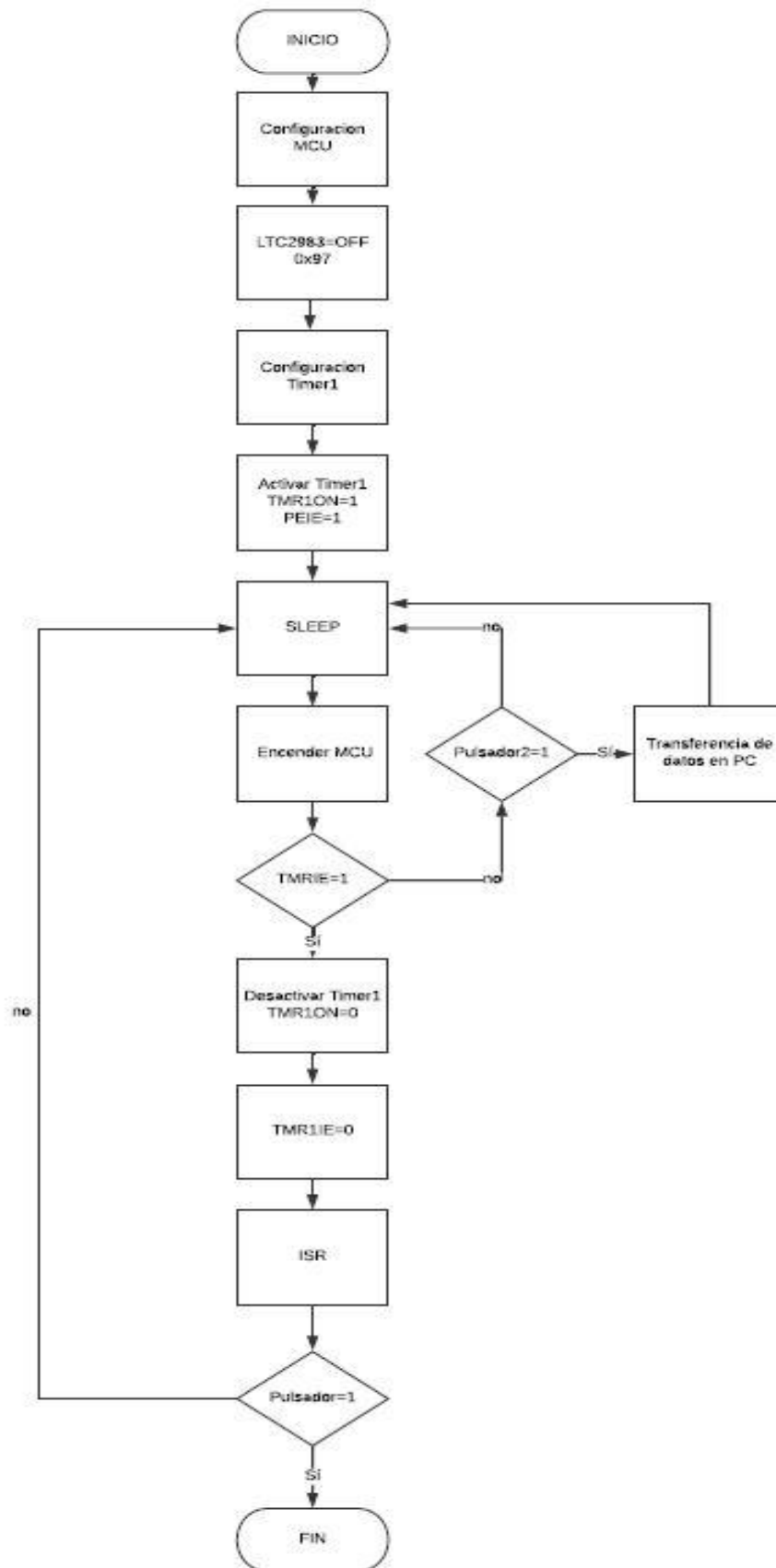


Figura 4.11: Diagrama de flujo mai

4.3.1.2.1.2 ISR

Esta rutina de interrupción se encarga de encender, configurar el LTC2983, para realizar las mediciones, donde posteriormente se transfiere los datos las mediciones de los sensores al microcontrolador, los almacena temporalmente, para posteriormente enviarlos a la memoria, al terminar, se vuelve a la rutina “main”, para seguir midiendo o culminar el funcionamiento.

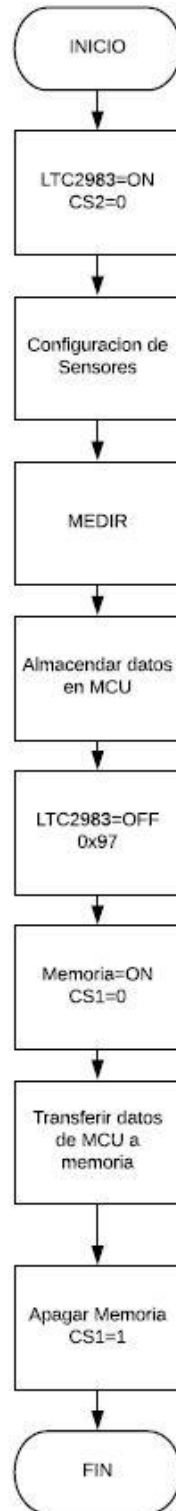


Figura 4.12: Diagrama de flujo ISR

4.3.1.2.1.3 RUTINA LTC2983

Esta rutina es proporcionada por el fabricante Linear Technology, donde representa en la figura 4.13 los procesos que ya están programados el LTC2983, para activarlos se requiere enviar ciertos comandos, dependiendo si son de escritura. Donde hace mención que cuando se enciende el sistema se debe esperar un tiempo máximo de 200ms, esto es por la carga de todos los circuitos internos que posee el integrado, después de haber encendido, permite configurar los canales de entrada del sistema, sensor a utilizar, fuente de corriente, resistencia de referencia entre otros. Después de configurarlo, se espera una orden para iniciar una conversión, después de esto decide si la conversión está completa si no envía de vuelta al MCU que no ha terminado el proceso y este le envía la misma orden, todo esto hasta terminar la conversión. Por último, al terminar el proceso de medición, permite leer los datos y ser enviados al microcontrolador, después de esto se puede volver a iniciar una conversión o si se necesita reconfigurar los canales. En caso de que se requiera apagar, el comando (0x97) se debe en la asignación del canal (“channel assignment”) o iniciar una conversión (“initiate conversion”).

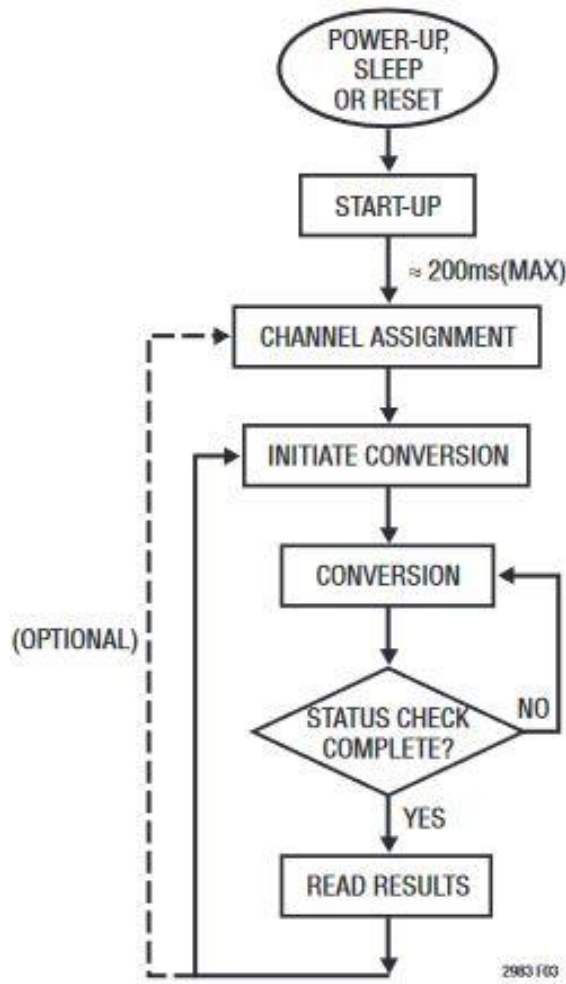


Figura 4.13: Diagrama de flujo LTC2983

4.3.1.3 MEMORIA

Para la memoria se decide utilizar una memoria que ofrece el fabricante de microchip SST25VF016B, es una memoria serial flash con comunicación SPI, tiene una capacidad de 16Mbit (2MB), con una frecuencia máxima de comunicación de 50Mhz, un modo de bajo consumo de 5µA y operación normal de 10mA[13]. A continuación, se ilustra en la figura 4.14.

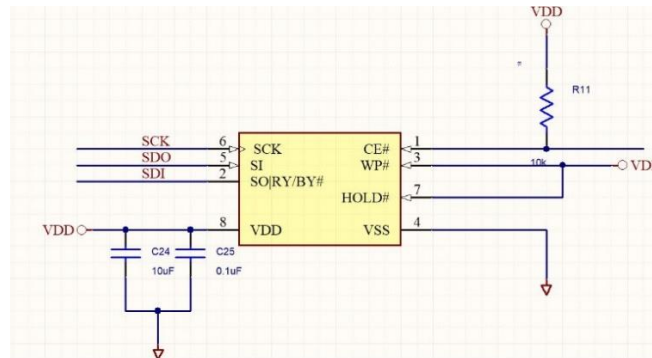


Figura 4.14: Esquemático de la memoria

4.3.1.4 BATERIA

Para seleccionar la batería, inicialmente se decidió hacer un cálculo aproximado de potencia instantánea que consume todo el sistema, entonces se conoce de la potencia que:

$$P = VI \quad (4.15)$$

Donde

P=Potencia (W)

V=Voltaje(V)

I=Corriente eléctrica(A)

Además, que:

$$P = \frac{W}{T} \quad (4.16)$$

W=Energía (Joules)

T=tiempo(s)

Entonces

$$I * T = \frac{W}{V} \quad (4.17)$$

Tomando estas dos ecuaciones (4.16) y (4.17) se puede estimar la energía que consume cada uno de los componentes durante cierto periodo, teniendo en cuenta que el voltaje base que se alimentara el sistema es de 3.6V, a continuación, en las tablas 4.10, 4.11 y 4.12, se presenta cada uno de los componentes con su respectivo consumo en distintos periodos de tiempo y momentos de operación (Midiendo y Sleep)

Componente	Variables	Midiendo	Sleep	Total
LTC2983	Tiempo (s)	0,7	899,3	9,00E+02
	Consumo por muestra (Joules*15 min)	5,60E-05	2,16E-04	2,72E-04
	Consumo por hora (Joules *Hora)	2,24E-04	8,63E-04	1,09E-03
	Consumo por día (Joules *Dia)	5,38E-03	2,07E-02	2,61E-02
	Consumo por mes (Joules *Mes)	1,61E-01	6,22E-01	7,83E-01
	Consumo por dos meses (Joules *2Meses)	3,23E-01	1,24E+00	1,57E+00

Tabla 4.10: Consumos de LTC2983

Componente	Variables	Midiendo	Sleep	Total
PIC18F	Tiempo (s)	1,000128	898,999872	9,00E+02
	Consumo por muestra (Joules *15 min)	1,20E-05	1,29E-05	2,49E-05
	Consumo por hora (Joules *Hora)	4,80E-05	5,18E-05	9,98E-05
	Consumo por día (Joules *Dia)	1,15E-03	1,24E-03	2,39E-03
	Consumo por mes (Joules *Mes)	3,46E-02	3,73E-02	7,18E-02
	Consumo por dos meses (Joules *2Meses)	6,91E-02	7,46E-02	1,44E-01

Tabla 4.11: Consumo PIC18F46k20

Componente	Variables	Midiendo	Sleep	Total
Memoria	Tiempo (s)	0,000128	899,999872	9,00E+02
	Consumo por muestra (W*15 min)	5,12E-09	7,92E-05	7,92E-05
	Consumo por hora (W*Hora)	2,05E-08	3,17E-04	3,17E-04
	Consumo por día (W*Dia)	4,92E-07	7,60E-03	7,60E-03
	Consumo por mes (W*Mes)	1,47E-05	2,28E-01	2,28E-01
	Consumo por dos meses (Joules *2Meses)	2,95E-05	4,56E-01	4,56E-01

Tabla 4.12: Consumo Memoria

Teniendo esto en cuenta, se totaliza todos los consumos y se convierte a amperios se puede observar en la tabla 4.13, se requiere una batería tenga una carga mayor a 602mAh para que el sistema funcione durante 60 días.

Tiempo	Joules	Amperio tiempo
Consumo por hora	1,50E-03	4,18E-04
Consumo por día	3,61E-02	1,00E-02
Consumo por mes	1,08E+00	3,01E-01
Consumo por 2 meses	2,17E+00	6,02E-01

Tabla 4.13: Consumo del sistema

Con esto, se decide utilizar la batería del fabricante Tadirian Batteries[14], TL-2150/S 3.6V, además de poseer un comportamiento de voltaje constante hasta su descarga, posee una capacidad de 1000mAh, que es suficiente para el sistema, a continuación, en la tabla 4.14 se presenta las especificaciones de la batería y en la figura 4.15 en la se muestra su grafica de descarga:

Capacidad Nominal @ 1mA a 2V	1.0Ah
Voltaje	3.6V
Máxima corriente continua	50mA
Máxima corriente pulso	100mA
Peso	9.2g
Volumen	4.3cc
Rango de operación de temperatura	-55°C a 85°C

Tabla 4.14: Especificación de la batería.

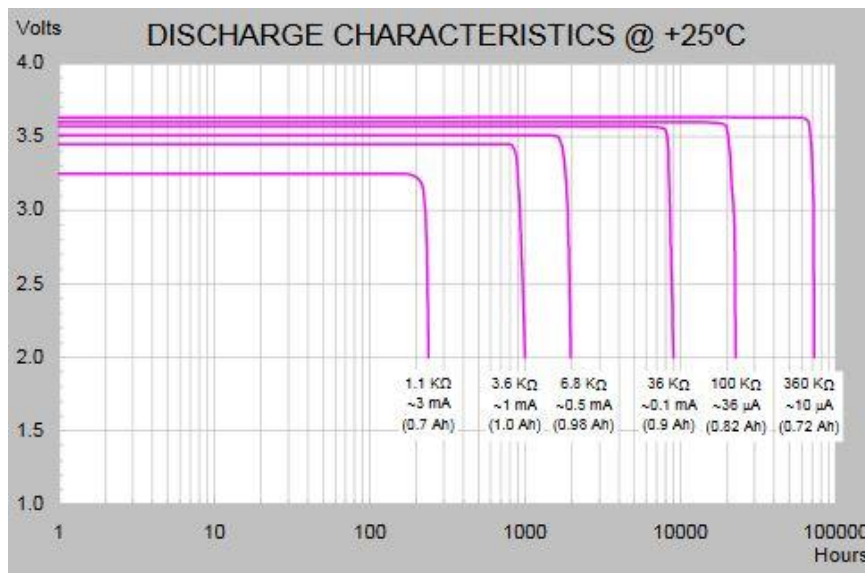


Figura 4.15: Especificaciones y Descarga de Batería TL-2150

4.3.1.5 CAJA

La caja será la encargada de brindarle protección y aislamiento del ambiente al circuito, en el mercado existen diversas cajas, las cuales difieren de su material, tamaño y número de orificios, para este caso se decide utilizar la caja 1550WQ que ofrece el fabricante HAMMOND MANUFACTURING[15], donde posee un área de 6cm por 5.5cm, además de estar hecha de aluminio, generando un blindaje contra ruido

electromagnético, además de generar una protección adicional al circuito, en la figura 4.16 se puede visualizar su hoja de especificaciones.

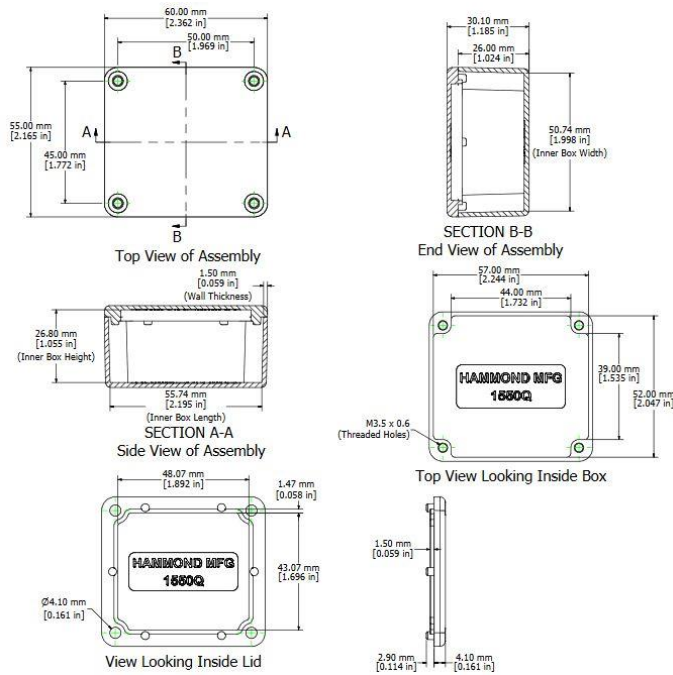


Figura 4.16: Hoja de especificaciones HAMMOND MANUFACTURING

4.3.2 DISEÑO DEL CIRCUITO IMPRESO DEL PROTOTIPO DE PRUEBAS

El esquemático de circuito del sistema se presenta en la figura 4.17, donde se tiene en cuenta conectores, componentes y periféricos adicionales, además en la tabla 4.15 se puede observar todos los componentes utilizados en el diseño del esquemático

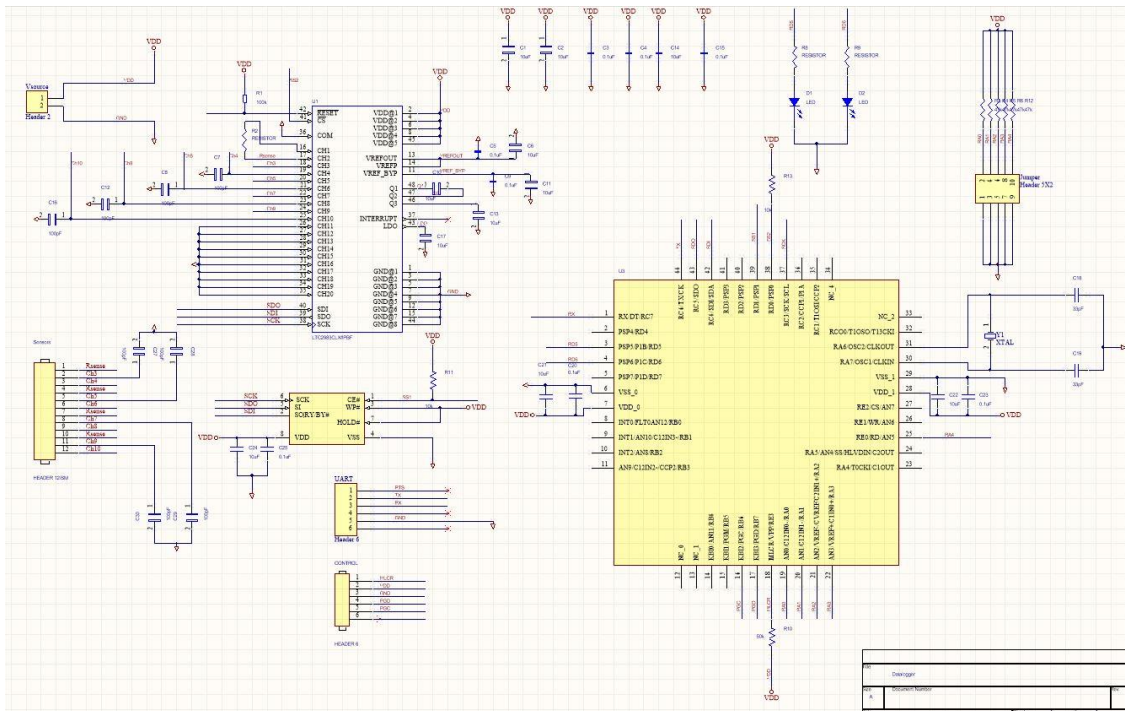


Figura 4.17: Esquemático del circuito

Cantidad	Numero de parte	Descripción	Precio (dólar USA)
1	LTC2983CLX#PBF-ND	IC SENSOR THERMAL	33,97
1	PIC18F46K20-I/PT-ND	IC MCU 8BIT 64KB FLASH 44TQFP	2,59
1	ED10568-ND	CONN TERM BLOCK 2.54MM 12POS PCB	3,64
1	SST25VF016B-50-4C-S2AF-TCT-ND	IC FLASH 16M SPI 50MHZ 8SOIC	1,52
1	S5481-ND	CONN FEMALE 6POS .100" R/A GOLD	0,66
1	1286-1097-ND	PMODUSBUART USB TO UART MODULE	9,99
10	445-2314-1-ND	CAP CER 100PF 250V C0G 0603	0,142
12	1276-1005-1-ND	CAP CER 0.1UF 16V X7R 0603	0,036
4	399-9053-1-ND	CAP CER 27PF 25V C0G/NP0 0603	0,12
1	952-3578-ND	CONN RCPT 1.27MM T/H AU 6POS	1,08
2	160-1909-1-ND	LED RED CLEAR CHIP SMD	0,51
1	609-3712-ND	CONN HEADER 10POS UNSHD VERT T/H	0,73
12	311-47.0KHRCT-ND	RES SMD 47K OHM 1% 1/10W 0603	0,026
2	749-1528-1-ND	RES 10K OHM 0.5% 1/4W 0603	0,57
4	1528-2090-ND	SENSOR RTD 100OHM PROBE	11,95
2	MCT0603-470-MDCT-ND	RES SMD 470 OHM 0.5% 0.15W 0603	0,43
1	S7004-ND	CONN HEADER FEMALE 6POS .1" TIN	0,52
2	YAG4454CT-ND	RES SMD 1K OHM 0.1% 1/10W 0603	0,71
3	S9345-ND	CONN JUMPER SHORTING 1.27MM GOLD	0,27
12	1276-2872-1-ND	CAP CER 10UF 16V X7R 0805	0,259
1	XC2122CT-ND	CRYSTAL 32.768KHZ 9PF SMD	1
1	HM1232-ND	BOX ALUM UNPAINTED 2.36"LX2.17"W	6,9
2	1276-6456-1-ND	CAP CER 10UF 10V X5R 0805	0,15
2	A106046CT-ND	RES SMD 100K OHM 1% 1/10W 0603	0,1
2	952-2262-ND	SIL VERTICAL PC TAIL PIN HEADER	0,11
2	WM2000-ND	CONN HOUS 2POS .100 W/RAMP/RIB	0,12
1	BH1/2AA-3-ND	HOLDER BATT 1/2AA CELL PC MNT	1,05
Total			\$123,41

Tabla 4.15: Componentes

4.3.2.1 DISEÑO DE PRINTED CIRCUIT BOARD (PCB)

Para el diseño del sistema en PCB se dio uso del software Altium®, teniendo en cuenta las especificaciones de la caja, donde el tamaño de mismo es de 4.96cm y 4.46cm, en la figura 4.18 y 4.19, se ilustra el diseño del impreso, donde los componentes son de montaje superficial para que se acomode todo en el área prevista.

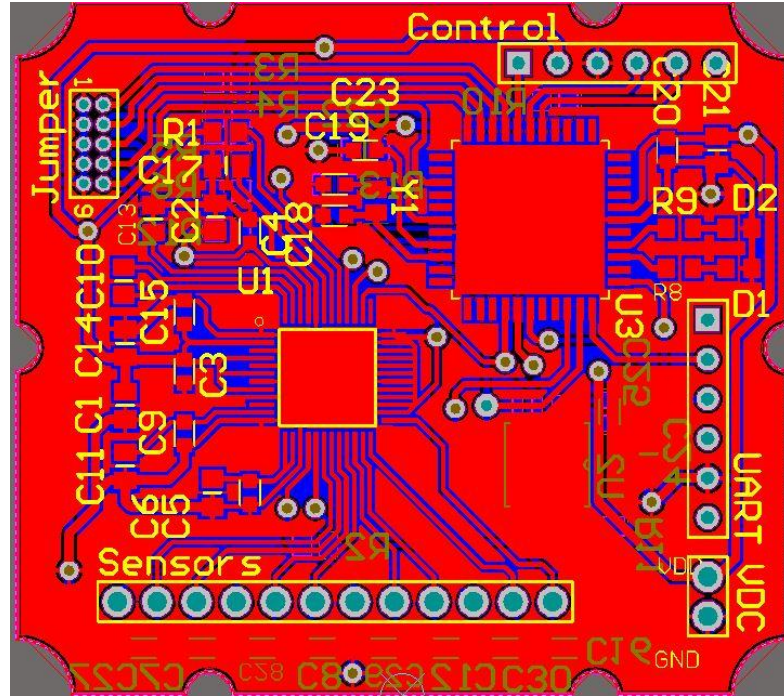


Figura 4.18: PCB Top Layer

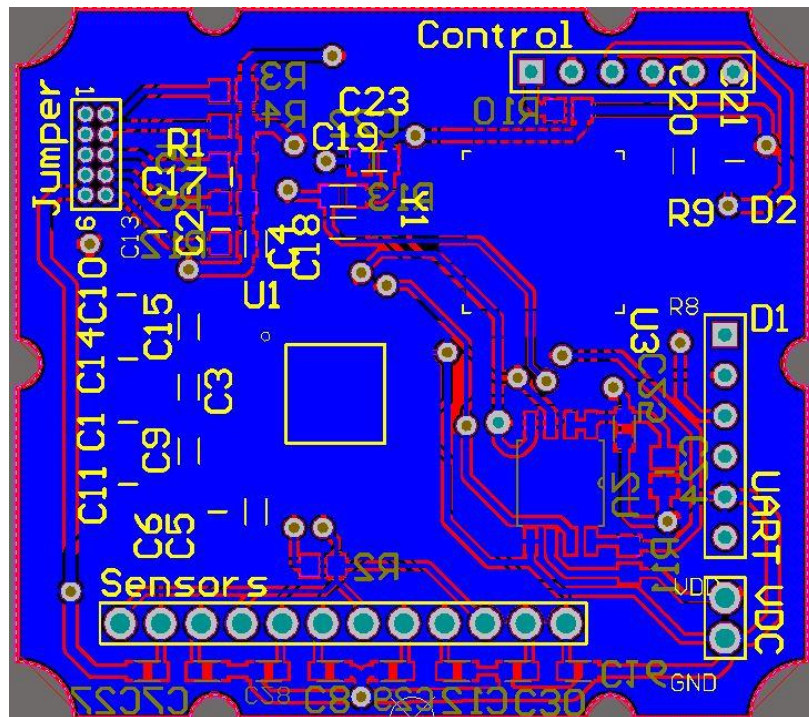


Figura 4.19: PCB Bottom Layer

4.3.3 FABRICACION DEL CIRCUITO IMPRESO Y ENSAMBLAJE DE COMPONENTES

En esta sección se ilustra en las figuras 4.20 y 4.21 circuito impreso ensamblado, tanto su top layer como su bottom layer

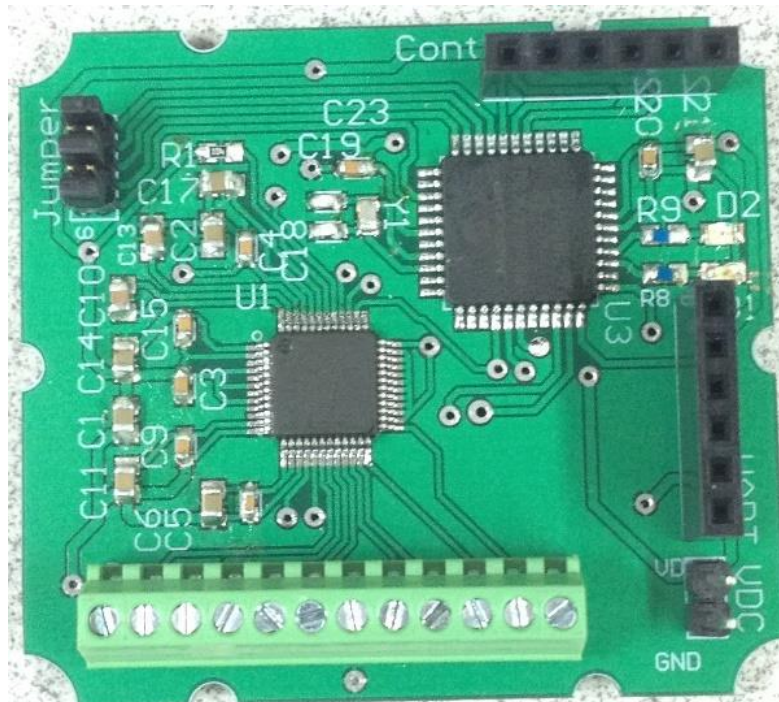


Figura 4.20: Ensamblaje top layer

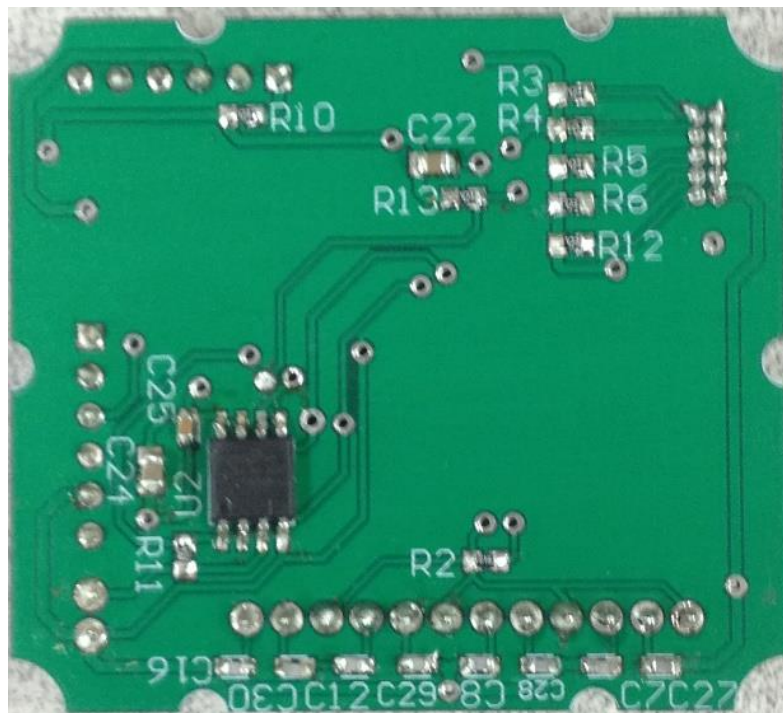


Figura 4.21: Ensamblaje bottom layer

4.4 FASE 5: PROTOCOLO DE PRUEBAS

4.4.1 PROTOCOLO DE PRUEBAS CALIBRACION DEL SISTEMA

Para la calibración de sistemas de medición de temperatura se suele utilizar un termómetro certificado con el sistema a calibrar, donde son sometidos al mismo medio para que tengan los mismo cambios de temperatura, sin embargo, la correcta forma de calibrar estos sistemas es por medio de un bloque calibrador seco, es un cuarto aislado que puede controlar la temperatura dentro el, con una buena precisión en los cambios de temperatura, esto para garantizar que el medio que se sumergen las dos puntas sea la misma y no posea cambios no esperados durante la calibración.

Sin embargo, al no tener este bloque calibrador seco, se decidió utilizar en un recipiente con agua para sumergir la punta del termómetro y un sensor del sistema, los demás sensores medirán distintos ambientes, temperatura ambiente dentro del laboratorio, temperatura exterior del laboratorio y el ultimo sensor será sometido a la temperatura que extrae el ventilador de un computador en su exterior, donde el termómetro utilizado es el del DMM de KEYSIGHT 34450 que posee función de medición de temperatura, con punta de un sensor termistor, las especificaciones se presentan en la tabla 4.16, además de esto se decidió usar el software BENCHVUE para almacenar los datos que mide el DMM, para luego ser comparados con las mediciones del sistema propuesto, además de esto, se utiliza el software SerialPlot, para almacenar los datos del medidor diseñado.

Rango de Temperatura	-40°C a 150°C
Resolución	0.1°C
Precisión	0.5°C

Tabla 4.16: Especificaciones del Termistor

Teniendo esto en cuenta lo anterior, se decidió que los sistemas midieran de forma continua y enviando las mediciones al computador, donde la cantidad de muestras serán 11520, donde esta cantidad será la mitad de las muestras que adquiriría el sistema. Este número de muestras también debe ser puesto en el software BENCHVUE, para indicarle cuando termina el proceso de medición,

En la tabla 4.17 se presenta el equipo utilizado para realizar estas pruebas

Equipo	Marca
DMM	KEYSIGHT 34450A
Programador	ICD3
Convertidor	UART a USB
Cable USB	USB-USBmini
Computador	Lenovo

Tabla 4.17: Equipos utilizados

4.4.2 PROTOCOLO DE PRUEBAS: CONSUMO DEL SISTEMA

Para determinar el consumo del sistema, se siguió el esquema de la figura 4.22, donde el sistema se agrega una resistencia en serie (shunt), de valor de 1Ω , entre el sistema y tierra del sistema, haciendo que por esta transite la corriente del sistema, donde se mide el voltaje que proporciona esta resistencia con un instrumento de medición, como se tiene un sistema que está entre modo encendido y dormido esto son cambios muy rápidos, un DMM no es capaz de capturarlos, por lo que se decidió utilizar un osciloscopio que está diseñado para este tipo de señales rápidas. Como la resistencia posee un valor de 1Ω , el voltaje es proporcional a la corriente. con esto se puede ver la forma de onda de la corriente de consumo del sistema, para esto se decide

apagar el sistema LTC2983 durante 4 segundos, después se enciende el sistema para medir con los 4 sensores y se vuelve a apagar, repitiendo el ciclo., para adquirir la señal se dio uso del software BENCHVUE para adquirir los datos del osciloscopio, donde la escala de tiempo fue de 2.5s y escala de voltaje a 10mV, de esta forma se visualizará 4 ciclos completos de la señal.

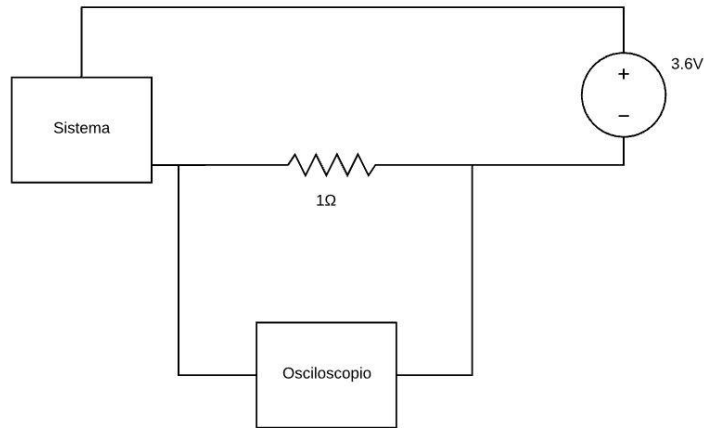


Figura 4.22: Medición de corriente del sistema

En la tabla 4.18 se presenta el equipo utilizado para las pruebas

Equipo	Marca
Osciloscopio Digital	Agilent MSOX2024A
Fuente de Voltaje Multiple	Keysight U8031A
Cable USB	USB-USBmini

Tabla 4.18: Equipo utilizado

5 RESULTADOS

5.1 RESULTADOS: CALIBRACION DEL SISTEMA

A continuación, se ilustra las mediciones obtenidas por los sensores de temperatura del sistema y el sistema de calibración, en la figura 5.1, se decidió tomar desde las muestras 6000 a 8000 las dos señales, la del termómetro de referencia y la del sensor del sistema, para observar las diferencia entre estas dos, donde se puede observar que la señal del sensor posee una oscilación que esta entre 0.05°C , con lo que hace que la medición varíe en la segunda cifra decimal del sistema, algo que es tolerable para la aplicación final, ya que se espera que el sistema posea una precisión de 1°C

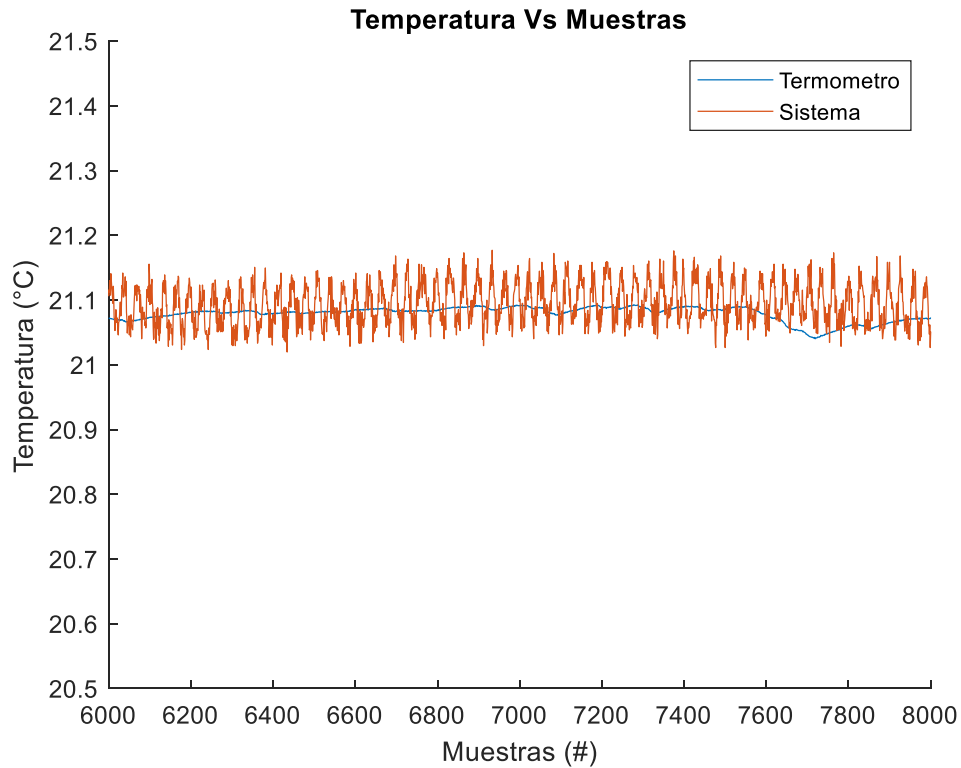


Figura 5.1: Medición Termómetro Vs Sistema

Teniendo estas dos señales se decidió calcular el error que posee el sistema, en la figura 5.2 se puede visualizar el error que se presenta, donde se puede observar que el porcentaje que se presenta máximo es de 0.5%, analizando estos datos por medio de MATLAB, se decidió calcular el error absoluto de la medición, donde este porcentaje fue referido a una temperatura referida de 21.08°C del termómetro

$$Error_{promedio} = 0.134\%$$

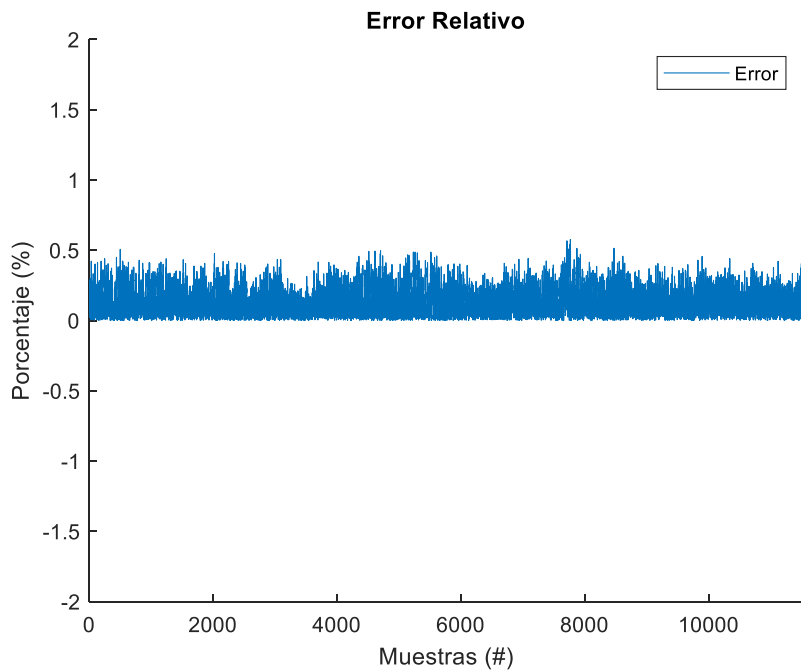


Figura 5.2: Error absoluto del sistema

En la figura 5.3, las mediciones generadas durante toda la prueba, donde se puede observar que la temperatura extrae el ventilador del computador a medida que paso el tiempo fue aumentando, después de la mitad del experimento, la temperatura del interior del laboratorio se mantuvo bastante constante durante todo el tiempo, en cuanto a la temperatura del exterior del laboratorio, se mantuvo por debajo de la del interior presentado unas pequeñas variaciones a medida que pasa el tiempo. Teniendo en cuenta los resultados anteriores, se puede concluir que el sistema puede presentar un error aproximado de 0.134%

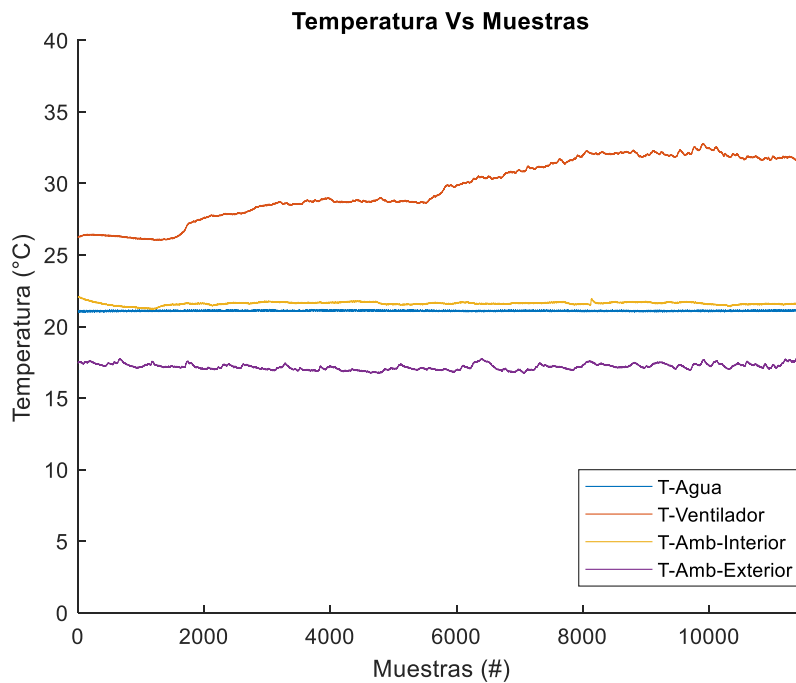


Figura 5.3: Mediciones de los sensores

5.2 RESULTADOS: CONSUMO DEL SISTEMA

A continuación, se ilustrará en la figura 5.4 la señal de consumo del sistema, donde se puede observar que posee un periodo de 5 segundos aproximadamente la señal, en el momento de encender el LTC2983 se puede observar que existe un cambio abrupto de corriente en un pequeño lapso de tiempo, después de esto se presenta la espera de 200ms para que inicialice correctamente el integrado, finalmente se presenta de configuraciones de los canales de los sensores y mediciones de cada sensor.

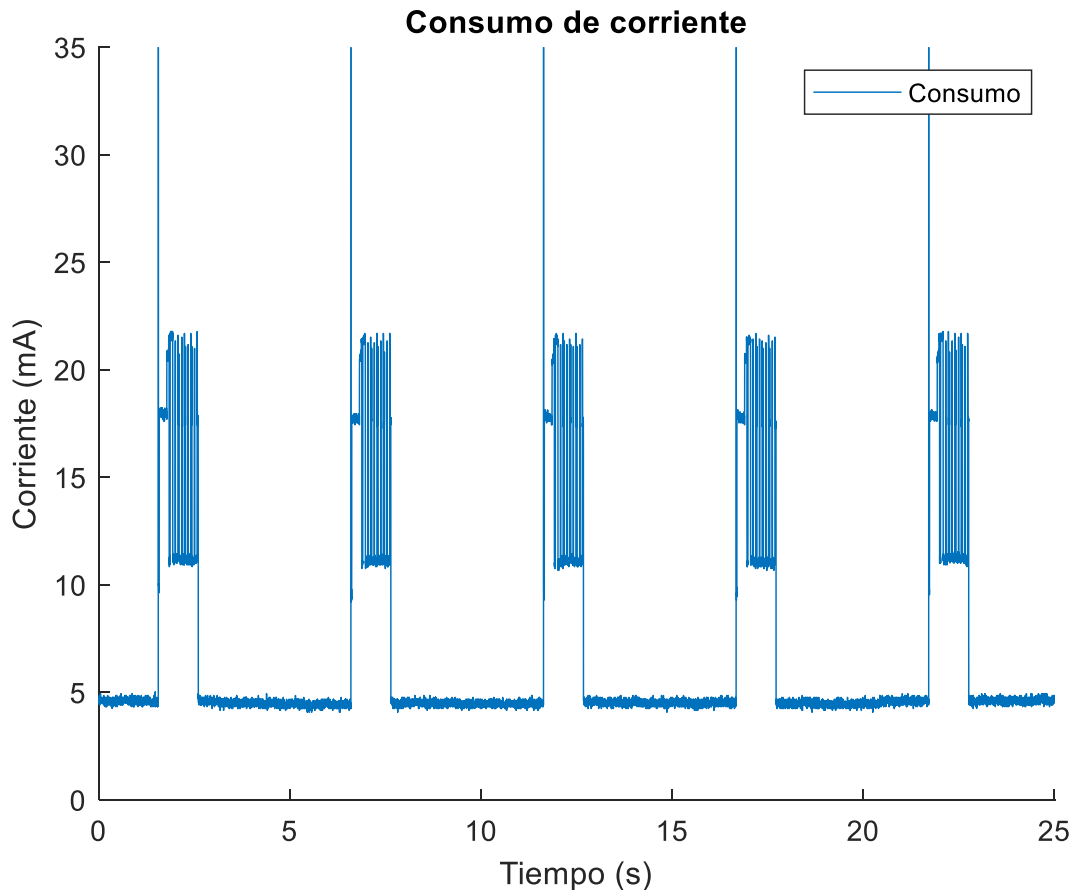


Figura 5.4: Consumo del Sistema

Teniendo en cuenta lo anterior se decide calcular la corriente promedio durante un ciclo de la señal con lo que se obtiene lo siguiente

$$I_{c_{promedio}} = 6.607mA$$

Este sería la corriente que consumiría el sistema en 5 segundos de operación, a partir de esto se calcula ahora la potencia promedio a partir de la ecuación 4.15 se obtiene

$$P_{C_{promedio}} = 23.788mW$$

Y la energía que consume en 60 segundos que se traduce a 12 muestras sería

$$E_{C_{promedio}} = 285.450mJ$$

Entonces el consumo de corriente por hora a partir de la ecuación 4.17, que es el caso cuando el sistema mide 720 muestras, en la tabla 5.1, se ilustra el consumo del sistema previamente calculado con el consumo obtenido, donde se nota la diferencia de consumo respecto del caso en que se mantiene encendido en todo momento el PIC comparado al cálculo de consumo general que se hizo en la sección anterior.

$$\text{Consumo} = 4757.5\text{mAh}$$

Consumo PIC (OFF)	Consumo PIC (ON)
0,418mAh	4757.5mAh

Tabla 5.1: Comparación de Consumo

Con lo anterior, se concluye que un sistema que requiera operar por un largo periodo de tiempo, encendiéndose en cortos periodos, además que el software hace un papel crucial en este tipo de aplicaciones, el código generado posea buenas prácticas de programación, haciendo que el sistema tenga buena autonomía.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

Con este trabajo de grado, se logró diseñar e implementar un sistema de medición de temperatura para el curado de concreto, analizando los diferentes sensores y escogiendo el más indicado para operar durante el curado de concreto, además, los circuitos integrados escogidos fueron lo más concentrado para reducir su tamaño, adicionalmente teniendo en cuenta tanto el almacenamiento de datos y comunicación del sistema hacia una computadora, para posteriormente visualizar los datos (temperatura Vs tiempo).

En este trabajo de grado solo se hizo una prueba de medición, donde se tomaba los sensores midiendo en distintos ambientes, verificando el funcionamiento de los sensores del sistema, los datos enviados a la computadora y visualizarlos por medio de una gráfica de temperatura Vs tiempo, donde se pudo corroborar la precisión necesaria para la aplicación ($\pm 1^\circ\text{C}$).

Sin embargo, aunque no se logro verificar el funcionamiento del sistema durante un proceso de curado, el sistema se diseño para trabajar en los diferentes ambientes que posea este proceso, como en seguridad del sistema, como en la precisión requerida.

La implementación de sistemas de medición de temperatura de concreto puede volverse costoso ya que, al no poder reutilizar los sensores, generan un gasto adicional al volver a someterse a otro periodo de medición.

6.2 TRABAJO FUTURO

Se espera que este diseño pueda ser mejorado, implementando un sistema de comunicación inalámbrico para que sea más sencilla el envío de datos al computador, además de posibles interfaces de usuario para que los datos se puedan ver de forma dinámica por medio de alguna aplicación, además de enviar los datos a internet para que no se queden atados los datos en una memoria física.

Una mejora para el sistema diseñado es cambiar las conexiones del microcontrolador, el reloj de 32KHz, pines 31 y 30 por los pines 32 y 35, para generar que funcione el reloj asíncrono del timer1 que es necesario para despertar el microcontrolador.

Se requiere un procesamiento de las señales de temperatura, tomando los datos y operarlos para estimar la madurez del concreto durante todo el tiempo que estuvo el sensor operando, mostrándolo cuando el usuario quiera observar este parámetro en tiempo real mediante una interfaz gráfica.

En el momento de diseñar una placa PCB para una determinada caja se sugiere analizar muy bien las dimensiones y la cara en la cual ira montado el circuito, sobre todo las dimensiones de los tornillos para que se ajuste la cara de la caja con el circuito.

La documentación es muy importante, para iniciar a operar con sistemas digitales, los cuales no se han trabajado antes., ya que la curva de aprendizaje es mayor que sin tener esta ayuda, por lo que se recomienda buscar en la selección de componentes este parámetro como uno de diseño.

Para el uso de sensores RTD de 3 hilos se recomienda bastante que todas sus conexiones tengan la misma longitud, ancho y longitud, ya que estos comprometen la medición de los sensores, además, la forma de ubicar los sensores es otro factor para tener en cuenta ya que un sensor mal pues o que no esté haciendo un contacto físico con el elemento o ambiente puede generar problemas de medición.

7 BIBLIOGRAFIA

- [1] Nrmca, “CIP 11 - Curado del concreto en el lugar.” [Online]. Available: <https://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/CIP11es.pdf>.
- [2] NRMCA, “CIP 39 - Madurez del Concreto.” [Online]. Available: <https://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/CIP1es.pdf>.
- [3] J. S. Socha Moya, “Evaluación de un método alternativo para determinar la energía de activación de un cemento tipo concretero Colombiano en la ciudad de Bogotá,” p. 250, 2014.
- [4] G. SCIENTIFIC, “Guía para elaborar curva de madurez o curva de caracterización de hormigón para metodo de madurez ASTM C1074.” .
- [5] N. Carino and H. Lew, “The maturity method: from theory to application,” *Structures Congress and Exposition 2001*, 2001. [Online]. Available: <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build01/PDF/b01006.pdf>.
- [6] N. 3357, “INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA. MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA TEMPERATURA DE CONCRETO FRESCO.” [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/381425026/2-NTC-3357-Temperatura-mezcla-pdf>.
- [7] Contaval, “¿Conoces los sensores de temperatura?,” *Enero 18, 2016*. [Online]. Available: <http://www.contaval.es/sensores-temperatura-caracteristicas/>.
- [8] SRC, “Sensores PT100 y termopares,” 2016. [Online]. Available: <https://srcsl.com/catalogo/sensores-pt100/>.
- [9] J. I. Huircán, “Conversores Análogo-Digital y Digital-Análogo: Conceptos Básicos,” *Quidel.[Internet]. Dispon. http://quidel.inele.ufro.cl/~jhuircan/PDF_CTOSII/ad03.pdf.[Acceso el 28 enero 2012]*, pp. 1–7, 2010.
- [10] Linear Technology, “Multi-Sensor High Accuracy Digital Temperature Measurement System,” 2015. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/2983fc.pdf>.
- [11] Maxim Integrated, “MAX31865 Datasheet,” <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX31865.pdf>, pp. 1–26, 2015.
- [12] M. Technology, “PIC18F2480/2580/4480/4580 Data Sheet Errata,” *Technology*, pp. 1–4, 2007.
- [13] Silicon Storage Technology Inc., “SST25VF016B 16 Mbit SPI Serial Flash,” 2015. [Online]. Available: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20005044C.pdf>.
- [14] Tadiran Lithium Batteries, “Model TL-2150,” 2010. [Online]. Available: [https://media.digikey.com/pdf/Data Sheets/TADIRAN PDFs/TL-2150.pdf](https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/TADIRAN%20PDFs/TL-2150.pdf).
- [15] Hammond Manufacturing, “1550WQ,” 2014. [Online]. Available: <http://www.hammondmfg.com/pdf/1550WQ.pdf>.
- [16] M. Palmer, “Using Timer1 in Asynchronous Clock Mode,” pp. 1–5, 1997.
- [17] Instron, “Resistencia de Compresion.” [Online]. Available: <http://www.instron.com.ar/es-ar/our-company/library/glossary/c/compressive-strength>.

8 ANEXOS

- https://livejaverianaedu-my.sharepoint.com/:f:/g/personal/chaparro-juan_javeriana_edu_co/EpsM3lXu169DmVB73_Oh-z0BX7oM5kNLOVhoqm_u0Zq3eA?e=kap2yY